

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
ГРАЂЕВИНСКИ ФАКУЛТЕТ

СЛАВКО ВАСИЉЕВИЋ

**МОГУЋНОСТИ
ГЛОБАЛНИХ НАВИГАЦИОНО-САТЕЛИТСКИХ И
ТЕРЕСТРИЧКИХ МЈЕРНИХ СИСТЕМА ЗА
ПЕРМАНЕНТНО ГЕОДЕТСКО ОСМАТРАЊЕ
ПОМЈЕРАЊА ОБЈЕКТА**

ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА

БЕОГРАД, 2023. ГОДИНЕ

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

SLAVKO VASILJEVIĆ

**POSSIBILITIES OF
GLOBAL NAVIGATION-SATELITE AND
TERESTRIAL MEASURING SYSTEMS FOR
PERMANENT GEODETIC MONITORING OF
CONSTRUCTION MOVEMENTS**

DOCTORAL DISSERTATION

BELGRADE, 2023.

МЕНТОР И ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

Ментор:

Др Загорка Госпавић, ванредни професор

Чланови комисије:

Др Драган Благојевић, дипл. геод. инж, редовни професор
Грађевински факултет, Универзитет у Београду

Др Олег Одаловић, дипл. геод. инж, ванредни професор
Грађевински факултет, Универзитет у Београду

Др Михајло Поповић, дипл. маш. инж, ванредни професор
Машински факултет, Универзитет у Београду

Датум одбране:

У Београду, _____ .

ЗАХВАЛНИЦА

Спровођење истраживања и израда ове дисертације не би били могући без помоћи и подршке одређених људи, којима овим путем желим изразити захвалност.

Прије свега, желим се захвалити проф. др Загорки Госпавић на прихватању менторских обавеза, помоћи и подршци при изради дисертације и родитељским савјетима за однос према послу, раду и животу уопште.

Желим се захвалити и члановима Комисије, на прихватању обавеза учешћа у комисији, пажљивом прегледу рада, корисним савјетима и приједлозима који су допринијели коначном садржају и облику рада. Проф. др Драгану Благојевићу и проф. др Олегу Одаловићу се захваљујем за сву подршку, помоћ и корисне савјете у мом научном раду.

Такође се захваљујем и проф. др Бранку Миловановићу за године сарадње кроз коју је и настала идеја за ово истраживање, те за конструктивне сугестије за дефинисање теме и усмјеравање при изради дисертације. Хвала му и за пријатељску подршку у току студирања, као и за мотивацију ка научном и стручном усавршавању у области инжењерске геодезије.

Колегама Дејану Васићу и Мирославу Вујасиновићу изражавам захвалност за несебичну другарску и стручну помоћ у спровођењу практичних истраживања и охрабривање у току писања дисертације. Захваљујем се и осталим наставницима, колегиницама и колегама који су на било који начин допринијели и помогли израду дисертације.

За уступљену геодетску опрему и материјалну подршку у спровођењу практичних истраживања захвалност дугујем и колективима из привреде: Институту за грађевинарство „ИГ“ д.о.о. Бања Лука, геодетском предузећу „*Геоинфо*“ д.о.о. Бања Лука, Генералном заступнику *Leica Geosystems* за Босну и Херцеговину „*ГЕОКОМ*“ д.о.о, Центру за пројектовање и консалтинг „*ЦПК*“ Бања Лука. Наравно, захвалност изражавам и колегиницама и колегама геодетима који су у њима били запослени у времену када је ово истраживање рађено.

На крају, али ништа мање важну захвалност изражавам својој породици за подршку у вријеме истраживања и за разумијевање моје одсутности у току писања дисертације.

Још једном, ХВАЛА свима!

У Бањој Луци, октобра 2023. године

Славко

САЖЕТАК

У овој дисертацији приказани су резултати истраживања могућности примјене глобалних навигационо-сателитских и терестричких мјерних система за перманентно геодетско регистровање помјерања објеката. У теоријском дијелу дисертације дат је преглед досадашњих истраживања, особина и специфичности савремених геодетских мјерних инструмената као и теоријских поставки чије разумијевање је неопходно за успостављање система перманентног геодетског осматрања. Експерименталним истраживањима испитане су могућности регистровања дискретних и континуираних помјерања роботизованом тоталном станицом, дигиталним прецизним нивелиром и ГНСС пријемником. Радом коришћених мјерних система управљано је даљинским путем, без утицаја опажача, а позиционирање у реалном времену вршено је аутоматски. Дискретна и континуирана помјерања, карактеристична за већину инжењерских објеката, симулирана су намјенски развијеним прецизним уређајима у теренским условима и у различитим периодима дана. На овај начин симулирани су савремени системи за перманентно геодетско осматрање помјерања објеката и испитане њихове могућности за регистровање спорих дуготрајних и брзих краткотрајних помјерања. Такође, утврђена је математичка веза величина сигурно регистрованих помјерања и тачности метода позиционирања са једним читавањем мјерења.

У експериментима регистровања дискретних помјерања испитана је могућност коришћених мјерних система за перманентно регистровање спорих просторних, хоризонталних и вертикалних помјерања различитих величина. На основу добијених резултата може се рећи да су роботизоване тоталне станице оптимални мјерни системи за дугопериодично осматрање релативно малих помјерања, при чему се на растојањима неколико стотина метара сигурно могу регистровати величине помјерања веће од $5 \cdot \sigma_{POZ}$. У изузетно повољним амбијенталним условима могу се остварити и бољи резултати. Основни недостатак у њиховој примјени је што мора постојати оптичко догледање између инструмента и рефлектора. Иако од стране произвођача нису развијани као мјерни системи за перманентно осматрање, кроз ово истраживање утврђено је да се аутоматски рад дигиталних прецизних нивелира може остварити управљањем са спољашњег рачунара. На тај начин се у теренским условима могу континуирано и прецизно регистровати вертикална помјерања малих интензитета. У периодима дана повољним за прецизни геометријски нивелман сигурно се могу регистровати величине помјерања веће од $5 \cdot \sigma_{POZ}$. Исти резултати могу се остварити чак и у одсуству дневне свјетлости (мјерења у току ноћи, у тунелима, подрумима, итд), уз правилно вјештачко освјетљавање. У неповољним периодима могу се очекивати двоструко лошији резултати. Основни недостатак примјене дигиталних прецизних нивелира у пројектима перманентног осматрања вертикалних помјерања је што удаљеност од инструмента до летве може бити само неколико десетина метара. У проведеним експериментима, ГНСС технологијом и RTK методом позиционирања у односу на кориснички успостављен базни пријемник, успјешно су регистроване величине просторних, хоризонталних и вертикалних дискретних помјерања веће од $3 \cdot \sigma_{POZ}$, у свим периодима дана. Готово исти резултати добијени су и при регистровању дискретних помјерања позиционирањем у мрежи перманентних ГНСС станица, а најбољи резултати добијени су примјеном МАХ модела за генерисање корекција. Основне предности ГНСС регистровања помјерања су: оптичко догледање између мјерног мјеста и објекта који се осматра није неопходно и удаљеност са које се објекат осматра може бити много већа него у примјени терестричких мјерних система. Основни недостатак овог начина осматрања, заснованог на релативном кинематичком позиционирању, поред смањене тачности позиционирања, је обавеза успостављања корисничког базног пријемника, што изискује додатне радове и трошкове, или зависност рада система од треће стране у случају коришћења мреже перманентних ГНСС станица.

У експериментима регистровања континуираних помјерања испитана је могућност коришћених геодетских мјерних система за регистровање положаја тачке која је у сталном покрету, чиме су симулирана понашања инжењерских објеката при динамичким оптерећењима. Добри резултати регистровања остварени су дигиталним прецизним нивелиром и ГНСС пријемником, док су за исте експерименталне услове нешто лошији резултати добијени роботизованом тоталном станицом. При регистровању континуираних помјерања роботизованом тоталном станицом појавиле су се значајне разлике између изведених и регистрованих инкрементних помјерања и одступања између изведених и регистрованих путања. Веће разлике и одступања појавиле су се при већим брзинама кретања рефлектора. Проблеми регистровања континуираних помјерања роботизованим тоталним

станицама првенствено су посљедица несавршености система за праћење рефлектора у покрету и синхронизације мјерних сензора у инструменту. Појава великих одступања, добијених у овом истраживању, посљедица је грешака оријентације рефлектора у току кретања, чак и у случају коришћења једног типа пасивног призматичног 360° рефлектора. Дигиталним прецизним нивелиром у периодима дана повољним за прецизни геометријски нивелман могу се регистровати континуирана вертикална помјерања интензитета већег од $5 \cdot \sigma_{POZ}$. Планирањем перманентног геодетског осматрања вертикалних помјерања овим мјерним системом морају се размотрити и узети у обзир евентуалне промјене хоризонталног положаја летве, јер се могу негативно одразити на тачност регистровања континуираних вертикалних помјерања. При регистровању континуираних помјерања ГНСС технологијом сигурно су регистровани сви изведени инкременти просторних помјерања величине $1 \cdot \sigma_{POZ}$ у случајевима када је брзина њиховог извођења била бар три пута мања од брзине њиховог регистровања. При овим брзинама кретања ГНСС пријемника, разлике изведене и регистроване путање биле су у интервалу $\pm 1 \cdot \sigma_{POZ}$. Исти резултати добијени су и при регистровању помјерања позиционирањем у односу на кориснички успостављен базни пријемник и у оквиру мреже перманентних ГНСС станица. Овим је још једном доказано да мреже перманентних ГНСС станица представљају савремену инфраструктуру за прецизно и поуздано позиционирање и регистровање како дискретних тако и континуираних помјерања. У експериментима регистровања континуираних помјерања (исте путање и са готово истим инкрементима помјерања) ГНСС технологијом су добијени бољи резултати него роботизованом тоталном станицом.

Општи закључак, изведен на основу спроведених теоријских истраживања, је да се захваљујући технолошком развоју геодетских инструмената и метода позиционирања, геодетски мјерни системи могу користити за осматрање дискретних и континуираних помјерања објеката, чак и у реалном времену. На основу проведених експеримената и добијених резултата, којима је потврђена претходна констатација, може се закључити да могућност перманентног геодетског регистровања помјерања зависи од тачности позиционирања и брзине кретања геодетских сензора. Такође, геодетским мјерним системима сигурно се могу регистровати, и додатном анализом одредити, фреквенције помјерања ако су оне бар два пута мање од фреквенције регистровања геодетским инструментима. Мјерни системи поред великих предности и могућности имају и недостатке и ограничења. Сваки пројекат геодетског осматрања је другачији и јединствен, и захтијева посебан приступ у процесу планирања осматрања. Да би се изградио поуздан систем који ће на оптималан начин испунити захјеве перманентног осматрања, неопходно је детаљно познавање особина мјерних система, начина и поступака њиховог умрежавања и метода за обраду и анализу регистрованих мјерења. Анализом принципа рада, квалитетним метролошким обезбјеђењем мјерења, идентификацијом и моделовањем свих спољашњих услова, елиминисањем или редуковањем извора грешака могуће је остварити високу прецизност и поузданост регистровања помјерања. Такође, да би се будућа достигнућа технолошког развоја у области перманентног геодетског осматрања максимално користила, намеће се потреба сталног научног истраживања и провјера кроз примјену у пракси. Методологија и приступ коришћени у овом истраживању могу се користити као један од начина за провјеру могућности нових мјерних система и постојећих мјерних система у конкретним пројектним условима.

Кључне ријечи: величина помјерања, фреквенција помјерања, дискретна помјерања објеката, континуирана помјерања објеката, статичка и динамичка оптерећења, симулатори помјерања, геодетско осматрање, роботизована тотална станица, дигитални прецизни нивелир, ГНСС пријемник.

Научна област: Геодетско инжењерство

Ужа научна област: Геодезија у инжењерским областима

ABSTRACT

In this dissertation, the results of the research on the possibilities of application of global navigation-satellite and terrestrial measurement systems for permanent geodetic registration of structure displacements are presented. The theoretical part of the dissertation provides an overview of previous research, characteristics, and specificities of modern geodetic measuring instruments, as well as theoretical foundations whose understanding is necessary for establishing a system of permanent geodetic observation. The possibilities of recording discrete and continuous displacement were examined through experimental research using a robotic total station, digital precise level, and GNSS receiver. The measurement systems were operated remotely, without the influence of an observer, and real-time positioning was performed automatically. Discrete and continuous displacements, characteristic of most engineering structures, are simulated by specially developed precise devices in field conditions and at different periods of the day. In this way, modern systems for permanent geodetic monitoring of the movement of structures were simulated and their possibilities for registering slow long-term and fast short-term displacement were examined. Also, a mathematical relationship between the reliably registered displacements and the accuracy of positioning methods with one measurement reading was established.

In the experiments of registering discrete displacements, the possibility of the used measurement systems for permanent registration of slow spatial, horizontal, and vertical displacements of different magnitudes was examined. Based on the obtained results, it can be said that robotic total stations are optimal measuring systems for long-term monitoring of relatively small displacements, where at distances of several hundreds of meters, displacement bigger than $5 \cdot \sigma_{POS}$ can be reliably registered. Better results can be achieved in extremely favorable ambient conditions. The main drawback in their application is that there must be an optical sighting between the instrument and the reflector. Although they were not developed by the manufacturer as measuring systems for permanent observation, through this research it was established that the automatic operation of digital precise levels can be realized by control from an external computer. In this way, vertical displacements of low intensity can be registered continuously and precisely in field conditions. During the periods of the day favorable for precise geometric leveling, displacement values bigger than $5 \cdot \sigma_{POS}$ can be reliably registered. The same results can be achieved even in the absence of daylight (measurements during the night, in tunnels, basements, etc.), with proper artificial lighting. In unfavorable periods, twice as bad results can be expected. The main disadvantage of using digital precise levels in projects of permanent observation of vertical movements is that the distance from the instrument to the bar-code staff can be only a few tens of meters. In the conducted experiments, with GNSS technology and the RTK method of positioning relative to the base receiver established by the user, the spatial, horizontal, and vertical discrete displacements bigger than $3 \cdot \sigma_{POS}$, were successfully registered in all periods of the day. Almost the same results were obtained when registering discrete displacements by positioning relative to the network of continuously operating GNSS stations, and the best results were obtained using the MAX model for generating corrections. The main advantages of GNSS displacement registration are: optical sighting between the measuring point and the observed object is not necessary and the distance from which the structure is observed can be much longer than in the application of terrestrial measuring systems. The main disadvantage of this observation method, based on relative kinematic positioning, in addition to reduced positioning accuracy, is the obligation to establish a user base receiver, which requires additional work and costs, or the system's dependence on a third party in the case of using a network of continuously operating GNSS stations.

In the experiments of registering continuous displacements, the possibility of using geodetic measurement systems to register the position of a point that is in constant motion was examined, which simulated the behavior of structures under dynamic loads. Good registration results were achieved with a digital precise level and a GNSS receiver, while for the same experimental conditions, slightly worse results were obtained with a robotic total station. When registering continuous displacements with a robotic total station, significant differences appeared between the derived and registered displacement increments and deviations between derived and registered trajectories. Bigger differences and deviations appeared at higher reflector movement speeds. The problems of registering continuous displacements by robotic total stations are primarily a consequence of the imperfection of the system for tracking reflectors in motion and the synchronization of measuring sensors in the instrument. The appearance of large deviations, obtained in this research, is a consequence of reflector orientation errors during movement, even in the case of using one

type of passive prismatic 360° reflector. With a digital precise level, in periods of the day favorable for precise geometric leveling, continuous vertical displacements with an intensity bigger than $5 \cdot \sigma_{POS}$ can be registered. When planning the permanent geodetic observation of vertical displacements with this measuring system, possible changes in the horizontal position of the staff must be considered and taken into account, because they can negatively affect the accuracy of registration of continuous vertical displacements. When registering continuous displacements with GNSS technology, all derived increments of spatial displacements with magnitude $1 \cdot \sigma_{POS}$ were reliably registered in cases where their speed was at least three times lower than the speed of their registration. At these speeds of movement of the GNSS receiver, the differences between the derived and registered trajectories were in the interval $\pm 1 \cdot \sigma_{POS}$. The same results were obtained when registering displacement by positioning relative to the user-established base receiver and relative to the network of continuously operating GNSS stations. This once again proved that networks of continuously operating GNSS stations represent a modern infrastructure for precise and reliable positioning and registration of both discrete and continuous displacements. In the experiments of registering continuous displacements (the same trajectories and with almost the same displacement increments), better results were obtained with GNSS technology than with a robotic total station.

The general conclusion, based on the conducted theoretical research, is that thanks to the technological development of geodetic instruments and positioning methods, geodetic measurement systems can be used to observe discrete and continuous displacements of structures, even in real-time. Based on the conducted experiments and obtained results, which confirmed the previous statement, it can be concluded that the possibility of permanent geodetic registration of displacements depends on the accuracy of positioning and speed of movement of geodetic sensors. Also, geodetic measuring systems can reliably register, and with additional analysis determine, displacement frequencies if they are at least two times less than the registration frequency of geodetic instruments. Measuring systems, in addition to great advantages and possibilities, also have disadvantages and limitations. Each geodetic monitoring project is different and unique and requires a special approach in the survey planning process. To build a reliable system that will optimally fulfill the requirements of permanent monitoring, it is necessary to have a detailed knowledge of the properties of measurement systems, the ways and procedures of their networking, and the methods for processing and analyzing registered measurements. By analyzing the principles of operation, conducting metrological assured measurements, identifying and modeling all external conditions, and eliminating or reducing sources of errors, it is possible to achieve high precision and reliability of registration of displacement. Also, to make maximum use of the future achievements of technological development in the field of permanent geodetic monitoring, there is a need for constant scientific research and verification through practical application. The methodology and approach used in this research can be used as one of the ways to check the possibilities of new measurement systems and existing measurement systems in concrete project conditions.

Keywords: magnitude of displacement, frequency of displacement, discrete displacement of structures, continuous displacement of structures, static and dynamic loads, displacement simulators, geodetic monitoring, robotic total station, digital precise level, GNSS receiver.

Scientific field: Geodetic Engineering

Scientific subfield: Engineering Surveying

СПИСАК СКРАЋЕНИЦА

AltBOC	Alternate Binary Offset Carrier
ANTEX	ANTenna EXchange format
AR	Ambiguity Resolution
ARNS	Aeronautical Radio Navigation Service
BDCS	BeiDou Coordinate System
BDS	BeiDou System
BKG	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
BPSK	Binary Phase Shift Keying
C/NAV	Commercial NAVigation Message
CBOC	Composite BOC
CCD	Charge Coupled Device
CCGC2000	China Geodetic Coordinate System 2000
CDMA	Code Division Multiple Access
CMOS	Complementary Metal-Oxide Semiconductor
CRS	Conventional Celestial Reference System
CS	Commercial Service
CSNO	China Satellite Navigation Office
CTP	Conventional Terrestrial Pole
CUsum	CUmulative sUMmation
DABAMOS	DAtaBAse-oriented MOnitoring System
DoD	Department of Defense
DOP	Dilution Of Precision
ECEF	Earth-Centred, Earth-Fixed
EGEP	European GNSS Evolution Programme
EGMER	European GNSS Mission Evolution Roadmap
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service
EHLD	Evolutions High Level Document
ESA	European Space Agency
EUSPA	European Union Agency for the Space Programme
F/NAV	Freely accessible NAVigation Message
FARA	Fast AR Approach
FAF	Fast Ambiguity Search Filter
FDMA	Frequency-Division Multiple Access
FIG	Fédération Internationale des Géomètres
FKP	Flächen KorrekturParameter
FOC	Full Operational Constellation
G/NAV	Governmental NAVigation Message
GEO	GEOstationary satellites
GGTO	GPS-Galileo time offset
GLONASS OS PS	GLONASS Open Service Performance Standard
GLST	GLONASS System Time
GOCA	GNSS/LPS/LS-based Online Control and Alarm System
GPPS	System of Global Precise Positioning in real-time

GPRS	General Packet Radio Service
GPS	Global Position System
GPS PSs	GPS Performance Standards
GRS80	Geodetic Reference System 1980
GRSP	Galileo Geodetic Reference Service Provider
GSA	European Global Navigation Satellite Systems Agency
GSM	Global System for Mobile Communications
GST	Galileo System Time
GTRF	Galileo's Terrestrial Reference Frame
HAS	High Accuracy Service
HDOP	Horizontal Dilution Of Precision
HTTP	Hyper Text Transfer Protocol
I/NAV	Integrity NAvigation Message
IAG	International Association of Geodesy
IAU	International Astronomical Union
ICD	Interface Control Document
ICG	International Committee on Global Navigation Satellite Systems
ICRF	International Celestial Reference Frame
ICRS	International Celestial Reference System
IERS	International Earth Rotation and Reference Systems Service
IGSO	Inclined GeoSynchronous Orbits
IoT	Internet of Things
IOV	In-Orbit Validation
IP	Internet Protocol
IRNSS/NavIC	Indian Regional Navigation Satellite System NavIC
ISPRS	International Society for Photogrammetry and Remote Sensing
ITRF	International Terrestrial Reference Frame
ITRS	International Terrestrial Reference System
ITU	International Telecommunication Union
JPL	Jet Propulsion Laboratory
L2CL	L2 Civil Long
L2CM	L2 Civil Moderated
LADGNSS	Local Area Differential GNSS
LAMBDA	Least-squares AMBiguity Decorrelation Adjustment
LAN	Local Area Network
LSAST	Least-Squares Ambiguity Search Technique
MAC	Master Auxiliary Concept
MBOC	Multiplexed BOC
MEO	Medium Earth Orbit
MGEX	Multi-GNSS Experiment
MLAMBDA	Modified LAMBDA
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
NGS	National Geodetic Survey
NRTK	Network RTK
NTRIP	Networked Transport of RTCM via Internet Protocol

NTSC	National Timing Service Center of Chinese Academy of Science
OCS	Operational Control Segment
OpenADMS	Open Automatic Deformation Monitoring System
OS	Open Service
OSNMA	Galileo Open Service Navigation Message Authentication
OTF	On-The-Fly
OVF	Orbit Validation Facility
PDOP	Position Dilution Of Precision
PNT	Positioning, Navigation and Timing
PPP	Precise Point Positioning
PPS	Precise Positioning Service
PRN	Pseudorandom Noise
PRS	Public Regulated Service
PTF	Precise Time Faciliti
PVT	Position, Velocity and Timing
QMBOC	Quadrature Multiplexed BOC
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
QZSS	Quasi-Zenith Satellite System
RAIM	Receiver Autonomous Integrity Monitoring
RNSS	Regional Navigation Satellite Systems
RTCM	Radio Technical Commission for Maritime Services
RTK	Real Time Kinematic
SAR	SeArch and Rescue
SHM	Structural Health Monitoring
SNR	Signal-Noise Ratio
SoL	Safety of Life service
SPS	Standard Positioning Service
TAI	International Atomic Time
TEC	Total Electron Content
TMBOC	Time Multiplexed Binary Offset Carrier
TRF	Conventional Terrestrial Reference Frame
TRS	Conventional Terrestrial Reference System
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
USNO	US Naval Observatory
UT	Universal Time
UTC(SU)	Universal Time Coordinated of Russia
VDOP	Vertical Dilution Of Precision
VLBI	Very Long Base Interferometry
VRS	Virtual Reference Station
WADGNSS	Wide Area Differential GNSS
WASHMC	Wind And Structural Health Monitoring System
WGS84	World Geodetic System 84
WLAN	Wireless Local Area Network
WMA	Weighted Moving Average
ГЛОНАСС	ГЛОбальная НАвигационная Спутниковая Система

ГНСС	Глобални Навигациони Сателитски Системи
ДПН	Дигитални Прецизни Нивелири
ЕОД	ЕлектроОптички фазни Даљиномјери
ЕУ	Европска Унија
ПЗ-90	Параметри Земли 1990 года
РТС	Роботизоване Тоталне Станице
СРПОС	Мрежа перманентних ГНСС станица Републике Српске

СПИСАК СЛИКА

Слика 2-1. Шема инкременталног (а), кодираног (б) и динамичког (в) поступка одређивања праваца	15
Слика 2-2. Принцип мјерења дужине електро-оптичким фазним даљинијером.....	16
Слика 2-3. 360° рефлектори.	17
Слика 2-4. Позиционирање тоталним станицама у 3Д координатном систему.....	23
Слика 2-5. Принцип мјерења дигиталним нивелирима.....	26
Слика 2-6. Одређивање висинских разлика геометријским нивелманом из средине (горе) и с краја (доље). .	31
Слика 2-7. Технологија аутоматског фокусирања: Leica (а), Sokkia (б).....	32
Слика 2-8. Принцип ГНСС трилатерације.....	51
Слика 2-9. Вектори ексцентрицитета и варијације фазног центра антене сателита.....	53
Слика 2-10. Јоносферски ефекат на ГНСС сигнале.....	55
Слика 2-11. Тропосферски ефекат на ГНСС сигнале.....	56
Слика 2-12. Вектори ексцентрицитета и варијације фазног центра антене пријемника.....	57
Слика 2-13. Вишеструка рефлексија ГНСС сигнала од површи у близини антене пријемника.....	58
Слика 2-14. Принцип релативног ГНСС позиционирања.....	64
Слика 2-15. Однос између тачности плутајућих и фиксних рјешења релативног позиционирања и дужине базне линије.....	65
Слика 2-16. Интегрисани геодетски мјерни системи: SmartStation (лијево) SmartPole (десно).....	75
Слика 2-17. Мултифункционалне геодетске мјерне станице: Leica MS60 (лијево) Trimble SX12 (десно).....	76
Слика 3-1. Алгоритам пројектовања геодетске контролне мреже.....	78
Слика 3-2. Облици ГНСС мрежа: радијалне (лијево) и затворене (десно)	81
Слика 3-3. Принципи осматрања објеката у RTK (а) и NRTK (б) режиму позиционирања.....	89
Слика 3-4. Принципи рада и компоненте GOCA система.....	90
Слика 3-5. Шематски приказ сензорске мреже засноване на OpenADMS систему.....	91
Слика 3-6. Распоред SHM сензора за осматрање моста „Tsing Ma“	102
Слика 3-7. Модуларна архитектура и улазно/излазни блок дијаграми система за надзор моста „Tsing Ma“	103
Слика 4-1. Дефиниција ICRS (а) и ITRS (б)	107
Слика 4-2. Геодетске координате глобалног елипсоидног координатног система	109
Слика 4-3. Локални астрономски (а) и елипсоидни (б) референтни координатни систем.....	114
Слика 4-4. Глобалне референтне површи висина	116
Слика 4-5. Типови деформација према начину дјеловања сила.....	121
Слика 4-6. Типови динамичких оптерећења.....	121
Слика 4-7. Координатни систем за осматрање бетонске лучне бране „Бочац“	122
Слика 4-8. Шематски приказ распореда ГНСС пријемника (а) и трансформације ГНСС координата у координатни систем моста (б) при одређивању квазистатичких и динамичких помјерања моста „Severn Bridge“	123
Слика 5-1. Дијаграм тока основних и опционих корака релативног/RTK позиционирања	157

Слика 5-2. Хијерархија модела у деформационој анализи.....	162
Слика 6-1. Полигон за практична истраживања.....	167
Слика 6-2. Роботизована тотална станица Leica TS15, припадајући контролер за даљинско управљање и 360° рефлектор.....	168
Слика 6-3. Дигитални прецизни нивелир Leica DNA03 са припадајућом инварском летвом и системом за аутоматско управљање.....	169
Слика 6-4. ГНСС пријемник GeoMax Zenith40 са припадајућим контролером за даљинско управљање.....	171
Слика 6-5. Координатни столови и симулатор дискретних помјерања.....	172
Слика 6-6. Симулатор континуираних помјерања.....	173
Слика 6-7. Скица распореда тачака геодетске контролне мреже за практична истраживања.....	176
Слика 6-8. Постављање симулатора на полигону практичних истраживања.....	179
Слика 6-9. Хоризонтисање симулатора помјерања.....	179
Слика 6-10. Оријентација симулатора помјерања.....	179
Слика 6-11. Испитивање симулатора помјерања.....	180
Слика 6-12. Постављање и заштита роботизоване тоталне станице у току регистровања помјерања.....	180
Слика 6-13. Мјерење атмосферских параметара за корекцију мјерења.....	181
Слика 6-14. Постављање и заштита дигиталног прецизног нивелира у току регистровања помјерања.....	181
Слика 6-15. Регистровање помјерања дигиталним прецизним нивелиром у току ноћи.....	181
Слика 6-16. Кориснички успостављен базни пријемник са панорамским приказом локације.....	182
Слика 6-17. Шематски приказ тестирања регистровања континуираних помјерања: а) изведено симулатором континуираних помјерања уз задано R и f_i и б) регистровано геодетским мјерним системима.....	202
Слика 6-18. Регистровање континуираних помјерања роботизованом тоталном станицом – просторне кружнице: а) f_n , б) $f_n / 2$, в) $f_n / 3$, г) $f_n / 5$	204
Слика 6-19. Регистровање континуираних помјерања роботизованом тоталном станицом – хоризонталне кружнице: а) f_n , б) $f_n / 2$, в) $f_n / 3$, г) $f_n / 5$	204
Слика 6-20. Регистровање континуираних помјерања роботизованом тоталном станицом – Y оса: а) f_n , б) $f_n / 2$, в) $f_n / 3$, г) $f_n / 5$	205
Слика 6-21. Регистровање континуираних помјерања роботизованом тоталном станицом – X оса: а) f_n , б) $f_n / 2$, в) $f_n / 3$, г) $f_n / 5$	205
Слика 6-22. Регистровање континуираних помјерања роботизованом тоталном станицом – N оса: а) f_n , б) $f_n / 2$, в) $f_n / 3$, г) $f_n / 5$	206
Слика 6-23. Одступања при регистровању континуираних помјерања роботизованом тоталном станицом – просторне кружнице: а) f_n , б) $f_n / 2$, в) $f_n / 3$, г) $f_n / 5$	206
Слика 6-24. Одступања при регистровању континуираних помјерања роботизованом тоталном станицом – хоризонталне кружнице: а) f_n , б) $f_n / 2$, в) $f_n / 3$, г) $f_n / 5$	207
Слика 6-25. Одступања при регистровању континуираних помјерања роботизованом тоталном станицом – Y оса : а) f_n , б) $f_n / 2$, в) $f_n / 3$, г) $f_n / 5$	207
Слика 6-26. Одступања при регистровању континуираних помјерања роботизованом тоталном станицом – X оса : а) f_n , б) $f_n / 2$, в) $f_n / 3$, г) $f_n / 5$	208

Слика 6-27. Одступања при регистровању континуираних помјерања роботизованом тоталном станицом – Н оса : а) f_n , б) $f_n / 2$, в) $f_n / 3$, г) $f_n / 5$	208
Слика 6-28. Регистровање континуираних помјерања дигиталним прецизним нивелиром: а) f_n , б) $f_n / 2$, в) $f_n / 3$, г) $f_n / 5$	210
Слика 6-29. Одступања при регистровању континуираних помјерања дигиталним прецизним нивелиром: а) f_n , б) $f_n / 2$, в) $f_n / 3$, г) $f_n / 5$	211
Слика 6-30. Регистровање континуираних помјерања ГНСС технологијом у односу на кориснички успостављен базни пријемник – просторне кружнице: а) f_n , б) $f_n / 2$, в) $f_n / 3$, г) $f_n / 5$	213
Слика 6-31. Регистровање континуираних помјерања ГНСС технологијом у односу на кориснички успостављен базни пријемник – хоризонталне кружнице: а) f_n , б) $f_n / 2$, в) $f_n / 3$, г) $f_n / 5$	213
Слика 6-32. Регистровање континуираних помјерања ГНСС технологијом у односу на кориснички успостављен базни пријемник – по Y оси: а) f_n , б) $f_n / 2$, в) $f_n / 3$, г) $f_n / 5$	214
Слика 6-33. Регистровање континуираних помјерања ГНСС технологијом у односу на кориснички успостављен базни пријемник – по X оси: а) f_n , б) $f_n / 2$, в) $f_n / 3$, г) $f_n / 5$	214
Слика 6-34. Регистровање континуираних помјерања ГНСС технологијом у односу на кориснички успостављен базни пријемник – по Н оси: а) f_n , б) $f_n / 2$, в) $f_n / 3$, г) $f_n / 5$	215
Слика 6-35. Одступања при регистровању континуираних помјерања ГНСС технологијом у односу на кориснички успостављен базни пријемник – просторне кружнице: а) f_n , б) $f_n / 2$, в) $f_n / 3$, г) $f_n / 5$	215
Слика 6-36. Одступања при регистровању континуираних помјерања ГНСС технологијом у односу на кориснички успостављен базни пријемник – хоризонталне кружнице: а) f_n , б) $f_n / 2$, в) $f_n / 3$, г) $f_n / 5$	216
Слика 6-37. Одступања при регистровању континуираних помјерања ГНСС технологијом у односу на кориснички успостављен базни пријемник – Y оса: а) f_n , б) $f_n / 2$, в) $f_n / 3$, г) $f_n / 5$	216
Слика 6-38. Одступања при регистровању континуираних помјерања ГНСС технологијом у односу на кориснички успостављен базни пријемник – X оса: а) f_n , б) $f_n / 2$, в) $f_n / 3$, г) $f_n / 5$	217
Слика 6-39. Одступања при регистровању континуираних помјерања ГНСС технологијом у односу на кориснички успостављен базни пријемник – Н оса: а) f_n , б) $f_n / 2$, в) $f_n / 3$, г) $f_n / 5$	217
Слика 6-40. Регистровање континуираних помјерања ГНСС технологијом на основу позиционирања у оквиру мреже перманентних ГНСС станица – просторне кружнице: а) f_n , б) $f_n / 2$, в) $f_n / 3$, г) $f_n / 5$	219
Слика 6-41. Регистровање континуираних помјерања ГНСС технологијом на основу позиционирања у оквиру мреже перманентних ГНСС станица – хоризонталне кружнице: а) f_n , б) $f_n / 2$, в) $f_n / 3$, г) $f_n / 5$	220
Слика 6-42. Регистровање континуираних помјерања ГНСС технологијом на основу позиционирања у оквиру мреже перманентних ГНСС станица – по Y оси: а) f_n , б) $f_n / 2$, в) $f_n / 3$, г) $f_n / 5$	220
Слика 6-43. Регистровање континуираних помјерања ГНСС технологијом на основу позиционирања у оквиру мреже перманентних ГНСС станица – по X оси: а) f_n , б) $f_n / 2$, в) $f_n / 3$, г) $f_n / 5$	221
Слика 6-44. Регистровање континуираних помјерања ГНСС технологијом на основу позиционирања у оквиру мреже перманентних ГНСС станица – по Н оси: а) f_n , б) $f_n / 2$, в) $f_n / 3$, г) $f_n / 5$	221
Слика 6-45. Одступања при регистровању континуираних помјерања ГНСС технологијом на основу позиционирања у оквиру мреже перманентних ГНСС станица – просторне кружнице: а) f_n , б) $f_n / 2$, в) $f_n / 3$, г) $f_n / 5$	222

Слика 6-46. Одступања при регистрању континуираних помјерања ГНСС технологијом на основу позиционирања у оквиру мреже перманентних ГНСС станица – хоризонталне кружнице: а) f_n , б) $f_n / 2$, в) $f_n / 3$, г) $f_n / 5$ 222

Слика 6-47. Одступања при регистрању континуираних помјерања ГНСС технологијом на основу позиционирања у оквиру мреже перманентних ГНСС станица – Y оса: а) f_n , б) $f_n / 2$, в) $f_n / 3$, г) $f_n / 5$ 223

Слика 6-48. Одступања при регистрању континуираних помјерања ГНСС технологијом на основу позиционирања у оквиру мреже перманентних ГНСС станица – X оса: а) f_n , б) $f_n / 2$, в) $f_n / 3$, г) $f_n / 5$ 223

Слика 6-49. Одступања при регистрању континуираних помјерања ГНСС технологијом на основу позиционирања у оквиру мреже перманентних ГНСС станица – N оса: а) f_n , б) $f_n / 2$, в) $f_n / 3$, г) $f_n / 5$ 224

СПИСАК ТАБЕЛА

Табела 2-1. Извори и класификација грешака мјерења хоризонталних углова електронским теодолитима.....	19
Табела 2-2. Извори и класификација грешака мјерења зенитних и вертикалних углова електронским теодолитима.....	20
Табела 2-3. Извори и класификација грешака мјерења дужина електрооптичким фазним даљиномјерима	21
Табела 2-4. Карактеристике савремених роботизованих тоталних станица за осматрање.....	25
Табела 2-5. Утицаји и могући ефекти на мјерења дигиталним нивелирима	28
Табела 2-6. Извори и класификација грешака мјерења висинских разлика дигиталним нивелирима	29
Табела 2-7. Практична горња граница тачности мјерења висинских разлика на станици.....	31
Табела 2-8. Доња граница тачности мјерења висинских разлика на станици.....	32
Табела 2-9. Карактеристике савремених дигиталних прецизних нивелира са аутоматским фокусирањем.....	33
Табела 2-10. GPS сигнали	37
Табела 2-11. Galileo сигнали	46
Табела 2-12. Планиране перформансе Galileo сервиса.....	46
Табела 2-13. BDS сервис и сигнали	49
Табела 2-14. Категорије IGS орбиталних параметара GPS и GLONASS система.....	52
Табела 2-15. Методе ГНСС позиционирања и њихове карактеристике.....	63
Табела 2-16. Карактеристике савремених ГНСС пријемника за осматрање	71
Табела 3-1. Основне активности при успостављању SHM система.....	96
Табела 4-1. Геометријски параметри GRS80 елипсоида.....	110
Табела 4-2. Геометријски параметри WGS84 елипсоида.....	110
Табела 4-3. Геометријски параметри елипсоида ПЗ-90.....	111
Табела 4-4. Геометријски параметри елипсоида CGCS2000.....	114
Табела 6-1. Основне техничке карактеристике роботизоване тоталне станице Leica TS15.....	168
Табела 6-2. Основне техничке карактеристике дигиталног прецизног нивелира Leica DNA03.....	170
Табела 6-3. Основне техничке карактеристике ГНСС пријемника GeoMax Zenith40.....	171
Табела 6-4. Резултати регистровања дискретних просторних помјерања роботизованом тоталном станицом у случајном јутарњем периоду са позиције RTS100.....	184
Табела 6-5. Сумарни резултати регистровања дискретних просторних помјерања роботизованом тоталном станицом са позиције RTS100	185
Табела 6-6. Резултати регистровања дискретних просторних помјерања роботизованом тоталном станицом у случајном јутарњем периоду са позиције RTS200.....	186
Табела 6-7. Сумарни резултати регистровања дискретних просторних помјерања роботизованом тоталном станицом са позиције RTS200	187
Табела 6-8. Резултати регистровања дискретних вертикалних помјерања дигиталним прецизним нивелиром у случајном јутарњем периоду	188

Табела 6-9. Сумарни резултати регистравања дискретних вертикалних помјерања дигиталним прецизним нивелиром	189
Табела 6-10. Резултати регистравања просторних помјерања ГНСС технологијом, у случајним условима и у односу на кориснички успостављен базни пријемник	191
Табела 6-11. Резултати регистравања хоризонталних помјерања ГНСС технологијом, у случајним условима и у односу на кориснички успостављен базни пријемник	192
Табела 6-12. Резултати регистравања вертикалних помјерања ГНСС технологијом, у случајним условима и у односу на кориснички успостављен базни пријемник	193
Табела 6-13. Резултати регистравања просторних помјерања ГНСС технологијом, у повољним условима и у односу на кориснички успостављен базни пријемник	194
Табела 6-14. Резултати регистравања хоризонталних помјерања ГНСС технологијом, у повољним условима и у односу на кориснички успостављен базни пријемник	195
Табела 6-15. Резултати регистравања вертикалних помјерања ГНСС технологијом, у повољним условима и у односу на кориснички успостављен базни пријемник	196
Табела 6-16. Сумарни резултати регистравања просторних помјерања ГНСС технологијом позиционирањем у оквиру мреже перманентних ГНСС станица	198
Табела 6-17. Сумарни резултати регистравања хоризонталних помјерања ГНСС технологијом позиционирањем у односу на мрежу перманентних ГНСС станица	199
Табела 6-18. Сумарни резултати регистравања вертикалних помјерања ГНСС технологијом позиционирањем у односу на мрежу перманентних ГНСС станица	200
Табела 6-19. Сумарни резултати регистравања континуираних помјерања роботизованом тоталном станицом – инкременти помјерања	203
Табела 6-20. Сумарни резултати регистравања континуираних помјерања роботизованом тоталном станицом - путање	209
Табела 6-21. Статистички показатељи успјешности регистравања континуираних помјерања дигиталним прецизним нивелиром	211
Табела 6-22. Сумарни резултати регистравања континуираних помјерања ГНСС технологијом у односу на кориснички успостављен базни пријемник – инкременти помјерања	212
Табела 6-23. Сумарни резултати регистравања континуираних помјерања ГНСС технологијом у односу на кориснички успостављен базни пријемник - путање	218
Табела 6-24. Сумарни резултати регистравања континуираних помјерања ГНСС технологијом позиционирањем у оквиру мреже перманентних ГНСС станица – инкременти помјерања	219
Табела 6-25. Сумарни резултати регистравања континуираних помјерања ГНСС технологијом позиционирањем у оквиру мреже перманентних ГНСС станица - путање	224

САДРЖАЈ

1. УВОД.....	1
1.1. ПРОБЛЕМ, ПРЕДМЕТ И ЦИЉ ИСТРАЖИВАЊА	3
1.2. ПРЕТХОДНА ИСТРАЖИВАЊА.....	5
1.3. ОЧЕКИВАНИ РЕЗУЛТАТИ И НАУЧНИ ДОПРИНОС	9
1.4. ПРЕГЛЕД САДРЖАЈА ДОКТОРСКОГ РАДА.....	12
2. ГЕОДЕТСКИ МЈЕРНИ СИСТЕМИ ГЕОДЕТСКОГ ОСМАТРАЊА ПОМЈЕРАЊА ОБЈЕКТА..	14
2.1. ТЕРЕСТРИЧКИ МЈЕРНИ СИСТЕМИ ГЕОДЕТСКОГ ОСМАТРАЊА ПОМЈЕРАЊА ОБЈЕКТА.....	14
2.1.1. Роботизоване тоталне станице.....	14
2.1.2. Дигитални прецизни нивелири	24
2.2. ГНСС МЈЕРНИ СИСТЕМИ ГЕОДЕТСКОГ ОСМАТРАЊА ПОМЈЕРАЊА ОБЈЕКТА.....	33
2.2.1. Глобални навигациони сателитски системи – концепти, развој и модернизација	34
2.2.2. Мјерне величине глобалних навигационих сателитских система	50
2.2.3. Извори грешака ГНСС мјерења	51
2.2.4. Методе ГНСС позиционирања.....	62
2.2.5. ГНСС пријемници.....	68
2.2.6. Интероперабилност и мултифреквенцијски ГНСС	72
2.2.7. Безбједност ГНСС позиционирања.....	73
2.3. ИНТЕГРИСАНИ МЈЕРНИ СИСТЕМИ ГЕОДЕТСКОГ ОСМАТРАЊА ПОМЈЕРАЊА ОБЈЕКТА.....	75
3. ГЕОДЕТСКЕ МРЕЖЕ ЗА ГЕОДЕТСКО ОСМАТРАЊЕ ПОМЈЕРАЊА ОБЈЕКТА.....	77
3.1. ПАСИВНЕ МРЕЖЕ ЗА ГЕОДЕТСКО ОСМАТРАЊЕ ПОМЈЕРАЊА ОБЈЕКТА.....	78
3.2. АКТИВНЕ МРЕЖЕ ЗА ГЕОДЕТСКО ОСМАТРАЊЕ ПОМЈЕРАЊА ОБЈЕКТА.....	86
3.2.1. Геодетске мреже перманентних ГНСС станица.....	87
3.2.2. Активне геодетске мреже за осматрање помјерања објеката.....	89
3.2.3. Активне SHM мреже за осматрање стања објеката	94
4. КООРДИНАТНИ СИСТЕМИ И ТРАНСФОРМАЦИЈЕ КООРДИНАТА ЗА ГЕОДЕТСКО ОСМАТРАЊЕ ПОМЈЕРАЊА ОБЈЕКТА	105
4.1. КООРДИНАТНИ СИСТЕМИ ТЕРЕСТРИЧКИХ И ГНСС МЈЕРНИХ СИСТЕМА	105
4.1.1. Координатни системи и системи времена ГНСС-а.....	106
4.1.2. Координатни системи терестричких мјерних система	114
4.2. ТРАНСФОРМАЦИЈЕ КООРДИНАТА ИЗМЕЂУ РАЗЛИЧИТИХ КООРДИНАТНИХ СИСТЕМА.....	117
4.3. ТРАНСФОРМАЦИЈЕ КООРДИНАТА У ЛОКАЛНЕ КООРДИНАТНЕ СИСТЕМЕ ОБЈЕКТА	120

5. АНАЛИЗА И ОБРАДА ПОДАТАКА ПЕРМАНЕНТНОГ ГЕОДЕТСКОГ ОСМАТРАЊА И КВАНТИФИКОВАЊЕ ПОМЈЕРАЊА ОБЈЕКТА	125
5.1. МОДЕЛОВАЊЕ ГРЕШАКА И ОЦЈЕНЕ КОМПОНЕНТИ ДИСПЕРЗИЈА МЈЕРЕЊА СИСТЕМИМА ЗА ГЕОДЕТСКО ОСМАТРАЊЕ ПОМЈЕРАЊА ОБЈЕКТА	126
5.1.1. Моделовање грешака терестричких мјерења	126
5.1.2. Параметризација ГНСС мјерења и управљање грешкама мјерења	132
5.1.3. Одређивање тачности геодетских мјерних система према <i>ISO</i> стандардима	138
5.2. ОБРАДА И АНАЛИЗА МЈЕРЕЊА СИСТЕМИМА ЗА ГЕОДЕТСКО ОСМАТРАЊЕ ПОМЈЕРАЊА ОБЈЕКТА	144
5.2.1. Обрада и анализа терестричких мјерења	145
5.2.2. Обрада и анализа ГНСС мјерења.....	149
5.3. КВАНТИФИКОВАЊЕ ПОМЈЕРАЊА ОБЈЕКТА	161
6. ПРАКТИЧНА ИСТРАЖИВАЊА	166
6.1. ПЛАНИРАЊЕ ЕКСПЕРИМЕНТА	167
6.2. ПРИКУПЉАЊЕ ПОДАТАКА	178
6.3. ОБРАДА, АНАЛИЗА И ТЕСТИРАЊЕ ДОБИЈЕНИХ РЕЗУЛТАТА	182
6.3.1. Анализа и тестирање регистровања дискретних помјерања.....	183
6.3.2. Анализа и тестирање регистровања континуираних помјерања.....	201
7. ЗАКЉУЧАК	225
7.1. ЗАКЉУЧНА РАЗМАТРАЊА.....	225
7.2. МОГУЋИ ПРАВЦИ ДАЉИХ ИСТРАЖИВАЊА.....	233
8. ЛИТЕРАТУРА	235

1. УВОД

Предмет геодетског осматрања (надгледања, мониторинга, геодетских деформационих мјерења) могу бити [1][2][3]:

- конструкције (инжењерски објекти) са непосредном околином,
- одрони, клизишта, терени који се слијежу,
- помјерања земљине коре,
- потенцијално опасне зоне (у индустрији, енергетици, рударству, екологији) и
- геодинамички процеси (земљотреси, вулканске ерупције).

Деформације инжењерског објекта су промјене конструкције и околине које настају у току грађења и употребе објекта. Настају као посљедица дјеловања унутрашњих и спољашњих сила: промјене температуре и нивоа подземних вода, тектонских и сеизмолошких утицаја, утицаја вјетра, оптерећења објекта и сл. Према карактеру, силе се дијеле на статичке и динамичке [2][4]. При пројектовању конструкција објекта у обзир се узимају сва оптерећења која дјелују на њих, која се затим суперпонирају ради одређивања максималних напрезања у елементима конструкција. Дјеловањем ових сила на објектима могу настати: затезања, притисци, угиби (савијања), нагиби, смицања, увртања (торзије) и искривљености (извијања). Могућа су и оштећења у облику пукотина и ломова. Помјерања објекта могу бити равномјерна и неравномјерна, а деформације еластичне и пластичне. Према промјени смјера, помјерања се дијеле на хоризонтална (тангенцијална и радијална) и вертикална (слијегања и издизања) [5], [6]. У оквиру овог истраживања деформације су посматране у геометријском смислу и у даљем тексту коришћен је појам помјерање.

Статичка (квазистатичка) оптерећења су, најчешће, посљедица дјеловања вјештачких сила која за резултат имају промјене геометрије објекта [3]. Промјене геометрије објекта, усљед дјеловања статичких оптерећења, најчешће се описују величинама дискретних помјерања карактеристичних тачака објекта или његових конструктивних елемената. Посљедице дјеловања динамичких сила (оптерећења) на објекат су промјене вриједности динамичких параметара конструкције. Динамичка оптерећења могу бити властита (вибрирајуће конструкције, кранови, висећи или мостови оптерећени саобраћајем, високи торњеви под утицајем вјетра, итд.) и вјештачки изазвана (падајући или нагло отпуштени терет, удари, итд.). Дјеловања динамичких оптерећења на објекат могу бити краткотрајна (вјетар, земљотрес, удар) или дуготрајна (рад постројења у индустрији, саобраћај на мостовима, промјена температуре). Понашање конструкције објекта при динамичком оптерећењу зависи од интензитета оптерећења, закона промјене оптерећења у функцији времена, мјесту дјеловања на конструкцију и физичким својствима материјала конструкције. Анализом регистрованих одговора конструкције на динамичко оптерећење, одређују се динамички параметри конструкције: вриједности фреквенције и периода помјерања, основни модални облици и логаритамски декременти пригушења за сваки модални облик [4]. Њиховим одређивањем правовремено се могу регистровати промјене и евентуална оштећења на конструкцијама и објектима.

Основни циљеви осматрања објеката су спрјечавање материјалних и хуманитарних штета, обезбјеђивање функционалности објеката и побољшање стандарда грађења. Стални развој и напредак технологија, као и истраживања у циљу рјешавања задатака осматрања, за посљедицу имају сталне промјене у концептима и стандардима осматрања.

Различите врсте помјерања, одређују се примјеном различитих метода и технологија. Општа дефиниција и подјела метода за одређивање помјерања је да се релативна помјерања одређују негеодетским (физикалним и геотехничким методама), а апсолутна помјерања геодетским методама [2], [3], [5]–[8].

Релативна помјерања и напони који се појављују на конструкцијама одређују се мјерењима грађевинске и геодетске струке, промјене терена геотехничким мјерењима и мјерењима геодетске струке, а њихове промјене у референтном систему само геодетским мјерењима. Геодетско осматрање објеката, мјерењем помјерања, је одређивање положаја и облика објекта осматрања у односу на референтни систем, у функцији времена и оптерећења.

Основни параметри за интерпретацију резултата геодетског осматрања су: величина (интензитет, правац и смјер вектора помјерања) и карактер помјерања (вријеме када се помјерање десило). Помјерања се могу посматрати и приказивати као 1Д, 2Д и 3Д помјерања. Такође, према карактеру настанка, дјеловања или трајања помјерања могу бити равномјерна и неравномјерна [2], [3]. За стабилност, функционалност и безбједност објеката, најопаснија су неравномјерна 3Д помјерања.

Досадашња пракса геодетског осматрања заснивала се на периодичном или осматрању по епохама. Основна карактеристика овог модела осматрања је прилично дуго вријеме између епоха осматрања. Данашњи задаци деформационе анализе на основу геодетских и геотехничких осматрања све су више оријентисани ка мултисензорским системима са перманентним и аутоматизованим прикупљањем и обрадом података у реалном времену гдје се обрада, анализа и интерпретација података заснивају на новим софистицираним концептима и робусним моделима. Примјена мултисензорских система сматра се оптималним начином за симултано одређивање апсолутних и релативних помјерања.

Перманентна (континуирана) геодетска осматрања актуелна су посљедњих двадесет година, а могу се примијенити на различите типове конструкција и инжењерских објеката. Сваке године системи за осматрање све су иновативнији у погледу мјерних система и софтверских рјешења за регистрацију, обраду података и анализу стабилности. Нови инструменти и методе омогућавају геодетским стручњацима осматрање инжењерских објеката са различитих удаљености (и по неколико километара), регистровање по интензитету малих помјерања, као и регистровање помјерања високе фреквенције.

Перманентно геодетско осматрање конструкција може се изводити у кратким временским интервалима (нпр. испитивање конструкција пробним оптерећењем, утицај екстремних услова), или непрекидно (осматрање у току грађења, експлоатације, итд). Резултати осматрања могу се добијати у реалном времену и аутоматизовано (процес осматрања се изводи без опажача, тј. утицаја људског фактора). На основу резултата перманентног осматрања могу се оцјењивати тренутна стања објеката и изводити предикције и симулације будућих догађаја.

Савремена теоријска и практична истраживања баве се интеграцијом геодетских мјерних система са сензорима других струка и њиховом укључивању у мреже за осматрање стања грађевинских објеката (*енг. Structural Health Monitoring – SHM*). Технологије за осматрање стања објеката имају широку примјену у процјени стања појединих елемената конструкција и објеката у цјелини, у свим фазама њиховог животног вијека. Свакако, најважнији дио система за *SHM* су сензори, а њиховом избору при изградњи система посвећује се посебна пажња. Може се рећи да сусензори својеврсна веза између система за осматрање и објекта који се осматра.

Сензори за *SHM* принципијелно се дијеле на сензоре за регистровање локалних и укупних динамичких одговора конструкција. Први тип сензора, као што су оптичка влакна и пиезоелектрични сензори могу регистровати локалне динамичке одзиве, имају тачкасти или линијски распоред и обично су причвршћени на најважнијим дијеловима објеката. Други тип сензора, у које се убрајају и геодетски мјерни системи, могу пратити укупне параметре динамичког одзива. Од геодетских мјерних система најчешће се користе роботизоване и мултифункционалне тоталне станице и ГНСС (Глобални Навигациони Сателитски Системи, *енг. Global Navigation Satellite System*) пријемници. Савремени сензори помјерања објеката могу регистровати у реалном времену, што омогућава изградњу алармних системи за рано упозоравање на опасности по стабилност и функционалност објеката.

1.1. ПРОБЛЕМ, ПРЕДМЕТ И ЦИЉ ИСТРАЖИВАЊА

Проблем истраживања јесте перманентно геодетско осматрање објеката засновано првенствено на примјени ГНСС технологије и терестричких мјерних система. Предмет истраживања су могућности поменутих система за регистровање дискретних и континуираних помјерања објеката, које су доказиване у теренским условима над симулираним моделима (са познатим помјерањима). Од терестричких мјерних система у оквиру овог истраживања коришћени су роботизована мултифункционална тотална станица и дигитални прецизни нивелир, а позиционирање је вршено методама са једним читавањем мјерних величина. Регистровање помјерања ГНСС технологијом вршено је примјеном метода кинематичког релативног позиционирања са два пријемника и кинематичког релативног позиционирања у оквиру мреже перманентних ГНСС станица. Посебна пажња посвећена је истраживању могућности регистровања помјерања позиционирањем у оквиру мреже перманентних ГНСС станица. Сагледавање поменутих могућности подразумијевало је идентификовање параметара који утичу на процес регистровања помјерања овим системима.

Полазна идеја овог истраживања је да перманентно геодетско осматрање треба бити предмет планирања (пројектовања). Циљ планирања, које се у досадашњој пракси заснива на методама оптимизације и анализама метода позиционирања и мјерења, је да се захтјеви осматрања испуне на економичан начин. Претпоставља се да је за планирање перманентног геодетског осматрања неопходно детаљно познавање мјерних технологија, метода мјерења, архитектуре и комплетног процеса рада система за перманентно осматрање. Осим детаљног познавања архитектуре и начина рада система за перманентно осматрање као технолошког процеса, битно је познавање извора грешака геодетских метода мјерења и појединих мјерних технологија, њиховог моделовања и оцијењивања утицаја на тачност

позиционирања. Такође, избор одговарајућег модела трансформације координата добијених позиционирањем различитим технологијама, основни је предуслов за могућност приказивања резултата осматрања на јединствен начин. Примјена оптималне методе за идентификацију статистички значајних помјерања, кључни је предуслов за одговоре на питања: да ли се објекат помјерио, како, колико и када се помјерио (квантификовање помјерања). На основу података перманентног осматрања могуће је и предвиђање будућих догађаја (предикција помјерања).

Знања и искуства из области геодетског осматрања помјерања објеката стално се мијењају. Нова истраживања и искуствени подаци проширују разумијевање ове проблематике, а стални технолошки развој и унапређење мјерних система намећу потребу за промјенама у истраживачким методама и професионалним праксама. Међутим, истраживачи и стручњаци у пракси морају се увијек ослањати на сопствена искуства и знања у процјени и коришћењу информација, чија тачност, безбједност и правовременост су неопходни и представљају професионалну одговорност. У раним фазама развоја, нове софистициране технологије за геодетско осматрање објеката биле су доступне мањем броју корисника, а њихове могућности је кроз свој рад користио још мањи број стручњака, већином научника и истраживача. Узимајући у обзир чињеницу да су ове технологије у 21. вијеку доживјеле велику експанзију, да су све јефтиније и доступније за свакодневне примјене, а захтјеви за осматрањем објеката у константном порасту, интегралне студије о њиховим могућностима више су него неопходне.

Растућа потреба за геодетским осматрањем објеката последица је изградње све већих и комплекснијих објеката и појачане активности природних процеса који утичу на њихову сигурност. Такође, све чешћи захтјеви за геодетским осматрањем су и због промјена пројектованих оптерећења објеката и конструкција као и достизања животних вијекова објеката уз ризике и опасности које долазе у том периоду. Потреба и значај успостављања система за геодетско осматрање могу се уочити и кроз бројне несреће и катастрофе у прошлости, као последице урушавања објеката, којима смо нажалост свједоци и у данашњем времену.

Сваки пројекат осматрања је другачији и јединствен, првенствено због карактеристика конструкције и терена, и захтјева посебан приступ у процесу планирања осматрања. Познавање могућности мјерних система, метода, архитектуре и процеса рада система за перманентно осматрање осигурава правилан избор и примјену у конкретним задацима успостављања различитих система геодетског осматрања објеката. Основни циљ овог истраживања је анализа могућности ГНСС и терестричких геодетских мјерних система за регистровање помјерања конструкција при перманентном геодетском осматрању. Рад на предложеној теми дисертације имао је и посебне циљеве:

- систематизација истраживања и извођење закључака о изворима грешака ГНСС и терестричких геодетских мјерења, параметрима који утичу на тачност позиционирања при перманентном геодетском осматрању и дефинисање поступака за њихово елиминисање, минимизирање и моделовање,

- анализа и описивање система и мрежа за осматрање објеката и дефинисање улоге и значаја геодетских мјерних система као дијела интегралних система за осматрање стања објеката,
- дефинисање поступака трансформације координата између различитих координатних система и поступака трансформације координата у јединствен координатни систем објекта и
- анализа и описивање постојећих метода за обраду и анализу података перманентног осматрања и метода за квантификовање регистрованих помјерања.

1.2. ПРЕТХОДНА ИСТРАЖИВАЊА

Хронолошки посматрано, прва истраживања у одређивању деформација конструкција на основу геодетских деформационих мјерења, јављају се двадесетих година прошлог вијека [9]. Интензиван развој ове области инжењерске геодезије започео је појавом првих научних и стручних радова и одржавањем првог FIG (*фр. Fédération Internationale des Géomètres; International Federation of Surveyors; Међународна федерација геодета*) симпозијума о деформационим мјерењима у Кракову 1975. године.

Прве примјене ГНСС технологије, тачније глобалног позиционог система (*енг. Global Position System - GPS*), за одређивање вектора помјерања конструкција појављују се крајем осамдесетих година прошлог вијека [10]. Може се рећи да је од самог почетка развоја ове технологије истраживана могућност њене примјене за осматрање природних и вјештачких објеката и феномена. Тадашње могућности ове технологије биле су ограничене на статичко релативно позиционирање и одређивање вектора помјерања из накнадне обраде података. Прве роботизоване тоталне станице примјену су нашле у навођењу грађевинских машина, јер је већ кроз почетна истраживања уочено да постоје потешкоће при прецизном одређивању положаја рефлектора због ограничења у тадашњим системима за препознавање рефлектора и грешака у синхронизацији појединих мјерних сензора.

Од краја 1990-тих година до данас, десила су се значајна технолошка побољшања геодетских мјерних система, а истраживања су усмјерена на могућности њихове примјене за перманентно осматрање конструкција. Првобитно, предмет истраживања била су понашања високих зграда и торњева услед дјеловања вјетра и земљотреса [11]–[13], а затим и понашања великих мостова услед дјеловања вјетра и оптерећења саобраћајем [14]–[22].

У наредних неколико година истраживања и публикације били су у функцији подизања свијести о новом концепту осматрања конструкција, могућност примјене на различите типове конструкција (високе зграде, ТВ торњеви, индустријски димњаци, челични торњеви, итд) и при различитим изворима дјеловања на њих [23]–[29]. Након првих реализованих пројеката осматрања и регистровања динамичког одговора конструкција тадашњим геодетским мјерним системима, предмет експерименталних истраживања постаје њихова оперативност у различитим условима. Добијени резултати геодетског осматрања поређени су са дуго примјењиваним системима за мјерење динамичког одговора конструкција [30]–[32]. Циљеви ових истраживања били су сагледавање могућности геодетских мјерних

система и проналазак рјешења за превазилажење тадашњих препрека у њиховој примјени. Увидјевши недостатке GPS технологије у погледу тачности вертикалног позиционирања, која је тада била три пута лошија од тачности хоризонталног позиционирања, истраживања су усмјерена на примјену псеудолита [33]–[36]. Такође, истраживана је могућност унапређења осматрања примјеном ГНСС технологије комбиновањем са роботизованим тоталним станицама [37] и акцелерометрима [32], [38]. Сва ова истраживања имала су за циљ превазилажење неопходности броја видљивих сателита и побољшања тачности GPS позиционирања у неповољним подручјима као што су градске средине, дубоке удолине, кањони, тјеснаци итд.

Готово у исто вријеме дешавао се и технолошки напредак у развоју тоталних станица. Неколико научника и истраживача поново се бавило испитивањем могућности њихове примјене у пројектима осматрања конструкција, првенствено динамичких одговора мостова при различитим утицајима [39], [40]. Увидјевши брзо да ови мјерни системи, са побољшањима појединачних функционалности и тачности позиционирања, дају много боље резултате у односу на GPS технологију, спроведена су лабораторијска истраживања могућности регистровања положаја рефлектора у покрету [41]–[43]. Међутим, аутори у овим радовима истичу грешку несинхронизованости рада сензора за мјерење дужине и правца, што доводи до систематске грешке при одређивању координата рефлектора. Затим су рађена тестирања и упоређивања могућности тоталних станица различитих произвођача при одређивању положаја рефлектора који се крећу по правилним путањама и при различитим брзинама кретања рефлектора [44], [45]. У наведеним истраживањима симулиране величине биле су мање од декларисане тачности позиционирања тоталном станицом и симулиране по појединачним осама. У наредном периоду, на основу могућности мјерних система утврђених кроз претходна истраживања, појављују се додатна истраживања ове проблематике примјеном различитих експерименталних приступа и симулацијом различитих сценарија из праксе осматрања конструкција [46], [47].

Основни недостаци мјерних система примијењених у наведеним истраживањима, наглашени у већини извора су: прецизно регистровање помјерања траје дуго што отежава примјену при осматрању високофреквентних одговора конструкција, код тоталних станица мора постојати оптичко догледање између мјерног инструмента и рефлектора и тачност вертикалног позиционирања GPS технологијом није задовољавајућа.

Развојем информатичког и комуникационог сектора почињу истраживања могућности аутоматског осматрања конструкција, као и осматрања у реалном времену, у границама могућности тадашњих мјерних система [48]. Почиње развој софтвера за анализу, обраду и визуелизацију резултата осматрања (GOCA, 3-D TRACKER, GRAZIA, Leica GeoMos, итд), како од стране научно-истраживачких институција тако и комерцијалног типа [49]–[51]. Такође, производе се уређаји за сталну комуникацију између различитих мјерних инструмената и њихову комуникацију са центрима за обраду, анализу и складиштење података осматрања. Системи се почињу посматрати кроз три основне компоненте: мјерни системи (сензори), системи за комуникацију (између сензора и система за обраду података) и системи за обраду података (центри за складиштење података уз софтвер за обраду,

анализу и управљање базом података). Претходно поменуте иновације дале су нове могућности и функционалности геодетском осматрању: развој система перманентног осматрања аутоматског типа, анализа података кроз вријеме, имплементација алармних система итд.

Појава нових технологија и мјерних система (мјерне камере, ласерски скенери), њихове могућности појединачно, као и интеграција са постојећим системима за потребе осматрања објеката, били су предмет интересовања научника и истраживача наредних година [52]–[58]. Мукупа и аутори у свом истраживању [58] о примјени терестричког ласерског скенера за осматрање објеката, као основни недостатак истичу значајно опадање тачности мјерења са повећањем удаљености између мјерног мјеста и објекта осматрања. Такође, сви истраживачи наглашавају могућност осматрања објеката овом технологијом и добијањем информацијама о насталим промјенама само са накнадном обрадом података.

У савременим истраживањима се истиче да роботизоване и мултифункционалне тоталне станице, ГНСС пријемници и дигитални прецизни нивелири чине основну групу сензора за геодетско осматрање објеката [53], [54]. Њихов развој последњих двадесет година револуционарно је промијенио концепте позиционирања и осматрања. Карактерише их мноштво технолошких побољшања који доприносе општем побољшању тачности 3Д позиционирања [59]. ГНСС пријемници подржавају праћење више сателитских система за позиционирање и пријем више врста сигнала како на малом, тако и на великом броју фреквенција. С обзиром на економичност прецизног позиционирања и могућност извођења високофреквентних мјерења, ова технологија постаје неизоставна у пројектима геодетског осматрања [23], [30], [60]. Роботизоване тоталне станице опремљене су брзим серво моторима најновије генерације, уређајима за аутоматско проналажење, визирање и праћење рефлектора, а тачност и брзина позиционирања су све веће [61]–[63]. Свестраност роботизованих тоталних станица и ГНСС пријемника, који се користе самостално или у комбинацији, омогућава превазилажење великог броја проблема при осматрању објеката. Ипак постоје ситуације у којима је потребно само осматрање вертикалних помјерања, или ситуације у којима су захтијеви тачности за осматрање вертикалних помјерања испод милиметра. У таквим случајевима најпогоднија је, у смислу једноставности рада и тачности резултата, примјена дигиталних прецизних нивелира. Технолошки развој и доступност компоненти за даљинско управљање и моторизацију омогућили су истраживања економски прихватљиве аутоматизације процеса мјерења вертикалних помјерања примјеном дигиталних нивелира [64].

Поменута побољшања су актуелна истраживања усмјерила на моделе мрежа и методе који доприносе остварењу високе тачности и поузданости 3Д осматрања на сваком жељеном мјесту. Међутим, може се рећи да су карактеристике прецизног ГНСС позиционирања још увијек лоше у изазовним окружењима као што су густа урбана подручја; карактеристична природна подручја као што су кањони, тјеснаци и котлине; подземни и затворени простори; која свакако могу бити мјеста грабења и експлоатације инжењерских објеката. Такође, развој и стално инсталирање различитих извора електромагнетног зрачења, који могу изазвати сметње у пријему сигнала, интерференцију и мијешање сигнала, још увијек представљају могуће препреке примјене ове технологије у прецизном позиционирању, а самим тим и

осматрању објеката. Пријемници се опремају системима за смањење шума фазних ГНСС мјерења, елиминисање вишеструке рефлексије, пријема сигнала са сателита на ниским елевационим угловима и алгоритмима који обезбјеђују непрекидно позиционирање упркос поменути изворима грешака. Такође, брзина регистровања података је све већа што их на извјестан начин сврстава у високо-фреквентне мјерне системе [59], [63], [65].

Сви мјерни системи се развијају као мали потрошачи електричне енергије. Такође, већина произвођача оставља могућност надоградње мјерних система за функционалности које су у фази истраживања и развоја што их чини уређајима које се користе како у садашњости тако и у будућности.

Од будућих геодетских рјешења за перманентно осматрање се очекује, превасходно, да интеграција хардвера и софтвера буде јединствена. Када је у питању хардвер, он данас подразумијева широк спектар геодетских и сензора животне средине. Сви мјерни системи морају бити активни, тачни и поуздани у свим временским условима попут јаке кише, вјетра и леда, вибрација, отпорни на прекид мјерења и комуникације, и сл. Софтвери треба да су прилагодљиви потребама корисника укључујући и визуелизацију прикупљених података и информација. Рјешења треба да теже раду у реалном времену и да буду алармно заснована. Закључак је да системи морају обезбиједити правовремене, тачне и поуздане информације о конструкцијама и објектима како би се открили евентуални проблеми и правовремено реаговало на њих.

Општа претпоставка је да робусно позиционирање у свим окружењима захтијева мулти-сензорски приступ и прикупљање података о карактеристикама средине у којој се врши позиционирање. Претпоставка је да управо овакав приступ обезбјеђује побољшање квалитета 3Д позиционирања, прикупљање података о објекту у реалном времену и правовремено доношење одлука о даљим активностима. Имајући у виду укупна побољшања, фреквенцију узорковања података и до 100 Hz и величине помјерања од неколико милиметара, ГНСС се сматра технологијом будућности за осматрање инжењерских објеката и идентификацију њиховог динамичког одговора. Осим за регистровање помјерања објеката може се користити и за регистровање модалних фреквенција конструкције [63]. Наведени закључци из анализе претходних истраживања су били основни разлог да се у оквиру овог истраживања, посебна пажња посвети управо могућностима ГНСС технологије за осматрање помјерања објеката.

Из претходне анализе литературе и стања у области може се закључити да се мали број аутора бавио интегралним истраживањем могућности регистровања просторних помјерања конструкција ГНСС и терестричким мјерним системима појединачно као и поређењем добијених резултата између система. Развој и потпуна употребљивост нових сателитских система, појава мрежа перманентних ГНСС станица и метода позиционирања у оквиру њих, роботизованих и мултифункционалних тоталних станица новије генерације (са аутоматским визирањем и праћењем рефлектора, са камерама високе резолуције итд), као и њихов константни развој, намећу потребу за сталним истраживањима могућности њихове примјене за осматрање конструкција. Геодетске мјерне системе најновије генерације карактерише изузетно висока прецизност мјерења, а вријеме потребно за реализацију мјерења је значајно смањено [63]. Сваке године системи за осматрање су

све иновативнији у погледу хардверских и софтверских рјешења постављајући нове стандарде у овој области.

На тржишту се појављује све већи број произвођача геодетске опреме, првенствено ГНСС пријемника и терестричких мјерних система, што их у одређеној мјери води ка статусу технологије ниске цијене (*low cost technology*) [66]. То значи да ће у скорој будућности ови мјерни системи бити примјенљиви за осматрање и у случајевима када су буџети предвиђени за осматрање ограничени. Наравно, подразумијева се да цијели поступак мора бити квалитетно планиран и реализован, како би примијењено рјешење испунило унапријед постављене критеријуме. Планирање перманентног геодетског осматрања подразумијева детаљно познавање технологија, метода, архитектуре и комплетног процеса рада система за перманентно осматрање. Међутим, до данас је мало тога урађено по питању планирања ове врсте радова. У већини случајева се планирање и очекивана тачност изражавају кроз вриједности декларисане у каталозима произвођача опреме, које свакако не морају бити стварни показатељ тачности и могућности мјерних система за регистровање помјерања у свим теренским условима и задацима осматрања. Објективан показатељ могућности мјерних систем и система за осматрање у цјелини свакако су испитивања спроведена у теренским условима, узимањем у обзир свих параметара средине који су неизоставни у пракси. Истраживање у оквиру ове дисертације се бави управо овом проблематиком. Успјешна валидација могућности мјерних система над теоријски тачним симулаторима омогућава касније коришћење тих сазнања у погледу величина и фреквенција помјерања које се могу регистровати у пројектима осматрања.

Имајући у виду да се коначни резултати осматрања различитим технологијама позиционирања морају приказивати у јединственом координатном систему објекта, овакав приступ намеће потребу за разматрањем питања трансформације координата. Наиме, сваки мјерни систем има припадајући координатни систем. Најчешће коришћен приступ за трансформацију координата подразумијева да се координате из мјерних система у локални систем или обрнуто, трансформишу на основу скупа заједничких тачака са координатама у оба система [67]. Истраживање могућности директне трансформације координата из мјерних система у јединствен систем објекта, и дефинисање једноставне методологије за њено спровођење, умногоме ће поједноставити и олакшати цијели поступак успостављања координатног система погодног за приказивање резултата осматрања.

1.3. ОЧЕКИВАНИ РЕЗУЛТАТИ И НАУЧНИ ДОПРИНОС

У оквиру истраживања анализирани су и описани ГНСС и терестрички мјерни системи за перманентно геодетско осматрање објеката са освртом на могућност њихове интеграције. Систематизација знања о изворима грешака геодетским мјерним системима, методама њиховог отклањања или минимизирања и утицају на тачност позиционирања; анализа и описивање специфичности геодетских мрежа за осматрање и савремених мрежа за осматрање стања објеката; дефинисање поступака директне трансформације координата у јединствен систем објекта који се осматра; анализа и описивање метода идентификације и квантификовања помјерања имају за циљ ближе упознавање шире геодетске заједнице са предностима и

ограничењима перманентног геодетског осматрања поменутих технологијама, која су на овим просторима још увијек недовољно заступљена у пракси.

Спроведено истраживање ће превасходно унаприједити поступке планирања перманентног геодетског осматрања конструкција примјеном ГНСС и терестричких мјерних система. Методологија и поступак испитивања могућности мјерних система коришћених у овом истраживању, могу се предложити за примјену у претходној провјери могућности појединих система уопште, као и у конкретним пројектима осматрања. Објашњење техничко-технолошких поступака за изградњу активних геодетских мрежа, метода обраде података осматрања и њихове трансформације унаприједиће разумијевање захтјева за осматрање и могућности употребе информација добијених по моделу перманентног осматрања. Истраживање ће осим поменутих доприноса конкретној науци и методологији, свакако допринијети промовисању могућности и значаја оваквог начина геодетског осматрања.

О актуелности и значају истраживања говори и чињеница да се проблемом прецизног позиционирања и његове примјене у домену геодетских деформационих мјерења активно баве и међународне геодетске организације, Међународна геодетска асоцијација (*енг. International Association of Geodesy - IAG*) и FIG.

IAG, њена Комисија 4 и припадајуће поткомисије окупују научнике, истраживаче и стручњаке који се баве развојем нових и унапређењем постојећих модела, технологија и метода позиционирања. Теоријска и практична рјешења у области ГНСС технологија, фузије сензора, осматрања атмосфере, моделовања, инжењерске примјене и геодетских техника уопште, промовишу се и дијеле путем публикација, конференција, симпозијума и центара за геодетске податке са научним, стручним и образовним организацијама и осталим корисницима. Препознајући данашњу и будућу централну улогу ГНСС у високопрецизном позиционирању, рад комисије је посебно фокусиран на истраживање модела и метода које побољшавају и осигуравају примјену ове технологије у свим сферама геодетског позиционирања, базираним првенствено на интегрисаним системима позиционирања са аутоматском обрадом података уз одговарајућу контролу квалитета рјешења која систем обезбјеђује. Константно се развијају теорије, стратегије и алати за моделовање и/или ублажавање ефеката интерференције, губитка сигнала и атмосферског утицаја као и начини њихове примјене у технологији прецизног ГНСС позиционирања.

Главни циљеви рада FIG Комисије 6 и Радне групе 6.1 за период од 2019. године до 2022. године, су подршка стручњацима у области деформационе анализе прегледом и систематизацијом постојећих и пружању информација о најновијим концептима геодетског осматрања оријентисаним на:

- *могућностима постојећих и нових сензора за одређивање величине геометријских деформација из геодетских и мјерења других струка,*
- *аутоматском складиштењу, размјени и претходној обради података,*
- *прилагодљивим нумеричким алгоритмима за израчунавање поузданих величина помјерања у реалном времену, укључујући и концепт анализе временских серија,*

- мултидисциплинарној сарадњи између геодета, грађевинских и инжењера геотехнике, са циљем разумијевања понашања конструкције и геотехничких објеката и појава,
- изучавању најмодернијих концепата за анализу података као што су вјештачке неуронске мреже, фази логика и генерички алгоритми,
- изучавању и примјени модерних техника анализе (Big data, IoT, итд.) којима се може управљати великом количином података све више доступних из великог броја *low-cost* сензора,
- истраживању ограничења и изазова који настају примјеном беспилотних летилица у деформационим мјерењима,
- истраживању могућности регистровања деформација већих фреквенција, које су од посебног значаја у области SHM.

Радна Група 6.1 има дугу традицију на пољу ширења резултата истраживања нових техника деформационих мјерења и метода анализе геодетски регистрованих деформација. У периоду од 1975. до 2008. године организовано је тринаест симпозијума, од којих су посљедња два организована у сарадњи са IAG. Од 2011. године FIG, IAG и ISPRS (*енг. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*) под вођством Радне групе 6.1, организују серију нових симпозијума под називом „Заједнички међународни симпозијум о деформационим осматрањима“. Циљ ових симпозијума је окушање како стручњака из различитих области геодезије тако и других струка које учествују у деформационим мјерењима и анализи регистрованих деформација, имајући у виду да се деформације посматрају као посљедица динамичког процеса.

Основни циљеви и очекивања од перманентног геодетског осматрања конструкција могу се дефинисати на сљедећи начин:

- Повећање сигурности: рано откривање значајних помјерања конструкција може спријечити њихово оштећење, повреде људи или губитак живота.
- Управљање ризицима: стално праћење напретка грађевинских радова омогућава инвеститорима и извођачима радова предузимање мјера прије него што се догоде непредвидиве штете.
- Редуковање трошкова: перманентно осматрање деформација смањује трошкове визуелног прегледа и евентуалну санацију на основу субјективних процјена стања конструкције. Такође, осматрањем се смањују краткорочни и дугорочни трошкови одржавања.
- Повећање продуктивности: могућност прикупљања података осматрањем у реалном времену (систем 24/7) са удаљених локација експоненцијално побољшава ефикасност и смањује вријеме како осматрања тако и евентуалног дјеловања у случају утврђивања значајних промјена на конструкцијама које онемогућавају њихову даљу употребу.

Коначан циљ примјене нове методологије и савремених система осматрања је добијање ажурних информација о стању конструкције и околног терена, у реалном времену и на основу обједињених сазнања геодетске, грађевинске и других струка које учествују у осматрању.

1.4. ПРЕГЛЕД САДРЖАЈА ДОКТОРСКОГ РАДА

Докторска дисертација написана је кроз седам поглавља. У првих пет поглавља изложене су теоријске основе геодетских мјерних система неопходне за разматрање могућности перманентног регистровања помјерања. Ове теоријске основе практично су примјењене за планирање и извођење перманентног регистровања помјерања у теренским условима и над симулираним моделима, што је описано у шестом поглављу. Закључци о могућностима навигационо-сателитских и терестричких мјерних система за перманентно геодетско регистровање помјерања објеката дати су у посљедњем поглављу.

На почетку првог поглавља размотрени су принципи и терминологија геодетског осматрања помјерања објеката уопште, са посебним освртом на потребу и значај успостављања и примјене система за перманентно геодетско осматрање помјерања објеката. Затим су дефинисани предмет и циљеви истраживања, узимајући у обзир полазне претпоставке и хипотезе истраживања. У сљедећем потпоглављу су хронолошки и систематично приказана најважнија претходна истраживања ове проблематике, са наглашавањем проблема који су предмет овог истраживања. На крају првог поглавља наведени су очекивани резултати и научни допринос ове дисертације у цијелини, уз идентификацију њеног значаја у оквиру активности геодетских структура и организација које се баве осматрањем објеката.

Најважнија теоријска разматрања технолошких достигнућа по питању принципа рада савремених геодетских мјерних система за осматрање објеката описани су у другом поглављу. Систематизована су теоријска сазнања о изворима грешака и метролошком обезбијеђењу прецизних мјерења. Представљене су методе позиционирања појединим мјерним системима са нагласком на методе за кинематичко позиционирање. Посебно и детаљно су обрађена и истакнута достигнућа ГНСС технологије за прецизно позиционирање. Имајући у виду значај система за перманентно осматрање помјерања објеката и потенцијалне ризике у отказивању рада система, описани су савремени изазови за њихов рад и позиционирање њима. За сваку технологију дат је преглед посљедњих генерација мјерних система од стране произвођача означених као инструмената за осматрање.

У трећем поглављу анализиране су и описане специфичности геодетских мрежа за осматрање помјерања објеката, као и методологија њиховог успостављања. Посебно су наглашене специфичности које важе за ГНСС мреже и које се морају узети у обзир при њиховом пројектовању. Описане су пасивне и активне геодетске мреже, као и мреже за осматрање укупног стања објеката. Такође, дефинисана је улога геодетских сензора и мрежа унутар њих. Наведене су специфичности важне за разумијевање и примјену при изградњи активних геодетских мрежа и система за перманентно осматрање.

Имајући у виду да је за правилну и технички разумљиву интерпретацију резултата осматрања, важан избор координатног система и референтних површи приказивања, у четвртном поглављу описани су координатни системи за геодетско

осматрање помјерања објеката. Детаљно су описани референтни координатни и временски системи ГНСС. Дефинисани су координатни системи појединачних мјерних система и описани начини конверзије координата између различитих координатних система. Такође, истражени су и анализирани поступци за трансформацију у јединствен координатни систем објекта који се осматра.

У петом поглављу изведене су параметризације мјерења и поступци моделовања грешака мјерења системима за перманентно геодетско осматрање. Затим су приказани *ISO* стандарди по којима се одређује тачност геодетских мјерних система у теренским условима. Дата је математичка интерпретација метода позиционирања и оцјене највјероватнијих вриједности координата тачака геодетских контролних мрежа са нагласком на позиционирање при једном читавању мјерених величина. Систематизована су истраживања о методама идентификације и квантификавања статистички значајних помјерања.

Практична истраживања могућности регистровања дискретних и континуираних помјерања спроведених у теренским условима и над моделима који симулирају понашање инжењерских објеката, приказана су у шестом поглављу. Експерименти су планирани и проведени по методологији и са поступцима који се предлажу за перманентно геодетско осматрање у пракси. Изложени су најважнији резултати добијени у појединачним експериментима. Послије сваког примјера дати су закључци о односу планиране и остварене тачности позиционирања и регистровања помјерања и величина сигурно регистрованих помјерања. Закључци о сигурно регистрованим величинама помјерања изведени су на основу теоријских поставки геодетских деформационих мјерења и примјеном статистичких тестова.

Закључна разматрања у седмом поглављу дају систематизацију важних теоријских разматрања о примјени савремених геодетских мјерних система за перманентно геодетско регистровање помјерања инжењерских објеката. За сваку мјерну технологију издвојене су и наглашене предности и недостаци сагласно данашњем степену њихових технолошких карактеристика, важне за разумијевање концепта перманентног осматрања заснованог на њима. Сумарни резултати практичних истраживања дају коначан преглед односа тачности регистровања помјерања и њихових величина. Посебно су наглашени резултати добијени примјеном ГНСС технологије и мреже перманентних ГНСС станица чим су истакнуте могућности и предности ове савремене инфраструктуре за прецизно и поуздано позиционирање и регистровање помјерања. С обзиром да овим истраживањем нису обухваћени сви проблеми перманентног геодетског осматрања, као и да су неки уочени у току истраживања, на крају поглавља су размотрени могући правци даљих истраживања.

2. ГЕОДЕТСКИ МЈЕРНИ СИСТЕМИ ГЕОДЕТСКОГ ОСМАТРАЊА ПОМЈЕРАЊА ОБЈЕКТА

Савремени геодетски мјерни системи за осматрање помјерања објеката, могу се користити као самостални системи осматрања или као дио интегралних система осматрања понашања објеката. Појава роботизованих тоталних станица и ГНСС пријемника високе фреквенције мјерења, револуционарно је промијенила концепт геодетских деформационих мјерења, нудећи могућност регистравања динамичких понашања објеката. Такође, развој ГНСС технологије уопште и прецизних кинематичких метода мјерења донио је нове могућности и концепте осматрања са удаљених локација и ријешо неке од проблема у погледу избора мјеста за стабилизацију тачака и плана мјерења. Развој информатике и сензора, телекомуникационих технологија и роботике омогућио је увезивање геодетских мјерних система у појединачне системе за осматрање или у интегралне системе осматрања, чак и у комбинацији са сензорима других струка.

2.1. ТЕРЕСТРИЧКИ МЈЕРНИ СИСТЕМИ ГЕОДЕТСКОГ ОСМАТРАЊА ПОМЈЕРАЊА ОБЈЕКТА

Историјски посматрано, геодетска деформациона мјерења заснивају се на коришћењу терестричких мјерних система: теодолита, електрооптичких даљиномјера, нивелира, тоталних станица и других мјерних уређаја високе прецизности мјерења [68]. До сада су ове технологије коришћене у концептима конвенционалне деформационе анализе, тј. за осматрање објеката по епохама и одређивање вектора помјерања чија значајност се провјерава тестирањем статистичких хипотеза. Роботизоване тоталне станице са брзим серво моторима и системима за проналазак, визирање и праћење покретног рефлектора, као и дигитални прецизни нивелири са аутоматским фокусирањем и читавањем летве, донијели су могућности примјене терестричких геодетских мјерних система у новом концепту деформационих мјерења, заснованом на перманентном регистравању положаја карактеристичних тачака на објектима који се осматрају.

2.1.1. Роботизоване тоталне станице

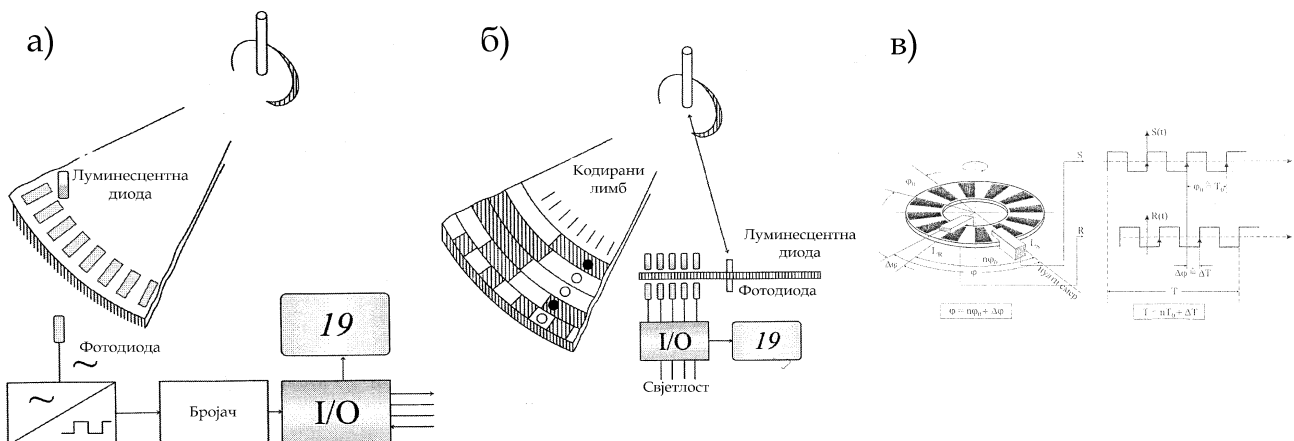
Идеја о примјени савремених геодетских мјерних инструмената на ефикасан начин, подразумијевала је аутоматизацију поступка од тренутка мјерења и регистрације до обраде, анализе и интерпретације. Њено прво потпуно остварење десило се са појавом геодетских тоталних мјерних станица. Геодетске тоталне мјерне станице, у принципу, представљају инструмент у којем су интегрисани: електронски теодолит, даљиномјер (електрооптички или/и ласерски) и рачунар.

Роботизоване тоталне станице (РТС) представљају нову генерацију тоталних мјерних станица које имају могућност аутоматског мјерења основних величина и одређивања координата рефлектора у покрету. Ове тоталне станице имају уграђене серво моторе и уређаје за аутоматско проналажење, визирање и праћење рефлектора, што је основна разлика између РТС и класичних тоталних станица. Почети развоја РТС везују се за осамдесете године прошлог вијека и пројекте *GEOROBOT* и *ТОРОМАТ*, чији концепти и техничка рјешења су значајно утицали на развој РТС, иако примарни циљ ових пројеката није била серијска производња РТС [4]. Прва комерцијална РТС *Geodimeter 4000* појавила се на тржишту 1990. године.

Данас се РТС посматра као мјерни систем оптималних могућности за примјену у пројектима осматрања гдје се очекују мале величине помјерања и висока фреквенција њихове појаве. За остваривање максималних могућности овог мјерног система у конкретним задацима, од кључног значаја је познавање кинематичког понашања РТС.

2.1.1.1. Мјерне величине роботизованих тоталних станица

РТС су геодетски мјерни системи којима се примарно мјере хоризонтални правци (хоризонтални углови), зенитна одстојања (вертикални углови) и косе дужине (просторне дужине), као основне мјерне величине. Из разлике мјерења два правца добија се вриједност угла па се у литератури често каже да се тоталним станицама мјере углови.

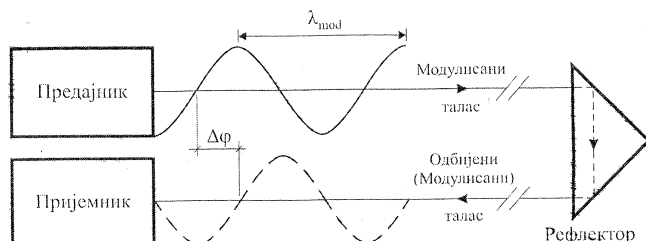


Слика 2-1. Шема инкременталног (а), кодираног (б) и динамичког (в) поступка одређивања праваца [69], [70]

Метода мјерења праваца и углова теодолитима једна је од најстаријих метода. Код електронских теодолита вриједности хоризонталних и вертикалних праваца се принципијелно добијају електронским читавањем кодираних лимбова. То значи да се поступак читавања одвија аутоматски у инструменту, без утицаја оператера, а микроскопи и оптички микрометри су замијењени електронским системима за читавање. Постоје инкрементални, кодирани и динамички поступци читавања (Слика 2-1), који мјерне величине представљају у облику дуалних бројева, а затим се те вриједности претварачима и цифарским јединицама изражавају и показују цифарски. Лимб за мјерење хоризонталних праваца и углова мора бити хоризонталан, што се код савремених РТС постиже помоћу компензатора. О принципима рада електронских теодолита, уређајима за детекцију, читавање и регистрацију угловних мјерења више се може прочитати у [70], [71].

Према сличним принципима, РТС мјере вертикалне и зенитне углове (зенитна одстојања). Геометријски услов који мора бити испуњен при мјерењу зенитних или вертикалних углова је да обртна оса дурбина пролази кроз центар подјеле лимба који мора бити вертикалан. За разлику од уређаја за читавање хоризонталног лимба, индекс за читавање вертикалног лимба мора бити непомичан и увијек на истом мјесту, што се код инструмената нове генерације постиже компензаторима. Такође, помоћу компензатора се код савремених тоталних станица алхидадна осовина доводи у вертикалан положај.

Мјерење дужина РТС сврстава се у групу електронских мјерења дужина. Систем за мјерење дужина електрооптичким фазним даљиномјером (ЕОД), који је интегрални дио РТС, састоји се од извора електричне енергије предајника, рефлектора и пријемника (Слика 2-2). Принцип мјерења косих дужина заснива се на мјерењу времена пута инфрацрвеног електромагнетног таласа генерисаног ласером, а затим модулисаног амплитудском модулацијом како би се добио већи број таласних дужина.



Слика 2-2. Принцип мјерења дужине електрооптичким фазним даљиномјером [70], [72]

носећом фреквенцијом, а фреквенција модулације мјерном фреквенцијом. Фреквенција модулисаног таласа погодна је за технику обраде, а фреквенција основног таласа носача омогућава његов прикладан пролаз кроз ваздух. Пошто се емитује континуални сигнал, сходно закону хармонијских осцилација дужина D се добија као [72]:

$$D = \frac{v}{2\pi f} (N + \Delta\varphi), \quad (2.1)$$

гдје су: v - брзина електромагнетног таласа (свјетлости) у медијуму, f - фреквенција електромагнетног таласа, N - број цијелих таласних дужина дуж мјереног зрака, $\Delta\varphi$ - мјерено фазно кашњење (фазна разлика).

Имајући у виду непозанте величине и принцип одређивања дужине, може се рећи да инструмент за мјерење дужина има следеће основне дијелове: извор свјетлости, осцилатор, предајник, пријемник, мјерач фазе и микропроцесор. Коришћењем дигиталног детектора фазе, мјерни процес се потпуно аутоматизује, при чему се добија резолуција од 10^{-3} до 10^{-4} , што одговара милиметарској тачности. Број N се одређује на више начина, а један од њих је аутоматски примјеном неколико незнатно различитих модулационих фреквенција. О технологијама и поступцима одређивања дужина тоталним станицама, и принципима рада појединих електронских компоненти ЕОД, више се може прочитати у [69], [70].

За мјерење дужина може се користити и видљиви (црвени) ласерски зрак. Он се може емитовати ка било ком предмету, али се након удара у препреку расипа тако да се само мали проценат враћа у инструмент. Због принципа рада, тачност и домет мјерења дужина видљивим ласерским зраком су мање него невидљивим инфрацрвеним. Међутим, предност ласерског мјерења дужина је што та технологија не захтијева коришћење рефлектора.

Сврха рефлектора, који се поставља у вертикали друге тачке мјерене дужине, јесте да прими и врати назад електромагнетне осцилације емитоване у смјеру ка њему од стране предајника који је постављен у вертикали прве тачке (станице) мјерене

дужине. Рефлектори могу бити пасивни и активни. Пасивни рефлектори су врло једноставни уређаји, од којих се најчешће користе призматични рефлектори. Код ове врсте рефлектора задовољен је услов међусобне управности његових страна за рефлектовање сигнала, тако да се рефлектовани сигнал враћа паралелно долазећем сигналу без обзира да ли је рефлектор тачно оријентисан у односу на долазећи сигнал. Призматични рефлектори се из тог разлога конструишу по принципу троструког огледала. При коришћењу рефлектора за мјерење дужина, појављује се адациона константа рефлектора која се сабира са адационом константом електрооптичког даљиномјера и представља једну од обавезних корекција мјерења дужина. Иако су призматични рефлектори врло једноставни уређаји за конструкцију и примјену при мјерењу дужина, постоје двије важне ствари које се морају имати на уму када је у питању њихова примјена. Прво, призматични рефлектори имају недостатак који ограничава домет мјерења дужина ако се они користе као рефлектори сигнала, а то је велико упијање упадног свјетлосног флукса које достиже чак 30%. Најповољније би било када би сав свијетлосни флукс био рефлектован у пријемни оптички систем, али је то у пракси немогуће остварити. Наиме, величина корисног дијела одбијене емитоване осцилације расте са повећањем димензија рефлектора, па би пречник рефлектора требало да буде огромних димензија, што је за практичне радове неостварљиво и неекономично. Проблем се рјешава погодним избором димензија рефлектора, у зависности од домета, а код мјерења већих растојања повећање рефлектујуће површине се остварује постављањем већег броја рефлектора, међусобно повезаних тако да чине једну цјелину. Друго, када се користе призматични рефлектори мора се водити рачуна о њиховој оријентацији (алинирању), на начин да центар рефлектора ипак, у одређеним границама тачности, припада правцу простирања мјерног сигнала.



Слика 2-3. 360° рефлектори

Оријентација универзалних призматичних рефлектора може бити ограничавајући фактор за мјерење дужина при геодетском осматрању помјерања објеката. Проблем се може превазићи коришћењем тзв. 360° рефлектора (Слика 2-3) који се не морају оријентисати јер, теоријски посматрано, увијек враћају сигнал паралелно са улазним снопом. Такође, приликом извођења мјерења цијела стаклена маса рефлектора би требала имати исту температуру. Предња (визирана) страна

призме мора бити очишћена од прашине, а уколико се мјерења изводе при киши и снијегу мора бити заштићена од капљица воде. У току мјерења дужина ЕОД, мора се водити рачуна о константама мјерног система и обавезним поправкама (корекцијама) мјерења које су саставни дио процеса прецизног одређивања дужина. Под овим величинама подразумевају се адациона константа инструмента и рефлектора, вриједност периодичне грешке, мултипликациона константа и метеоролошка поправка (атмосферски параметри и рефракција), које су описане у поглављу 5.

РТС имају могућност аутоматског проналаска, прецизног визирања и праћења рефлектора. Код првих РТС овај процес заснивао се на мјерењу јачине рефлектованог сигнала и проналаску рефлектованог максимума [73]. Међутим, за овај приступ тражио се приближан положај рефлектора, што је било једно од ограничења ове технологије у погледу брзине и могућности проналаска и праћења рефлектора, посебно у условима његовог брзог кретања. Савремене РТС (Табела 2-4) користе CCD (енг. *Charge Coupled Device*) и CMOS (енг. *Complementary Metal-Oxide Semiconductor*) сликовне сензоре за проналазак рефлектора, који имају широко видно поље проналаска рефлектора, без познавања његовог приближног положаја [73]. Након одређивања приближног положаја рефлектора сликовним сензорима, инструменти изводе прецизна мјерења кориговањем вриједности не погађања центра рефлектора. За континуирано праћење рефлектора, РТС су осим ових сензора опремљене софтвером који предвиђа путању рефлектора. Инструмент на основу претходног кретања рефлектора, предвиђа његов положај за одређени временски интервал. Такође, за случај евентуалног прекида праћења и губитка сигнала, развијена су рјешења за брзо скенирање и претраживање околине, заснована на коришћењу истих сензора, с циљем поновног проналаска рефлектора. Претходно описани начини проналаска, визирања и праћења рефлектора, важе у случају коришћења РТС и пасивних рефлектора. Други приступ је коришћење РТС и активних рефлектора. Код овог концепта, активни рефлектори генеришу сигнале које прима РТС, а затим се РТС у кратком тренутку времена наводи на рефлектор и започиње процес мјерења. Предност концепта активних рефлектора је брзина проналаска рефлектора и избјегавање визирања „лажних“ рефлектора у облику рефлектујућих објеката (свјетла, ретровизори и стакла аутомобила; рефлектујући прслуци; и сл.).

Код одређивања положаја рефлектора у покрету примјеном РТС посебно је важна синхронизација рада појединих сензора, јер се мјерења изводе при релативно брзим промјенама положаја пријемника. У том смислу одређивање тренутка мјерења сваким сензором је од посебне важности, јер се различита мјерења могу интерполовати или екстраполовати на заједнички тренутак мјерења. У савременим РТС вријеме читавања основних мјерних величина траје од неколико милисекунди до неколико секунди. Брзина одређивања мјерних величина утиче на прецизност мјерења, што је посебно изражено код одређивања дужина чије мјерење принципијелно траје дуже него мјерење хоризонталних и вертикалних праваца. Такође, када би сви сензори у РТС били покренути у истом временском тренутку грешка синхронизације била би велика. Из тог разлога се појединачни сензори покрећу у различитим тренуцима времена, а затим се резултати мјерења свде на заједнички тренутак.

2.1.1.2. *Извори грешака мјерења роботизованим тоталним станицама*

Исправно одређивање мјерених величина и позиционирање РТС, подразумијева исправност свих интегрисаних мјерних уређаја. За мјерење хоризонталних углова испитује се исправност електронског теодолита у цјелини, испитивањем карактеристика појединих дијелова и управности и паралелности појединих оса.

Опште посматрано, подјела грешака геодетских мјерења по значају подразумијева подјелу у двије групе:

1. грешке од којих зависи тачност мјерења или доминантне грешке (грешке прве групе),
2. грешке које се могу елиминисати или учинити безначајним (грешке друге групе):
 - 2.1. методом мјерења,
 - 2.2. условима при мјерењу,
 - 2.3. условима тачности и
 - 2.4. уношењем поправака.

У Табели 2-1 дат је приказ могућих извора грешака мјерења хоризонталних углова електронским теодолитима, који су интегрални дио РТС.

Табела 2-1. Извори и класификација грешака мјерења хоризонталних углова електронским теодолитима

Извор грешке	Група и/или подгрупа
ексцентрицитет алхидаде	2.1
невертикалност алхидадне осе (угао „i“)	2.3
мртви ход завртња за фино окретање алхидаде	2.1
неуправност обртне осе дурбина на алхидадну осу	2.1
неправилан рад сочива за фокусирање	2.1 (2.2)
колимација	2.1 (2.4)
ексцентрицитет визуре	2.1
ексцентрицитет лимба	2.1
грешке подјеле лимба	1 (2.4)
центрисање теодолита	2.3
нестабилност постоља теодолита	2.2
увијање постоља теодолита	2.2
грешка система детекције електронских теодолита	1 (2.2)
увијање сигнала под утицајем спољашњих услова	2.2
деректификација теодолита под утицајем спољашњих услова	2.2
неједнака освијетљеност сигнала	2.2
рефракција	1
треперење ваздуха	2.2
колебање ваздуха	2.2
центрисање сигнала	2.3
грешка визирана	1
грешка усљед заокруживања читања	1

Одређени извори грешака у претходној табели добијени су анализом методе мјерења прецизним електронским теодолитима уопште, па је потребно додатно размотрити њихов карактер код РТС. Грешке подјеле лимба код тоталних станица се не могу одређивати на стандардни начин, јер код њих нема помјерања лимба у класичном смислу. Наиме, лимб се стално креће, а вриједности праваца се добијају у односу на положај фото-диоде, као аритметичка средина великог броја елементарних финих мјерења у току ротације лимба, што код РТС износи око 0,3 s. На овај начин се грешке подјеле лимба своде на минимум. Такође, код тоталних станица не постоји нула лимба, већ се читање угловне вриједности добија релативно

у односу на неки почетни положај, који је сасвим случајан. Ради елиминације утицаја ексцентрицитета алхидаде детекција се изводи и на дијаметрално супротним дијеловима лимба, са неколико парова детектора. Код тоталних станица постоји могућност аутоматске корекције: нагиба главне осе инструмента преосталог након дјеловања компензатора, ексцентрицитета визуре и хоризонталне колимације. Деректификација инструмента под спољашњим условима је могућа и код РТС, нарочито при промјенама температуре, и може довести до великих грешака мјерења праваца. Највећи утицај се изражава преко промјене колимације и грешака у систему детекције и читавања лимба. Стога се и код РТС мора водити рачуна о температурној адаптацији инструмента и о промјени засићења ваздуха воденом паром. Додатно, одређени извори грешака се другачије третирају код РТС у односу на класичне тоталне станице, имајући у виду да се ови мјерни системи разликују према начину визирања сигнала (рефлектора). Иако код РТС практично не постоји потреба контакта оператера са мјерним инструментом, грешка визирања ипак постоји и њена величина зависи од тачности технологије аутоматског визирања рефлектора.

Све што је о електронском теодолиту у РТС за мјерење хоризонталних праваца и његовим грешкама речено у претходном дијелу, принципијелно важи и при мјерењу зенитних и вертикалних углова. У Табели 2-2 приказани су извори грешака и њихова класификација према значају.

Табела 2-2. Извори и класификација грешака мјерења зенитних и вертикалних углова електронским теодолитима

Извор грешке	Група и/или подгрупа
грешка подјеле вертикалног лимба	1 (2.4)
вертикална колимација	2.1 (2.4)
нестабилност индекса за читање вертикалног лимба	2.3
ексцентрицитет вертикалног лимба	2.1
грешке система детекције електронских теодолита	1 (2.2)
деректификација теодолита под утицајем спољашњих услова	2.2
грешке израде сигнала за визирање	2.3
грешка визирања	1
вертикална рефракција	1
треперење ваздуха	2.2
колебање ваздуха	2.2
смањена видљивост и јасноћа ликова	2.2

Аналогно колимацији код хоризонталних углова, код зенитних и вертикалних углова имамо вертикалну колимацију, која се код РТС такође може аутоматски кориговати. Међутим, вертикална колимација се мијења са температурним промјенама дијелова инструмента, с тога се она мора одређивати у одређеним временским интервалима и уносити као поправка. Међутим, аутоматско увођење поправки исправно је у случају када су систематске грешке непромјенљиве у току мјерења, па је због непознавања понашања систематских грешака електронске теодолите потребно често контролисати [70].

У Табели 2-3 приказани су извори грешака мјерења дужина електрооптичким даљиномјерима и њихова класификација према значају.

Табела 2-3. Извори и класификација грешака мјерења дужина електрооптичким фазним даљинимјерима

Извор грешке	Група и/или подгрупа
грешка одређивања брзине свјетлости у ваздуху	1
грешка мјерне фреквенције (грешка мултипликационе константе)	1
промјена фреквенције током времена	2.4
грешка одређивања адиционе константе	2.4
грешка одређивања атмосферске поправке	2.4
периодична грешка	1; 2.1; 2.4
рефлексија сигнала	2.2
грешка центрисања инструмента и рефлектора	2.3
грешка индекса преламања	2.4
случајна грешка мјерења разлике фаза	1
грешка усљед недовољне јачине сигнала	2.2
грешка усљед недовољног напона батерије	2.2
грешка усљед нетачног визирања рефлектора	2.2
грешка оријентације рефлектора	2.3
грешка усљед непоклапања обртне осе дурбина и центра емитовања	2.4
грешка читања	1
грешка усљед заокруживања читања	1

Један од додатних извора грешака који оптерећује мјерења РТС је појава динамичког шума. Динамички шум је посљедица нестабилности фреквенције опажања. Најчешће се отклања софтверским поступком, регистровањем мјерења са резолуцијом од стотог дијела секунде и одбацивањем максималних вриједности осцилација или чак цијелих циклуса мјерења [74].

Потенцијални извори грешака мјерења РТС, који се могу појавити и који се посебно морају узети у обзир при пројектовању геодетског осматрања помјерања објеката су [2], [75]:

- утицај типа (обични призматични рефлектори, 360 призме, рефлектујуће маркице), оријентације и стабилности рефлектора на прецизност позиционирања,
- несинхронизованост мјерења угла и дужине, као и кашњење и празан ход између два мјерења,
- промјена климатских услова дуж путање електромагнетног таласа или ласерског зрака,
- могућност појаве рефлектујућих објеката на правцима планираних мјерења, итд.

2.1.1.3. Методе позиционирања роботизованим тоталним станицама

За мјерење хоризонталних праваца и углова развијено је и у геодетској литератури описано неколико метода. Најпознатије и најчешће коришћене су проста и гирусна метода. Мјерењем, и равномјерним опажањем тачака у кратком временском интервалу у два положаја дурбина и гирусном методом елиминишу се одређени извори грешака. Када се врше угловна мјерења у мрежама за осматрање помјерања објеката, најчешће се користи гирусна метода којом се због економичности и

скраћења времена мјерења опажају правци. Гирусна метода у својој пуној дефиницији се може користити код осматрања помјерања објеката у статичком режиму, тј. када вријеме читавања вриједности, условно речено, није ограничено. Читав процес се уз коришћење РТС може потпуно аутоматизовати. Међутим, мјерење вриједности праваца РТС при осматрању динамичког понашања објеката изводи се најчешће без прекида и у једном положају дурбина. Мјерење хоризонталних праваца само у првом положају дурбина назива се простом методом. Ове чињенице се морају узети у обзир при дефинисању методе и оцјене тачности мјерења за осматрање помјерања објеката, јер су мјерења праваца у једном положају дурбина оптерећена грешкама које настају због неиспуњења услова или због грешака у конструкцији инструмента. На основу резултата мјерења хоризонталних праваца и углова могу се одређивати хоризонтална помјерања објеката.

Оцјена тачности мјерења хоризонталних праваца и углова зависи од извора грешака прве врсте. Изрази се изводе у зависности од начина и методе мјерења, а приказани су у поглављу 5. Горња граница тачности мјерења, која зависи од дужине визуре, се добија када је број мјерења максималан, а грешке радне мјере, центрисања инструмента и сигнала, рефракције и треперења ваздуха минималне. С обзиром да је практично неизводљиво и економски неоправдано извршити велики број мјерења једне величине, изводи се оптималан број мјерења на основу кога се добија практична горња граница тачности мјерења хоризонталних праваца и углова. Доња граница тачности или најмања тачност постиже се када је број мјерења $n=1$ и под претпоставком да се мјерења изводе када постоји треперење ваздуха. Произвођачи РТС, умјесто компоненти дисперзија, односно релативних грешака, у спецификацијама инструмента дају средње, тј. стандардне грешке мјерења углова. Вриједности ових грешака које се могу остварити савременим РТС за осматрање помјерања објеката приказане су у *Табели 2-4*.

Зенитни односно вертикални углови мјере се у циљу одређивања висинских разлика, па се може рећи да њихово мјерење служи за одређивање вертикалних помјерања објеката. Слично као код хоризонталних праваца и углова, зенитни и вертикални углови могу се мјерити простом и гирусном методом. Разрада методе мјерења и оцјена тачности мјерења зенитних и вертикалних углова разматра се најчешће у оквиру њихове примјене за одређивање висинских разлика по методи тригонометријског нивелмана. Тачност њиховог мјерења, која се може остварити савременим РТС, је најчешће иста као и за хоризонталне правце и углове и приказана је у *Табели 2-4*.

ЕОД мјере се дужине између двије тачке на површи Земље. На једној тачки се центрише и хоризонтише инструмент, а на другој рефлектор тако да се мјери растојање од прекрета дурбина до референтне тачке рефлектора. Овако косо измјерена дужина (просторна дужина) се попрваља за атмосферске услове, адициону и мултипликациону константу, по потреби се редукује у раван пројекције, и користи за одређивање хоризонталног и вертикалног помјерања објеката.

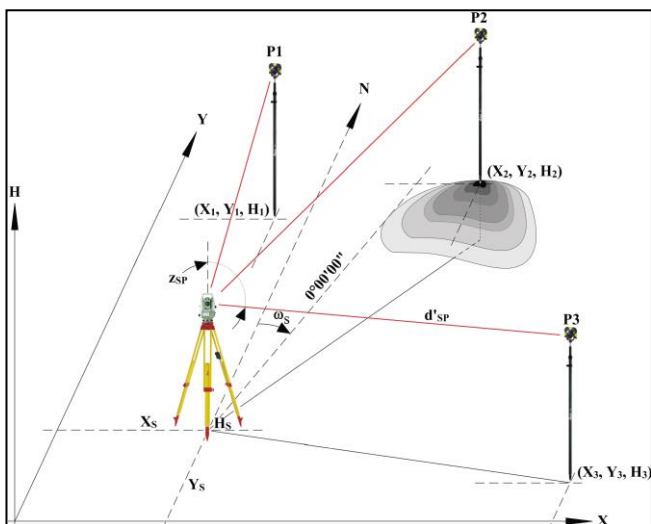
Максималан домет ЕОД при коме се могу добити сигурни резултати мјерења дужина једна је од основних карактеристика даљиномјера. До одступања свјетлосног таласа од праволинијске путање простирања долази због промјена у средини простирања. Узроци промјена могу бити појава или постојање водене паре, угљеника и других примјеса у атмосфери, што изазива велико упијање енергије и

слабљење таласа. Може се рећи да домет ЕОД зависи од густоће предајником емитоване енергије, осјетљивости пријемног уређаја, величине и квалитета рефлектора и од метеоролошких прилика дуж мјерне линије. Такође, истраживањима је утврђено да је један од битних параметара који утичу на радни домет даљиномјера, треперење ваздуха [69].

Горњу границу тачности мјерења за велике дужине одређује тачност одређивања брзине свјетлости у ваздуху, а за врло мале дужине периодична грешка фазе и грешке центрисања инструмента и рефлектора. Међутим, умјесто компоненти дисперзија, односно релативних грешака појединачних извора, у литератури и спецификацијама произвођача ЕОД даје се средња, тј. стандардна грешка мјерења дужине D у облику:

$$\sigma_D = (\sigma' + \sigma''D) \text{ mm}; \quad (D \text{ u km}). \quad (2.2)$$

Може се примјетити да је у претходном изразу један дио средње грешке константан и не зависи од дужине (σ') и други који је сразмјеран дужини (σ''). Више о моделовању грешака мјерења дужине је написано у поглављу 5.



Слика 2-4. Позиционирање тоталним станицама у 3Д координатном систему [314]

Мјерења хоризонталних и вертикалних праваца и дужина користе се за позиционирање у хоризонталној и вертикалној равни, а комбиновањем ове двије компоненте може се добити и просторна позиција тачке (Слика 2-4). Посматрано из угла геодетског осматрања помјерања објекта може се рећи да РТС одређују позиције и помјерања у 1Д, 2Д и 3Д координатним системима. Хоризонталне позиције тачака одређују се на основу мјерења хоризонталних праваца, углова и дужина примјеном неке од добро познатих метода класичног геодетског позиционирања: поларне методе, пресецања праваца или дужина, итд. На

основу мјерења зенитних или вертикалних углова и дужина, рачунају се висинске разлике по методи тригонометријског нивелмана. За одређивање укупне висинске разлике по овој методи мјере се висина инструмента и висина сигнала. Тачност позиционирања поменутих методама зависи од тачности мјерених величина које се користе за рачунање, а њихов утицај се моделује према закону о преносу грешака.

Тачност мјерења хоризонталних праваца се на позицију тачке у хоризонталној равни манифестује тангенцијално у односу на вектор опажања, док тачност мјерења дужина има утицај по правцу вектора опажања. Помјерања карактеристичних тачака објекта се примјеном РТС могу одредити са тачношћу мањом од 1 cm, ако су основне особине мјерног система познате и прилагођене конкретним теренским условима [75]. За остваривање тачности регистровања помјерања од неколико милиметара морају се додатно узети у обзир и моделовати сви фактори који у конкретним условима утичу на тачност регистровања помјерања [76]. На тачност

одређивања висинских разлика тригонометријским нивелманом највише утиче тачност мјерења зенитних односно вертикалних углова.

Највећа грешка у тригонометријском нивелману је последица дјеловања вертикалне рефракције [77]. Да би се елиминисао, односно минимизирао њен утицај, прецизно одређивање висинских разлика по методи тригонометријског нивелмана се може изводити њиховим истовременим обостраним одређивањем. Такође, да би се елиминисао утицај грешке одређивања висине инструмента, метода једностраног одређивања се модификује и изводи као тригонометријски нивелман из средине [2]. При једностраном одређивању висинских разлика тригонометријским нивелманом мјерењем вертикалних или зенитних углова у једном положају дурбина, мора се водити рачуна о вертикалној колимацији. Наиме, ако вертикална колимација постоји она се директно преноси на резултате мјерења. Може се отклањати уношењем поправака које се одређују са одређеном грешком, што се такође мора узети у обзир. Како је већ напоменуто, вриједност вертикалне колимације се може мијењати са промјеном температуре. Горња граница тачности методе тригонометријског нивелмана, чак и испод 1 mm, добија се при: максималној стабилности атмосферских услова, минималној рефракцији, максималној тачности мјерења зенитних или вертикалних углова, дужина, висине инструмента и сигнала и приближно хоризонталним визурама [70][2][2]. Више о моделима оцјена мјерених величина РТС, позиција тачака и оцјени тачности позиционирања поменутих методама дато је у поглављу 5.

Примјеном РТС може се одређивати положај рефлектора у покрету. Такав поступак у литератури се назива кинематичком методом позиционирања. Ова могућност чини РТС неизоставним дијелом система за осматрање инжењерских објеката. Уз комбиновање РТС, и њихових могућности са другим мјерним системима и методама, могу се добити важне информације о стању објеката у динамичком режиму [39], [75], [78]–[82].




2.1.1.4. *Кратак приказ роботизованих тоталних станицама*

РТС представљају основне мјерне системе за перманентно геодетско осматрање помјерања објеката у рјешењима за мониторинг већине водећих произвођача геодетске опреме. Принципи рада, методе позиционирања и могућност аутоматизације радног процеса чине их јединственим системима за одређивање помјерања, са одређеном тачношћу, у 3Д координатним системима. У Табели 2-4 приказане су посљедње генерације РТС водећих произвођача, опремљене технологијом за аутоматско проналажење, визирање и праћење рефлектора.

2.1.2. **Дигитални прецизни нивелири**

Посљедњих двадесетак година масовно се производе аутоматизовани геодетски инструменти са уграђеном електроником и софтверима који преузимају скоро све функције за одређивање мјерних величина и у великој мјери замјењују оператере и записничаре. Откриће дигиталних нивелира почетком деведесетих година прошлога вијека донијело је потпуно нову еру нивелманских радова. Нивелири нове генерације опремљени су квалитетним и прецизним оптичким и механичким системима, израђеним од савремених материјала и са врхунским електронским технологијама, а софистицирани софтвери прилагођени су корисницима и слични су као код роботизованих тоталних станица.

Табела 2-4. Карактеристике савремених роботизованих тоталних станица за осматрање

Прозвоач и тип инструмента											
Карактеристике	Leica Nova TM50			Trimble S9 / S9 HP			Sokkia NET05AXII; Topcon MS05AXII				
Угловна мјерења											
Метода / тачност	апсолутна, континуирано			апсолутна, читање на дијаметралним мјестима			апсолутна, читање на дијаметралним мјестима				
	0,5 " или 1 "			0,5 " или 1 "			0,5 "				
Мјерење дужина											
Домет	призматични рефлектор	стандарна призма	1,5 m до 3 500 m	призматични рефлектор	DR Plus	0,2 m до 5 500 m (Long Range модул)	призматични рефлектор	1,3 m до 3 500 m			
		360° призма	1,5 m до 2 000 m		DR HP	1,5 m до 7 000 m (Long Range модул)					
	без рефлектора / било која површина		1,5 m до 1000 m		без рефлектора / било која површина	DR Plus	1 m до 2 200 m (Extended Range модул)	рефлектујућа маркица	1,3 m до 200 m		
						DR HP	1,5 m до 150 m	без рефлектора / било која површина			0,5 m до 100 m
Тачност / вријеме мјерења	призматични рефлектор		0.6 mm + 1ppm / 2,4 s		призматични рефлектор	DR Plus	2 mm + 2 ppm / 1,2 s	призматични рефлектор	0,8 mm + 1 ppm / 1,5 s		
						DR HP	1 mm + 1 ppm / 3 s				
	без рефлектора / било која површина		2 mm + 2 ppm / 3 s		без рефлектора / било која површина	DR Plus	2 mm + 2ppm / 1 s - 5 s	рефлектујућа маркица	0,5 mm + 1 ppm		
						DR HP	3 mm + 2 ppm / 3 s - 15 s	без рефлектора / било која површина			1 mm + 1 ppm
Технологија	System Analyser			DR (Direct Reflex) Plus, DR HP (High Precision), Extended и Long Range Mode			Ласер класа 1R				
Моторизација											
Директни погон	Piezo технологија			MagDrive технологија			DC моторима				
	брзина ротације max. 180 °/s			брзина ротације max. 115 °/s			Брзина рот. max. 85/s				
Аутоматско проналажење, визирање и праћење рефлектора											
Домет	пасивни призматични рефлектор		3 000 m	пасивни призматични рефлектор		до 700 m	пасивни призматични рефлектор		1,3 m до 1 000 m		
	пасивни 360° рефлектор		1 500 m		MultiTrack модул		до 800 m	рефлектујућа маркица		5 m до 50 m	
					активни 360 рефлектор		до 500 m	аутоматско праћење пасивног 360° рефлектора		2 m до 600 m	
Тачност / вријеме мјерења	0,5 " или 1 " / од 3 s до 4 s			< 2 mm на 200 m / од 2 s до 10 s			пасивни призматични рефлектор		1 " (1 mm на 200 m)		
							рефлектујућа маркица		1 mm на 50 m		
Технологија	Automatic Target Recognition (ATR): Power Search, Auto Aiming, Target Lock			FineLock, Long Range FineLock, AutoLock			Auto-Pointing, Auto-Tracking				
Радно окружење											
Интерфејси	RS232, USB, Bluetooth, WLAN			RS232, USB, Bluetooth			RS232, USB, Bluetooth				
Радни опсег	од - 20 °C до + 50 °C			од - 20 °C до + 50 °C			од - 20 °C до + 50 °C				
Отпорност на прашину, воду и влажност	да, 95 % (без кондензације)			да, 100% (са кондензацијом)			да, 95% (без кондензације)				

Дигитални прецизни нивелири (ДПН) аутоматски су мјерни уређаји са интегрисаним системима дигиталне обраде слика, који омогућавају читавање специјалних нивелманских летава са бар-код подјелом. Основна предност ових нивелира у односу на класичне прецизне нивелире је што су све грешке оператера при мануелном читавању летве минимизирани.

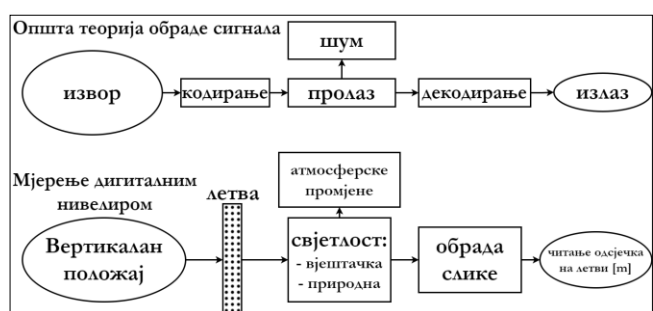
Претечом свих дигиталних нивелира сматрају се радови и унапрјеђења проф. Zetsche-а (Бон) из 1966. године. Он је развио идеју да се реална слика подјеле летве упоређује се њеном умањеном сликом која се налази у равни фокуса. Међутим, због недостатка адекватне електронике, ова идеја није била практично спроводљива све до раних осамдесетих година.

Тада се појављују први CCD сензори и микропроцесори побољшаних перформанси чиме је отворен пут изузетно доброј обради слике. Од комерцијалних произвођача опреме, развојем ове технологије прва се почела бавити компанија *Wild* (данашња *Leica*). Са историјског аспекта важно је поменути и рад истраживача са Техничког универзитета у Дрездену и компаније *Carl Zeiss* из Јене у Њемачкој. Они су од 1982. године до 1988. године развијали дигитални нивелир на бази нивелира *Zeiss NI002* и линеарног CCD низа. *Neues technikum Buchs* из Швајцарске је 1987. године представио развој дигиталног нивелира, који је и поред софистициране оптике имао ограничен опсег мјерења на удаљености од 20 m до 30 m.

Сва техничка побољшања која су се временом дешавала учинила су најпрецизнију методу одређивања 1Д положаја и вертикалних помјерања још једноставнијом и бржом у смислу њеног теренског спровођења. Захваљујући могућности аутоматског читавања и регистровања мјерења, вријеме извођења читавања и укупног мјерења је много краће. Искусвени подаци говоре да се при раду са дигиталним нивелирима остварује уштеда и до 50% времена у поређењу са класичним нивелирима.

2.1.2.1. Мјерне величине дигиталних прецизних нивелира

Дигитални прецизни нивелири мјере и региструју одсјечак подјеле на летви и дужину до летве, као основне мјерне величине. Принципијелно, дигиталним прецизним нивелирима мјере се исте величине као и класичним прецизним нивелирима, само што је поступак мјерења дјелимично или потпуно аутоматизован. Може се рећи да CCD камера замјењује оператера и оптички микрометар, а софтвер у инструменту замјењује записничара.



Слика 2-5. Принцип мјерења дигиталним нивелирима [69]

Мјерни систем састоји се од оптике, камере, компензатора, кодиране летве и софтвера за управљање радом нивелира. Бар-кодна подјела летве наноси се према правилима јединственим за сваког произвођача, а њена слика смјештена је у софтверу инструмента и служи као референтни сигнал. Приликом мјерења, дио летве који се види у видном пољу дурбина изнад и испод хоризонталне визуре снима се декодером (CCD камера) као мјерни сигнал. Затим се мјерни сигнал

(снимљени дио летве) упоређује са референтним (слика цијеле летве у меморији инструмента), а као резултат се добија читање одсјечка подјеле на летви и хоризонтална дужина. Процес читања одсјечка на кодираној летви може се описати теоријом преноса информација између двије позиције, што је у овом случају одређивање позиције на бар-код подјели вертикалне летве (Слика 2-5). Више о принципу рада пријемне јединице, анализи сигнала, обради слике и корелационој анализи може се прочитати у [69]. Сваки произвођач инструмента има разрађен и јединствен поступак читавања и обраде података. Резултати мјерења региструју се у интерну рачунарску меморију инструмента или се комуникационим технологијама прослеђују на удаљене меморијске уређаје.

Као и код мјерења класичним нивелирима, основни је услов да летва стоји вертикално и управно на визуру (нису пожељна ротирања). Такође, приликом извођења мјерења важан је и ниво освијетљености летве, јер је сензор за читавање осјетљив на видљиву свјетлост. Да би се минимизирале грешке читавања подјеле летве, слично као код класичних нивелира, дигиталним нивелирима се кодирана подјела читава на више мјеста (више линија у видном пољу) за свако читање одсјечка. Такође, да би се избјегле промјене подјеле летве услед атмосферских и других ефеката средине, или услед старења материјала, како и код класичних прецизних нивелира, бар-код подјела наноси се на инварску траку.

Ефикасност и поузданост процеса одређивања одсјечка на летви код дигиталних нивелира зависи и од кодирања подјеле на летви. Поред поменутих основних услова који морају бити испуњени за мјерење дигиталним нивелирима, постоји неколико геометријских услова чисто везаних за бар-код подјелу, а то су: подјела треба имати особину псеудослучајног низа, контраст на ивицама низа мора бити изражен и подјела мора бити једнозначна на цијелој дужини летве за посматрање са удаљености до 100 m. Произвођачи инструмента су развили посебне бар-код подјеле на летвама за дигиталне нивелире, тако да се њихова пројекција у инструменту добија без превише скупе оптике. Сваки произвођач има свој јединствен бар-код и методу обраде, а свима им је заједничко да се преко линеарног CCD низа из сликовног записа преводе у информације о положају. Контраст бар-код подјеле остварује се оштрим ивицама сегмената бар-кода и преласком са црних на свијетла (бијела или жута) поља. Јасна видљивост сегмента бар-код подјеле који се посматра (фино подешавање размјере) остварује се оптиком за фокусирање.

2.1.2.2. *Извори грешака мјерења дигиталним прецизним нивелирима*

Приликом читавања одсјечка на летви нивелир мора да успостави хоризонталну раван кроз пресјек хоризонталне и вертикалне осе нивелира на нивелманској станици. Могло би се рећи да је нивелир инструмент помоћу кога се одржава константни вертикални угао 0° , односно зенитно одстојање 90° . Ако је испуњен претходни услов, могу се читавати одсјечци на летвама и рачунати висинска разлика између тачака на којима се летве налазе. Тачност одређивања одсјечка на летвама, а посредно и тачност одређивања висинске разлике, зависе првенствено од исправности инструмента и летава (испуњености одређених теоријских услова). Такође, извори грешака могу бити и посљедица начина постављања инструмента и летава, спољашњих услова и рада оператера.

Класични прецизни нивелири били су већином оптичко-механички склопови, једноставнији за разумијевање принципа рада, а неисправност је лакше уочавана и исправљана. Данашњи нивелири се израђују са компензаторима и електронским компонентама које чине окосницу рада дигиталних прецизних нивелира. Самим тим је испитивање, ректификација и метролошко обезбијеђење нових нивелира много сложеније него код класичних нивелира. Имајући у виду да је цијена инструмената висока, да конструкцију и механичку израду инструмената познају произвођачи, испитивање нивелира прије изласка на тржиште врше произвођачи и овлашћене лабораторије, а ректификацију и поправке овлашћени сервисери. Корисницима је омогућено испитивање одређених услова, а дјелимична ректификација се спроводи софтверским путем. Корисници дигиталних нивелира, готово да немају могућност њихове механичке ректификације.

Сви дигитални нивелири раде на природној видљивој свјетлости, па у процесу одређивања одсјечка на летви морају бити идентификовани и отклоњени првенствено различити утицаји који могу изазвати случајне промјене електричног сигнала (мјерни шум). У Табели 2-5 дат је преглед могућих утицаја и њихових ефеката на процес мјерења дигиталним прецизним нивелирима.

Табела 2-5. Утицаји и могући ефекти на мјерења дигиталним нивелирима

Утицај	Могући ефекат
Освијетљеност	различит интензитет освијетљености природним свијетлом (промјена односа сигнал-шум); нехомоген интензитет свјетлости због сјенке на летви; карактеристике спектра извора свјетлости
Атмосферски утицај	појава турбуленција (замагљена слика, већи однос сигнал-шум); рефракција (одступања визуре од праволинијског сигнала)
Механички утицај	вибрације; ректификација инструмента и летве; постављање и нагнутост летве
Особине инструмента	термални ефекти; интерференција величине бар-код и пиксела; рад компензатора

У литератури из геодетске метрологије може се наћи класификација и детаљан опис извора грешака који се могу јавити приликом мјерења висинских разлика прецизним нивелирима по методи геометријског нивелмана.

У Табели 2-6 дат је приказ извора грешака мјерења висинских разлика дигиталним нивелирима које утичу на укупну грешку мјерене висинске разлике, са класификацијом по значају. Основна разлика у изворима грешака класичних и дигиталних нивелира је у грешкама оптичког микрометра и изворима везаним за визирање летве.

Табела 2-6. Извори и класификација грешака мјерења висинских разлика дигиталним нивелирима [69], [70]

Извор грешке	Група и/или подгрупа
грешка успостављања визуре (примјеном компензатора)	1
нехоризонталност визуре	2.1 (2.3)
неправилан ход сочива за фокусирање	2.1 (2.3)
невертикалност главне осе нивелира	2.3
грешка подјеле летве	1 (2.4)
грешка средњег метра пара летава	1 (2.4)
грешка одређивања температурног коефицијента ширења летве	2.4
адациона константа летве	2.1 (2.4)
непоклапање нултих подионих цртица летве	2.1 (2.4)
грешка обраде пете летве	2.1
ексцентритет тачке ослонца летве	2.1
промјена дужине пантљике летве услјед промјене силе затезања	2.3
савијеност летве	2.3
невертикалност летве	2.3
неједнака освијетљеност летве	2.2
вертикално помјерање статива	2.1
вертикално помјерање подметача за летву	2.1
вертикално помјерање визуре услјед промјене мјеста опажача	2.1
вибрирање терена	2.2
скретање вертикале услјед привлачног дејства Сунца и Мјесеца	2.4
промјена угла i под утицајем температурних промјена	2.3
промјена дужине пантљике летве под утицајем температурних промјена	1 (2.4)
увијање статива	2.2
случајна рефлексија	1
треперење ваздуха	2.2
замућеност и колебање ваздуха	2.2
вјетар	2.2
случајна грешка визирана	1
заокруживање читања	1

Теорија метролошког обезбјеђења мјерења висинских разлика прецизним нивелирима од раније је позната и доступна у литератури, па су у наставку наведене неке специфичности везане за дигиталне прецизне нивелире. Са новом технологијом израде и читавања нивелманских летава, појавили су се неки нови извори грешака који се већином односе на могућност читавања подјеле на летви.

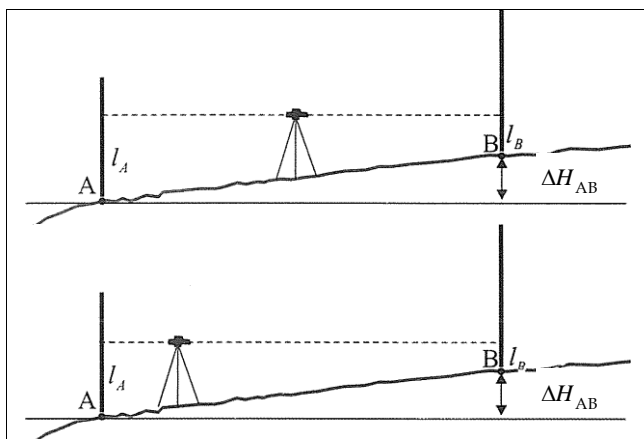
Утицај неједнаке освијетљености летве се код дигиталних нивелира третира другачије него код класичних нивелира. Наиме, за читање подјеле летве дигиталним нивелиром, потребна је далеко мања количина свјетлости. То значи да дигитални нивелири могу подјелу летве читати у границама тачности мјерења и у условима врло неповољним за читање људским оком [69]. Међутим, два случаја су специфична када је у питању освјетљење летве о којим се мора водити рачуна у прецизним радовима. Први случај је прејако освјетљење (природно и вјештачко) које може онемогућити читање подјеле летве или изазвати грубу грешку у читању. Други случај је када летва није освијетљена монохроматском свјетлошћу или када се мијешају сунчева и вјештачка свјетлост. Посљедица може бити појава грубих

грешака у резултатима читања. У оба сучаја, појава грешака елиминише се условима при мјерењу, тако што се летве штите од прејаког и неједнаког освјетљења, а у случају вјештачког освјетљавања се користи адекватан извор монохроматске свјетлости. Утицај угла освјетљавања подјеле летве на грешку читавања је могући извор грешака који долази до изражаја када се при мјерењу висинских разлика мора користити вјештачки извор свјетлости. На основу спроведених истраживања, препоруке су да се вјештачко освјетљавање подјеле на летви монохроматском свјетлошћу врши под правим углом.

Један од извора грешака може бити и фокусирање. Дигитални нивелири могу читати подјелу летве и када она није добро фокусирана, што може изазвати значајне грешке у резултатима читања. Овај извор грешака се отклања условима при мјерењу, што значи да се летва мора фокусирати прије читавања. О овом извору грешака се посебно мора водити рачуна код примјене дигиталних прецизних нивелира најновије генерације, јер су они опремљени системима за аутоматско фокусирање. Уколико је подјела летве оштећена, било црна поља бар-кода или основа подјеле, могу се појавити грешке читања подјеле. Овај извор узрокује грешке читања подјеле са удаљености већих од 5 m и у случајевима када је оштећење у средини видног поља. У осталим случајевима је занемарљив. Читање подјеле на почетку или на крају летве може код дигиталних нивелира изазвати значајну грешку читавања летве. Грешка се елиминише постављањем услова при мјерењу, тако што се за сваког произвођача летава може срачунати корисна површина изван које се не читава одсјечак на летви. Код дигиталних нивелира се фотографисањем летве добија растерска слика летве. Том приликом се елемент бар-кода пројектује на CCD сензор дигиталног нивелира као цијели број пиксела. Растојања инструмента и летве на којима елемент бар-кода мијења своју величину, односно цијели број пиксела на које се пројектује, називају се критичним растојањима. На овим растојањима се може десити да инструмент даје резултате мање тачности. Овај извор грешака се елиминише постављањем услова да се не читавају одсјечци на летвама са критичних удаљености. Грешка снимања подјеле летве сензорима CCD камере манифестује се као грешка размјере слике подјеле летве која се упоређује са референтном сликом у нивелиру. Испитивањем се може одредити несагласност размјера двију слика и уносити као поправка у мјерења. Експерименталним истраживањима је утврђено да је утицај ове грешке у укупној грешци мјерења практично безначајан, па се у разматрању методе мјерења сматра занемарљивом грешком [70]. Међутим, овај извор грешака се мора имати у виду јер са старошћу CCD сензора неједнакост двију размјера се мијења.

Даљим развојем технологије и софтвера очекује се да ће поједини извори грешака бити успјешно елиминисани или учињени безначајним у односу на тачност нивелања. Карактер и дејство грешака одређивања висинске разлике услијед различитих извора може бити случајан и систематски, а њихово моделовање је приказано у поглављу 5.

2.1.2.3. Методе позиционирања дигиталним прецизним нивелирима



Слика 2-6. Одређивање висинских разлика геометријским нивелманом из средине (горе) и с краја (доље)

Дигитални прецизни нивелири уз припадајуће летве и прибор користе се за високо прецизно одређивање висинских разлика између тачака, односно високо прецизно 1Д позиционирање (Слика 2-6). Из разлике очитаних одсјечака рачуна се висинска разлика по формули:

$$\Delta H_{AB} = l_a - l_b \text{ или } \Delta H_{BA} = l_b - l_a \quad (2.3)$$

гдје су l_a и l_b вриједности одсјечака подјела на летвама изнад тачака А и В. За потребе осматрања помјерања објеката по методама конвенционалне

деформационе анализе, у пасивним геодетским 1Д мрежама, висинске разлике се одређују прецизним нивелманом, а у изузетним случајевима, уколико су захтјеви тачности високи, висинске разлике се могу одређивати и по принципима нивелмана високе тачности. Такође, у овим случајевима морају се узети у обзир и теоријске поставке физичке геодезије и законитости које важе за геодетске системе висина [70]. За перманентно геодетско осматрање вертикалних помјерања у контексту активних геодетских мрежа, геометријски нивелман се посматра са становишта одређивања висинских разлика непомичним инструментом у оквиру једне исте станице.

Горња граница тачности мјерења висинских разлика би се добила кад би број мјерења био бесконачан, а вриједност грешке била би нула. Пошто је то практично немогуће остварити, уводи се појам практичне горње границе тачности одређивања висинске разлике. У овом случају, грешка мјерења висинске разлике у функцији је од дужине визуре, а вриједности које се могу остварити приказане су у Табели 2-7.

Табела 2-7. Практична горња граница тачности мјерења висинских разлика на станици [69]

d [m]	5	10	20	30	50
$\sigma_{\Delta h} \pm$ [mm]	0,008	0,010	0,016	0,023	0,038

Доња граница тачности мјерења или најмања тачност постиже се када је број мјерења минималан, грешка очитавања максимална (треперење ваздуха при очитавању) и када је разлика температуре при мјерењу и еталонирању летава 30 °С. У том случају грешка мјерења висинске разлике је у функцији дужине визуре и вриједности висинске разлике на станици. Нумеричке вриједности које се добију прорачуном приказане су у Табели 2-8. Вриједности практичне горње и доње границе тачности мјерења висинских разлика на станици дигиталним прецизним нивелирима својеврсне су референтне вриједности за област геодетског осматрања помјерања објеката примјеном ове технологије.

Границе тачности мјерења висински разлика на једној станици посебно су важне за област перманентног осматрања и регистровања динамичких помјерања, имајући у виду да се у том случају инструмент практично не помјера за вријеме осматрања, чиме се вриједност помјерања карактеристичне тачке одређује као разлика

очитаних одсјечака на једној истој летви, односно помјерање је висинска разлика која се одређује између релативно блиских тачака.

Табела 2-8. Доња граница тачности мјерења висинских разлика на станици [69]

Δh [m]	d [m]	5	10	20	30	50
		$\sigma_{\Delta h} \pm$ [mm]				
0		0,015	0,021	0,035	0,050	0,082
1		0,036	0,038	0,048	0,060	0,089
2		0,066	0,068	0,073	0,082	0,105

Дигитални прецизни нивелири од самог почетка њиховог развоја нашли су примјену у пројектима геодетског осматрања објеката. Њихове могућности су слично као и код тоталних станица, осим за самостално геодетско осматрање испитиване у експериментима интегралног осматрања стања мостова, високих зграда и других објеката [7], [83], [84]. Такође, посебно актуелна су истраживања могућности њихове примјене за аутоматизовано регистровање положаја летве и утицајима атмосферских промјена на могућност перманентног осматрања овим мјерним системима [64]. Овакве могућности биће вишеструко корисне у области осматрања темеља зграда, осматрања тунела у изградњи и експлоатацији, осматрања у току ињектирања, осматрања при испитивању мостовских и других конструкција, итд.

2.1.2.4. Кратак приказ дигиталних прецизних нивелира

Дигитални прецизни нивелири нове генерације опремљени су врхунском оптиком, електронским системима и софтверима, а неријетко је процес читавања бар-код подјеле на летви потпуно аутоматизован захваљујући технологијама аутоматског фокусирања подјеле (Слика 2-7).



Слика 2-7. Технологија аутоматског фокусирања: Leica (а), Sokkia (б)

У Табели 2-9 дат је приказ и поређење посљедњих генерација дигиталних прецизних нивелира водећих произвођача геодетске опреме, опремљених управо технологијом аутоматског фокусирања. Интегрисана технологија за аутоматско фокусирање осим брзог визирања подјеле врши и аутоматско подешавање контраста чиме се додатно побољшава тачност читања одсјечка подјеле на летви.

Табела 2-9. Карактеристике савремених дигиталних прецизних нивелира са аутоматским фокусирањем

Произвођач и тип инструмента		
Карактеристике	Leica LS15	Sokkia SDL1X
Мјерење висинских разлика		
Тачност мјерења висинске разлике (1 km; напријед-назад; инварске летве)	0,2 mm; 0,3 mm	0,2 mm; 0,3 mm
Мјерење дужина		
Тачност мјерења дужина	15 mm на 30 m	30 mm на 30 m
Мјерни опсег		
Минимална удаљеност	1,8 m	1,6 m
Максимална удаљеност	110 m	110 m
Вријеме читавања (просјечно)	2,5 s	2,5 s
Аутоматско фокусирање		
Радни опсег аутофокуса	од 1,8 m	од 1,6 m
Вријеме фокусирања (просјечно)	4 s	Аутоматски
Камера за преглед		
Видно поље	6° x 4,8° (7,7° дијагонално)	3°
Брзина снимања	20 оквира по секунди	Х
Фокусирање	од 3 m	од 1,5 m
Компензатор		
Радни опсег	±9'	±12'
Тачност	0,3"	0,3"
Осјетљивост на магнетно поље	≤ 1"	Да, посебан систем
Интерфејси		
RS232/USB	Да	Да
Bluetooth	Да	Да
Мини USB	Да	Х
Радно окружење		
Температурни радни опсег	од - 20 °C до + 50 °C	од - 20 °C до + 50 °C
Влажност	95 % (без кондензације)	95 % (без кондензације)
Отпорност на прашину и воду	Да	да

2.2. ГНСС МЈЕРНИ СИСТЕМИ ГЕОДЕТСКОГ ОСМАТРАЊА ПОМЈЕРАЊА ОБЈЕКТАТА

Навигациони сателитски системи могу бити глобални (ГНСС) и регионални (*енг. Regional Navigation Satellite Systems - RNSS*). Тренутно се глобалним системима називају амерички GPS, руски ГЛОНАСС (*рус. ГЛОбальная НАвигационная Спутниковаја Система*), европски Galileo и кинески BDS (*енг. BeiDou System*), док групу регионалних система чине јапански QZSS (*енг. Quasi-Zenith Satellite System*) и индијски IRNSS/NavIC (*енг. Indian Regional Navigation Satellite System NavIC*).

Сваки навигациони сателитски систем, као цјелину, чине три основне компоненте: космичка, контролна и корисничка. Теоријске поставке, алгоритми, методе позиционирања и могућности примјене GPS-а и ГЛОНАСС-а, као првих потпуно оперативних навигационих сателитских система постали су својеврсни стандарди и основа су развоја осталих сателитских система. Још од тренутка оперативности првог система и почетка примјене нове технологије област, сателитских навигационих система стално се мијења. Промјене се огледају у повећању броја ГНСС, броја сигнала и услуга доступних корисницима система. Паралелно, развијају се нови концепти обраде ГНСС сигнала и навигационих података. Све то унапрјеђује

особине система, доприноси повећању тачности и правремености услуга и проширује подручје примјене ове технологије.

Даљи развој ове области усмјерен је ка вишеконстелационом и вишефреквентном ГНСС-у (*енг. multi-constellation and multi-frequency GNSS*), односно истовременом пријему сигнала једним пријемником са више система, интеграцији добијених података, са примарним циљем повећања тачности и поузданости позиционирања. У наставку су дате основне информације о ГНСС, њиховим концептима, развоју, надоградњи и стању у области.

2.2.1. Глобални навигациони сателитски системи - концепти, развој и модернизација

GPS. Министарство одбране (*енг. Department of Defense - DoD*) Сједињених Америчких Држава (САД) је пројектовало и реализовало GPS [85], првобитно као војни навигациони сателитски систем. Од 2004. године за рад система је задужен Национални извршни комитет за космички засновано позиционирање, навигацију и одређивање времена (*енг. National executive committee for space-based Positioning, Navigation and Timing - National PNT EXCOM*) који чине многобројне институције, организације и радне групе [86], [87]. Први GPS сателит лансиран је 1978. године, а систем је потпуно оперативан постао 1995. године [88]. Данас су услуге система доступне за цивилне и војне кориснике широм свијета. Двојна употреба система је одобрена одлуком предсједника САД 1983. године. Од првобитне искључиво војне намјене, до данашње цивилне, број и разноврсност примјена система увећани су до нивоа који пројектанти система нису могли ни да замисле. Све већи, првенствено кориснички захтјеви, навели су DoD да 1998. године сачини план модернизације система.

Номиналну GPS констелацију чине 24 сателита распоређена у шест орбиталних равни, са по четири сателита у свакој од њих. Јуна 2011. године завршено је проширење констелације са три додатна сателита. Од тада GPS констелација са 27 сателита има бољу доступност услуга широм свијета [89]. Инклинација орбиталних равни је 55° , а њихови узлазни чворови удаљени су за по 60° . Сваки сателит се креће у приближно кружној орбити средње висине (*енг. Medium Earth Orbit - MEO*), на висини од приближно 2000 km и периодом обиласка од приближно 11 h и 58 min. До сада је лансирано неколико генерација GPS сателита: NTS-1, NTS-2, Block I, Block II, Block IIA, Block IIR, Block IIR-M, Block IIF и Block III [86]. Израда 22 сателита генерације Block IIF започета је 2018. године, а први сателити ће бити лансирани након успостављања десет оперативних сателита генерације Block III [89]. О функционалности и оперативности система, првенствено констелацији GPS сателита стара се контролни сегмент система (*енг. Operational Control Segment - OCS*). У новијој литератури контролни сегмент се назива и GPS терестрички сегмент (*енг. GPS ground segment*) [86].

Атомски часовници генеришу основну фреквенцију $f_{GPS} = 10,23 \text{ MHz}$ навигационих сигнала у L опсегу. Насљеђени GPS сигнали, познати и као C/A и P сигнали, емитују се на двије радио фреквенције у L опсегу, и означавају се са L1 (Link 1) и L2 (Link 2). Кружно су поларизовани са десном оријентацијом, а њихове централне фреквенције од 1575,420 MHz (L1) и 1227,600 MHz (L2) изводе се из основне фреквенције

генерисане атомским часовником, множењем са 154 и 120, респективно. GPS на емитованим сигналимa корисницима нуди два основна сервиса [86], [88], [90]:

- сервис за стандардно позиционирање (*енг. Standard Positioning Service - SPS*) и
- сервис за прецизно позиционирање (*енг. Precise Positioning Service - PPS*).

SPS је цивилни сервис, бесплатан и јавно доступан свим корисницима широм свијета. PPS је сервис заштићен криптографском техником и доступан је ауторизованим корисницима, првенствено војним али и цивилним у комерцијалном сектору. Оба сервиса су и више од сервиса за позиционирање јер пружају могућност преноса информација о времену и брзини. PPS се назива прецизним на основу могућности коју даје пријемницима ауторизованих корисника да уклоне намјерну деградацију сигнала, а његова доступност на више фреквенција омогућава елиминисање утицаја јоносфере као главног извора грешака позиционирања. Међутим, данас готово да не постоје разлике између сервиса првенствено у погледу тачности, што њихове називе чини анахронизмима [86]. Стандарди перформанси GPS -а (*енг. GPS Performance Standards – GPS PSs*) дефинишу декларисане особине емитованих сигнала у смислу тачности, интегритета, континуитета и тачности одређивања времена. SPS PS [91] дефинише перформансе система које америчка влада гарантује корисницима SPS сервиса. Тренутни SPS PS поред спецификација које се односе на C/A сигнал, садржи и информације о карактеристикама планираних и нових сигнала. PPS PS [92] дефинише перформансе система које америчка влада гарантује корисницима PPS сервиса. Тренутни PPS PS се односи само на P(Y) сигнал иако корисници имају могућност пријема сигнала и са помоћних навигационих система. Међутим, перформансе примљеног сигнала периодично се оцјењују јер су ефекти простирања сигнала (укључујући грешке кашњења услед утицаја јоносфере), грешке корисничке опреме и грешке оператора промјенљиве и не могу се унапријед дефинисати. Просјечна дневна грешка (95%) аутономног хоризонталног позиционирања GPS SPS сервисом за 2019. годину је била око 1,6 m, а вертикалног око 2,6 m [93]. Грешка одређивања времена, према истом извјештају, боља је од декларисаних 40 ns.

За слање различитих сигнала на истој радио фреквенцији GPS користи технику сигнала широког спектра (*енг. Code Division Multiple Access - CDMA*) и бинарну фазну модулацију (*енг. Binary Phase Shift Keying - BPSK*) као примарну технику модулисања сигнала. Типови псеудослучајних кодова (*енг. Pseudorandom Noise - PRN*) и навигационих порука, модулисаних на носеће фреквенције, су:

- C/A код (*енг. C(t)Coarse/Acquisition code*), у литератури познат и као јавно доступни или цивилни код. Модулисан је на L1 и основа је SPS-а,
- прецизни код (*енг. P(t)- Precision code*), резервисан за војне и ауторизоване цивилне кориснике. PRN секвенца је седмични дио кода који се додјељује сваком сателиту, а читав низ се понавља сваких 266 дана. Код је модулисан на L1 и L2 и основа је за PPS и
- навигациона порука (*енг. D(t) – navigation message*), садржи ефемериде, корекцијама часовника, параметре модела јоносфере, информације о статусу констелације, итд.

Да би се корисницима ограничио приступ услугама система максималне тачности и да би услуге система биле безбједне за употребу, увођене су сљедеће заштите:

- S/A (*енг. Selective Availability*), намјерна деградација сателитских часовника (процес δ) и манипулација ефемеридима (процес ε). Грешка аутономног хоризонталног позиционирања са укљученом S/A била је око 100 m, док је грешка позиционирања без S/A била око 10 m. Наредбом предсједника САД, S/A је искључена 2000. године, а 2008. године је трајно уклоњена и не примјењује се са новим генерацијама сателита, и
- A/S (*енг. Anti-Spoofing*), шифровање P кода криптографском заштитом, комбиновањем са тајним W кодом. Резултат је Y код, у литератури познат и као P(Y) код, модулисан на L1 и L2. Сврха A/S је заштита војних пријемника од противника који емитује лажну копију GPS сигнала и ускраћивање приступа неауторизованим корисницима P(Y) мјерном коду на L1 и L2.

Модернизацијом сигнала која је почела 2005. године, GPS је добио још једну додатну фреквенцију L5 (насталу множењем основне фреквенције са 115) и неколико нових кодова на постојећим носивим фреквенцијама. Нови кодови, који се називају и цивилним сигнаима, означавају се са L2C, L5 и L1C, а додат је и један војни код са ознаком M. L2C сигнал је посебно дизајниран за комерцијалне потребе. Његово емитовање је омогућило развој двофреквентних пријемника ниске цијене, а у комбинацији са L1(C/A) сигналом цивилним корисницима омогућава исту тачност као и војним корисницима система. Корисницима професионалних двофреквентних пријемника L2C омогућава брже регистровање сигнала, побољшава поузданост позиционирања и проширује подручје рада за релативно позиционирање. Код сигнала L2C је сачињен од два временски мултиплексирани мјерна кода: L2CM (*енг. L2 Civil Moderated*) и L2CL (*енг. L2 Civil Long*). L2C је модулисан на L2 носећу фреквенцију BPSK техником и емитује се са већом ефективном снагом него оригинални L1(C/A) сигнал. Ова особина, заједно са моћним својствима унакрсне корелације, олакшава праћење и пријем сигнала у изазовним окружењима (нпр. испод дрвећа, па чак и у затвореном простору). Сигнал је интероперабилан са сигнаима BDS, и од јуна 2021. године се емитује са 23 сателита [94].

План модернизације GPS-а настављен је лансирањем Block III сателита 2012. године, који су по први пут емитовали трећи цивилни сигнал на L5 фреквенцији из високо заштићеног ARNS (*енг. Aeronautical Radio Navigation Service*) опсега. Нови L5C сигнал има нови тип модулације и дизајниран је за кориснике којима је потребан SoL сервис (*енг. Safety of Life Service*). Дизајн овог сигнала, модулисаног BPSK техником, омогућио је побољшања у погледу праћења носеће фреквенције и кодова, што га чини сигналом велике снаге и отпорним на интерференцију. Штавише, већа брзина чиповања у односу на сигнал са C/A кодом пружа отпорност на појаву вишеструке рефлексије (*енг. multipath*). L5, као најнапреднији цивилни сигнал, у комбинацији са L1(C/A) и L2C сигнаlima, корисницима широм свијета омогућава тачност аутономног позиционирања бољу од 1 m без додатних корекција. Од јуна 2021. године L5 сигнал се емитује са 16 сателита [94].

У сљедећем кораку модернизације имплементирани су сателити напредне генерације Block III који су омогућили емитовање четвртог сигнала са цивилним кодом на L1 опсегу (L1C). Сигнал је дизајниран како би се обезбједила

интероперабилност између GPS-а и других сателитских навигационих система [86]. У циљу побољшања пријема сигнала мобилним пријемницима и у изазовним окружењима, за модулисање овог сигнала на носећу фреквенцију користи се временски мултиплексирана бинарна офсетна модулација (енг. *Time Multiplexed Binary Offset Carrier - TMBOC*). L1C садржи L1C-I канал података и L1C-Q пилот канал. Сигнал се емитује на истој фреквенцији као и оригинални L1(C/A) сигнал, који је задржан ради компатибилности система са постојећим стањем у корисничком сегменту. Од јуна 2021. године сигнал се емитује са 4 сателита [94]. Сумарни преглед GPS сигнала и сервиса је дат у Табели 2-10.

Табела 2-10. GPS сигнали

Фреквенцијски опсег	Носећа фреквенција	Ширина фреквенцијског опсега (MHz)	Ознака сигнала (компоненте)	Тип сигнала
L1	1 575,42	30,69	C/A	Јавни
			P(Y)	Заштићени
			M	Заштићени
			L1C	Јавни
L2	1 227,60	30,69	P(Y)	Заштићени
			C (M i L)	Јавни
			M	Заштићени
L5	1 176,45	24,00	L5	Јавни

Сваки сателит прима од терестричких антена навигационе податке који се корисницима враћају путем навигационих порука. Навигациона порука садржи све информације потребне за позиционирање: ефемериде, податке о времену и корекције часовника, параметре сервиса са информацијама о исправности сателита, параметре модела јоносфере и алманах. Ефемериде и параметри часовника се обично ажурирају сваких сат времена, док се алманах ажурира најмање једном дневно [95]. Постоји пет типова GPS навигационих порука. Први тип су наслеђене GPS навигационе поруке типа NAV, модулисане на L1 и L2. Цијела порука садржи 25 страна (или оквира), свака страна траје 30 s, тако да се цијела порука емитује сваких 12,5 min. Модернизацијом GPS-а уведена су још четири типа навигационих порука: CNAV, CNAV-2, MNAV и L5-CNAV [86], [96]. Три типа су цивилне поруке, док је MNAV војна порука. Нови типови навигационих порука пружају тачније податке и брже се емитују него NAV. Тренутно су у фази тестирања (енг. *pre-operational*) и користе се на сопствену одговорност до момента док не постану званично оперативни [96].

ГЛОНАСС је глобални навигациони сателитски систем у власништву Владе Руске Федерације. Тренутно је за рад система задужена Државна корпорација за космичке активности ROSCOSMOS [97], [98]. Методолошку подршку и оперативне информације за цивилне кориснике обезбијеђују Центар за цивилне кориснике (рус. *Прикладной Потребительский Центр Глонасс*; енг. *Applied Consumer Center of Roscosmos*) користећи податке Информационо-аналитичког центра за позиционирање, навигацију и одређивање времена (рус. *Информационно-Аналитический Центр Координатно-Временного и Навигационного Обеспечения АО "ЦНИИМАШ"*; енг. *Information and Analytical Center for Coordinate, Time and Navigation Support of JSC TSNIIMASH*) [99]. Систем је упоредив са америчким GPS-ом с обзиром да дијеле исте принципе преноса података и метода позиционирања. Први ГЛОНАСС сателит лансиран је у орбиту 1982. године. Систем је потпуно оперативан први пут постао 1995. године. Након привремене деградације, номинална констелација поново је

успостављена 2011. године и систем је од тада у функцији [97], [100]. Услуге система ове генерације су, као и код претходног совјетског навигационо-комуникационог система Tsyclon/Tsikada, доступне војним и цивилним корисницима широм свијета.

Номиналну констелацију ГЛОНАСС-а чине 24 сателита, распоређена у три орбиталне равни, са по 8 сателита у свакој орбити. Узлазни чворови орбиталних равни размакнути су за 120° , а сателити унутар исте орбиталне равни подједнако су удаљени 45° . Разлика у аргументима ширине за сателите са истим позицијама, у двије различите орбиталне равни, је 15° . Сваки сателит се креће у готово кружној МЕО орбити, на висини од приближно 19 100 km. Угао инклинације орбиталних равни је $64,8^\circ$, а сателити пређу орбиталну путању за приближно 11 h и 16 min. У ГЛОНАСС сателитима се налазе атомски часовници (цезијумски и рубидијумски) који генеришу носеће фреквенције радио сигнала из L опсега. Констелацију ГЛОНАСС система су чиниле или и данас чине сљедеће генерације сателита: Глонасс, Глонасс-М, Глонасс-К1 и Глонасс-К2 [97], [99]. Носеће фреквенције свих емитованих сигнала и модулационих секвенци су кохерентно изведене из атомског фреквенцијског стандарда.

За разлику од GPS сателита који користе исте фреквенције, ГЛОНАСС сателити (лансирани прије ГЛОНАСС-М сателита број 55) емитују сигнале на посебној фреквенцији унутар истог фреквенцијског опсега. Фреквенције су одређене бројем фреквенцијских канала сателита, који емитују сигнале вишеструког приступа с фреквенцијском расподјелом (*енг. Frequency-Division Multiple Access - FDMA*). FDMA сигнали, или како се у литератури још називају наслеђени ГЛОНАСС сигнали, кружно су поларизовани са десном оријентацијом, центрирани на двије радио фреквенције у L опсегу, и у литератури се означавају са G1 и G2 због разликовања са GPS L1 и L2 опсезима, иако се ради о сигналима истог типа. Модернизацијом ГЛОНАСС-а додат је нови G3 фреквенцијски опсег и нови CDMA сигнали у сва три фреквенцијска опсега. Тренутна ГЛОНАСС констелација сачињена је од ГЛОНАСС-М и ГЛОНАСС-К сателита који емитују пет навигационих сигнала [97], [100]:

- G1OF -јавни FDMA сигнал у G1 опсегу,
- G2OF - јавни FDMA сигнал у G2 опсегу,
- G1SF - заштићени FDMA сигнал у G1 опсегу,
- G2SF - заштићени FDMA сигнал у G2 опсегу и
- G3OC - јавни CDMA сигнал G3 опсегу.

гдје прва два знака потичу од фреквенцијског опсега (G1, G2 и G3), а друга два од типа сервиса који омогућавају (O: *open*, S: *authorized special*) и врсте сигнала (F: *FDMA*, C: *CDMA*).

Фреквенције сигнала на G1 и G2 изводе се из броја канала примјеном сљедећих формула [101]:

$$G1: f1(k) = 1602 + k \times 9 / 16 = (2848 + k) \times 7 / 16 \quad [\text{MHz}] \quad (2.4)$$

$$G2: f2(k) = 1246 + k \times 7 / 16 = (2848 + k) \times 7 / 16 \quad [\text{MHz}] \quad (2.5)$$

што даје интервале од 1598,0625 MHz до 1605,3750 MHz за G1 и од 1242,9375 MHz до 1248,6250 MHz за G2. Јавни FDMA сигнали емитовани на G1 и G2 носећим фреквенцијама модулисани су BPSK техником. Носеће фреквенције су модулисане

бинарном секвенцом, која је резултат модуло-2 сабирања три компоненте: псеудослучајног мјерног кода (PRN), навигационих података и помоћне секвенце сигнала. Интервал понављања мјерног кода је 1 ms. G3OC сигнал се емитује на фреквенцији 1202,25 MHz и модулише се четворофазном дигиталном модулацијом (енг. *Quadrature Phase Shift Keying - QPSK*), док се пилот и компонента података тог сигнала модулишу BPSK техником. G1SF и G2SF сигнале користе ауторизовани корисници и о њима готово да нема јавно доступних података.

Мјерни кодови доступни на ГЛОНАСС сигналима, у литератури се описују и означавају као и код GPS-а: C/A јавно доступни мјерни код стандардне тачности и P прецизни мјерни код доступан ауторизованим корисницима [101]. Међутим, ови изрази се не спомињу у званичном документу [102] којим се описују карактеристике система и не представљају званичне ознаке.

Како би се задовољиле растуће потребе корисника проводи се програм модернизације система, првенствено ГЛОНАСС сигнала. Од 2011. године ГЛОНАСС сателити поред насљеђених емитују и нове CDMA сигнале. Сателити ће наставити да емитују постојеће сигнале и у будућности све док то буду потребе корисничког сегмента. Оптималан скуп FDMA и CDMA сигнала ће корисницима бити доступан након надоградње констелације сателитима нових генерација, прије свега ГЛОНАСС-K2 [100]. Тренутно се разматрају постојећи и могући захтјеви цивилних и ауторизованих корисника ГНСС сервиса, трендови модернизације и интеграције ГНСС, постојећи сет сигнала које емитују ГЛОНАСС сателити и постојећи ГНСС опсежи којима управља Међународна унија за телекомуникације (енг. *International Telecommunication Union - ITU*) ради увођења нових сигнала, и то [97]:

- G1SC - заштићени CDMA сигнал у G1 опсегу (1599,972 MHz),
- G1OC - јавни CDMA сигнал у G1 опсегу (1600,9995 MHz),
- G1OCM - јавни CDMA сигнал у G1 опсегу (1575,42 MHz),
- G2SC - заштићени CDMA сигнал у G2 опсегу (1248,06 MHz),
- G2OC - јавни CDMA сигнал у G2 опсегу (1248,06 MHz),
- G3OC - јавни CDMA сигнал у G3 опсегу (1204,00 MHz),
- G3SC - заштићени CDMA сигнал у G3 опсегу (1202,025 MHz) i
- G5OCM - јавни CDMA сигнал у G5 опсегу (1176,45 MHz).

Сагласно статусу двоструке намјене ГЛОНАСС систем пружа сљедеће навигационе сервисе:

- јавни сервис са сигналима у три фреквенцијска опсега и глобално доступним за све кориснике без било каквих ограничења и
- сервис за ауторизоване кориснике, доступан на два фреквенцијска опсега и са заштићеним сигналима.

Терминологија ГЛОНАСС сервиса није потпуно дефинисана, па се у литератури користе и алтернативни називи: SPS и PPS као код GPS-а, или сервис са сигналима стандардне тачности (енг. *Standard Accuracy Signal Service*) и сервис са високо-прецизним сигналима (енг. *High-Accuracy Signal Service*). У контексту FDMA сигнала и

припадајућих мјерних кодова који омогућавају ова два сервиса користе се термини сигнал стандардне тачности (*енг. standard accuracy signal*) и високо прецизни сигнал (*енг. pinpoint signal*) [102].

Почевши од Глонасс-К генерације, ГЛОНАСС сателити су опремљени сигнално-релејном опремом COSPAS-SARSAT за међународни сервис потраге и спасавања. Са Глонасс-К2 генерацијом сателита, планирано је успостављање двосмјерно-релејног система за размјену порука на локалном и глобалном нивоу.

Карактеристике ГЛОНАСС јавног сервиса су описане у Стандарду перформанси ГЛОНАСС јавног сервиса (*енг. GLONASS Open Service Performance Standard – GLONASS OS PS*). Стандардом је дефинисано да корисници система могу очекивати глобалну просјечну грешку (95%) аутономног позиционирања 5 m и 9 m у хоризонталном и вертикалном правцу, респективно [97], [103]. Опција намјерне деградације тачности позиционирања коришћењем јавног сервиса никад није разматрана ни примјењивана у ГЛОНАСС систему. Ауторизовани сервис и прецизни сигнал (модулисан посебним кодом) намијењени су првенствено потребама Министарства одбране Руске Федерације. Начин криптографске заштите ГЛОНАСС прецизног кода није званично објављен. Међутим, већ у првим данима његовог емитовања неколико истраживачких група га је дешифровало, користећи различите технике претраживања кодова [100], [101]. Ипак, руско Министарство одбране може промијенити овај код без претходног упозорења, што се мора имати на уму у случају коришћења пријемника који региструју сигнале са овим кодом за потребе прецизног позиционирања.

Од успостављања номиналне констелације 2011. године ГЛОНАСС систем обезбјеђује глобалну дневну доступност бољу од 99% при елевационом углу $\geq 5^\circ$ и PDOP фактору (*енг. Position Dilution Of Precision*) мањем од 6. У извјештају о оцјени тренутних перформанси система [104] наводи се да је просјечна грешка (95%) аутономног позиционирања сигналима у оквиру сервиса стандардне тачности испод 5 m за хоризонталну компоненту и испод 10 m за вертикалну компоненту. Грешка одређивања времена, према овом извјештају, је испод 40 ns.

Насљеђени ГЛОНАСС сигнали преносе навигационе поруке сачињене од оквира и низова, при чему се подаци о ефемеридама односе на референтни систем ПЗ90 (*рус. Параметри Земли 1990*), а подаци о времену на ГЛОНАСС временску скалу [100]. ГЛОНАСС сателити модулишу два типа навигационих порука при брзини од 50 bps, на сигнале са стандардним и са високо прецизним Р кодом. Свака ГЛОНАСС навигациона порука даје корисницима информације потребне за позиционирање, навигацију и одређивање времена.

Навигациона порука на сигналу са стандардним кодом емитује се континуирано, а цијела навигациона порука понавља се сваких 2,5 min. Садржај поруке је подијељен на непосредне податке емитујућег сателита (ефемериде) и посредне податке о осталим сателитима (алманах). Непосредни подаци садрже корекције часовника, податке о исправности сателита, релативне разлике носеће фреквенције емитоване са сателита и њене номиналне вриједности, а понављају се једном у 30 s. Ефемериде се обично ажурирају у интервалима од пола сата и важе 15 минута око референтне епохе у центру интервала. Структура ГЛОНАСС навигационих порука на FDMA сигналима подржава констелацију од 24 сателита. ГЛОНАСС ефемериде се

разликују од GPS ефемерида. Умјесто Кеплерових орбиталних елемената, ГЛОНАСС ефемериде садрже податке о: положају (просторне правоугле праволинијске координате у конвенционалном терестричком референтном систему ПЗ90) и брзини сателита (укључујући и пертурбације усљед лунисоларног привлачења). Алманах ГЛОНАСС-а је прилично сличан GPS-овом, и садржи модификоване Кеплерове параметре. Ажурира се приближно једном дневно. Овај тип навигационих порука не садржи податке за јоносферску корекцију. То значи да се за прецизно позиционирање овим сигнаlima морају користити двофреквентни пријемници.

Званична структура навигационе поруке сигнала са прецизним кодом није позната, али је неколико истраживачких група успјело да је декодира. Према овим истраживањима, комплетну навигациону поруку чине 72 стране, а за емитовање цијеле поруке је потребно 12 минута [101].

Спровођењем плана за побољшање перформанси ГЛОНАСС система очекује се прије свега повећање тачности позиционирања. Кључни кораци за постизање побољшања укључују обраду фазних мерења у процесу одређивања орбита и одређивања времена, коришћење међусателитских комуникационих веза за обављање до 24 отпремања навигационих података дневно на релацији контролни сегмент - сателити, коришћење података мјерења растојања између сателита при одређивању орбиталних параметара и корекција часовника, и глобално ширење мреже станица за мониторинг система.

Основни циљ развоја и модернизације ГЛОНАСС контролног сегмента је побољшање перформанси елемената. Реализација подразумијева модернизацију станица за пасивна мјерења и рачунања, главног атомског часовника, станица за слање података у сателите и проширење мреже станица за ласерска мјерења.

Такође, побољшања перформанси система се очекују од увођења нових CDMA сигнала високог квалитета и нове генерације атомских часовника у сателитима. Осим повећања тачности позиционирања, од CDMA сигнала очекује се боља отпорност на сметње и побољшано раздвајање јавног и ауторизованог сервиса. План еволуције сигнала се проводи по фазама. Први CDMA сигнал у G3 опсегу се емитује од 2011. године, а остали сигнали се уводе са новим генерацијама сателита. Лансирањем ГЛОНАСС-K2 сателита 2014. године, почело је емитовање FDMA сигнала на G1 и G2 и CDMA сигнала на G1, G2 и G3. Осим увођења нових генерација сателита, предвиђено је и проширење констелације до 30 сателита. Начин дефинисања мјерних кодова даје могућност укупног проширења констелације и до 64 сателита [105]. Почетне оцјене новог ГЛОНАСС G3 сигнала детаљније су описане у раду [106]. CDMA сигнали подијељени су у двије групе: отворени (незаштићени) и шифровани (заштићени) сигнали. Ови сигнали обезбјеђују два сервиса: јавни сервис и сервис за ауторизоване кориснике. Фреквенције за CDMA сигнале из опсега G1 и G2 изабране су из оригиналних фреквенцијских опсега наслијеђених FDMA сигнала, док је G3 нова фреквенција из L опсега којем припадају и Galileo E5b и BeiDou B2 сигнали. Поред тога, тренутно се проучавају и елементи нових модернизованих цивилних сигнала (G1OCM и G5OCM) на G1 и G5 фреквенцијама. Ови сигнали су компатибилни са сигнаlima GPS и Galileo системима. Године 2016. први пут је јавно публикован и контролни документ о интерфејсу система (*енг. Interface Control Document - ICD*) [105] са општим информацијама о CDMA сигнаlima. Такође,

објављени су и посебни документи са детаљним описом сваког сигнала појединачно [107]–[109].

Тренутно је у оквиру ГЛОНАСС-а у развоју систем за глобално прецизно позиционирање у реалном времену (*енг. System of Global Precise Positioning in real-time - GPPS*) који ће корисницима системски пружити могућности методе прецизног аутономног позиционирања (*енг. Precise Point Positioning - PPP*). Очекује се да ће корисници овог система моћи остварити тачност позиционирања од 0,1 m у реалном времену до 0,02 m при накнадној обради података мјерења [97].

Galileo је глобални навигациони сателитски систем који, као пројекат започет 1999. године, реализује Европска унија (ЕУ) у сарадњи с Европском свемирском агенцијом (*енг. European Space Agency - ESA*). Данас је у име ЕУ за реализацију система, комерцијализацију, техничку подршку и оперативне активности одговорна Агенција Европске уније за свемирски програм (*енг. European Union Agency for the Space Programme - EUSPA*), као наследица Европске агенције за ГНСС (*енг. European Global Navigation Satellite Systems Agency - GSA*) [110]. ESA је одговорна за дизајн, технички развој и успостављање система. Циљ пројекта је изградња глобалне инфраструктуре за сателитско позиционирање, навигацију и одређивање времена посебно дизајниране за цивилне сврхе. Услуге система доступне су јавним и ауторизованим корисницима у Европи и широм свијета. Иако је замишљен као независан навигациони систем, Galileo је интероперабилан са осталим ГНСС и доприноси тачности, доступности и континуитету услуга ГНСС [111]. Први експериментални Galileo сателит GIOVE-A лансиран је 2005. године, а први оперативни (*енг. In-Orbit Validation - IOV*) сателит је лансиран 2011. године. Од 2016. године корисничком сегменту су на располагању почетни сервиси (*енг. Galileo Initial Services*). Galileo систем је тренутно у завршној фази развоја, која обухвата остваривање функционалне констелације (*енг. Full Operational Constellation - FOC*) и завршетак успостављања терестричке инфраструктуре [112]. Према пројекту, Galileo систем чини космички, терестрички и кориснички сегмент.

Констелација потпуно оперативног Galileo система ће се састојати од 30 (24 оперативна и 6 резервних) МЕО сателита распоређених у три орбиталне равни. Узлазни чворови орбиталних равни подједнако су размакнути за 120° , а угао инклинације орбиталних равни је 56° . Инклинација орбиталних равни је изабрана тако да обезбиједи добру покривеност поларних подручја, која су запостављена од стране GPS-а [113]. Очекује се да потпуно оперативан Galileo систем, обезбиједи добру покривеност сигналом чак и на подручјима до 75° сјеверне и јужне геодетске ширине. Galileo сателити налазе се у готово кружним орбитама, на висини од приближно 23 222 km и периодом орбитирања око 14 h и 5 min. Велики број сателита, заједно са пажљиво оптимизованим дизајном констелације, плус доступност резервних сателита, обезбјеђује да губитак једног сателита нема значајан ефекат за кориснике система. Избор референтне Galileo констелације од 24 сателита омогућава корисницима широм свијета да у било ком тренутку примају сигнале са 6 до 11 сателита, са просјечном видљивошћу од 8 сателита при елевационим угловима већим од 5° [112]. Ова констелација допуњена је са још шест резервних сателита, што резултира глобалном геометријом са просјечним DOP (*енг. Dilution Of Precision*) факторима хоризонталног положаја (*енг. Horizontal Dilution Of Precision - HDOP*) и висине (*енг. Vertical Dilution Of Precision - VDOP*) од приближно 1,3 односно 2,3 [111].

Galileo сателити су опремљени са по четири атомска часовника, пасивни мазер и рубидијумски часовници, по два сваког типа. Констелацију је 2020. године чинило укупно 18 потпуно оперативних сателита [112].

Кад систем постигне ФОС, сваки Galileo сателит ће емитовати 10 навигационих сигнала, у фреквенцијским опсезима E1, E6 и E5 (E5a и E5b), са десно оријентисаном кружном поларизацијом. Galileo сигнали дизајнирани су тако да подрже различите сервисе засноване на потребама корисника [111], [112]:

- јавно доступни (отворени) сервис (*енг. Open Service - OS*) [114], [115]: бесплатни је сервис доступан широм свијета. Сервис је доступан на три фреквенције, у једнофреквентном и двофреквентном моду. Једнофреквентним пријемницима се у оквиру овог сервиса нуде перформансе сличне онима са GPS C/A сигнала. Генерално, у оквиру OS се комбинују Galileo и GPS сигнали, чиме се побољшава квалитет позиционирања у изазовним окружењима као што су урбана подручја;
- сервис јавне управе (*енг. Public Regulated Service - PRS*) [116]: намијењен је органима безбједности (војска, полиција, и сл.) који захтијевају висок континуитет услуге са контролисаним приступом. У оквиру овог сервиса је уведена побољшана модулација/енкрипција сигнала како би се спријечила ометања и деградација (*енг. spoofing and jamming*) сигнала и сервиса. Биће доступна два PRS навигациона сигнала са шифрованим кодовима и подацима;
- високопрецизни сервис (*енг. High Accuracy Service - HAS*) [117], [118]: раније познат као комерцијални сервис (*енг. Commercial Service - CS*), пружа корисницима приступ додатним сигнаlima заштићеним комерцијалном енкрипцијом. Заштита се односи и на мјерења и на навигационе поруке. Особина HAS, по којој се додатно разликује од осталих сервиса, је већа брзина преноса навигационих података;
- сервис потраге и спасавања (*енг. Search and Rescue - SAR*) [119]: је сервис који додатно доприноси међународном COSPAS-SARSAT систему за потраге и спасавања. Сигнал за помоћ се просљеђује Центру за координацију спасавања (*енг. Rescue Coordination Centre*), а Galileo систем омогућава обавјештавање корисника о пријему захтјева за помоћ;
- сигурносни сервис (*SoL*) [120]: је Galileo сервис намијењен додатном побољшању карактеристика постојећег ENGNOS сервиса за безбједност ваздухопловства према одредбама Међународне организације цивилног ваздухопловства (*енг. International Civil Aviation Organization*). Сервис се тренутно поново профилише и
- сервис са навигационим порукама за аутентификацију у оквиру јавно доступног сервиса (*енг. Galileo Open Service Navigation Message Authentication - OSNMA*) [121]: је бесплатно доступна функција аутентификације и допуна Galileo OS широм свијета. Коришћењем OSNMA података унутар корисничких пријемника потврђује се да примљена Galileo навигациона порука долази из самог система и да није модификована. Сервис је тренутно у фази јавног тестирања.

Наведене сервисе Galileo систем пружа аутономно, непосредним емитовањем сигнала са сателита. Поред ових сервиса постоје и сервиси који проистичу из комбиноване употребе Galileo и других навигационих система [122]. У ову групу се убрајају локални сервиси за унапрјеђење Galileo навигације (*енг. GALILEO locally assisted services*), регионални европски сателитски систем за унапрјеђење навигације (*енг. European Geostationary Navigation Overlay Service - EGNOS*)[119], [123], [124] и Galileo комбиновани ГНСС сервиси који проистичу из комбиновања поменутих сервиса са другим навигационим или комуникационим системима.

Као и код GPS-а, сви сателити емитују сигнале на истим фреквенцијама, а њихово диференцирање се врши CDMA техником. Неки сигнали садрже само канале са мјерним кодовима (*енг. pilot channels*), а неки канале са мјерним кодовима и подацима (*енг. data channels*). Свака компонента сигнала се емитује са јединственим секвенцама, познатим као PRN, посебним за сваки сателит. За њихово модулисање користе се различите варијанте бинарне офсетне модулације. BOC модулација је изабрана како би се елиминисала интерференција са сигнаlima других ГНСС. Да би обезбиједио робустан пренос података, Galileo користи *Viterbi Forward Error Correcting Coding* методу корекције грешака кодирања [111]. У блиској будућности, планирано је увођење додатних могућности за корекције грешака кодирања примјеном *Reed Solomon* кодова за неке дјелове навигационих порука [112]. Очекује се да ће ове промјене побољшати временски пријем и перформансе осјетљивости сигнала.

E1 фреквенцијски опсег подржава OS, HAS, SoL и PRS сервисе. Садржи три компоненте навигационих сигнала у L1 опсегу. Прва, E1-A је заштићена и доступна само ауторизованим PRS корисницима. Друге двије компоненте, E1-B и E1-C, су отворени сигнали са незаштићеним кодовима и доступне свим корисницима. E1-B је канал података, а E1-C је пилот канал. E1-B канал садржи незаштићене податке о интегритету и заштићене комерцијалне податке. За модулисање навигационих сигнала користе се MBOC (*енг. Multiplexed BOC*) и CBOC (*енг. Composite BOC*) технике. E1 Galileo опсег се дијели са L1 GPS и B1 BDS опсезима.

E6 је намјенски фреквенцијски опсег који подржава HAS и PRS. Обезбјеђује три компоненте навигационог сигнала које се емитују у E6 опсегу. Као и код E1, прва компонента E6-A је заштићена и доступна само ауторизованим PRS корисницима. Друге двије компоненте су комерцијално доступни сигнали и укључују канал података (E6-B) и пилот канал (E6-C). E6 кодови су заштићени. Већа брзина преноса података (500 bps) омогућава пренос додатних комерцијалних података. Galileo E6 опсег се дијели са BDS B3 опсегом.

E5a подржава OS. То је јавно доступан сигнал који се емитује у E5a опсегу. Садржи двије компоненте, E5a-I (канал података) и E5a-Q (пилот канал). E5a сигнал садржи нешифроване податке, доступне свим корисницима. Овим сигналом се преносе основне информације за потребе позиционирања, навигације и одређивања времена, коришћењем релативно ниске брзине преноса података (25 bps) што омогућава примјену робусних техника демодулације сигнала. E5a опсег се дијели са GPS L5, GLONASS L5 и BDS B2a опсезима сигнала.

E5b подржава OS, HAS и SoL. То је сигнал са отвореним приступом, емитује се у E5b опсегу и садржи двије компоненте: канал података (E5b-I) и пилот канал (E5b-Q). E5b

сигнал садржи нешифроване податке, доступне свим корисницима. Брзина преноса података је 125 bps. E5b опсег дијели се са GLONASS G3 и BDS B2b опсезима.

Компоненте сигнала E5a и E5b модулисане су на једну носећу фреквенцију 1 191,795 MHz, коришћењем AltBOC (*енг. Alternate Binary Offset Carrier*) модулације. Мјешавина сигнала E5a и E5b се означава као E5 сигнал и може се процесирати као један сигнал широког опсега. Овакав приступ у формирању сигнала за резултате има минималан утицај вишеструке рефлексије и лакшу детекцију ометања сигнала.

Коришћењем OSNMA провјерава се аутентичност података добијених у оквиру OS. OSNMA се остварује путем навигационе поруке (I/NAV) која се емитује на компоненти сигнала E1-B. Подаци специфични за аутентификацију смјештени су у претходно резервисана поља E1 I/NAV поруке. Коришћењем претходно резервисаних поља, OSNMA не уводи преклапања унутар система навигационих порука, тако да перформансе OS сервиса остају непромјењене.

Galileo сигнали, нарочито таласна форма и структура порука, последица су како научног и техничког рада на проналажењу оптималног облика сигнала тако и политичких напора Европе да промовише интероперабилну употребу GPS-а и Galilea [112]. Напори су и формално потврђени споразумом између SAD и EU (*енг. EU/US Agreement on the Promotion, Provision, and Use of Galileo and GPS Satellite- Based Navigation Systems and Related Applications*) о промоцији, заштити и заједничком коришћењу система и њихових могућности у пракси [125]. Коначан циљ успостављања интероперабилности између GPS-а и Galileo система је могућност истовременог коришћења сигнала оба система и побољшања геометријског распореда сателита са којих се примају сигнали. Међутим, данас се овај концепт додатно проширује и укључује заједничку дефиницију навигационих података, као што су ефемериде, алманах, корекције часовника, временске скале, корекције сигнала, алгоритми за корисничке пријемнике, па чак и софтвери.

Galileo сателити емитују кохерентне сигнале на три различите носеће фреквенције, а сваки од сигнала садржи најмање један пилот канал и један канал података. Емитује се пет типова података: подаци неопходни за позиционирање; подаци о интегритету; помоћни (додатни) подаци; подаци од значаја за јавну управу и подаци за сервис потраге и спасавања [112]. Ови подаци емитују се у четири навигационе поруке: бесплатно доступна навигациона порука (*енг. Freely accessible NAVigation Message - F/NAV*); навигациона порука о интегритету (*енг. Integrity NAVigation Message - I/NAV*); комерцијална навигациона порука (*енг. Commercial NAVigation Message - C/NAV*) и навигациона порука јавне управе (*енг. Governmental NAVigation Message - G/NAV*). I/NAV тип навигационих порука обезбјеђује корисницима податке неопходне за позиционирање, одређивање брзине и времена. Овај тип поруке је наслеђе старе навигационе поруке интегритета са високом брзином преноса података и кратком дужином стране. Емитује се на E1 и E5b сигналима. F/NAV тип поруке садржи податке за бесплатну навигацију и са малом брзином се преноси на E5a-I сигналима. C/NAV је тип порука за комерцијалну навигацију, са емитовањем у готово реалном времену на B компоненти сигнала E6. Садржај Galileo навигационих порука се грубо може подијелити на чисте навигационе податке који се углавном периодично понављају (вријеме преноса, корекције часовника, ефемериде, итд.) и друге не понављајуће податке са малим кашњењем. Садржај навигационих порука се континуирано генерише сваких 10 min и валидан је максимално 100 min. Сви

детаљи о навигационим порукама Galileo система доступни су у [114], пратећим и повезаним званичним документима. Важно је имати на уму да су могуће промјене карактеристика навигационих порука, с обзиром да су и оне у фази развоја и тестирања као и остали елементи система. У Табели 2-11 је дат сумарни приказ информација о Galileo сигнаlima, сервисима и навигационим порукама.

Табела 2-11. Galileo сигнали

Опсег	Носећа фреквенција (MHz)		Канал (компонента сигнала)	Техника модулације		Навигациона порука	Сервиси	
E1	1575.420		E1-A	BOC		G/NAV	PRS	
			E1-B data	MBOC		I/NAV	OS, HAS, SoL	
			E1-C pilot					
E5a	E5	1176.450	1 191,795	E5a-I data	BPSK	AltBOC	F/NAV	OS
		E5a-Q pilot						
E5b	1207.140	E5b-I data		BPSK	I/NAV	OS, HAS, SoL		
		E5b-Q pilot						
E6	1278.750		E6-A	BOC		G/NAV	PRS	
			E6-B data	BPSK		C/NAV	CS	
			E6-C pilot					

У Табели 2-12 приказане су очекиване перформансе Galileo сервиса, заснованих на сигнаlima и подацима емитованим само са сателита (*eng. satellite-only services*)

Табела 2-12. Планиране перформансе Galileo сервиса

Сателитски сервиси	Јавни сервис	Комерцијални сервиси	Сервис јавне управе
Покривеност	Глобална	Глобална	Глобална
Тачност (95%) Једна фреквенција Двије фреквенције	15 m/24 m H; 35 m V 4 m H; 8 m V		15 m/24 m H; 35 m V 6,5 m H; 12 m V
Тачност одређивања времена	30 ns	30 ns	30 ns
Доступност сервиса	99,5 %	99,5 %	99,5 %
Контрола приступа	Бесплатан јавни приступ	Контролисан приступ подацима	Контролисан приступ подацима

Као и код других ГНСС, планиране перформансе Galileo система се прате и периодично оцјењују. Увидом у до сада доступне извјештаје о оцјени стања и перформанси [126], закључује се да су грешке мјерења и позиционирања мање од очекиваних. Процјена је да ће са остваривањем FOC-а, ове вриједности бити далеко боље од декларисаних [112].

У оквиру Galileo система развија се систем за корекције мјерења једнофреквентним пријемницима. Алгоритам система је заснован на тродимензионалном представљању јоносфере. Модел који се користи се назива NeQuick G, и добијен је адаптацијом оригиналног ITU-R NeQuick модела густине електрона у јоносфери [127]. Заснован је на емпиријском климатолошком приказу јоносфере. Густина електрона се генерише из емпиријски изведених аналитичких профила и у зависности од улазних вриједности: соларног параметра, мјесеца у години, географске ширине и дужине као и доба дана. Перформансе NeQuick G модела се редовно оцјењују као и перформансе Galileo сервиса. Садашње оцјене тачности овог модела су на нивоу оних које су планиране након остваривања FOC [112].

Поред модела за корекцију јоносфере, Galileo систем као и други ГНСС корисницима нуди корекције часовника за двофреквентне пријемнике. С друге стране, корисници једнофреквентних пријемника ће путем навигационе поруке

добити емитоване (процијене) корекције кашњења сигнала (*енг. Broadcast Group Delay*).

Док се прва верзија Galileo система приближава ФОС, његови зачетници већ припремају програм модернизације. Прве активности на планирању будућности система су започете око 2007. године кроз Програм еволуције европског ГНСС (*енг. European GNSS Evolution Programme - EGEP*) припремљеног од стране ESA. Већ од 2013. године до 2017. године спроведена је А фаза из програма Galileo система нове генерације. Почетком 2016. године, на основу споразума између Европске комисије (ЕК) и ЕСА, припремне и активности истраживања и развоја прогресивно су прешле у оквирни програм *EU Horizon 2020* за истраживање и иновације у сателитској навигацији. Године 2014. ЕК је дефинисала почетне идеје о модернизацији система и публиковала их кроз План еволуције европске ГНСС мисије (*енг. European GNSS Mission Evolution Roadmap - EGMER*). У документу се разматра будућност Galileo система након успостављања ФОС, као и еволуција EGNOS-а у смислу његовог остваривања у трећој верзији. EGMR је 2016. године прерастао у стратешки важан документ, па је и назван *Evolutions High Level Document (EHLД)*. Кроз документ су идентификовани прелиминарни циљеви и захтјеви перформанси које Galileo треба да испуни у периоду од 2030. до 2040. године.

BDS, познат и као BeiDou, KOMPASS или само BD, кинески је навигациони сателитски систем који корисницима нуди могућност позиционирања, навигације и одређивања времена. Многе кинеске институције биле су укључене у процес развоја BDS-а. Влада Кине основала је Одбор за сателитску навигацију (*енг. China Satellite Navigation Committee*) и Канцеларију за сателитску навигацију (*енг. China Satellite Navigation Office - CSNO*) који су преузели одговорност у вези са конструкцијом, примјенама и међународном сарадњом на пољу BDS-а [128]. Истовремено, успостављени су стручни одбори и експертске групе који дају савјете, стручна мишљења и спроводе научне и друге процесе при доношењу важних одлука у вези са радом и развојем система. Такође, основан је Истраживачки центар за тестирање и оцјењивање (*енг. Test and Assessment Research Center*) задужен за: изградњу и рад међународног ГНСС система за мониторинг и оцјењивање, изградњу и рад BDS терестричког система за симулацију и верификацију, подршку BDS корисницима, међународну сарадњу и др. BDS, као и друге глобалне навигационе сателитске системе чине три главне компоненте: космичка, контролна и корисничка. Изградња BDS-а је континуирано спровођена на основу стратегије развоја у три корака [129].

Првим кораком сматра се изградња BDS за демонстрацију навигације [130]. Кина је први вјештачки сателит лансирала још седамдесетих година прошлог вијека. Пројекат BDS-1 започет је 1994. године, а систем са два геостационарна сателита (*енг. GEOstationary satellites - GEO*) завршен је и пуштен у рад 2000. године. BDS-1 је корисницима у Кини омогућавао позиционирање, одређивање времена, диференцијалне корекције и размјену кратких текстуалних порука. Трећи GEO сателит лансиран је 2003. године, што је додатно побољшало перформансе BDS-1 система.

Други корак је изградња BDS-а као регионалног сервиса. Кина је 2004. године иницирала изградњу BDS-2 навигационог сателитског система регионалног карактера. Први BDS-2 сателити лансирани су 2007. године. Крајем 2012. године, BDS је чинило 14 оперативних сателита, укључујући пет GEO сателита, пет геосинхроних

сателита са нагнутом орбитом (*енг. Inclined GeoSynchronous Orbits – IGSO*) и четири МЕО сателита [128], [130], [131]. BDS-2 имао је FOC на територији Кине и околних подручја. Систем је обезбјеђивао двије врсте сервиса: слободно доступан цивилни сервис и ауторизован сервис доступан владиним службама и војсци.

Спровођењем трећег корака BDS је постао глобални сервис. Истраживање и развој BDS-3 започето је још 2009. године, а реализација 2013. године. Од марта 2015. године до фебруара 2016. године пет експерименталних BDS-3 сателита, са различитим орбитама, лансирано је у космос [132]. Њихово успјешно лансирање и накнадна потврда оперативности сматрају се темељима новог BDS-3 система. На прес конференцији одржаној 03. августа 2020. године BDS-3 је формално проглашен успостављеним, а постојећи регионални систем унапријеђен је и проширен у ранг глобалног навигационог сателитског система [133]. Иако је и BDS развијан као потпуно независан и самосталан ГНСС, он је интероперабилан са другим системима. Први формални корак у том смислу направљен је потписивањем званичних докумената о сарадњи између институција одговорних за BDS, GLONASS, GPS и Galileo системе [128]. Развој BDS као интероперабилног система омогућио је његову интеграцију у породицу ГНСС, коришћење услуга система широм свијета и повећање перформанси позиционирања, навигације и одређивања времена (*енг. Positioning, Navigation and Timing –PNT*) уопште.

BDS констелација се временом мијењала, сагласно спровођењу стратегије развоја система. Данашњу BDS констелацију чини укупно 30 сателита, од тога су 3 GEO, 3 IGSO и 24 МЕО сателита. GEO сателити су позиционирани на 80° , $110,5^\circ$ и 140° источне геодетске дужине, у орбитама на висини од око 35 786 km. IGSO сателити орбитирају на висини од око 35 786 km, а инклинација орбиталних равни је 55° . МЕО сателити распоређени су у три орбиталне равни, са инклинацијом од 55° и висином орбитирања од око 21 528 km. Савремена BDS констелација предвиђа додавање резервних сателита уколико је то неопходно за функционисање система. Избор елемената хибридне констелације је такав да МЕО сателити обезбјеђују глобалну доступност услуга система, док GEO и IGSO сателити пружају побољшану покривеност територија Кине и Азијско-Пацифичког региона. Захваљујући GEO и IGSO сателитима, 10 до 14 BDS сателита истовремено је видљиво у овим регионима. За остале регионе, број видљивих сателита је 8 до 10, док је у неким областима средње географске ширине само 6 до 8 сателита видљиво истовремено [132].

Тренутна BDS констелација, коју чине BDS-2 и BDS-3 сателити, емитују радио-навигационе сигнале центриране на три радио фреквенције (B1, B2 и B3) у L опсегу. Сателити емитују укупно пет сигнала: B1C, B2a, B2b, B1I и B3I [134], [135]. Систем корисницима омогућава позиционирање, навигацију и одређивање времена на површи Земље и областима око Земље на висини до 1 000 km.

На глобалном и регионалном нивоу доступно је неколико јавних и ауторизованих радио сервиса: јавни сервис (*енг. open service*), сервис прецизног аутономног позиционирања (*енг. PPP Service*), сервис сателитског система за унапрјеђење PNT (*енг. Satellite-Based Augmentation Service*), сервис терестричког система за унапрјеђење PNT (*енг. Ground-based Augmentation Service*), сервис за размјену кратких порука (*енг. Short Message Communication Service*) и сервис потраге и спасавања (*енг. Search And Rescue Service*).

BDS, слично као и остали ГНСС, користе CDMA сигнале, и то:

- B1C сигнал са централном фреквенцијом 1575,42 MHz и ширином опсега 32,736 MHz. Сигнал је кружно поларизован са десном оријентацијом. Чине га компонента података (B1C_D) и пилот компонента (B1C_P), модулисана BOC и QMBOC (енг. *Quadrature Multiplexed BOC*) техникама, респективно [136],
- B2a сигнал са централном фреквенцијом 1176,45 MHz и ширином опсега 20,46 MHz, кружно је поларизован са десном оријентацијом. Чине га компонента података (B2a_D) и пилот компонента (B2a_P) модулисана BPSK техником [137],
- B2b сигнал са централном фреквенцијом 1207,14 MHz и ширином опсега 20,46 MHz, такође је кружно поларизован са десном оријентацијом. Чини га једна компонента модулисана BPSK техником [138],
- B1I сигнал са централном фреквенцијом 1561,098 MHz и ширином опсега 4,092 MHz, модулисан је BPSK техником и кружно поларизован са десном оријентацијом [139] и
- B3I сигнал са централном фреквенцијом 1268,52 MHz и ширином опсега 20,46 MHz, модулисан BPSK техником, кружно поларизован и десно оријентисан [140].

B1I и B3I су BDS сигнали наслеђени из BDS-2 система, док су остали нови сигнали чије емитовање је започето са BDS-3 системом. Сигнали се заснивају на псеудослучајним кодовима као и код GPS-а. B1C нови сигнал је симбол новог BDS-3 система, доступан корисницима на глобалном нивоу. Сличан је L1 C/A и L1C сигналима GPS-а, али и Galileo E1OC сигналу. И отворени сигнали у B2 опсегу су изабрани тако да подржавају интероперабилност са GPS L5 и Galileo E5 сигналима, што је технички изведено избором широкопојасних сигнала на двије носеће фреквенције. Преглед BDS сервиса, сигнала на којима су доступни и сателита са којих се емитују дат је у Табели 2-13.

Табела 2-13. BDS сервиси и сигнали

Сервиси		Фреквенцијски опсежи (сигнали) сервиса	Сателити са којих се сервис емитују
Јавни сервис		B1I, B1C, B2a, B2b, B3I	3 IGSO+24 MEO
		B1I, B3I	3 GEO
Сервис сателитског система за унапријеђење навигације		BDSBAS - B1C	3 GEO
		BDSBAS - B2a	
Сервис за размјену кратких порука	регионални	L (Uplink), S (Downlink)	3 GEO
	глобални	L (Uplink)	14 MEO
		B2b (Downlink)	3 IGSO + 24 MEO
Сервис потраге и спасавања		UHF (Uplink)	6 MEO
		B2b (Downlink)	3 IGSO + 24 MEO
Сервис прецизног аутономног позиционирања		B2b	3 GEO

Квалитет BDS сервиса доступних корисницима, дефинисан је и гарантован као и код других ГНСС стандардима перформанси. Стандардом перформанси BDS јавног сервиса [134] предвиђено је да сервис буду доступан на регионалном нивоу са вјероватноћом 99%, при минималном елевационом углу од 5° и PDOP фактору ≤6.

Декларисана тачност аутономног позиционирања у оквиру овог сервиса је 9 m за хоризонталну и 15 m за вертикалну компоненту положаја. Тачност одређивања брзине је 0,2 m/s, а тачност одређивања времена је 20 ns. Све декларисане вриједности су за вјероватноћу 95% (2σ) и на глобалном нивоу.

Навигационе поруке које се емитују на новим B1C, B2a и B2b сигнаlima B-CNAV1, B-CNAV2 и B-CNAV3 формати навигационих порука. На наслеђеним B1I и B3I сигнаlima емитују се D1 и D2 формати порука. Сви типови навигационих порука углавном садрже: сателитске ефемериде и корекције часовника које се ажурирају сваких сат времена, параметре корекције кашњења сигнала који се ажурирају свака два сата, информације о исправности сателита и интегритету система у реалном времену, параметре синхронизације BDS и UTC временских скала који се ажурирају у периоду краћем од 24 часа, алманах који се ажурира у периоду краћем од 7 дана и др.

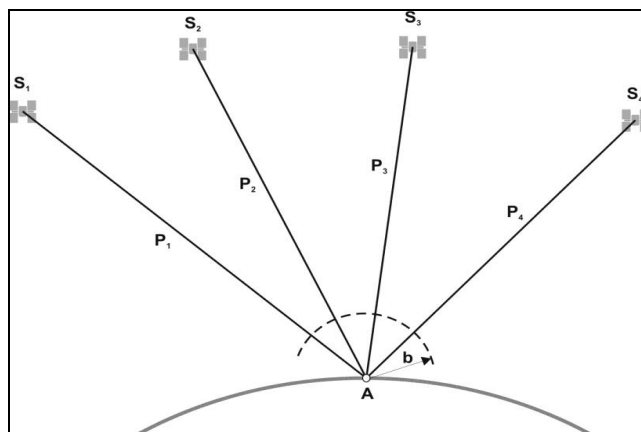
2.2.2. Мјерне величине глобалних навигационих сателитских система

Коришћење вјештачких Земљиних сателита за потребе позиционирања, одређивања брзине и времена (*eng. Position, Velocity and Timing – PVT*) подразумева регистрацију или мјерење сигнала које емитују сателити. Физички посматрано, сателитски сигнали су радио таласи чије се карактеристике модификују како би се омогућио пренос информација.

За потребе геодетског позиционирања користи се метода једносмјерног сателитског мјерења дужина (*eng. satellite ranging*), која у класификацији метода сателитске геодезије припада поступцима Земља-космос [131], [141]. Постоји импулсни и фазни поступак мјерења. [142].

Посматрано из корисничког угла, ГНСС пријемници мјере кодне и фазне псеудодужине [142]–[148]. Кодне псеудодужине (*eng. code pseudorange, code measurement*) пријемник мјерни тако што упоређује примљене кодове са сателита са кодовима које сам генерише. На тај начин он у ствари мјери вријеме за које сигнал пређе пут од сателита до пријемника. Фазне псеудодужине (*eng. phase pseudorange, carrier-phase measurement*) мјере се тако што пријемник упоређује фазу примљеног носећег таласа са фазом носећег таласа којег сам генерише, мјерећи у ствари фазну разлику. Дужине мјерене до сателита користе се за позиционирање тачака на физичкој површи Земље методом трилатерације, односно просторног лучног пресека [145], [149].

Чињеница да ГНСС пријемници не мјере дужине него псеудодужине, незнатно мијења трилатерациони приступ ГНСС позиционирања (Слика 2-8). Пријемник са тачке А са непознатим координатама (x, y, z) мјери псеудодужине P_i према сателитима S_i чији су положаји познати у тренутку мјерења. Положаје сателита одређује контролни центар сателитског система и корисницима их шаље путем навигационе поруке. Тродимензионални положај непознате тачке принципијелно се одређује пресеком три сфере, чији су центри у сателитима а полупречник једнак псеудодужини.



Слика 2-8. Принцип ГНСС трилатерације [131]

Међутим, пошто мјерене псеудодужине садрже исту непознату грешку синхронизације часовника пријемника и сателита b , за комплетно рјешење потребно их је најмање четири [145], [148]. Поједностављено математички дефинисано, ГНСС трилатерација се своди на рјешавање једначина облика:

$$P_i = r_{As_i} + b = \sqrt{(x - x^i)^2 + (y - y^i)^2 + (z - z^i)^2} + b \quad (2.6)$$

по непознатим координатама (x, y, z) тачке A и непознатој грешци синхронизације b , при чему су познате координате сателита означене експонентом $i = 1, \dots, 4$. Непозната грешка синхронизације часовника пријемника се односи на временску скалу коју реализују часовници у сателитима.

2.2.3. Извори грешака ГНСС мјерења

Кодне и фазне псеудодужине, као и мјерења другим технологијама, оптерећене су различитим изворима грешака које деградирају изведене параметре PVT . Оне се у општем случају могу подијелити на грешке сателитског поријекла, грешке које потичу од средине кроз коју се крећу емитовани сигнали и грешке настале у пријемнику и његовој непосредној околини [131], [150], [151]. Такође, према начину настанка и утицају на резултате мјерења грешке могу бити грубе, систематске и случајне [95], [152]. Посебну групу грешака које се морају узети у обзир код примјене ГНСС за прецизно позиционирање узрокују утицаји који мијењају положај станице корисничког пријемника и утицаји који се покуравају теорији релативитета. Савремену технологију сателитских мјерења карактерише изразито динамички карактер грешака и њихове просторно временске корелације, које се не могу третирати на исти начин као код мјерења терестричким мјерним системима.

У **грешке сателитског поријекла** убрајају се грешке сателитских ефемерида (*енг. satellite ephemeris errors, satellite orbits errors, satellite orbit bias*), грешке часовника сателита (*енг. satellite clock errors, satellite clock bias*), грешка услјед хардверског кашњења сигнала у сателиту (*енг. satellite hardware delay*), грешка услјед варијације фазног центра антене сателита (*енг. Satellite Antenna Phase Center Variation*) и грешка услјед увијања сигнала (*енг. satellite phase "wind-up"*). Подаци о сателитским орбитама и часовницима одређују се у контролном сегменту система. Користе се одређени модели којима се врши предикција вриједности ових параметара, а затим се резултати корисницима емитују путем навигационе поруке. То значи да су сателитске ефемериде и корекције часовника, које се користе у тренутку мјерења,

оптерећене грешкама одређивања и предикције [131]. [153] у свом раду детаљно описују моделе и методе оцјењивања прецизних орбита и корекција часовника, начине провјере квалитета добијених података и њихове дистрибуције ГНСС корисницима.

Тачност одређивања емитујућих ефемерида сателита које постижу контролни центри је реда величине 1 m до 2 m [131], [154], [155]. Грешка положаја сателита, при разматрању њеног утицаја на тачност мјерења псеудодужина, разлаже се на компоненте пројектовањем на вектор мјерења од сателита до пријемника. Најмања је у радијалном правцу (од сателита према центру Земље) [146]. Грешке емитујућих ефемерида производе грешку мјерења псеудодужина око 0,8 m [152]. Пошто су емитујуће ефемериде прогнозиране вриједности, оне се временом мијењају. Са протоком времена опада тачност емитујућих ефемерида, па их контролни центри повремено ажурирају. Независно од контролних центара ГНСС, постоје и научне организације које се, такође, баве одређивањем орбита ГНСС сателита. Најпознатија је Међународна ГНСС служба, са мрежом од преко 500 станица приближно равномјерно распоређених широм свијета на којима се непрекидно прикупљају ГНСС опажања. IGS одређује неколико категорија прецизних ефемерида, од којих су неке доступне и у реалном времену (Табела 2-14).

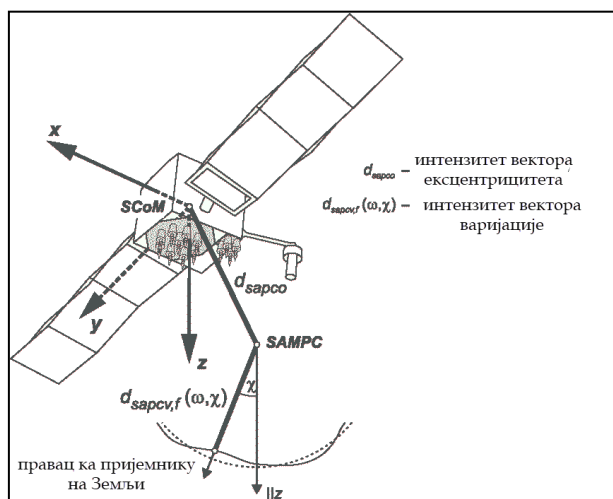
Табела 2-14. Категорије IGS орбиталних параметара GPS и GLONASS система [156]

Тип IGS производа		Тачност	Доступност	Ажурирање	Интервал ажурирања
Емитујуће (broadcast)	Ефемериде	~ 100 cm	У реалном времену	---	На дневном нивоу
	Одступање сателитских часовника	~ 5 ns			
Ултра брзе (ultra-rapid) - predicted half	ефемериде	~ 5 cm	У реалном времену	у 03 h, 09 h, 15 h, 21h (UTC)	15 min
	Одступање сателитских часовника	~ 3 ns			
Ултра брзе (ultra-rapid) - observed half	Ефемериде	3 cm	3 h - 9 h	у 03 h, 09h, 15h, 21h (UTC)	15 min
	Одступање сателитских часовника	~150 ps			
Брзе (rapid)	ефемериде	~2,5 cm	17 h - 41 h	Сваки дан у 17 h	15 min
	Одступање сателитских часовника	~75 ps			5 min
Прецизне (final)	Ефемериде	~ 2,5 cm	12 дана до 18 дана	Сваког четвртка	15 min
	Одступање сателитских часовника	~ 75 ps			sat. 30 s stn. 5 min
Прецизне (final) - GLONASS	ефемериде	~ 3 cm	12 дана до 18 дана	Сваког четвртка	15 min

Дефинитивне прецизне IGS ефемериде, чија је тачност чак 25 mm, бесплатно су доступне путем Интернета, али се могу преузимати тек за пар седмица од тренутка времена за који се потражују. Грешка ефемерида не спада у мјерне грешке већ систематски оптерећује слободне чланове линеаризованог функционалног модела [131]. Грешка релативног позиционирања услед овог систематског утицаја је пропорционална количнику грешке ефемерида и висине лета сателита. [152] у свом истраживању, позивајући се на [141], наводи да је грешка релативног одређивања базне линије од приближно 100 km, услед грешке прецизних ефемерида од 25 mm,

око 0,1 mm. Грешке сателитских ефемерида се, осим коришћењем прецизних ефемерида, могу елиминисати и формирањем разлика мјерења, дужим временом опажања или експлицитним оцјењивањем сателитских путања заједно са осталим параметрима [150], [155].

ГНСС сателити опремљени су атомским часовницима који веома стабилно одржавају фреквенцију током дужег временског периода. Међутим, и поред високе тачности ови часовници одступају од системских времена за релативно мали износ [155], који није константан. Контролни сегменти система прате и одређују стање часовника сваког сателита. Одступања часовника од системског времена се корисницима просљеђују путем навигационих порука. С обзиром да се ове вриједности оцјењују на основу мјерења, и поправљене вриједности читавања времена сателитским часовницима оптерећене су грешкама реда величине до 5 ns [131]. Резидуални дио ове грешке, у зависности од типа сателита, атомског часовника и интервала ажурирања емитованих података узрокује грешку мјерене псеудодужине у интервалу од 0,14 m до 4 m [146]. Као и у случају сателитских орбита, за потребе прецизних радова, могуће је користити одступања сателитских часовника која одређује IGS (Табела 2 - 14), при чему се коришћењем прецизних одступања може постићи тачност псеудодужине од приближно 2 cm. Грешке часовника сателита се могу елиминисати и формирањем простих разлика оригиналних мјерења интерфереометријског типа [150].



Слика 2-9. Вектори ексцентрицитета и варијације фазног центра антене сателита [165]

часовника и елиминисе се заједно са њом формирањем разлика оригиналних мјерења или комбинацијом мјерења [150], [152]. Међутим, корисници једнофреквентних пријемника морају користити емитујуће корекције које се односе на групно кашњење одашиљача (енг. *transmitter group delay*) чије вриједности оцјењује и обезбјеђује Jet Propulsion Laboratory (JPL). Фазни центар антене сателита (енг. *Satellite Antenna Phase Center*) замишљена је тачка антене сателита из које се врши емитовање сигнала. Емитујуће сателитске ефемериде односе се на ову тачку. Пошто није директно доступан, фазни центар сателитске антене описује се својим средњим положајем у односу на центар масе сателита (енг. *Satellite Center of Mass*), а подаци о одређивању средњег положаја доступни су у прецизним ефемеридама [158]. У

Кодови на истим, као и кодови на различитим носећим фреквенцијама нису међусобно синхронизовани због различитих аналогних и дигиталних медија у којима се генеришу и кроз које се крећу. Ово узрокује тзв. хардверска кашњења сигнала [146]. У сателитима се ради о кашњењу сигнала на путу од тачке генерисања до тачке емитовања. Разлика кашњења између фреквенција означава се као диференцијално кодно одступање (енг. *Differential Code Bias*) [157] и у сателитима

може имати вриједности око 3 ns [131]. Грешка мјерења псеудодужина услед утицаја кашњења сигнала у сателиту неодвојива је од грешке сателитских

пракси, сваки сателитски сигнал има свој фазни центар. Из практичних разлога, уводи се појам средњег положаја фазног центра антене сателита (*енг. Satellite Antenna Mean Phase Center*).

Непоклапање средњег положаја фазног центра антене сателита са центром масе сателита (*Слика 2-9*) назива се офсетом фазног центра антене сателита (*енг. Satellite Antenna Phase Center Offset*), а одступање фазног центра од његове средње вриједности варијацијом фазног центра антене сателита (*енг. Satellite Antenna Phase Center Variation*). Од 2017. године компоненте офсета и варијација фазних центара се примјењују за различите типове сателита кроз IGS апсолутни модел фазног центра *igs14.atx* [159]. Модел је дизајниран тако да подржава корекције за више сателитских система и више фреквенција и корекције у зависности од азимута [144]. Занемаривање офсета фазног центра антене сателита код прецизног апсолутног позиционирања може изазвати грешку хоризонталног положаја од неколико центиметара, вертикалног око 10 cm, а занемаривање варијација фазног центра може узроковати максималну грешку вертикалног положаја од 1 mm. Код релативног позиционирања офсет фазног центра антене сателита се елиминише, док је утицај варијације фазног центра практично занемарљив [152].

Да би у сваком тренутку обезбиједили максимално снабдијевање соларном енергијом, сателити се у својој орбити ротирају око Z осе како би соларни панели били оријентисани ка Сунцу, а да би се корисницима омогућио пријем сигнала максималне снаге антене за емитовање сигнала оријентишу се ка центру Земље. Овакво кретање сателита доводи до спиралног кретања сигнала од антене сателита до антене статичног пријемника на Земљи. На тај начин се умјесто линеарно поларизованог појављује циркуларно поларизован сигнал, а настали ефекат се назива увијањем сигнала (*phase "wind-up"* или *phase "wrap-up"*). Ефекат увијања сигнала, због природе мјерних величина, нема утицаја на кодне, већ само на фазне псеудодужине [160]. Посљедица овог ефекта може бити промјена фазе и до једног циклуса, чиме се мјерена дужина од пријемника до сателита мијења за једну цијелу таласну дужину сигнала. Ефекат је посебно изражен код прецизног апсолутног позиционирања, јер последице примјене прецизних ефемерида и корекција часовника, грешка положаја без увођења поправке може бити дециметарском нивоу [157]. Међутим, овај ефекат је готово безначајан код одређивања кратких базних линија [144]. Код дужих базних линија, грешка изазвана овим ефектом елиминише се увођењем поправке или двоструким разликама фазних мјерења [152].

У групу **грешака које потичу од средине кроз коју се крећу сигнали**, убрајају се првенствено грешке услед јоносферског и тропосферског кашњења сигнала (*енг. ionospheric and tropospheric delay of GNSS signal*). Ова два атмосферска слоја карактеристична су по томе што се у њима ГНСС сигнали различито понашају, а њихов укупан ефекат на мјерне сигнале назива се атмосферском рефракцијом (*енг. atmospheric refraction*).

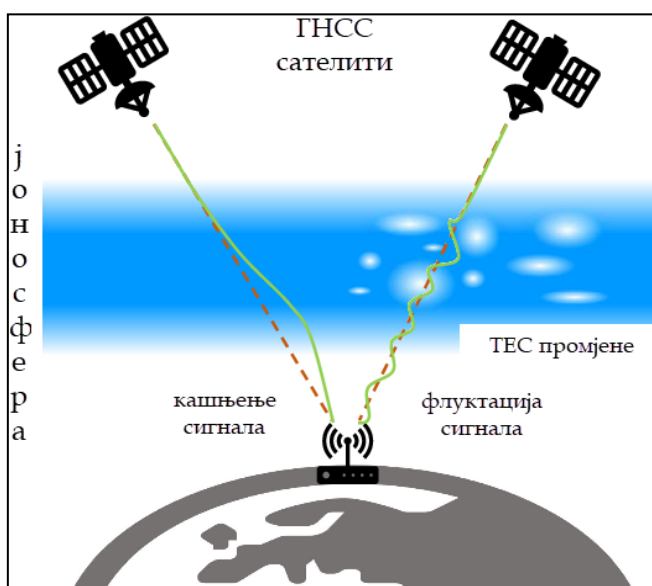
Земљину јоносферу чине дијелови атмосфере од 50 km до 1 500 km у којима је процес јонизације довољног интензитета да утиче на простирање сателитских сигнала (*Слика 2-10*). Јонизација је најинтензивнија током дана, а достиже максимум касно поподне. Током ноћи, процес јонизације је изузетно низак, а најмањи утицај је неколико сати иза поноћи. Такође, утицај јоносфере на простирање сателитских сигнала израженији је током лjeta [95]. Јоносфера двојачко утиче на ГНСС сигнале, јер

су радио таласи које емитују сателити комбинација носећих таласа високе фреквенције и фазних модулација псеудослучајним кодовима ниске фреквенције. Посљедица је да сигнали при проласку кроз јоносферу имају групни (n_g) и фазни (n_f) индекс преламања [131], [146]:

$$n_g = 1 + \frac{40,3N_e}{f^2}, \quad n_f = 1 - \frac{40,3N_e}{f^2} \quad (2.7)$$

при чему f означава фреквенцију, а 40,3 нумеричку константу.

Из једначине 2.7 може се закључити да утицај јоносфере узрокује кашњење модулационе фазе и убрзање фазе носећег таласа. То значи да ће измјерене кодне псеудодужине бити дуже, а фазне краће од истинитих вриједности. Јоносферска рефракција показује дневне и сезонске варијације, а повезана је и са једанаестогодишњим периодом Сунчевих циклуса [150], [152].



Слика 2-10. Јоносферски ефекат на ГНСС сигнале [315]

одговарајуће комбинације оригиналних мјерења [146], [150].

Атмосферски слој од физичке површи Земље до висине од приближно 80 km назива се неутралном атмосфером. Чине га тропосфера, стратосфера и дио мезосфере. Неутрална атмосфера у литератури се често назива само тропосфером, с обзиром да овај слој има доминантан утицај на простирање ГНСС сигнала (Слика 2-11), јер садржи 99% атмосферских гасова и цјелокупан садржај водене паре. Индекс преламања неутралне атмосфере n , која није дисперзивна средина, зависи од актуелних атмосферских параметара, температуре T , атмосферског притиска P и парцијалног притиска водене паре e [131][161]:

$$n = 1 + c_1 \frac{P}{T} + c_2 \frac{e}{T} \quad (2.8)$$

гдје су c_1 и c_2 константе. Грешка мјерења псеудодужина услед утицаја тропосфере зависи од зенитног одстојања сателита у односу на пријемник и мања је за опажања

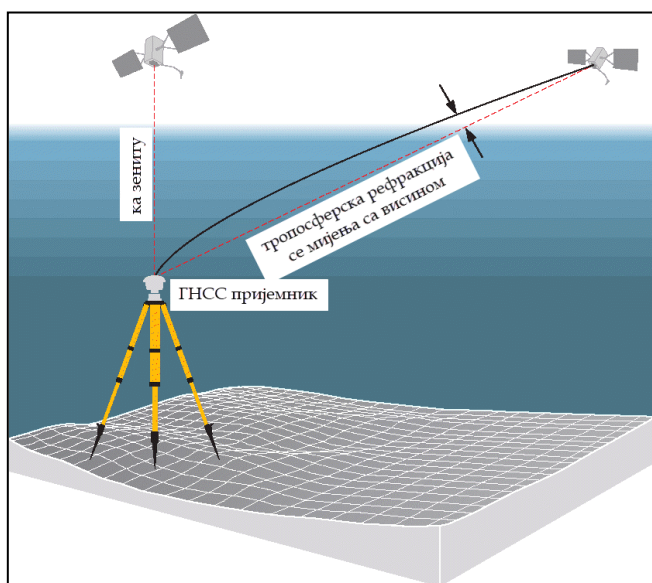
Сумарно, све варијације одражавају се на стање јоносфере, а кашњење сигнала у јоносфери пропорционално је укупном садржају електрона (енг. Total Electron Content – TEC) дуж путање сигнала. Грешка измјерених псеудодужина услед јоносферског кашњења зависи од фреквенције сигнала и зенитног одстојања сателита са кога сигнал долази. Псеудодужине у правцу зенита имају мању грешку (10 m до 30 m) [153] од псеудодужина ближих хоризонту (и до 150 m) [131], [152]. Грешка мјерења псеудодужина услед

утицаја јоносфере може се редуковати или елиминисати, увођењем поправака [145], формирањем разлика или

у правцу зенита (око 2,3 m) од грешке опажања према сателитима који су близу хоризонта (и до 25 m) [146], [150], [152], [154].

Грешка псеудодужина изазвана тропосферском рефракцијом може се редуковати уношењем поправака које се рачунају по неком од многобројних тропосферских модела [145]. Код тропосферског утицаја просторна декорелација брзо наступа већ при растојањима од 15 km, тако да формирање разлика мјерења редукује одговарајућу грешку само за краће базне линије [150], [154]. Утицај тропосферске рефракције је посебно изражен код дугих базних линија, јер су на њиховим крајњим тачкама заступљени различити атмосферски услови. Осим тога, поменути утицај је изражен и у случају када постоји велика висинска разлика између крајњих тачака базних линија. У неким случајевима утицај тропосфере на простирање сигнала може имати сезонске варијације, тако да је најмањи утицај током суве зиме, а највећи током влажног љета [153].

Послије примјене неког од модела поправака гдје фигуришу атмосферски параметри, разликама или комбинација оригиналних мјерења у ГНСС мјерењима преостаје један немоделовани резидуални дио јоносферског и тропосферског кашњења сигнала, који у великој мјери ограничава тачност прецизног ГНСС позиционирања.



Слика 2-11. Тропосферски ефекат на ГНСС сигнале [161]

Јоносферски и тропосферски резидуали имају нерегуларну промјену у времену и могу се умањити продужавањем трајања мјерне сесије. Примјена линеарне комбинације мјерења елиминира 99,9% јоносферског ефекта првог реда који може изазвати грешку псеудодужине и до 150 m [157]. Ефекат кашњења другог реда може узроковати грешку од 4 cm, при елевационом углу од 10°, док утицај ефекта трећег реда може бити 1 mm до 4 mm [162]. Разматрање ефекта другог реда заједно са напредним тропосферским моделима, може побољшати тачност координата одређених PPP методом за 3 mm и смањити вријеме конвергенције за 15% [157]. Тропосферско кашњење

сигнала у правцу зенита дијели се на суву и влажну компоненту, а 90% кашњења долази од суве компоненте. Ефекат се увећава за сигнале пристигле под елевационим углом од 5° [157]. Утицај тропосферске рефракције споро се мијења у времену и због тога се значајно може умањити тек на нивоу троструких разлика ГНСС мјерења [152].

Грешке пријемника и непосредне околине, које се морају узети у обзир за потребе прецизног PVT, производе ефекти као што су мјерни шум пријемника (*eng. receiver noise*), хардверско кашњење сигнала у пријемнику (*eng. receiver hardware delay*), грешка часовника пријемника (*eng. receiver clock error, receiver clock bias*), варијације фазног

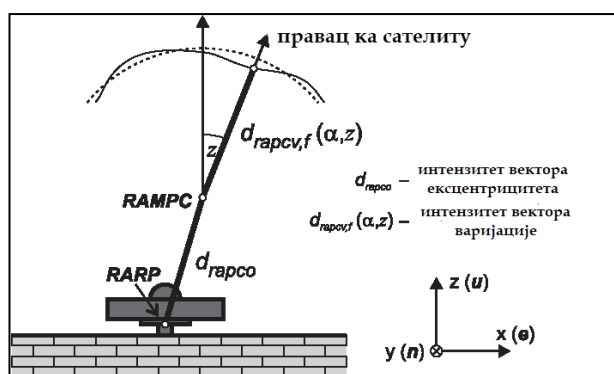
центра антене пријемника (*енг. receiver antenna phase center variation*) и вишеструка рефлексија сигнала (*енг. multipath*).

Мјерни шум у пријемнику појављује се као посљедица сталног кретања електрона у електронским компонентама пријемника [160]. У мјерни шум улазе и немоделисани системски утицаји као и непознате резидуалне грешке преостале након непотпуне елиминације или редукције систематских утицаја. Мјерни шум пријемника описује се и као посљедица термалног шума и динамичког напрезања пријемника при обради сигнала [161]. Због утицаја мјерног шума, кодне псеудодужине имају прецизност око 1 m, а фазне псеудодужине од 1 mm до 2 mm [146]. Шум у пријемнику не може се елиминисати из мјерења и представља случајну грешку мјерења.

Хардверско кашњење сигнала у пријемнику је кашњење сигнала од мјеста пријема до мјеста обраде. Диференцијално кодно одступање у пријемнику може имати вриједности око 10 ns [131]. Хардверско кашњење сигнала у пријемнику не утиче на тачност мјерења псеудодужине, већ само на оцјене грешака часовника пријемника и најчешће се посматрају као један извор грешака [158]. Елиминишу се примјеном модела двоструких разлика псеудодужина [152].

Грешка часовника пријемника је одступање часовника пријемника од системског времена. С обзиром да се грешка часовника пријемника оцјењује као непозната величина у поступку математичке обраде мјерења, или се потпуно елиминише одговарајућом комбинацијом оригиналних мјерења, захтјеви тачности синхронизације часовника пријемника нису велики. Из тог разлога се у пријемницима могу и користе обични и економски прихватљивији кварцни осцилатори. Грешка часовника пријемника може се елиминисати и коришћењем екстерног високостабилног осцилатора, јер сваки пријемник има могућност прикључења екстерних сензора разних типова [150].

Фазни центар антене пријемника (*енг. Receiver Antenna Phase Center*) замишљена је тачка антене пријемника у којој се врши пријем сигнала. Референтну тачку антене пријемника (*енг. Receiver Antenna Reference Point*), IGS дефинише као тачку продора вертикалне осе симетрије антене кроз њено подножје. Средњи положај фазног центра антене пријемника (*енг. Receiver Antenna Mean Phase Center*) одређује се из практичних разлога и служи за довођење у везу тачака између којих се мјери псеудодужина.

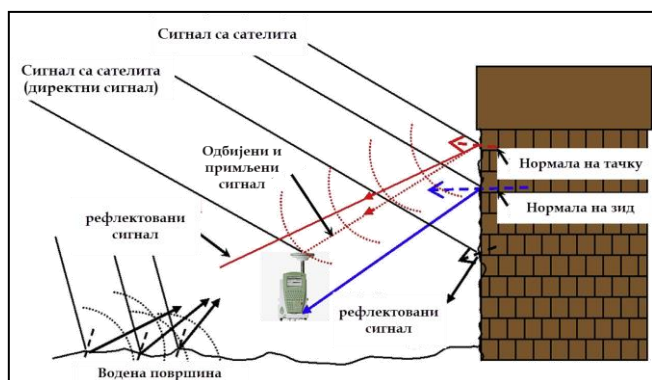


Слика 2-12. Вектори ексцентрицитета и варијације фазног центра антене пријемника [165]

Ексцентрицитет фазног центра антене пријемника (*енг. Receiver Antenna Phase Center Offset*) представља растојање између референтне тачке антене и средњег положаја фазног центра антене и различит је за сваку фреквенцију сигнала (Слика 2-12). Међутим, актуелна тачка пријема сигнала показују варијације око средњег положаја. Варијације фазног центра антене пријемника (*енг. Receiver Antenna Phase Center Variation*) зависе од азимута сателита и зенитног одстојања

путање сигнала, односно релативног положаја сателита и пријемника, и могу достићи центиметарске вриједности. Испитивањем је могуће одредити вриједности грешака псеудодужине за одређени тип антене у зависности од азимута и висине сателита [146] и елиминисати их из мјерења увођењем поправака [150]. Релативна калибрација у спољашњим условима, апсолутна калибрација у спољашњим условима и апсолутна калибрација у анехоичној комори три су главне методе одређивања варијација фазних центара антена пријемника и њиховог моделовања [163]. Моделовање варијација фазних центара врши се у неколико научних центара (енг. *National Geodetic Survey – NGS, Geo++ GmbH*), а најновији модел калибрације, који се све више користи, је модел апсолутне калибрације *igs14.atx* [153]. Вриједности офсета фазних центара антена могу бити и 10 cm, а вриједности варијација које су систематског карактера обично су мање од 2 cm (цитирано [164] у [152]) и зависе од фреквенције, елевационог угла пристиглог сигнала и у мањој мјери азимута [144]. Они највише утичу на вертикални положај тачке чији се координате одређују. Ако се користе антене истог типа, и ако су антене исто оријентисане, за кратке базне линије није потребно уводити поправке, јер се утицај ексцентрицитета и варијација фазног центра поништавају у моделу двоструких разлика.

Вишеструка рефлексија ГНСС сигнала је појава да антена пријемника осим директних сигнала са сателита прима и сателитске сигнале који се одбијају од околних природних или вјештачких површина (Слика 2-13). Директни и одбијени сигнали мешају се у антени, због чега узрокују грешку мјерења псеудодужина. За разлику од осталих извора грешака, вишеструка рефлексија сигнала најзначајнији је извор грешака при високопрецизном PVT [165].



Слика 2-13. Вишеструка рефлексија ГНСС сигнала од површи у близини антене пријемника [165]

Грешка услед утицаја вишеструке рефлексије посебно је изражена код релативног статичког позиционирања и за случај кратких базних линија [166]. Величина утицаја вишеструке рефлексије зависи првенствено од четири фактора: рефлективности окружења у којем се налази пријемник, сателитско-антенске геометрије, типа

антене пријемника, те хардвера и софтвера пријемника (алгоритама за процесирање података). Извор појаве вишеструке рефлексије могу бити

природни и вјештачки објекти у близини антене пријемника (високе зграде и објекти са фасадама од рефлектујућих материјала, водене површине, висока брда и планине у близини станице, дрвеће, па и земљиште око станице на којој је постављена антена пријемника). Укупна грешка на станици укључује грешке које потичу од четири утицаја [152]:

$$\delta S = d_{rapco} + d_{rapcv} + d_{mp, near-field} + d_{mp, far-field} \quad (2.9)$$

при чему су d_{rapco} и d_{rapcv} грешке услед ексцентрицитета и варијација фазног центра антене пријемника, док су $d_{mp, near-field}$ и $d_{mp, far-field}$ грешка вишеструке рефлексије која

настаје услијед одбијања сигнала од предмета који су у “*near-field*” области (непосредна близина антене) и грешка под утицајем истог ефекта али из “*far-field*” области (област изван “*near-field*” на типично метарској удаљености од антене).

Поменуте компоненте вишеструке рефлексije имају потпуно различите физичке особине. $d_{mp, near-field}$ је систематска грешка са математичким очекивањем различитим од нуле и периодом од неколико сати, а може се елиминисати дужим периодом мјерења. $d_{mp, far-field}$ је систематска грешка са математичким очекивањем нула [167] и периодом између 15 min и 30 min, а постаје случајна грешка пролонгирањем периода мјерења [141]. Грешка кодних псеудодужина под утицајем вишеструке рефлексije може бити на нивоу од неколико метара, док фазне псеудодужине, теоријски не могу имати грешку услијед вишеструке рефлексije већу од четвртине таласне дужине, што је око 4,8 cm за мјерења на L1, а 6,1 cm за мјерења на L2 сигнаlima GPS-а [131], [152], [165]. Грешка положаја која потиче од вишеструке рефлексije сигнала је реда величине неколико милиметара у хоризонталној равни, док је за вертикалну компоненту ова вриједност лошија два до три пута. Ефекат вишеструке рефлексije сигнала има посебан утицај и на пријемнике који раде у динамичком режиму [158]. Наиме, када је пријемник у стању кретања, посебно кретања великом брзином, околина се нагло мијења а са тим се и рефлектовани сигнали брзо мијењају. Суперпозиција различитих рефлектованих сигнала узрокује бржу промјену фазе композитног сигнала. Амплитудни феномен вишеструке рефлексije има случајни карактер, тако да ефекат личи на појаву бијелог шума. Ублажавање утицаја вишеструке рефлексije је од суштинског значаја за постизање центиметарске и милиметарске тачности позиционирања. Постоје различите технике ублажавања утицаја вишеструке рефлексije. Најчешће се класификују као технике које зависе од локације, хардвера и софтвера [146], [147]. Технике које зависе од локације могу врло ефикасно да ублаже утицај вишеструке рефлексije, тако што се она моделује на основу познатог геометријског односа сателита, антене и рефлектујуће површи. Ако је антена пријемника на станици непомицна, и ако је околина непромјенљива, онда су флукутација амплитуде и промјена фазе рефлектованог сигнала зависне углавном од промјене геометрије сателита и путање рефлектованог сигнала, што је могуће моделовати. Међутим, окружење локације антене пријемника се временом може промијенити због вегетације, временских прилика или сезонских промјена, а ажурирање мапа вишеструке рефлексije за одређену локацију је скуп процес. С тога су технике засноване на хардверу и софтверу економски прихватљивије. [165] у свом раду даје студиозан преглед ових техника, с посебним освртом на оне које се тичу фазних мјерења псеудодужина. Утицај вишеструке рефлексije могуће је знатно смањити условима при мјерењу, првенствено избјегавањем постављања антена у близини рефлектујућих површи уколико је то могуће [155], [158], коришћењем антена са технологијама отпорним на вишеструку рефлексiju [95] и коришћењем софтвера са имплементираним алгоритмима за редукацији или елиминацију грешака вишеструке рефлексije [154]. На примјер, [163] наводе да за антену типа *choke-ring* постављену на висини 2 m од тла, вишеструка рефлексija која потиче од одбијања сигнала од тла изазива нестабилност фазног центра антене од ± 1 mm. Додатно, ови аутори за елиминацију грешке вишеструке рефлексije препоручују да се не обрађују сигнали пристигли са сателита на малим елевационим угловима. Примјена Калмановог филтера код PVT

пријемником у покрету, може успјешно филтрирати и елиминисати грешке вишеструке рефлексије сигнала [154]. Међутим, немогуће је потпуно елиминисати пристизање рефлектованих сигнала на антену пријемника, тако да утицај вишеструке рефлексије увијек постоји, само је питање у ком интензитету. Формирањем двоструких разлика мјерења редукује се утицај вишеструке рефлексије сигнала. Наиме, формирањем двоструких разлика компонента $d_{mp, near-field}$ се скоро потпуно елиминише. Међутим, у овом моделу разлика остаје резидуални дио компоненте $d_{mp, far-field}$ са нерегуларном промјеном у времену и један је од главних фактора који ограничава тачност позиционирања [152].

Под утицајем гравитационих сила, првенствено Мјесеца и Сунца, на Земљину кору и океане појављују се **помјерања станице на којој се налази ГНСС пријемник** (*eng. GNSS site displacement*). Поред тога, појављују се помјерања усљед центрифугалних нерегуларности узрокованих варијацијама у Земљиној ротацији, тј ротационих деформација насталих помјерањем пола. Утицаји који изазивају помјерања опажачке станице мањег интензитета, најчешће милиметарских вриједности, су они које узрокује оптерећење узроковано атмосферским притиском, оптерећење у присуству сњечног и леденог покривача, влажности земљишта и подземних вода, и оптерећење узроковано притиском на океанском дну.

Величина и правац помјерања станице изазвана гравитационим дјеловањем Сунца и Мјесеца зависе од позиције станице у односу на њих, интензитета привлачних сила, као и од реологије Земље. Вертикална помјерања под дејством ових сила могу бити и неколико дециметара, док су хоризонтална неколико центиметара [153], [168]. Ефекат плиме Земљине коре (*eng. solid Earth tides*) чине једна константна (зависи само од геодетске ширине) и више периодичних компоненти (дневна, полудневна и дугопериодична), а описују се сферним хармоницима у смислу *Love* и *Shida* бројева. Због тога је овај ефекат промјенљиви, и на дневном нивоу може достићи неколико центиметара у радијалном правцу [159]. У попречном правцу ова вриједност је много мања. Помјерања станице узрокована плимом Земљине коре готово су истог интензитета на широком подручју, и потпуно се елиминишу формирањем разлика мјерења, а не узимају се у обзир код кратких базних линија. Међутим, овај утицај се мора узети у обзир код прецизног апсолутног позиционирања, а умањује се увођењем поправака примјеном модела плиматског дисања Земљине коре (*eng. solid Earth tide models*).

Плима океана узрокује промјене распореда океанске масе (*eng. ocean loading*). Посљедично, јављају се промјене оптерећења и деформације Земљине коре, које могу изазвати вертикална помјерања са вриједностима и до 10 cm, а ефекат се посебно испољава за станице близу морске обале [153], [169]. Хоризонтална помјерања су најчешће два до три пута мања. [168] наводе да је вриједност хоризонталног помјерања изазваног овим ефектом 2 cm и мање. Конвенционално, плиматско оптерећење има 11 хармонијских елемената са фреквенцијама које одговарају таласима са полудневним, дневним и дугим периодом [170]. Као и у случају ефеката плиме Земљине коре, средња вриједност ефеката плиматског оптерећења на ГНСС станицу на дневном нивоу различита је од нуле. Највећи дио овог утицаја се због мале варијабилности помјерања које изазива, елиминише у моделима разлика опажања [152]. Међутим, овај утицај се мора узети у обзир код

PPP, а елиминише се коришћењем IGS корекција за орбите и часовнике сателита [157].

Плиматски утицај Мјесеца и Сунца на Земљину атмосферу и промјена температуре, такође узрокује варијације садржаја огромних ваздушних маса, што се посебно огледа у промјенама атмосферског притиска. Ефекат атмосферског оптерећења (*енг. atmospheric pressure loading*) за посљедицу има одређену деформацију Земљине коре која може достићи вриједност вертикалног помјерања око 25 mm [157]. Хоризонтално помјерање је најчешће три до десет пута мање [131], [157], [171]. Грешка услјед овог ефекта елиминише се увођењем поправака, које се генеришу примјеном геофизичких модела. Ефекти оптерећења услјед промјена снежног и леденог покривача, влаге у земљишту и подземним водама, као и притиска у океанском дну, такође доприносе помјерању локације. Међутим, ови ефекти имају далеко мањи утицај на амплитуду помјерања од атмосферског оптерећења [157].

Промјена положаја пријемника на Земљи, тачније његове латитуде, дешава се и као посљедица помјерања пола изазваног клаћењем осе ротације Земље у односу на њену кору, посматрано у референтном систему фиксираним за Земљу. Вриједности помјерања изазваних утицајем помјерања пола (*енг. polar motion*) могу бити и до 25 mm по висини и 7 mm хоризонтално [159]. IGS центри при генерисању својих производа који се односе на орбите и часовнике користе одређене моделе корекције података за овај утицај. За базне линије краће од 500 km, које се одређују релативним позиционирањем, грешка коју производи овај ефекат своди се на занемарљиву вриједност или се поништава у моделима разлика опажања [152].

На ГНСС одређивање PVT дјелују различити **ефекти који се описују теоријом релативитета** (*енг. relativistic effects*). Узроци појаве ових ефеката леже у чињеници да се сателити крећу релативно великом брзином као и то да постоји разлика у гравитационом потенцијалу између висине лета сателита и физичке површи Земље [146], [159]. Константни дио релативистичког ефекта регулише се смањењем основне фреквенције осцилатора прије лансирања сателита [131], чиме се омогућава да пријемник на површи Земље региструје сигнале фреквенције једнаке оној коју би емитовао сателитски часовник када би био смјештен на геоиду [152]. Периодични (резидуални) дио овог утицаја, који преостаје због елиптичне сателитске путање, у потпуности се поништава коришћењем двоструких разлика мјерења [152]. Пријемник који је статичан на површи земље и ротира заједно са њом, од момента када је сигнал са сателита емитован до момента његовог пријема, прелази одређени пут. Посљедични утицај на часовник тог пријемника је тзв. Сањаков ефекат (*енг. Sagnac effect*) [146], познат и као ефекат закривљености (савијања) ГНСС сигнала. Грешка мјерења услјед Сањаковог кашњења, која зависи од фреквенције и елевационог угла сателита, елиминише се увођењем поправака које се често називају поправке ротације Земље (*енг. Earth rotation corrections*), а најчешће се примјењује унутар софтвера у пријемнику. Када се не би користиле поправке за Сањаков ефекат, грешка положаја при аутономном позиционирању би била од 40 m до 46 m [146]. На кретање сателита утиче и закривљеност континуума простор-вријеме, која је узрокована дејством гравитационог поља Земље. Отклања се увођењем поправке за убрзање сателита познате као и Schwarzschild корекција [152]. Ефекат закривљености континуума има утицај и на простирање сателитског сигнала у близини Земље, познат као Shapiro ефекат или Shapiro кашњење (*енг. Shapiro*

gravitational time delay). Максимална вриједност поправке добија се за случај пријема сигнала при елевационом углу 0° и износи око 19 mm, а важи за случај апсолутног позиционирања [157]. У случају релативног позиционирања ова грешка је много мања и износи 1 ppb [152].

2.2.4. Методе ГНСС позиционирања

Позиционирање примјеном ГНСС-а изворно се заснива на примјени просторног лучног пресјека мјерених кодних и/или фазних псеудодужина. Када су у питању методе (поступци) ГНСС позиционирања постоји неколико приступа у њиховој класификацији.

У општем случају, ГНСС позиционирање може бити: аутономно (апсолутно) (*eng. point positioning*), релативно (*eng. relative positioning*) и диференцијално (*eng. differential positioning*) [131]. Важно је напоменути да у стручној литератури постоји неконзистентност када су у питању дефиниције релативног и диференцијалног позиционирања.

Посматрано из угла стационарности ГНСС пријемника и времена запосједања тачака, позиционирање може бити: перманентно (*eng. continuous*), статичко (*eng. static*), брзо статичко (*eng. fast static*), псеудокинематичко (*eng. stop&go*) и кинематичко (*eng. kinematic*). ГНСС позиционирање може се посматрати и према тренутку времена одређивања положаја, гдје се класификују позиционирање у реалном времену (*eng. real time*) и позиционирање са накнадном обрадом података (*eng. post processing*).

Са становишта тачности позиционирања, што је важно за област геодетског осматрања помјерања објеката, одређене методе могу се класификовати у групу прецизних ГНСС метода [172]: прецизно апсолутно позиционирање, релативно статичко позиционирање, брзо релативно статичко позиционирање, релативно кинематичко позиционирање и диференцијално ГНСС позиционирање у реалном времену.

2.2.4.1. Сумарни преглед метода ГНСС позиционирања

Тачност позиционирања ГНСС методама, један је од најважнијих критеријума при избору конкретне методе позиционирања како за већину радова тако и за област геодетског осматрања помјерања објеката. У том смислу методе ГНСС позиционирања показују различиту осјетљивост на промјену фактора који утичу на тачност, и то: број и распоред видљивих сателита, атмосферске услове и интервал времена са којим се врши регистрација мјерења [150]. Што се тиче мјерних величина, са становишта тачности, фазна мјерења имају предност над кодним. Релативно позиционирање, дуже вријеме запосједања тачака и накнадна обрада података у општем случају имају вишу тачност у односу на апсолутно позиционирање, покретне пријемнике и обраду у реалном времену. Међутим, методе које имају елементе друге групе погодне су за област геодетског осматрања помјерања објеката у реалном времену и посебан акценат практичних истраживања је управо на њима. Класификација метода ГНСС позиционирања са основним принципима и најважнијим карактеристикама дата је у Табели 2-15.

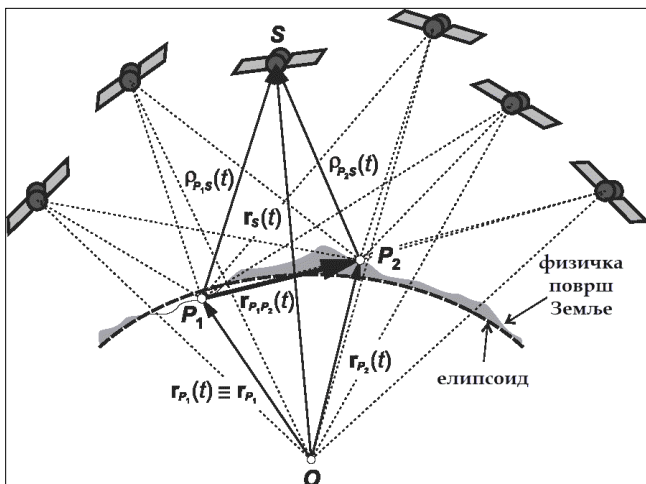
Табела 2-15. Методе ГНСС позиционирања и њихове карактеристике

Метод позиционирања	Начин одређивања позиције	Принцип и основне карактеристике
Перманентно	Накнадна обрада	Релативно позиционирање симултаним фазним мјерењима, перманентно стационарани пријемници, вријеме трајања опажања неограничено, тачност неколико милиметара, вишефреквентни пријемници, произвољна међустатична растојања.
Статичко	Накнадна обрада	Релативно позиционирање симултаним фазним мјерењима, премјештање пријемника, вријеме опажања од 1h до неколико дана, тачност неколико милиметара до 1cm, једнофреквентни или вишефреквентни пријемници, растојања до 100km.
Брзо статичко	Накнадна обрада	Релативно позиционирање симултаним фазним мјерењима, премјештање пријемника и евентуално поновно запосједање тачака, вријеме опажања од неколико минута до 1h, тачност од неколико милиметара до 2 cm.
Квазикинематичко	Накнадна обрада	Релативно позиционирање симултаним фазним мјерењима, иницијализација и секвенцијално одређивање тачака, вријеме иницијализације неколико минута или OTF, опажање неколико епоха, тачност 1 cm до 3 cm, пожељни вишефреквентни пријемници, растојања до 10 km.
Прецизно аутономно позиционирање (Precise Point Positioning - PPP)	Накнадна обрада	Апсолутно позиционирање кодним и фазним мјерењима, коришћење прецизних ефермида, корекција часовника и додатних неконвенционалних корекција, вријеме конвергенције око 40 min, прецизност неколико mm до cm.
Кинематичко	Накнадна	Релативно позиционирање симултаним фазним мјерењима, иницијализација и одређивање трајекторије, вријеме иницијализације неколико минута или OTF, тачност неколико cm, пожељни двофреквентни пријемници, растојања и до неколико десетина km.
Кинематичко у реалном времену (RTK)	У реалном времену	Релативно позиционирање симултаним фазним мјерењима, иницијализација и секвенцијално одређивање тачака, вријеме иницијализације неколико минута или OTF, вријеме опажања од неколико епоха, тачност од 1 cm до 3 cm, растојања мања од 10 km или неколико десетина km у мрежи перманентних ГНСС станица.
Диференцијално ГНСС позиционирање (DGNSS)	У реалном времену	Релативно позиционирање симултаним кодним или фазним мјерењима, одређивање тачака или навигација, вријеме опажања од једне до неколико епоха, тачност позиционирања кодним мјерењима од 0,5 m до 3 m, тачност позиционирања фазним мјерењима боље од 0,1 m. Произвољна растојања (најчешће до 20 km).
Прецизно позиционирање у реалном времену PPP-RTK	У блиском реалном и реалном времену	Апсолутно позиционирање кодним и фазним мјерењима, коришћење прецизних ефермида, корекција часовника и додатних неконвенционалних корекција, вријеме конвергенције неколико минута, прецизност неколико cm.
Аутономно (SPP)	У реалном времену	Апсолутно позиционирање кодним мјерењима једног пријемника, одређивање тачака или навигација, вријеме опажања од једне до неколико епоха, тачност од 1 m до неколико десетина метара.

2.2.4.2. Релативно ГНСС позиционирање

ГНСС пријемник на референтној станици мјери псеудодужине до свих видљивих сателита у унапријед дефинисаним тренуцима времена. Ови временски тренуци се називају епохама опажања. Референтна станица комуникационим везама (радио веза, GSM веза, Интернет, итд.) може у околни простор емитовати своја оригинална мјерења и податке о епохама када су мјерења настала. За емитовање и пренос мјерења најчешће се користи RTCM (*eng. Radio Technical Commission for Maritime Services*) формат података. Кориснички пријемник у непосредној околини прима мјерења псеудодужина са референтне станице и комбинује их са својим мјерењима. Као и код диференцијалног позиционирања и у овом случају се утицаји грешака ефемерида, јоносферске и тропосферске рефракције поништавају. У случају да се

комбинују мјерења фазних псеудодужина, постоји потреба да се ријеше фазне неодређености. Међутим, ако се користе фазне псеудодужине, грешке вишеструке рефлексије и случајне грешке мјерења су много мање него у случају коришћења кодних псеудодужина. Посљедично, тачност релативног позиционирања (Слика 2-14) мјерењем фазних псеудодужина је далеко боља. Пошто се у моделу комбинација псеудодужина релативног позиционирања појављује разлика геометријских растојања од референтне станице и пријемника до сателита, непознате величине које се одређују из ових комбинација су у ствари три координатне разлике и једна грешка синхронизације часовника. С обзиром на то да се координате корисничког пријемника добијају индиректно, сабирањем координата референтне станице и израчунатих координатних разлика, метода се назива релативним ГНСС позиционирањем [131], [173]. За разлику од аутономног и диференцијалног позиционирања, који се најчешће базирају на једнофреквентним мјерењима кодних псеудодужина, и најчешће из једне констелације, релативно позиционирање се обично заснива на обради свих доступних кодних и фазних мјерења, на више фреквенција, а у посљедње вријеме и из већег броја констелација. За формирање разлика мјерених псеудодужина у моделу релативног позиционирања користе се неки од модела разлика интерфереометријског типа или фреквенцијске комбинације о којима ће бити ријечи у поглављу 5.



Слика 2-14. Принцип релативног ГНСС позиционирања [152]

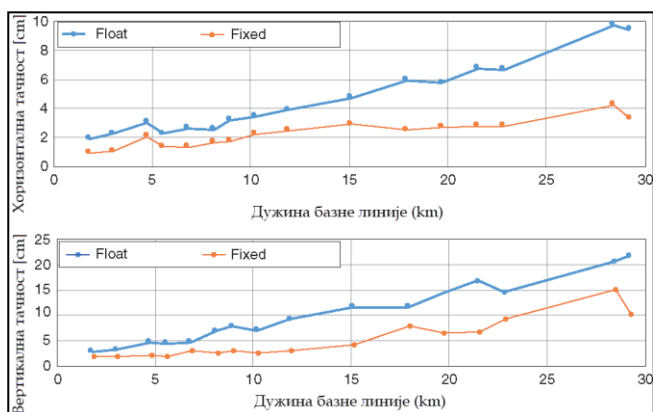
За разлику од аутономног и диференцијалног позиционирања, који се најчешће базирају на једнофреквентним мјерењима кодних псеудодужина, и најчешће из једне констелације, релативно позиционирање се обично заснива на обради свих доступних кодних и фазних мјерења, на више фреквенција, а у посљедње вријеме и из већег броја констелација. За формирање разлика мјерених псеудодужина у моделу релативног позиционирања користе се неки од модела разлика интерфереометријског типа или фреквенцијске комбинације о којима ће

бити ријечи у поглављу 5. Постоје два основна режима релативног позиционирања: статичко и кинематичко.

Статичко позиционирање је релативно ГНСС позиционирање стационарног корисничког пријемника у односу на референтну станицу. Користи се искључиво за потребе високо прецизног позиционирања. Одликује га велики број опажања, који омогућавају спровођење строгих статистичких анализа и поуздано рјешавање фазних неодређености, што на крају резултира милиметарском тачношћу позиционирања. С обзиром да овај режим рада не даје резултате у реалном времену за његову примјену нису потребне ни комуникационе везе референтне станице и корисничког пријемника, а релативни положаји тачака одређују се накнадном софтверском обрадом велике количине прикупљених ГНСС мјерења. Релативним статичким позиционирањем заснованим на двоструким разликама фазних

псеудодужина и са фиксним рјешењем фазних неодређености, на кратким базним линијама може се остварити тачност од 1 mm, па чак и боље [173], [174]. На средње дугим базним линијама може се остварити тачност позиционирања од неколико милиметара, са дужим периодом мјерења [173], [175]. [176] у свом раду наводи да је тачност позиционирања на дугим базним линијама на центиметарском нивоу.

Кинематичко позиционирање је релативно ГНСС позиционирање покретног пријемника у реалном времену. Ако се користе фазне псеудодужине, постиже се висока тачност позиционирања, а такав режим се назива RTK (*енг. Real Time Kinematic*) позиционирање [95]. Процес рјешавања фазних неодређености у овом режиму рада је познат и као иницијализација. Проблему брзог рјешавања фазних неодређености посвећена је велика пажња у истраживањима, како у претходном периоду, тако и данас. Брзо рјешавање фазних неодређености је од суштинског значаја за примјену RTK методе на кратким и средње дугим базним линијама. Постоји неколико приступа у извођењу иницијализације: статичким мјерењима, запосједањем тачака са познатим координатама, замјеном мјеста ГНСС антена или посебним алгоритмима у случају да је пријемник у покрету (*енг. On-The-Fly – OTF*). Статичка иницијализација подразумијева статичко одређивање почетног вектора положаја покретног пријемника [173]. Међутим, за већину примјена се захтијева кинематичка иницијализација, односно рјешавање фазних неодређености у покрету (*OTF*), чиме се постиже брза апроксимација почетног вектора и његова накнадна побољшања [173], [177]. Брзе технике рјешавања фазних неодређености биле су основа развоја RTK методе позиционирања.



Слика 2-15. Однос између тачности плутајућих и фиксних рјешења релативног позиционирања и дужине базне линије [173]

Слика 2-15 показује типичну грешку позиционирања са хоризонталном и вертикалном компонентом за плутајућа (*енг. float*) и фиксна (*енг. fix*) рјешења мјерене базне линије у распону од 3 km до 28 km. За ову анализу, коришћена су дневна кинематичка мјерења, при чему је базна станица била непомична, а обрада података извршена у RTKLIB софтверу отвореног кода [178], [179]. Добијене вриједности стандардних одступања представљају типичну грешку позиционирања корисничког покретног пријемника за изабрану дужину базне линије. Очигледно је да са повећањем дужине базне линије, опада тачност позиционирања. Такође, јасно је да се у случају фиксних рјешења, односно рјешавања фазних неодређености на основу двоструких разлика мјерења, значајно смањује грешка позиционирања (до

У пракси, грешке фазног центра антене пријемника, утицај вишеструке рефлексије на кодну и фазна мјерења, као и утицај атмосферске рефракције повећавају грешку релативног позиционирања са милиметарског на центиметарски ниво. Пошто је атмосферска рефракција најзначајнији фактор који доприноси грешци позиционирања, са просторном и временском декорелацијом утицаја на ГНСС сигнале, грешка релативног позиционирање се може посматрати као функција дужине основне линије.

центиметарског нивоа). Дужина базне линије, као главни фактор, ограничава примјену RTK методе за подручја у радијусу од 10 km до 15 km око базне станице. На том подручју хоризонтално позиционирање је са тачношћу око 2 cm, а вертикално око 5 cm [173]. Лошија тачност одређивања вертикалне компоненте је и код ове методе посљедица геометрије ГНСС сателита и пријемника. Имајући у виду да се у оквиру RTK методе фазне неодређености рјешавају од епохе до епохе, то значи да се резултати кинематичког позиционирања могу поредити са резултатима статичке методе. Такође, то значи да се додатна прецизност резултата позиционирања може добити осредњавањем скупа RTK рјешења на истој локацији насталих у неколико секунди или десетина секунди мјерења (неколико епоха опажања). Такође, повећање броја доступних констелација доноси нове погодности и за RTK методу. Наиме, повећање броја видљивих сателита и доступних сигнала повећава редувантност у процесу оцјене рјешења позиције. Међутим, када су у питању оперативне способности RTK методе у погледу дужине базних линија које се могу одређивати, побољшања услјед ових иновација врло су мала чак и у случајевима отвореног неба [173]. Обрада података са више констелација је корисна када је ограничена отвореност неба изнад корисничког пријемника, а само додатна мјерења при различитим геометријским положајима сателита и пријемника побољшавају оцјену положаја пријемника. RTK метода захтијева размјену мјерења са једног пријемника ка другом у реалном времену. Технологије и протоколи којима се то остварује биће описани у поглављу 3.

Након што је основни RTK модел успостављен као одржив оперативни облик PVT на центиметарском нивоу и у реалном времену, пажња истраживача фокусирана је на рјешавање основог ограничења RTK методе – дужине базне линије. Прво су побољшани алгоритми за дуже базне линије, првенствено кроз употребу више референтних станица. Већ са првим истраживањима је постало очигледно да модел вишеструких референтних станица може да обезбиједи корекције на регионалном нивоу и да у том случају растојања између референтних станица могу бити дужа од 15 km. Овај модел је познат и као мрежни RTK (*eng. Network RTK - NRTK*). Главне компоненте NRTK обраде података су:

- рјешавање фазних неодређености на референтној станици,
- оцјена коефицијената корекција и
- рачунање и примјена опажања/корекција на покретној станици.

Фазна мјерења са фиксним рјешењем цијелог броја таласних дужина на референтној станици неопходна су за процјену непознатих утицаја на локацији корисничког пријемника. Ова рјешења морају бити позната у реалном времену. Континуирано рјешавање фазних неодређености је изазован процес, а за његово успјешно провођење користе се све *a priori* информације, укључујући унапријед одређене координате станице, предиктоване сателитске ефемериде, NRTK оцјене јоносферске и тропосферске рефракције, оцјене вишеструке рефлексije сигнала за фазна мјерења из анализе мрежних станица и корекције фазних центара антена сателита и пријемника из претходних калибрација антена. За моделовање (интерполацију) непознатих утицаја између референтне станице и корисничког пријемника, који су зависни од удаљености, развијене су бројне технике. Најчешће се користе линеарне комбинације, линеарна интерполација, линеарна

интерполација заснована на удаљености, моделовање полинома нижег степена и колокација по методи најмањих квадрата. Како се степен промјена величина грешака разликује, разликује се и учесталост емитовања корекција. Корекције за утицај јоносфере оцјењују се за сваки сателит и преносе приближно сваких 10 s. Корекције сателитских орбита се, такође, оцјењују за сваки сателит и емитују сваких ~ 60 s. Грешке услјед утицаја тропосфере се оцјењују за сваки сателит или за сваку референтну станицу, а корекције се емитују сваких ~ 60 s. Грешке изазване утицајем јоносфере имају највеће временске варијације и стога захтијевају већу брзину преноса корекција и мање подручје унутар кога се корекције моделују. Обично су израчуната референтна мјерења која се користе за NRTK са најближе референтне станице и одређена по неком од прецизних модела корекција. Корекције за покретни пријемник рачунају се на основу опажања на референтној станици, модела корекција и координатних разлика референтне станице и приближног положаја пријемника. Израчунате корекције пријемник користи за оцјену положаја са центиметарском тачношћу, по принципу RTK методе за веома крате базне линије. Једна од метода рачунања корекција у NRTK је заснована на симулираним (виртуелним) мјерењима референтне станице. Пошто се симулирања мјерења односе на привидну станицу у близини покретног пријемника, накнадне двоструке разлике брзо доводе до тачних плутајућих рјешења са малим мјерним шумом и успјешног RTK позиционирања. Свакако, треба имати на уму да се све грешке у рачунању корекција мјерења и њиховој интерполацији преносе на грешку позиционирања корисничког пријемника. Популарне технике NRTK које су у комерцијалној употреби су: VRS (*енг. Virtual Reference Station*), MAC (*енг. Master Auxiliary Concept*) и FKP (*њем. Flächen KorrekturParameter*). Ове методе имају неке сличне аспекте дизајна, али са суштински различитим комуникацијским процедурама мјерења и корекције. Код VRS методе кориснички пријемник емитује своју приближну позицију централној јединици која интерполује корекције и генерише виртуелна опажања. Затим се виртуелна опажања преносе корисничком пријемнику који своју позицију оцјењује релативно у односу на VRS. Код MAC методе се све корекције генеришу у централној јединици и преносе до корисничког пријемника за интерполацију и оцјену позиције. За разлику од VRS не захтијева двосмјерну комуникацију. Код FKP методе свака референтна станица користи мјерења са околних референтних станица за генерисање коефицијената корекција. Корекције, координате референтне станице и њена мјерења преносе се до корисничког пријемника који затим врши интерполацију и оцјену положаја. NRTK је временом постао својеврсни стандард за регионално позиционирање у реалном времену, са тачношћу на центиметарском нивоу, за многе апликације. Три претходно описана приступа укључују различите процедуре генерисања корекција, комуникације, алгоритме интерполације али дају сличне перформансе позиционирања. [173] у свом раду наводи да је тачност NRTK позиционирања стабилна и на дневном нивоу, а мале варијације положаја које се дешавају су посљедица случајних грешака мјерења. Перформансе статичког и кинематичког NRTK позиционирања су упоредиве, с обзиром да обје технике дају рјешења положаја по епохама. То значи, да све док је добра отвореност неба и добра покривеност ГНСС сигнаlima, положај пријемника се одређује са истом тачношћу, а за позиционирање је довољно коришћење само једног покретног пријемника посматрано из угла корисника. Треба имати на уму да излазак пријемника из подручја покривености мрежом

референтних станица подразумијева лошије перформансе позиционирања, првенствено јер се корекције грешака не могу тачно екстраполовати. Такође, и у случају NRTK позиционирања, мултиконстелационо позиционирање не повећава значајно тачност позиционирања, већ као и у осталим случајевима обезбјеђује интегритет позиционирања у изазовним окружењима гдје постоји могућност губитка сигнала.

Релативно позиционирање развијено је као алтернативна метода за диференцијално позиционирање. Међутим, постоји неколико ствари које се морају узети у обзир при доношењу одлуке о избору методе позиционирања. DGNSS користи корекције које се споро мијењају и које се сматрају константним у периоду од једног или два минута. С друге стране, релативно позиционирање се заснива на оригиналним псеудодужинама чија промјена достиже брзину од 1 km/s. Такође, могу се појавити и кашњења у систему за емитовање мјерења и корекција. То значи да се мора водити рачуна о евентуалном непоклапању епоха мјерења на референтној станици и у корисничком пријемнику. Свођење мјерења на референтној станици на мјерења у корисничком пријемнику је најпогодније извести примјеном одговарајућег интерполационог поступка.

Многе земље су за потребе прецизног PNT на својој територији успоставиле националне мреже перманентних (стално оперативних) ГНСС станица [180]. Могло би се рећи да ове мреже припадају LADGNSS (*енг. Local Area Differential GNSS*) архитектури са просјечним међустаничним растојањима између 50 km и 100 km. Међутим, ове мреже имају и одлике WADGNSS (*енг. Wide Area Differential GNSS*) као што су декомпозиција корекција или могућности њиховог преноса путем Интернета. Због тога се ова област издваја као посебна цјелина и биће предмет поглавља 3.2.

2.2.5. ГНСС пријемници

Стандардни ГНСС пријемници обављају сљедећих пет основних функција [131], [148], [181]–[188]:

- пријем сигнала које емитују сателити,
- раздвајање пристиглих сигнала према сателитима са којих су емитовани,
- мјерење времена пута сигнала и Доплеровог помака,
- декодирање навигационе поруке и
- одређивање положаја, брзине и времена.

Према [189] класификација ГНСС пријемника може бити направљена према: 1) принципу рада (кодни и фазни), 2) примјени (геодетски, навигациони, пријемници за одређивање времена), 3) броју коришћених фреквенција (једнофреквентни, мултифреквентни) и 4) броју система чије сигнале подржавају (једноконстелациони, мултиконстелациони).

Први GPS пријемници појавили су се осамдесетих година прошлог вијека, били су великих димензија, мале тачности позиционирања и са доста ограничења за теренске примјене. С обзиром да се већ у првим примјенама назирала велика могућност ове технологије, истраживањима и иновацијама су пријемници релативно брзо побољшани и у погледу димензија и тачности. Истраживачи су тих година

спровели неколико пројеката осматрања помјерања објеката у циљу сагледавања могућности примјене GPS технологије за потребе деформационих мјерења. Општи закључак је био да су се тадашњим методама и технологијама могла регистровати статичка помјерања, претежно брана и насипа, са накнадном обрадом велике количине прикупљених података и у одређеним границама тачности. Средином деведесетих година прошлога вијека дешава се права револуција у области ГНСС позиционирања са развојем RTK методе, ГЛОНАСС система и појавом нових пријемника малих димензија и побољшане тачности позиционирања. Одмах је започело спровођење истраживачких пројеката могућности примјене ове технологије за одређивање динамичких помјерања објеката. Додатне могућности и побољшања настала су крајем деведесетих година са појавом пријемника који су могли истовремено регистровати GPS и ГНСС сигнале, а повећана је и учесталост регистровања сигнала (*eng. sampling rate*).





Технолошка еволуција области ГНСС у посљедњих десетак година, свакако је обухватила и ГНСС пријемнике. У поређењу са ранијим типовима GPS пријемника, који су строго класификовани као војни или цивилни, гдје су цивилни опет строго класификовани као стационарни референтни пријемници, геодетски, авијацијски, и сл., данашње пријемнике чини велики скуп уређаја доступних на тржишту за различите апликације релативно мале величине, а неријетко и као интегрални дио других уређаја. Савремени ГНСС пријемници имају могућност пријема и обраде више сигнала са неколико система истовремено, чиме се значајно побољшава поузданост PVT на многим локацијама. Вишефреквентни пријемници омогућавају елиминисање грешке мјерења усљед јоносферске рефракције, која како је претходно наведено зависи и од фреквенције сигнала. Пријемници који имају могућност регистровања нових широкопојасних сигнала (L5, E5a) имају могућност ублажавања шума и вишеструке рефлексije. Коришћење пријемника који имају могућност регистровања сигнала из више констелација, значи већи број сателита у видном пољу, што резултира: повољнијим вриједностима DOP фактора, смањење проблема пријема сигнала узрокованог препрекама као што су зграде, дрвеће и сл., краће вријеме аквизиције сигнала и побољшање тачности и поузданости PVT. Савремени ГНСС пријемници имају могућност регистровања података великом брзином, просјечно 20 мјерења у секунди, а постоје пријемници и са брзином регистровања и до 100 мјерења у секунди [190].

На тржишту геодетских пријемника, данас постоји велики број произвођача пријемника различите намјене и различите тачности која се њима може остварити. Водећи свјетски произвођачи геодетске опреме, имајући у виду специфичности у области геодетског осматрања помјерања објеката, производе намјенске пријемнике и класификују их као опрему за осматрање. С обзиром да је један од важних задатака у позиционирању превођење различитих ГНСС сигнала из електромагнетних таласа у електрични сигнал погодан за обраду ГНСС пријемником, могло би се рећи да је ГНСС антена најважнији дио пријемника. То значи да је избор одговарајућег типа антене од великог значаја при избору ГНСС пријемника у практичним примјенама. Као и за пријемнике, постоје одређене карактеристике које се узимају у обзир при самој конструкцији и дизајну антене, које у великој мјери зависе од коначне намјене антене. С обзиром да у области геодетског осматрања помјерања објеката ГНСС антена и пријемник не морају бити строго интегрисани, неријетко је избор типа антене и пријемника одвојен процес.

Постоји велики број антена које се могу категорисати као ГНСС антене високог квалитета. Скоро све савремене геодетске антене израђују се као двофреквентне или мултифреквентне, са основним циљем да се једноставно елиминише утицај јоносферске рефракције. Такође, ови типови антена засновани су на технологији за ублажавање или елиминисање утицаја вишеструке рефлексije сигнала. Често су ове врсте антена већих димензија и скупље од осталих (*eng. low-cost*) типова антена. Два најчешћа типа антена која се користе у домену прецизног позиционирања су *choke ring-based* и *advance planner-based* типови антена [187]. Током пројектовања и израде антене, мјерење параметара антене је од највеће важности за валидацију жељених перформанси антене. Иако софтвери за симулацију антена дају пројектантима антена назнаке о очекиваном понашању, људске грешке и производна ограничења могу довести до тога да антене не одговарају у потпуности резултатима симулација. Након производње антене, њене пројектоване карактеристике се провјеравају и оцјењују по одговарајућој метролошкој методологији. Такође, и у току њихових примјена, антене се повремено еталонирају. Елементи који су од значаја за геодетску примјену и који се провјеравају су офсет и варијације фазног центра антене. Понекад се, у зависности од примјене, на антенама означавају референтни маркери азимута, имајући у виду да су варијације фазног центра у корелацији са овом вриједношћу. Најчешће је та ознака везана за „правац сјевера“. Одређивање одговарајућих корекција антена посебно је важно за све типове геодетских антена (у корисничким пријемницима и на референтним станицама) које се користе за прецизна кинематичка позиционирања. Национална геодетска служба САД обезбјеђује апсолутну калибрацију за широк спектар мултифреквентних ГНСС антена [191]. Поред тога, и комерцијалне организације обезбјеђују калибрацију корисничких и антена сателита [192]. Посебна пажња посвећује се калибрацији антена које се користе на референтним станицама. Ове антене често су већих димензија од обичних корисничких антена, тако да су им офсети и варијације фазних центара веће. За њихову калибрацију користе се технике калибрације у анехоичној комори и посебне технике калибрације на терену и методе додатног моделовања варијација фазног центра [187]. Резултати калибрација геодетских антена према поменутиим методологијама компатибилни су са IGS производима и дистрибуирају се као дио IGS модела антене, који се континуирано ажурира како би њиме биле обухваћене све нове антене. Вриједности офсета фазних центара и варијација фазних центара дистрибуирају се у стандардизованом *ANTEX* формату (*eng. ANTenna EXchange format*), што омогућава досљедну примјену у свим софтверима за позиционирање [193], [194]. Треба имати на уму да се тренутни IGS модел антене (*igs14.atx*), који чине резултати одређивања роботом за калибрацију и конвертоване вриједности релативног теренског испитивања, односи на L1 и L2 фреквенцијске опсеге GPSa и GLONASSa.

У Табели 2-16 дат је преглед најновијих типова ГНСС пријемника водећих свјетских произвођача геодетске опреме који се користе за осматрање помјерања објеката са најважнијим карактеристикама.

Табела 2-16. Карактеристике савремених ГНСС пријемника за осматрање

Произвоач и тип инс.																
Карактер.	Leica GM30				Leica GMX910		Trimble R750 MON				Topcon MR-2					
ГНСС Технологија																
Технологија	Leica Smart Track + : ГНСС мјерења са ниским нивоом шума (< 0.5 mm Root Mean Square RMS). Pulse Aperture Correlator (PAC) индустријска технологија за избјегавање утицаја вишеструке рефлексије сигнала. Напредна анализа спектра снаге радиофреквентних таласа и елиминисање интерференције на свим ГНСС опсезима.				Leica Smart Track + : ГНСС фазна мјерења са ниским нивоом шума (< 0.5 mm RMS). Pulse Aperture Correlator (PAC) водећа индустријска технологија за избјегавање утицаја вишеструке рефлексије. Напредна техника праћења сигнала на ниским елевационим угловима, брза активизација података и отпорност на лажирање. Интегрисана антена.				Trimble Maxwell 7 GNSS Chips : Напредна Trimble Maxwell 7 Custom GNSS Chip технологија са великим бројем канала за праћење сигнала. Trimble EVEREST Plus технологија за избјегавање утицаја вишеструке рефлексије: Флексибилно праћење сигнала и побољшано позиционирање у изазовним окружењима. Високо прецизни корелатор за ГНСС мјерења псеудодужина. ГНСС фазна мјерења са ниским нивоом шума. (< 1 mm RMS).				Модуларни ГНСС пријемник са технологијом универзалног праћења сигнала.			
ГНСС сигнали	GPS (L1C/A, L1C, L2P(Y), L2C, L5); GLONASS (L1, L2P, L2C, L3); Galileo (E1, E5a, E5b, AltBOC, E6); BeiDou (B1, B2, B3); QZSS (L1C/A, L1C, L2C, L5); NavIC L5; SBAS (WAAS, EGNOS, GAGAN, MSAS)				GPS (L1, L2P(Y), L2C, L5); GLONASS (L1, L2P, L2C); Galileo (E1, E5a, E5b, AltBOC); BeiDou (B1, B2); QZSS (L1C, L2C, L5)				GPS (L1C/A, L1C, L2C, L2E, L5) GLONASS (L1C/A, L1P, L2C/A, L2P, L3), Galileo (E1, E5A, E5 AltBOC, E6), BeiDou (B1, B1C, B2, B2A, B2B, B3), QZSS (L1C/A, L1S, L1C, L2C, L5, L6), NavIC (L5), SBAS (WAAS, EGNOS, GAGAN, MSAS - L1C/A, L5)				GPS (L1C/A, L1C, L1P(Y), L2P(Y), L2C, L5) GLONASS (L1C/A, L1P, L2C/A, L2P, L3C), Galileo (E1, E5A, E5B, E5 AltBOC), BeiDou (B1, B2), QZSS (L1C/A, L1C, L2C, L5C), BAS (WAAS, EGNOS, MSAS)			
Број канала	555				555		672				226					
Мјерне перформансе и тачности																
Методе и тачност поз.	RTK метода позиционирања	Референтна станица (осредњено рјешење)	Осматрање (тренутно)	NRTK (тренутно)	Статичка метода - postprocessing	Hz: 3 mm + 0.5 ppm V: 5 mm + 0.5 ppm		Статичка метода - postprocessing	Високопрецизна статичка мјерења	Hz: 3 mm + 0.1 ppm V: 3.5 mm + 0.4 ppm	Статичка и брза статичка мјерења	Статичка и брза статичка мјерења	Hz: 3 mm + 0.5 ppm V: 5 mm + 0.8 ppm			
	Базна линија < 30 km	Hz: 6 mm + 1 ppm V: 10 mm + 1 ppm	Hz: 8 mm + 1 ppm V: 15 mm + 1 ppm	Hz: 8 mm + 1 ppm V: 15 mm + 1 ppm		Базна линија < 30 km	Мрежни RTK		Базна линија < 30 km	мрежни RTK						
	Мрежни RTK	Hz: 6 mm + 1 ppm V: 10 mm + 1 ppm	Hz: 8 mm + 1 ppm V: 15 mm + 1 ppm	Hz: 8 mm + 1 ppm V: 15 mm + 1 ppm	RTK	Базна линија < 30 km Hz: 8 mm + 1 ppm V: 15 mm + 1 ppm	Мрежни RTK Hz: 8 mm + 0.5 ppm V: 15 mm + 0.5 ppm	RTK Hz: 8 mm + 1 ppm V: 15 mm + 1 ppm	мрежни RTK Hz: 8 mm + 0.5 ppm V: 15 mm + 0.5 ppm	RTK Hz: 5 mm + 0.5 ppm V: 10 mm + 0.8 ppm						
Вријеме иницијализације	< 10 s		< 10 s	< 4 s	< 30 s		2 s до 8 s				< 10 s					
Радно окружење																
(Data logging rates)	до 50 Hz				до 10 Hz		до 50 Hz				до 100 Hz					
Интерфејси	RS232/USB/GSM/GPRS/UMTS/Web				RS232/USB/GSM/GPRS/UMTS/Web		RS232/RS422/USB/GSM/GPRS/UMTS/Web/Radio				RS232/USB/Web					
Радни опсег	од -40 °C до + 65 °C				Од -40 °C до + 65 °C		од -40 °C до + 65 °C				од -40 °C до + 75 °C					
Орпорност на прашину, води и влажн.	Да, 100% (без кондензације)				Да, 100% (без кондензације)		Да, 93% (без кондензације)				Да, 100% (без кондензације)					

2.2.6. Интероперабилност и мултифреквенцијски ГНСС

Развојем Galileo, BeiDou и RGNSS система, GPS и GLONASS су добили директну конкуренцију. Наравно, ово је позитивно утицало на стање у области навигационих сателитских система јер је подстакнута модернизација и даљи развој GPS-а и GLONASS-а.

Већ са појавом прва два ГНСС, отворено је питање њихове компатибилности и могућности истовременог коришћења услуга система. Такође, са развојем осталих система, идеја изградње интероперабилних система добила је на значају, постала предмет научног истраживања и реализације кроз стручне активности. Примарни циљ ове идеје је да се обједине могућности PNT вишеструким ГНСС, који у основи раде независно, и побољшају перформансе сервиса доступних корисницима.

Теоријски посматрано добра интероперабилност би се постигла када би сваки ГНСС сигнал био структуриран на исти начин. Разлике у емитованим сигнаlima са појединачних система су у почетку њиховог развоја биле значајне. Данас је ситуација доста боља јер сви системи користе сигнале истог типа (CDMA сигнали). Идеална интероперабилност би се постигла када би се умјесто четири концептуално различите констелације изградила једна са истим орбитама и истим сигнаlima. Посљедица разлика у констелацијама, је стална промјена видљивости сателита, доступност сигнала и DOP фактора. Ипак, велики број видљивих сателита у космосу константно омогућава добру глобалну покривеност сигнаlima и прихватљиве вриједности DOP фактора за потребе PNT. Разлике у системима имају и своју предност. Постојање различитих провајдера система омогућава да се дизајнирају кориснички пријемници који могу идентификовати евентуалне проблеме у функционалностима једног од система и избјећи употребу сигнала тог система док се проблем не ријеша. Имајући у виду претходне чињенице, изградња интероперабилних ГНСС се може посматрати из два угла: интероперабилности на нивоу сигнала и интероперабилности на корисничком нивоу [195].

Потпуна интероперабилност на нивоу сигнала би свакако била остварена изградњом поменуте јединствене констелације. Пошто је у данашњим условима ово практично неизводљиво интероперабилност на нивоу постојећих сигнала прате потешкоће теоријског комбиновања и остваривања жељеног квалитета добијених услуга. Такође, појављује се и проблем цијене комбиновања различитих сигнала, уколико се он рјешава хардверским компонентама. У циљу смањења ових проблема ГНСС су почели са емитовањем компатибилних или сигнала истог типа, дијелећи исте фреквенцијске опсеге.

Ако је корисничка опрема, укључујући софтвере, дизајнирана да прима и обрађује сигнале са различитим карактеристикама, са физички различитих сателита и из различитих система остварује се интероперабилност на корисничком нивоу. Рјешавање проблема обраде сигнала са различитим параметрима путем софтвера је лакше и јефтиније за имплементацију од хардверских модификација.

Оптималан приступ у остваривању интероперабилности ГНСС свакако је комбинација претходно наведених приступа. То значи да се компатибилни или слични сигнали из различитих система примају једном антеном, користите исте појачиваче и филтере за радио фреквенцију и/или међуфреквенцију (RF/IF) и конвертују у дигитални облик заједничким аналого-дигиталним (A/D)

претвараčem. Све остале разлике рјешавају се фирмвером у чиповима за дигиталну обраду или софтвером у наредним корацима обраде сигнала. У овом случају корисници услуга система не воде рачуна о сигналима већ само о квалитету остварених PNT резултата, што је и коначан циљ успостављања интероперабилних ГНСС.

Интероперабилност ГНСС има изузетан значај за области гдје се захтијева висока тачност и поузданост PNT услуга, што геодетско осматрање помјерања објеката свакако јесте. Њеним остваривањем прецизност, доступност и интегритет услуга система, посебно у изазовним окружењима, се значајно мијења. Побољшава се доступност, тачност и брзина рјешавања фазних неодређености у урбаним срединама, кањонима па чак и испод земље као и интегритет услуга коришћењем унакрсне корелације имајући у виду могућност коришћења великог броја сателита. Са почетком примјене интероперабилних ГНСС потреба за развојем и одржавањем скупих сателитских система за унапрјеђење PNT почеће да опада. Преостали недостаци интероперабилности ће се за потребе прецизних радова елиминисати коришћењем локалних система за диференцијални ГНСС и методама релативног позиционирања.

2.2.7. Безбједност ГНСС позиционирања

Развој технологије сателитске навигације нуди много могућности и олакшица у области PNT. Међутим, са развојем електронске информационе технологије расту и изазови и пријетње за ову област, првенствено могућност намјерне деградације сигнала система. Деградирање сателитског сигнала директно утиче на погрешно одређивање PVT. Нема сумње да ће са порастом примјене ГНСС учесталост деградације бити већа, а методе и технологије за ове активности усавршаване [196]. Постојање могућности деградације сигнала може у одређеној мјери учинити ГНСС несигурном и непоузданом технологијом за потребе цивилног прецизног PVT, јер садашњи цивилни сигнали нису шифровани. ГНСС је, генерално, поуздан систем, а да би такав и остао, професионални ГНСС пријемници морају бити заштићени од свих могућих слабости, како случајних, тако и оних које узрокује човјек. С друге стране и провајдери сателитских система чине напоре да се цивилни сигнали додатно обезбеде и заштите од могућности деградације. Примјер ових активности је и развој OSNMA сервиса у оквиру Galileo система [121]. Најчешћи облици деградације ГНСС сигнала су [197]: интерференција сигнала (*interference*), ометање сигнала (*jamming*), самоометање сигнала (*self-jamming*), пресретање и репродукција сигнала (*meaconing*), лажирање сигнала (*spoofing*), самолажирање сигнала (*self-spoofing*), итд.

Потенцијални извори појаве **интерференције** ГНСС сигнала [198] раде у оквиру истих фреквенцијских опсега као и ГНСС. Интерференција може настати намјерним изазивањем или ненамјерно [189], [199]. Интерференција ГНСС сигнала описује се као феномен када други радио сигнали ометају ГНСС сигнале узрокујући смањену тачност PNT или чак потпуни прекид услуга система. ГНСС сигнали су иначе сигнали мале снаге. Такве сигнале лако може деградирати било какав извор електромагнетних таласа у фреквенцијском опсегу блиском фреквенцијама носећих таласа ГНСС сигнала. Страни сигнали довољне снаге и сличних фреквенција смањују однос сигнал-шум, чиме се примарно смањује тачност мјерења, али се може десити и прекид праћења сигнала и мјерења псеудодужина. Шум у пријемнику могу

генерисати и екстерни електрични уређаји. Појава шума изазвана овим уређајима јавља се у случају коришћења пријемника са slabим филтрирањем сигнала. Извори интерференције сигнала могу бити изван али и унутар пријемника. Интерференција сигнала може настати мијешањем сигнала у антени, струјним колима или проводницима у самом пријемнику [196]. Вјештачки извори интерференције могу бити и индустријске електричне инсталације, електрични апарати кућанских инсталација, и сл. Природни извори интерференције могу бити природни извори електромагнетних, акустичних и таласа карактеристика сличних карактеристикама ГНСС сигнала. Атмосфера такође може бити извор интерференције ГНСС сигнала, а настаје као посљедица електромагнетног зрачења широког фреквенцијског опсега изазваног атмосферским наелектрисањем. Интерференција изазвана атмосферским условима најчешће само смањује квалитет, али не и прекид услуга PNT. Радио интерференција са друге стране, изазвана електромагнетним зрачењима, отежава или чак онемогућује пријем ГНСС сигнала. Техничке методе за њену елиминацију су разни штитови, уземљења, технологије за балансирање, филтрирање, изолацију, раздвајање и оријентацију сигнала, подешавање импеданси електричних кола, избор електричних инсталација, потискивање у фреквентном или временском домену, итд. [196].

Једна од најједноставнијих метода деградације је *meaconing* [200], односно пресретање и поновно емитовање модификованог навигационог сигнала који кад буде примљен корисничким пријемником даје погрешне PVT информације. Софистициране верзије ове методе управљају са мјерним сигнаlima тако да чак одлучују о коначном рјешењу PVT које „жртва“ треба да оствари. Због природе настанка лажних сигнала овом методом, за напредне верзије корисничких пријемника ипак не представљају већу пријетњу јер се у коначном рјешењу у случају „напада“ овом методом појављује значајан скок вриједности PVT који се може лако идентификовати.

Лажирање ГНСС сигнала је метода код које се ка корисничком пријемнику емитују лажни сигнали веће снаге који опонашају праве ГНСС сигнале и које кориснички пријемник на крају користи за PVT услуге [200]. Представља најсложенији облик деградације ГНСС сигнала, а подржан је напредним верзијама рачунарске и радио опреме. Генерисање лажних сигнала је засновано на јавно доступним информацијама о правим сигнаlima. С обзиром да постојећи сателитски системи немају развијене методе и услуге верификације емитованих сигнала ка корисницима, овај облик деградације је значајан извор несигурности ГНСС-а. Од 2021. године Galileo систем је први ГНСС који је у рад пустио OSNMA сервис за провјеру аутентичности и криптографског интегритета примљених сигнала. Треба имати на уму да је OSNMA само један алат у области ГНСС-а за борбу против многобројних и изазовних технологија деградације услуга ГНСС-а. Постојеће технике против лажирања сигнала могу се подијелити на два типа: технике којима се открива лажирање и технике којима се отклања лажирање [201]. Технологија за откривање лажирања се заснива на откривању лажирања праћењем абнормалних промјена у карактеристикама сигнала, укључујући технике детекције засноване на снази сигнала, њиховим карактеристикама у простору, навигационим порукама, праћењу квалитета сигнала, интегрисаној навигацији и аутентификацији. Технике откривања лажирања су главне методе које се користе за спречавање лажирања, али оне не могу помоћи пријемницима да поврате способност за PVT. Овај недостатак

поменутих техника надомјешта се техникама за отклањање лажирање. У позадини ових техника је метода која уклања откривене абнормалне вриједности карактеристика сигнала праћењем аутономног интегритета пријемника (*eng. Receiver Autonomous Integrity Monitoring*) и метода којом се сузбија лажирање у просторном домену коришћењем техника обраде низа сигнала.

ГНСС **ометачи** (*jammers*) су уређаји којима се намјерно изазива деградација сателитских сигнала с коначним циљем њиховог ометања и ускраћивања њиховог пријема [202]. У законском смислу, намјерно изазивање деградације је активност треће стране која за посљедице има сметње или спрјечавање правилног пријема ГНСС сигнала. Данас ометаче могу на направе људи са основним познавањем техничких дисциплина, набавком лако доступних техничких компоненти и коришћењем јавно доступних информација [196]. При намјерном ометању сигнала ометачима се емитују радио таласи фреквенција сличних фреквенцијама ГНСС сигнала и довољно јаче снаге [189] да спрјече корисничке пријемнике у некој области да прате и примају ГНСС сигнале [203]. У посљедњих неколико година, широм свијета улажу се значајни напори да се превазиђу изазови ометања сигнала. Производ тих напора је развој неколико технологија и приступа у спрјечавању појаве ометања. Први приступ је имплементација филтера (временских и фреквентних) у радиофреквентној секцији пријемника, чији је основни задатак уклањање лажних сигнала [204]. Ефикасност ове технике зависи од природе ометача и квалитета примјене филтера, што је у директној вези са цијеном пријемника. Други приступ је избјегавање пријема ометајућег сигнала. С обзиром да су извори ометања већином на земљи, идеја се заснива на коришћењу антена са технологијама (шаблонима) који омогућавају само пријем сигнала са неба или који могу да контролишу и елиминирају сигнале који долазе са ометача. Технологије за борбу са деградацијом сигнала још увијек су прилично скупе, па се њихова примјена мора пажљиво размотрити из угла економичности [196].

2.3. ИНТЕГРИСАНИ МЈЕРНИ СИСТЕМИ ГЕОДЕТСКОГ ОСМАТРАЊА ПОМЈЕРАЊА ОБЈЕКТА

У посљедње вријеме, захваљујући развоју електронике и микрокомпјутерске технике геодетска опрема и методе мјерења претрпјели су значајне промјене. Савремени геодетски мјерни системи и технологије постепено се интегришу у јединствене геодетске мјерне системе мултифункционалне намјене.



Слика 2-16. Интегрисани геодетски мјерни системи: SmartStation (лијево) SmartPole (десно)

Првим интегрисаним мјерним системима, познатим и као паметне станице (*eng. SmartStation*) и паметни ровери (*eng. SmartPole*) (Слика 2-16), називани су мјерни системи настали интеграцијом тоталних станица и рефлектора са ГНСС пријемницима. Међутим, овај облик интеграције не подразумева заједнички рад два мјерна система као једног, већ рјешавање различитих задатака сваким од мјерних система у оквиру једне

мјерне епохе. То значи да овај облик интеграције подразумева да се добијени подаци могу дијелити, хармонизовати и математички

објединити како би се добила одређена рјешења која се иначе не могу добити директним путем. Дакле, стварна интеграција је изведена софтверским путем, јер се са оба мјерна система управља кроз један заједнички софтвер, најчешће смјештен на тоталној станици или контролеру којим се управља цијелим системом, а подаци су смјештени на заједнички меморијски простор. Коришћењем напредних технологија, све компоненте су непримјетно комбиноване тако да је све интегрисано у једну компактну јединицу.



Слика 2-17. Мултифункционалне геодетске мјерне станице:
Leica MS60 (лијево) Trimble SX12 (десно)

Савременим интегрисаним геодетским мјерним системима за осматрање помјерања објеката називају се мјерни системи у којима су интегрисане тоталне станице, ГНСС пријемници, терестрички ласерски скенери и мјерне камере. Такви мјерни системи називају се мултифункционалним станицама

(*енг. Multi-Station*) (Слика 2-17). Интеграција поменутих технологија, доноси нове могућности у области осматрања објеката, јер осим високе прецизности мјерења омогућава прикупљање података о објекту у реалном времену, у односу на координатни систем од интереса и са великом густином узорковања тачака на објекту. Видео пренос у реалном времену омогућава боље разумијевање услова на локацији осматрања, а прикупљање фотографија додатну визуелну анализу чиме је могуће идентификовати и узроке настанка помјерања.

3. ГЕОДЕТСКЕ МРЕЖЕ ЗА ГЕОДЕТСКО ОСМАТРАЊЕ ПОМЈЕРАЊА ОБЈЕКТА

Још од појаве првих дигиталних мјерних инструмената за осматрање помјерања објеката, појавила се идеја за њихово умрежавање у један систем и аутоматско управљање њиховим радом и радом читавог система. Данас сензори за осматрање објеката представљају везу између система за осматрање и објекта који се осматра. Њихова улога је конверзија физичких мјерења у неку квалитативну величину или, најчешће, електрични сигнал који је могуће даље мјерити. Избор сензора при осматрању помјерања објеката дуго времена био је прилично исти, а промјене су се дешавале споро. Постоје два основна разлога за то. Први разлог је што су комерцијални инструменти прилагођавани конкретним програмима осматрања објеката, тј. били су предодређени за одређене типове објеката. Други разлог је што су ти сензори у великој мјери функционисали на задовољавајући начин, а њихова примјена је теоријски и практично прилично добро дефинисана, описана и учињена познатом. Због посљедњег разлога постојала је својеврсна неспремност да се у процесу осматрања имплементирају нове технологије и нови сензори, што би свакако донијело и нове концепте мрежа за осматрање.

Међутим, ситуација се данас значајно промијенила, а нови типови сензора постали су реалност. Растуће тржиште мјерних инструмената и појава конкуренције, подстакли су произвођаче мјерне опреме на улагање додатних напора у развој и технолошко побољшање сензорских система за осматрање. Нове производне методе и модерне технологије омогућавају израду бољих инструмената у погледу тачности, поузданости и робусности, економски прихватљиве и са обимом производње задовољавајућим за захтјеве тржишта. На тај начин на тржиште се пласирају алтернативни мјерни инструменти и сензори са новим могућностима за осматрање помјерања објеката:

- рачунарски контролисани геодетски оптички мјерни инструменти,
- прецизни и високофреквентни ГНСС пријемници,
- ласерски мјерни системи,
- технологије дигиталне фотограметрије (са дигиталном обрадом слика),
- фиброоптички сензори, и др.

Са појавом инструмената, комплексних у погледу броја компоненти од којих су сачињени, постоји повећана могућност за појавом неисправности и неправилности у раду. Спровођење научних истраживања, прикупљање информација о перформансама и поузданости рада нових напредних сензора и сензорских система током времена у пракси, као и поређење нових спознаја са резултатима добијеним конвенционалним мјерним системима подићи ће ниво поузданости ових технологија и ниво повјерења будућих корисника. До тада је свакако потребна одређена доза опреза у коришћењу паметних сензора и њиховој имплементацији, посебно у условима гдје не постоји могућност њихове појединачне замјене и физичког приступа, и потпуне замјене постојећи пасивних система осматрања новим активним мултисензорским системима.

3.1. ПАСИВНЕ МРЕЖЕ ЗА ГЕОДЕТСКО ОСМАТРАЊЕ ПОМЈЕРАЊА ОБЈЕКТА

Стандардни приступ у осматрању помјерања објеката заснива се на коришћењу пасивних геодетских мрежа, за које се у геодетској научној и стручној литератури користе различити називи. Најпогоднији је свакако геодетска контролна мрежа за осматрање објеката (скуп стабилних тачака изван објекта и скуп карактеристичних тачака на објекту) [205], [206], којом се обезбјеђује потребна дискретизација конструкције и остварује захтијевана тачност одређивања помјерања.

Теорија геодетских мрежа за осматрање помјерања објеката сеже још од прве половине прошлога вијека, а њен развој условила је изградња изразито сложених инжењерских објеката, индустријских постројења, експлоатација рудних богатстава и друге привредне активности [207]. Постоје три основна разлога која и до данас условљавају потребу за успостављањем мрежа посебне намјене у инжењерству: 1) захтјеви тачности 2) облик и величина инжењерских објеката и 3) карактеристике подручја око објекта.

Очекивано је да са новим мјерним технологијама, долазе нове методе позиционирања, концепти геодетских контролних мрежа, модела обраде података и квантификовања помјерања. Међутим, када су у питању технологије које су предмет истраживања ове дисертације, кључне карактеристике геодетских мрежа за осматрање помјерања објеката које се морају испунити при њиховом успостављању, нису се промијениле. Може се рећи да се са појавом нових технологија појавила нова класификација геодетских мрежа према методама њиховог успостављања, односно према врстама мјерених величина у мрежи, и то:

- терестричке мреже,
- сателитске (ГНСС) мреже и
- комбиноване мреже.

И са појавом нових технологија, успостављање квалитетне геодетске мреже за осматрање објеката изводи се кроз три фазе: пројектовање, реализација и анализа постигнутих резултата.



Слика 3-1. Алгоритам пројектовања геодетске контролне мреже [208], [209]

При изради пројекта геодетске мреже за осматрање помјерања објеката, користе се хеуристичке или аналитичке методе планирања пројектног рјешења [210]. Хеуристички метод подразумијева да се поставе критеријуми које мрежа мора да

задовољи. Алгоритам пројектовања геодетских контролних мрежа у том случају се састоји из неколико корака и приказан је на *Слици 3-1*.

У поступку пројектовања мреже за осматрање дефинише се број и распоред тачака мреже (геометрија мреже), врста, број и распоред мјерених величина у мрежи (план мјерења) којима ће се остварити циљеви осматрања [208], [211]. Такође, пројектом се дефинише координатни систем и датум мреже. Избор координатног система мреже за осматрање зависи од намјене мреже и врсте мјерених величина. С обзиром на димензије координатног система у којем се приказују положаји тачака геодетске мреже, разликују се [212]:

- висинске мреже – геодетска контролна 1Д мрежа,
- хоризонталне мреже – геодетска контролна 2Д мрежа и
- просторне мреже – геодетска контролна 3Д мрежа.

Координатни системи за осматрање помјерања објеката најчешће су локални, а датум се дефинише минималним трагом на свим тачкама или на дијелу стабилних тачака (на стабилним тачкама основне мреже). Неријетко је у поступку пројектовања мрежа за осматрање, потребно урадити анализу постојећих мрежа [213], како би се утврдила могућност њиховог коришћења или укључивања у пројектно рјешење нове мреже. Ова проблематика среће се код израде пројеката геодетског осматрања надограђених или проширених инжењерских објеката, за све типове мрежа [214]. На основу дефинисане величине помјерања d коју геодетским осматрањем сигурно треба открити, примјеном принципа занемарљивости, дефинише се захтијевана тачност положаја тачака геодетске контролне мреже као [77], [208]:

$$\sigma_{POL/GKM} = \sigma_{POZ} \leq \frac{1}{5} d. \quad (3.1)$$

На основу ове величине и изабране методе позиционирања, даље се дефинише потребна тачност мјерених величина у мрежи. Терминолошки посматрано, у литератури се за дефинисање тачности мјерених величина, каже и дефинисање прецизности мјерених величина. Посматрано из угла геодетске метрологије, заправо је ријеч о дефинисању мјерне несигурности коју треба остварити. Како се у домаћој литератури и пракси усталио и највише користи термин тачност мјерених величина, он је надаље коришћен у овој дисертацији. Након дефинисања елемената пројектног рјешења, врши се прорачун којим се провјерава да ли предложено рјешење испуњава постављене критеријуме. Ако неки од критеријума није испуњен, мијењају се елементи пројектног рјешења и понавља прорачун све док постављени критеријуми не буду задовољени. При пројектовању мрежа за осматрање, главни критеријуми су: вектори помјерања карактеристичних тачака на објекту који се морају открити (осјетљивост геодетске контролне мреже), прецизност и поузданост геодетске контролне мреже. Пројекат је потребно израдити тако да се захтијевана тачност оствари уз што мање трошкова и уз поштовање принципа геодетске струке [208], [212], [215], [216].

Уобичајени назив за пројектовање (планирање) геодетских мрежа је оптимизација геодетских мрежа, а практично спровођење метода оптимизације се у инжењерској геодезији назива прорачуном тачности. Из теорије је познато да се оптимизација мрежа дијели у четири реда: оптимизација нултог реда - избор датума мреже,

оптимизација првог реда - дефинисање плана опажања, оптимизација другог реда - дефинисање тачности мјерених величина и оптимизација трећег реда - погушћавање постојећих мрежа [208]. Теорија оптимизације описана је у [217], [218], а практични поступци и специфичности појединих фаза алгорита пројектовања геодетских контролних мрежа за осматрање објеката у [208], [209], [211], [212], [219].

Реализација пројекта мреже обухвата рекогносцирање, стабилизацију и сигнализацију тачака и геодетска мјерења, а спроводи се према одредбама дефинисаним техничким упутством за реализацију пројекта, које је саставни дио пројектне документације [211]. Реализацијом пројекта практично се врши теренска материјализација мреже. Важан корак у реализацији пројекта контролне мреже, чак и са преласком на нове технологије и системе активних мрежа, је квалитетна стабилизација тачака мреже и избор адекватних материјала од којих ће бити израђени уређаји за монтирање мјерене опреме.

Приликом анализе мјерења посебна пажња посвећује се корекцијама и редуцијама мјерења и анализи *a priori* тачности. За најбољу оцјену непознатих параметара (координате тачака мреже), мјерених величина и оцјену тачности *a posteriori* изводи се изравнање геодетске контролне мреже, уобичајено примјеном методе најмањих квадрата са функционалним и стохастичким моделом формираним сагласно врсти мјерених величина. На основу добијених резултата из изравнања контролне мреже, примјеном одговарајућег математичког модела, на основу прве серије мјерења образује се нулта епоха, тј. утврђује се нулто (почетно) стање геодетске контролне мреже. На основу нових серија мјерења или перманентног прикупљања података утврђују се стабилност тачака основне мреже, помјерања тачака на објекту и остали параметри објекта који су од интереса у процесу осматрања.

Још од појаве првих ГНСС (GPS) пријемника, истраживана је могућност примјене ГНСС технологије у пасивним мрежама за осматрање помјерања објеката. У тим истраживањима, ГНСС технологија је сагласно могућој тачности позиционирања, идентификована као мјерна технологија која се у условима добре отворености неба може користити за мјерења у мрежама за осматрање [220]. У почетку су коришћене услуге GPS-а као првог потпуно оперативног сателитског система, а уочене предности сателитског осматрања су: положајна тачност је мање зависна од облика и геометрије геодетске мреже, тачке се постављају тамо гдје су потребне а не на мјестима гдје се задовољава оптичко догледање, могућност остварења високе тачности позиционирања уз релативно мали напор, итд. Са развојем области ГНСС, техничким побољшањима метода позиционирања и пријемника којима се врше мјерења, унапријеђене су могућности ове технологије при мјерењима у мрежама за геодетско осматрање објеката.

У новије вријеме предмет истраживања је теорија оптимизације ГНСС мрежа за осматрање [210], [221] и у наставку ће бити истакнуте неке специфичности овог процеса. План мјерења у ГНСС мрежама зависи од облика мреже. Облик ГНСС мрежа најчешће је условљен: захтијеваном тачношћу, бројем расположивих пријемника и економичношћу. С обзиром на облик, постоје двије врсте ГНСС мрежа: радијалне и затворене мреже (Слика 3-2).



Слика 3-2. Облици ГНСС мрежа: радијалне (лијево) и затворене (десно)

Код ГНСС мрежа радијалног облика мјерења се изводе тако да се референтни пријемник постави на познату тачку, а базне линије се мјере ка непознатим тачкама. Ако је позната само једна тачка, нема изравнања мреже. Недостатак овог облика мрежа је немогућност контроле одређивања координата нових тачака. Код затворених ГНСС мрежа изводе се мјерења вектора, формирањем затворених фигура. Мјерења се у зависности од броја пријемника изводе у сесијама, у којима се одређени број тачака преклапа. Поузданост одређивања положаја тачака у мрежи се постиже тако што се свака тачка опажа бар у двије сесије, тј. посједа се два пута.

За примјену ГНСС технологије и мјерења у мрежама за осматрање објеката, важно је добро испланирати извођење мјерења, складиштење података и обраду мјерења. С обзиром да се ГНСС метода мјерења разликује од класичних метода потребно планирање и извођење мјерења врши се на другачији начин. Основна разлика је што се код ГНСС мјерења не води рачуна о догледању између тачака, временским приликама и геометријској чврстоћи мреже.

Приликом планирања ГНСС опажања у обзир се узима број и распоред тачака геодетске контролне мреже које треба да буду обухваћене мјерењима, захтијевана тачност, метода опажања, доступност сателита у времену, број сесија, њихово трајање и редослијед извођења, потребна опрема и друга организациона питања и захтјеви везани за извођење мјерења. У практичном смислу, поступак планирања ГНСС мрежа може се вршити по истом алгоритму као и за терестричке мреже (Слика 3-1), а обухвата:

- дефинисање величине и облика мреже, броја и распореда тачака мреже,
- избор методе опажања и врсте пријемника,
- дефинисање сесија, трајања мјерења и периода за извршење мјерења, у зависности од броја и распореда доступних сателита узимајући у обзир елевациони угао и евентуалне сметње и препреке у околини тачака на којима се планирају ГНСС мјерења,
- избор референтних тачака, координатног система, датума мреже и модела трансформације координата и
- дефинисање процедура за реализацију пројекта: избор ГНСС хардвера и софтвера, дефинисање начина регистравања и преноса података, дефинисање процедура за регистравање додатних података потребних за формирање коначних мјерења, дефинисање теренских екипа и материјално-техничких средстава за успјешну и ефикасну реализацију мјерења.

Избор методе опажања и врсте пријемника један је од важних елемената у поступку пројектовања ГНСС мрежа, јер од њиховог избора првенствено зависи тачност позиционирања тачака мреже. Приликом пројектовања пасивних мрежа за осматрање објеката, посебна пажња посвећује се избору координатног система и модела трансформације координата у случају када се ради о мрежама у којима се комбинују терестричка и ГНСС мјерења. Паар је у свом раду [207] дао систематичан и детаљан преглед активности на планирању и организацији ГНСС мјерења, извођењу мјерења и обради и презентацији резултата у пасивним ГНСС мрежама у инжењерству, са корисним практичним коментарима уоченим кроз реализацију неколико значајних пројеката мрежа овог типа.

Оптималан пројекат ГНСС мреже могао би се дефинисати као скуп оптималне конфигурације сателита, мреже на терену и тачности ГНСС мјерења који задовољавају унапријед дефинисане критеријуме тачности и осјетљивости мрежа, који као и код конвенционалних терестричких мрежа могу бити: прецизност, поузданост и величина помјерања која се са одређеном вјероватноћом може открити. Такође, очекује се да је такав пројекат могуће реализовати уз минималне трошкове.

Ефикасност и многе предности ГНСС мјерења у поређењу са конвенционалним мјерним техникама учиниле су ГНСС технологију веома популарном у посљедњих десетак година. Стога, ГНСС мјерења и њихов ефикасан дизајн играју кључну улогу у многим примјенама геодетског инжењерства.

Специфичности које се појављују при пројектовању ГНСС мрежа посљедица су природе ГНСС мјерења. Међу различитим типовима ГНСС мјерења, фазна мјерења уз формирање двоструких разлика дају боље перформансе од недиференцираних мјерења, за средње дуге и кратке базне линије [221]. Коваријациона матрица ГНСС мјерења не садржи само информације о тачности, већ и о корелацији мјерења. За фазна мјерења и формирање двоструких разлика, могу се појавити двије врсте корелације, математичка и физичка. Прва је резултат математичког формирања разлика, а друга је посљедица дјеловања околине на мјерења при чему настаје просторна и/или временска корелација [143]. Свеобухватан преглед истраживања о математичкој и физичкој корелацији у примјенама ГНСС дат је у раду [222]. У овом раду се наводи да је разматрање математичке корелације унутар исте базне линије безначајно, док разматрање корелације између базних линија може донијети мала побољшања. Међутим, ово истраживање о утицају математичке корелације на ГНСС мреже са базним линијама од неколико стотина километара дало је закључак да би узимање у обзир математичких корелација обезбиједило бољу оцјену поузданости компоненти базних линија, као и реалнију процјену несигурности. Готово исти закључци изведени су и у сличним радовима других аутора [223], [224], који су истакли значај разматрања математичке корелације при извођењу геодетских мјерења посебно за потребе осматрања. Аутори [225] су описали безначајност утицаја физичке корелације на оцјену координата и фазних неодређености. Међутим, они су истакли ефикасност дужих мјерења у смањењу ефекта физичке корелације.

Конфигурација ГНСС мреже дефинисана је геометријом коју образују тачке на физичкој површи земље и сателити. С обзиром да корисници не могу утицати на сателитску констелацију, концепт оптимизације првог реда је непрактичан и готово да се не користи у пројектовању ГНСС мрежа [221]. Ово је посебно случај код мрежа

малог и средњег обима, гдје промјена положаја тачака на физичкој површи земље унутар неколико метара не утиче значајно на квалитет мјерења. Ипак, поступак изналаска оптималног рјешења може се наставити примјеном оптимизације другог реда.

Процедура аналитичке оптимизације у геодетској мрежи почиње дефинисањем критеријумских функција (*енг. objective function*). У зависности од намјене мреже, критеријумске функције могу бити појединачне или комбинација функција прецизности, поузданости или економичности. Међутим, коваријациона матрица, матрица поузданости или матрица тежина којима се математички моделују критеријумске функције сачињене су од елемената нелинеарних функција координата тачака мреже и тежина мјерења. Развојем ових функција у Тејлоров ред са првим члановима, линеаризовани облик ових једначина записан матрично је:

$$\begin{cases} \mathbf{C}_x = \mathbf{C}_x^0 + \sum_{j=1}^m \frac{\partial \mathbf{C}_x}{\partial x_j} \Delta x_j + \sum_{j=1}^m \frac{\partial \mathbf{C}_x}{\partial y_j} \Delta y_j + \sum_{j=1}^m \frac{\partial \mathbf{C}_x}{\partial z_j} \Delta z_j + \sum_{i=1}^n \frac{\partial \mathbf{C}_x}{\partial p_i} \Delta p_i \\ \mathbf{R} = \mathbf{R}^0 + \sum_{j=1}^m \frac{\partial \mathbf{R}}{\partial x_j} \Delta x_j + \sum_{j=1}^m \frac{\partial \mathbf{R}}{\partial y_j} \Delta y_j + \sum_{j=1}^m \frac{\partial \mathbf{R}}{\partial z_j} \Delta z_j + \sum_{i=1}^n \frac{\partial \mathbf{R}}{\partial p_i} \Delta p_i \\ \mathbf{P} = \mathbf{P}^0 + \sum_{i=1}^n \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial p_i} \Delta p_i \end{cases} \quad (3.2)$$

гдје су \mathbf{C}_x^0 и \mathbf{R}^0 приближна коваријациона и матрица поузданости које се рачунају по формулама:

$$\mathbf{C}_x = \sigma_0^2 \left[(\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A} + \mathbf{D} \mathbf{D}^T)^{-1} - \mathbf{H} (\mathbf{H}^T \mathbf{D} \mathbf{D}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \right] \text{ и} \quad (3.3)$$

$$\mathbf{R} = \mathbf{I}_n - \mathbf{A} (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A} + \mathbf{D} \mathbf{D}^T)^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{P}. \quad (3.4)$$

У претходним формулама σ_0^2 је *a priori* дисперзиони фактор, за који се у фази пројектовања обично узима вриједност 1, а \mathbf{A} и \mathbf{P} су матрица дизајна и матрица тежина, респективно. Матрица \mathbf{P} је пуна матрица у случају када се узима у обзир корелација између мјерења, у супротном је дијагонална. \mathbf{D} и \mathbf{H} су матрице датумских услова за случај када је датум дефинисан минималним бројем датумских услова и када је датум дефинисан датим тачкама. Уколико је датум дефинисан датим тачкама, матрица \mathbf{D} се замјењује матрицом \mathbf{H} [226]. \mathbf{I}_n је $n \times n$ јединична матрица, гдје је n број опажања. Коефицијенти у претходним матрицама рачунају се на основу почетних вриједности координата (x^0 , y^0 и z^0) и тежина (p^0). Матрица тежина са приближним вриједностима коефицијената означена је са \mathbf{P}^0 . Једначина 3.2 садржи прираштаје координата за сваку тачку мреже j (Δx_j , Δy_j и Δz_j) и прираштаје тежина Δp_i . m и n су број тачака и број мјерења у мрежи.

Оптималан план мјерења у ГНСС мрежи дефинише се тако што се дефинише потребан број и тачност базних линија, као и оптимално вријеме трајања мјерења пријемника. Ако би се у поступку оптимизације ГНСС мреже у потпуности избјегла примјена оптимизације првог реда, оптималне позиције тачака мреже не би биле укључене у прорачун тачности. Имајући у виду Једначину 3.2, елементи коваријационе и матрице поузданости били би елиминисани из процеса оптимизације.

Да би се дефинисала одговарајућа критеријумска функција за проблем оптимизације, прво се одређују почетне матрице дизајна мјерења и приближне тежине мјерења. Мјерени вектор Δ_i у ГНСС мрежи дефинише се као вектор који садржи координатне разлике између двије непознате тачке j и k :

$$\Delta_i = \mathbf{x}_j - \mathbf{x}_k, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.5)$$

гдје \mathbf{x}_j и \mathbf{x}_k представљају тродимензионалне векторе координата тачака j и k . Под претпоставком да мрежа има m тачака, укупан број мјерених вектора ће бити:

$$n = \frac{m(m-1)}{2} \quad (3.6)$$

гдје је само $m-1$ вектора независно. Такође, посматрано са становишта методе најмањих квадрата, једначина мјерења за ГНСС мрежу се узимајући у обзир *Једначину 3.5* може записати као:

$$\Delta - \varepsilon = \mathbf{A}\mathbf{x} \quad (3.7)$$

гдје су $\Delta = [\Delta_1 \ \Delta_2 \ \dots \ \Delta_n]^T$; \mathbf{A} матрица дизајна која повезује мјерења и непознате координате (\mathbf{x}) са коефицијентима $+1$, -1 и 0 ; и ε је вектор резидуала.

За оцјену непознатих параметара у *Једначини 3.7* користе се методе изравнања појединачних или више базних линија. У првом случају рачуна се једна по једна базна линија и занемарује могућа корелација између базних линија, док други узима у обзир корелацију и обухвата све тачке мреже одједном [227]. Претпоставка постојања корелације се у поступку изравнања разматра кроз матрицу тежина. При увођењу матрице тежина у оптимизацији некорелисаних ГНСС базних линија, вандијагонални елементи су 0 . У супротном, са претпоставком постојања корелације узима се потпуно попуњена матрица тежина.

У процедуру оптимизације уводимо почетну матрицу тежина, без узимања у обзир корелације, која се у току процеса мијења у складу са дефинисаним критеријумима, и претвара у оптималну матрицу тежина обезбијеђујући потребне информације о базним линијама. Сваку базну линију чине три компоненте, што значи да тежину сваке базне линије чине три елемента [228]. Математички записано, укупна матрица тежина базних линија има облик:

$$\mathbf{P} = \text{diag}(\mathbf{p}_i), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.8)$$

гдје је:

$$\mathbf{p}_i = \sigma_0^2 \begin{bmatrix} \sigma_{\Delta x_i}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\Delta y_i}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\Delta z_i}^2 \end{bmatrix}^{-1} \quad (3.9)$$

а тачности компоненти базних линија приказане су као $\sigma_{\Delta x_i}$, $\sigma_{\Delta y_i}$ и $\sigma_{\Delta z_i}$. σ_0^2 је *a priori* дисперзиони фактор, за који се у фази пројектовања усваја вриједност 1 . Мања тачност вертикалне компоненте ГНСС мјерења сваке базне линије i може се подесити у *Једначини 3.9* узимањем у обзир следећег израза:

$$\sigma_{\Delta x_i}^2 = \sigma_{\Delta y_i}^2 < \sigma_{\Delta z_i}^2. \quad (3.10)$$

Сада се, узимајући у обзир уведену критеријумску функцију у *Једначини 3.2* и основу намјену мреже, може примјенити одговарајући модел за оптимизацију и завршити пројектовање ГНСС мреже [228].

Међутим, данас се при извођењу сесија статичких ГНСС мјерења ријетко користе само два пријемника. Стога при планирању ГНСС мјерења треба имати у виду да рад са више од два пријемника у исто вријеме доводи до корелације између базних линија. Уз постојање корелације, матрица тежина више се не може третирати као дијагонална матрица, већ се морају узети у обзир и ефекти математичке корелације.

До сада су тежине базних линија у ГНСС мрежи биле предмет оптимизације због претпоставке о непостојању корелације. Базне линије са малим тежинама (нула или близу нуле) могу бити уклоњене из оптимизационог плана мјерења, а резултат оптимизације у том случају може бити ГНСС мрежа са прекобројним мјерењима базних линија. С тога је потребно истражити и описати случај гдје се разматрају математичке корелације између ГНСС базних линија. У том случају, нагласак је на оптимизацији сесија мјерења, а то се спроводи оптимизацијом фактора варијансе сваке сесије како би се испунили унапријед дефинисани захтјеви мреже.

Када се користе фазна мјерења и релативна метода позиционирања, корелација базних линија узима се у обзир при рачунању коваријационе матрице. На овај начин се у процедуру оптимизације уводи реалистична коваријациона матрица. Матрица тежина \mathbf{P} са коефицијентима корелације се нумерички може добити за било коју сесију i на сљедећи начин [227]:

$$\mathbf{P}_i = \sum_{\nabla\Delta}^{-1} = \frac{1}{\mu_i} \begin{bmatrix} 4 & 2 & 2 & 2 & 1 & 1 \\ 2 & 4 & 2 & 1 & 2 & 1 \\ 2 & 2 & 4 & 1 & 1 & 2 \\ 2 & 1 & 1 & 4 & 2 & 2 \\ 1 & 2 & 1 & 2 & 4 & 2 \\ 1 & 1 & 2 & 2 & 2 & 4 \end{bmatrix}^{-1} \quad (3.11)$$

гдје $\sum_{\nabla\Delta}$ представља коваријациону матрицу двоструких разлика фазних мјерења ($\nabla\Delta$) а μ_i је фактор варијансе сесије i . Како се може видјети у *Једначини 3.11*, \mathbf{P}_i је потпуно попуњена матрица која указује на постојање корелације између елемената базне линије. Занемаривање ове чињенице, даје дијагоналну матрицу са нултим вандијагоналним елементима.

Да би се имплементирала матрица тежина са корелационим коефицијентима у процесу оптимизације, потребно је да се изведу коваријациона матрица и матрица поузданости у односу на фактор варијансе сваке сесије, а не тежине мјерења јер је у формули 3.11 непознат само коефицијент μ_i . Позивајући се на *Једначину 3.2* за ГНСС мрежу у којој се разматра постојање корелације базних линија, важе сљедеће формуле за прецизност и поузданост:

$$\begin{cases} \mathbf{C}_x = \mathbf{C}_{x_0} + \sum_{i=1}^n \frac{\partial \mathbf{C}_x}{\partial \mu_i} \Delta \mu_i \\ \mathbf{R} = \mathbf{R}^0 + \sum_{i=1}^n \frac{\partial \mathbf{R}}{\partial \mu_i} \Delta \mu_i \end{cases} \quad (3.12)$$

гдје су сви параметри као у *Једначини 3.2*, осим коефицијената μ_i (фактор варијансе за сесију i) и његове корелације $\Delta\mu_i$. Аутори [229] су у свом раду користили критеријумске функције прецизности и поузданости и описали методологију примјене двокритеријумског модела оптимизације мреже у датом случају.

Једна од критеријумских функција која може бити постављена у процесу оптимизације мрежа је вектор деформације. У том случају критеријум матрица се дефинише према захтијеваној тачности параметра деформације. То се постиже тако што се дефинисана критеријумска матрица апроксимира коваријационом матрицом деформационих параметара C_e . Међутим, ово је могуће примијенити ако се цијели објекат који се осматра, понаша по истом обрасцу деформације. Другим ријечима, тада се претпоставља да су сви параметри деформације исти на цијелом објекту, али је очигледно да ова претпоставка важи за објекте мањих димензија. Ако је објекат већих димензија и још додатно подијељен на више елемената не морају сви елементи имати исто понашање. С тога се фрагментирање објекта на мање елементе и анализирање деформација појединачно за сваки елемент предлаже као једно од могућих рјешења. Тетраедар је основна геодетска фигура за одређивање карактеристичних коефицијената једначине деформације, односно компоненти деформације и диференцијалне ротације у тродимензионалном простору. Стога, деформабилно тијело може бити фрагментирано на тетраедарске елементе примјеном, на примјер, тродимензионалне *Делонове* технике триангулације. Ова метода триангулације обезбијеђује непреклапајуће и једнакоугаоне троуглове/тетраедре са врховима у тачкама мреже.

Аутори [229] су у свом раду предложили методологију за дефинисање критеријумске матрице помјерања за процедуру оптимизације засновану на тачности параметара деформације у сваком тродимензионалном елементу. Ово доводи до пројектовања мреже за осматрање, гдје су помјерања у свакој тачки мреже функција деформационог понашања елемента који је њоме дискретизован.

3.2. АКТИВНЕ МРЕЖЕ ЗА ГЕОДЕТСКО ОСМАТРАЊЕ ПОМЈЕРАЊА ОБЈЕКТА

Сигурни и дуготрајни објекти су они којима се током њиховог животног вијека управља на правилан начин. Контролна мјерења и осматрање често имају кључну улогу у активностима управљања. Тачни, објективни и поуздани подаци који се прикупљају у току осматрања користе се за оптимизацију функционисања, одржавања, ремонта и санације објеката [230].

Нове могућности које нуди савремена сензорска и информациона технологија донијеле су нове концепте осматрања објеката. Такође, убрзан развој система за осматрање објеката условљен је и повећаним потребама услед све смјелијих конструктивних рјешења, које захтијевају осматрање и у току изградње и експлоатације. Захтјеви за сталним осматрањем условљени су повећаном потребом провјере квалитета, економичности изградње и експлоатације, провјере и поштовања сигурносних правила, процедура и прописа.

С временом долази до старости свих објеката, а са повећаном изградњом и број објеката који старе се повећава. Замјена објеката, посебно важних инфраструктурних, није једноставан процес ни из практичних ни из економских

разлога. Због тога је у данашње вријеме потребно стално праћење стања објеката ради благовременог планирања санација и реконструкција постојећих или изградње нових објеката. Додатни разлог за сталним осматрањем објеката у свим фазама је изградња на локацијама неповољним у геомеханичком смислу, што захтијева сталну провјеру носивости терена и помјерања објекта са напретком процеса грађења или санационих радова.

Савременим геодетским и SHM системима се параметри који на најбољи начин репрезентују стање и карактеристике објекта који се осматра, могу прикупљати периодично, периодично перманентно и перманентно. У зависности од врсте објекта, његовог стања и посебних захтјева везаних за пројекат осматрања, осматрање се може обављати краткорочно (обично неколико сати или дана), средњорочно (неколико дана до неколико недјеља), дугорочно (неколико мјесеци или година) и током цијелог животног вијека објекта.

Информације добијене на основу осматрања генерално се користе за планирање и пројектовање одржавања, повећања сигурности, провјере постављених хипотеза, смањење ризика и проширивање знања о објекту који је предмет осматрања. Упркос његовој важности, концепт SHM још увијек није широко распрострањен у пракси. Осматрање се често сматра као додатна активност која не захтијева детаљно планирање, иако теоријске и практичне чињенице говоре управо супротно. Успостављање активних система (посебно интегралних SHM) веома је сложен процес са много важних и специфичних фаза, а само правилно и детаљно планирање сваког корака и фазе може довести до успјеха и постизања максималних перформанси система који ће омогућити квалитетно осматрање објекта [231].

3.2.1. Геодетске мреже перманентних ГНСС станица

За разлику од класичних рјешења релативног и диференцијалног позиционирања, које подразумијева примјену једног базног пријемника, истраживања су показала да концепт мреже перманентних ГНСС станица представља значајан корак у развоју метода за примјену ГНСС технологије [172], [180], [232], [233]. Из тог разлога је мрежама перманентних ГНСС станица пажња посвећена на самом почетку разматрања активних мрежа за геодетско осматрање помјерања објеката. Овај концепт подразумијева постављање перманентних ГНСС станица на међусобном растојању до 80 km, одликује се краћим периодом иницијализације и поузданијим оцјенама параметара, без обзира на велико растојање између станица. Све то се постиже софтверима који укључују моделе за оцјене поправака и моделовање главних извора грешака (орбита, јоносфере, тропосфере и часовника у пријемнику сателита).

Мреже перманентних ГНСС станица чине три међусобно повезана сегмента [234]:

- ГНСС перманентне станице,
- комуникациони сегмент и
- кориснички сегмент.

Коришћењем мреже перманентних ГНСС станица у односу на независне појединачне станице, остварује се већа територијална покривеност и повећава тачност позиционирања са мањим бројем референтних станица. Употреба више референтних станица распоређених на ширем географском простору, омогућава

емпиријско моделовање грешака мјерења које зависе од растојања [233]. Моделоване корекције, које омогућавају прецизно рјешавање фазних неодређености дуж базних линија, испоручују се корисницима на терену [172], [235].

Неке од основних предности коришћења мреже перманентних станица за ГНСС позиционирање уопште, које се могу узети у обзир при њиховој примјени за осматрање помјерања објеката су:

- могућност постизања високе тачности позиционирања коришћењем само једног корисничког пријемника,
- релативно велика растојања између „базних пријемника“,
- поуздана и напредна комуникација између мобилног пријемника и станица за емитовање корекција,
- повећање поузданости и могућности праћења интегритета система,
- краћи период иницијализације и
- повећање контроле квалитета добијених оцјена.

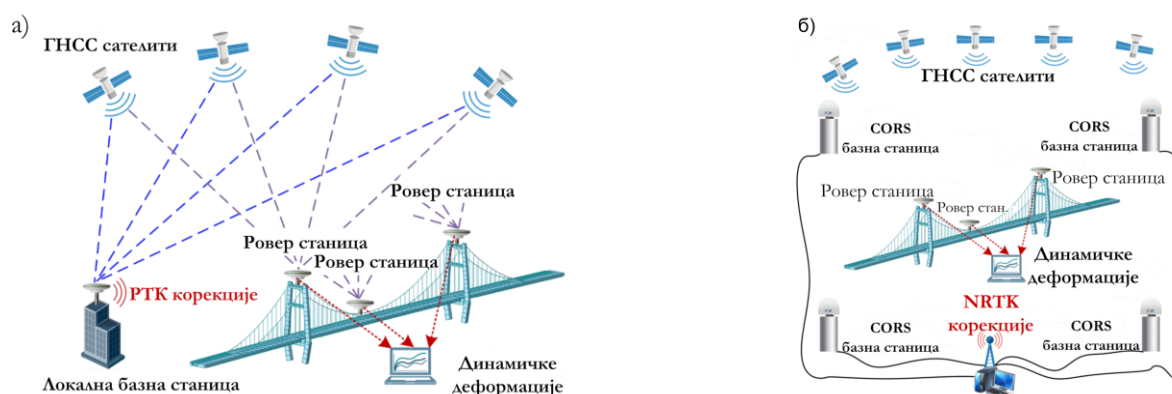
Код примјене мреже перманентних ГНСС станица кључно је питање комуникације. С обзиром да се од система за осматрање помјерања објеката очекује поузданост у погледу континуитета процеса, функционисање овог сегмента мреже мора се посебно анализирати у оквирима постојећих телекомуникационих система на предметном подручју. Важно је остваривање двосмјерне комуникације, при којој покретни пријемник шаље податке о свом положају рачунарском центру или најближој перманентној станици одакле се поправке и остале информације враћају кориснику. Постоји неколико технологија којима се остварује комуникација: радио модеми, ТВ фреквенције, GSM (*Global System for Mobile Communications*) мрежа, FM фреквенције локалних станица, интернет и сателитске комуникације. Приликом избора комуникације, посебна пажња мора се обратити на: цијену потенцијалног типа комуникације, дomet и покривеност сигналом, опсег емитовања, проток и кашњење сигнала, сигурност комуникационе везе, могућност добијања дозволе за фреквенције и могућност имплементације у оквиру софтверског рјешења система. У неким случајевима, предност се даје коришћењу комуникационих сателита и GPRS (*eng. General Packet Radio Service*) и UMTS (*eng. Universal Mobile Telecommunication Standards*) сервиса.

Федерална агенција за картографију и геодезију Њемачке (*њем. Bundesamt für Kartographie und Geodäsie - BKG*) развила је технологију за прикупљање и размјену ГНСС података у реалном времену путем отвореног интернета. Њена основна намјена је емитовање диференцијалних поправака за потребе прецизног позиционирања и навигације. Масовна употреба интернета иницирала је појаву сервиса за пренос података путем IP (*eng. Internet Protocol*) пакета.

Такође, BKG је у сарадњи са Универзитетом у Дортмунду развио технику преноса података путем интернета и мобилних телефона, засновану на *http* протоколу (*eng. Hyper Text Transfer Protocol*) [180]. Сервис је заснован на NTRIP (*eng. Networked Transport of RTCM via Internet Protocol*) протоколу кроз који се емитују поправке у познатом RTCM-104 (*eng. Radio Technical Commission for Maritime Services*) формату [180]. Како је

већ наведено у ранијим теоријским разматрањима, брзина емитовања, односно старост корекција утичу на тачност позиционирања.

Као што је могуће видјети из доступне научне и стручне литературе, примјеном мреже перманентних ГНСС станица могуће је унаприједити концепт осматрања објеката заснован на ГНСС технологији. Предности се огледају првенствено у смањењу хардверских компоненти, као и могућности изградње система за перманентно осматрање објеката са удаљених локација [236]. Аутори [237] су у свом истраживању нагласили значај примјене NRTK технике за праћење динамичког одзива великих објеката. У NRTK режиму рада, корекције се примају са референтних станица умјесто са локално успостављене базне станице или више њих (Слика 3-3).



Слика 3-3. Принципи осматрања објеката у RTK (а) и NRTK (б) режиму позиционирања [63]

3.2.2. Активне геодетске мреже за осматрање помјерања објеката

Имајући у виду да је број области у којима постоји потреба за геодетским осматрањем понашања одређених структура широк, развијају се самостални геодетски системи који се користе за ове намјене. Историја њиховог настанка везује се за прве могућности рачунарског управљања геодетском мјерном опремом и за могућност аутоматизације поступка прикупљања, обраде и анализе, тестирања и презентације података.

Активне геодетске мреже за осматрање помјерања објеката најчешће су алармни системи који се примјењују за перманентно осматрање великих конструкција (мостови, бране, тунели) или регионалних геомеханичких процеса. Активни геодетски системи за перманентно осматрање најчешће су електронски увезани геодетски мјерни системи (сензори): ГНСС пријемници и/или роботизоване тоталне станице. Савремени системи имају могућност надоградње и додавања сензора других струка, најчешће геотехничких, и то: екстензиометара, инклинометара, пиезометара, акцелерометара и др. На овај начин добијају се системи за осматрање стања објеката у цијелини (SHM системи), а њихов развој, пројектовање и успостављење су трендови савремених истраживања у овој области. На тај начин, геодетски мјерни системи и активне геодетске мреже за осматрање помјерања објеката постају елементи SHM система. Суштина изградње активних алармних система, без обзира на врсту и број уграђених сензора, је да се алармни систем активира у тренутку када мјерни сигнал (деформациони сигнал) изађе из дозвољеног опсега.

Активне геодетске мреже за перманентно осматрање помјерања објеката се као и пасивне геодетске мреже, састоје од тачака основне мреже, које се постављају изван зоне деформација, и тачака на објекту. На тачкама основне мреже постављају се стационарни мјерни инструменти (ГНСС пријемници, РТС, ДПН) а на тачкама на објекту постављају се стационарни или покретни ГНСС пријемници, одговарајући типови рефлектора за мјерења РТС, нивелманске летве са бар-код подјелом, итд.

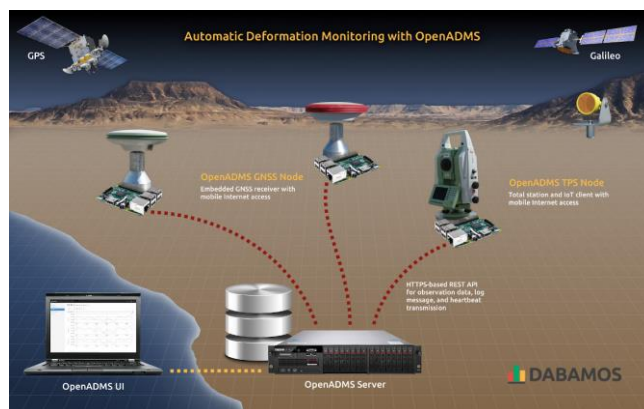
С обзиром да су системи за перманентно осматрање помјерања намијењени за праћење деформационих процеса на ризичним локацијама, управљање системом и обрада података изводи се у посебно успостављеним центрима. Постоје локални и управљачки центри [3]. Локални центар представља скуп мјерних сензора прикључених на локални рачунар кроз који се управља радом сензора и врши пријем мјерења. Везе између компоненти локалног система остварују се мрежним RS232 и RS485 кабловима, коаксијалним (оптичким) кабловима за локалне (*Local Area Network – LAN*) мреже или бежичним путем коришћењем радио модема, бежичних мрежа (*Wireless Local Area Network – WLAN*), те мобилних комуникација (*GSM, GPRS, UMTS*) [228]. Број локалних центара зависи од величине локације која се осматра, конфигурације терена и могућности успостављања веза. У управљачком центру система за осматрање врши се обрада мјерења из свих локалних центара. Обрада података се у савременим геодетским системима за осматрање изводи потпуно аутоматски, специјално развијеним рачунарским програмима. Систем је у контролном центру често подржан и свјетлећим сигналимa и алармним системима. Уобичајено је да ако су помјерања у дозвољеним границама свијетли зелена лампица, ако је стање упозоравајуће (помјерања близу дозвољених граница) свијетли наранџаста лампица, а ако су изван дозвољеног опсега црвена лампица, након чега се шаље порука за узбуњивање. Међутим, коначну одлуку о узбуњивању доноси човјек због могућих грешака у систему. У наставку овог поглавља приказани су неки од најчешће коришћених система за перманентно геодетско осматрање.



Слика 3-4. Принципи рада и компоненте GOCA система [238]

Најпознатији геодетски систем за осматрање је GOCA (*енг. GNSS/LPS/LS-based Online Control and Alarm System*) [49], [238]. Систем је намијењен за одређивање тродимензионалног помјерања, а развијен је на Универзитету Карлсруе, на департману за примијењене науке. Мјерени подаци код овог система се са базе станице шаљу радио везом у ровер станице, и у њима се процесирају вектори. Подаци о процесираним векторима се помоћу радио модема шаљу у GOCA центар на даљу обраду. За сваку тачку објекта помјерање, брзина и убрзање одређују се примјеном секвенцијалног изравнања, тј. Калмановог филтера. Организациона шема GOCA система приказана је на Слици 3-4.

OpenADMS (*енг. Open Automatic Deformation Monitoring System*) је јавно доступан систем за аутоматско перманентно осматрање помјерања, који се развија као производ у оквиру научно-истраживачког пројекта DABAMOS (*енг. DAtaBAse-oriented MOnitoring System*) на Универзитету за примијењене науке у Нојбранденбургу [239]. Систем се развија на принципу аутоматског управљања радом сензора и обрадом података кроз софтвер отвореног кода. Систем је заснован на IoT (*енг. Internet of Things*) технологији. OpenADMS може се користити за умрежавање геодетских и геотехничких сензора и изградњу активних геосензорских мрежа (Слика 3-5).



Слика 3-5. Шематски приказ сензорске мреже засноване на OpenADMS систему [239]

Систем подржава и метеоролошке сензоре, а додавање сензора као компоненти система врши се једноставним подешавањима кроз кориснички интерфејс. Рачунарска платформа система компатибилна је са свим савременим рачунарским архитектурама и широким спектром оперативних система. Софтвер се може инсталирати на класичним рачунарима и мобилним рачунарским уређајима. OpenADMS Node апликација састоји се од различитих модула за контролу сензора и обраду података мјерења. Проширење функционалности система може се постићи додатним софтверским модулима написаним у одговарајућим програмским језицима. Изворни интерфејс за програмирање апликација омогућава даљинско управљање системом кроз комуникационе мреже и размјену података са софтверима трећих страна. OpenADMS користи MQTT (*енг. Message Queuing Telemetry Transport*) протокол за интерну и екстерну комуникацију. Све компоненте су отвореног кода и могу се бесплатно користити у академске и комерцијалне сврхе.

Leica GeoMoS вишенамјенски је програм за аутоматско осматрање. Примјењује се за осматрање разних врста објеката: брана, аеродрома, путева, мостова, пруга, високих грађевина, културно-историјских споменика, тунела, итд. Систем је погодан за перманентно, периодично или осматрање по епохама. Leica GeoMoS подржава

повезивање са било којим сензором за осматрање, као и Leica софтверима или софтверима трећих лица. Систем има могућност флексибилне комуникације, контроле сензора, аутоматског складиштења, анализе и обраде података. Аутоматизовано управљање подацима које користи многобројне стандарде отвореног интерфејса, омогућава једноставну, али моћну фузију сензора. *GeoMoS Monitor* модул система обезбјеђује непрекидан циклус мјерења, управљање радом сензора и складиштење података у јединственој бази. Као компоненте система могу се користити геодетски, геотехнички и други сензори животне средине. Процес мјерења је подржан системом за праћење и контролу мјерења, аутоматску валидацију података, филтрирање и понављање мјерења уколико су детектоване грешке у подацима. Уколико се кроз рад система детектују прекорачења критичних вриједности појединих параметара који се осматрају (најчешће су то величине помјерања), људи одговорни за рад система бивају благовремено обавијештени коришћењем различитих опција за размјену порука (*e-mail-a*, *SMS-a*, алармног система). Систем користи и одређене математичке моделе који комбинују мјерења са различитих мјерних уређаја у процесу осматрања неких карактеристичних објеката. У основи Leica GeoMoS систем је заснован на основном GeoMoS Monitor софтверу, у оквиру којег корисници могу да бирају и комбинују модуле како би креирали софтверски пакет који најбоље одговара њиховим потребама [228]. Опциони модули доступни корисницима нуде могућност контроле интегритета сензора, анализу тачности мјерења, графичко приказивање и процесирање података, изравнање мреже по епохама, квантификовање величине помјерања, симулације, итд. Избор модула и компоненти система зависи и од тога да ли ће се систем користити за дугопериодично (*GeoMoS Monitor* модул) или краткпериодично (*GeoMoS Now* модул) осматрање.

Окосницу *Trimble* система за осматрање чини *Trimble 4D Control* и *Trimble High Rise* софтвери. Они омогућавају интеграцију података са различитих геодетских сензора и осматрање у току изградње и експлоатације. *Trimble High Rise* систем намијењен је за осматрање високих објеката, првенствено током изградње, коришћењем података прикупљених ГНСС пријемницима, тоталним станицама и инклинометрима [240]. Подаци из овог система користе се за реализацију геодетског обиљежавања, премјера изведеног стања и контролу вертикалности објеката као што су високе зграде, торњеви, лучне и поморске платформе. За извођење претходно поменутих радова захтијева се висока тачност мјерења, а она је на одређен начин условљена тачношћу положаја тачака геодетске основне мреже. При избору положаја тачака основне мреже често се јавља проблем густине околних објеката и догледања између тачака. Такође, приликом изградње високих објеката јављају се различити проблеми и изазови услјед чијег дјеловања долази до помјерања објеката. У том случају услови за мјерења су отежани јер се објекат перманентно помјера, а са порастом висине објекта услјед изградње константно се мијењају дужине до тачака основне мреже а и визирање ка тим тачкама постаје отежано. Помоћу *Trimble High Rise* апликације могуће је рачунање помјерања и корекције положаја тачака које се обиљежавају на појединим етажама објекта. Корекције се мобилним путем шаљу у тоталну станицу постављену на врху објекта и врши се аутоматска корекција њеног положаја. Одступања објекта од вертикалности рачунају се на основу мјерења угловних одступања објекта од вертикале и на основу вертикалног одстојања између инклинометара којима се одступање мјери. На основу мјерења ГНСС пријемницима

постављеним директно на 360° призматичне рефлекторе, и стабилизоване на врху објекта врши се оцјена 3Д координата контролних тачака. Апликација *Trimble High Rise* у дефинисаним временским тренуцима ажурира координате контролних тачака на врху објекта поправљене за вриједност 3Д одступања одређених мјерењима инклинометрима и ГНСС пријемницима. Бежичним везама (радио модемима, *wi-fi*, 3G) тотална станица приступа серверу *High Rise* апликације који аутоматски шаље корекције и координате контролних тачака на врху објекта. На основу тих података врши се позиционирање тоталне станице методом пресецања назад, а затим и геодетско обиљежавање, контрола геометрије изграђених елемената или премјер изведеног стања. *Trimble 4D Control* софтвер најважнији је елемент *Trimble* мониторинг система. Софтвер омогућава управљање радом и регистравање података различитих сензора на јединствен начин. Осим геодетских (ГНСС пријемници, РТС) коришћењем овог софтвера, као компоненте система могу се прикључити и геотехнички, сеизмички и метеоролошки сензори. Подаци осматрања процесирају се коришћењем напредних алгоритама доступних путем *Web-a*. У модулима је доступан велики број рачунарских алата за обраду, анализу и визуелизацију података осматрања и детекцију помјерања. Велики број подржаних сензора може се увезати у јединствену геосензорску мрежу, чак и са комплексним алармним системом. Поруке се одговорним особама могу слати путем *e-mail-a* или *SMS-a*, а систем може да активира звучне и визуелне аларме. Систем за осматрање омогућава корисницима и напредне услуге, као што је коришћење оригиналних података мјерења доступних у бази података. *Trimble 4D Control* софтвер садржи и софистициране алате за деформациону анализу, који врше детаљну обраду података осматрања и идентификују тачке са статистички значајним помјерањима. У софтверу се могу дефинисати граничне вриједности помјерања за сваку тачку појединачно и у случају њиховог прекорачења софтвер покреће аларм. Такође, софтвер омогућава предикцију очекиваних помјерања за сваку тачку. Сва рачунања и симулације помјерања врше се у 3Д координатном систему.

Из претходних разматрања могуће је закључити да водећи произвођачи геодетске мјерне опреме израђују активне геодетске системе за осматрање вишеструке намјене: за кратко и дуго периодична осматрања и засноване на фиксним и мобилним компонентама система. На тај начин се геодетски системи за перманентно осматрање могу користити у свим животним циклусима објекта, од претходних радова, изградње, тестирања на пробна оптерећења до краја животног вијека кроз експлоатацију објекта. У случају примјене геодетских инструмената за потребе осматрања од изузетне је важности да се изврши набавка инструмената и цјелокупне пратеће опреме од стране једног произвођача, осим када постоје специјални захтјеви за коришћење посебне опреме коју посједује само одређени произвођач. У већини случајева, пратећа опрема једног произвођача није компатибилна са пратећом опремом других произвођача (константе призми, бар код подјела нивелманских летава, итд.). Ови проблеми успоравају динамику извођења радова и захтијевају извршавање додатних мјерења како би се проблеми превазишли (нпр. одређивање адиционе константе призми). Такође, сваки произвођач геодетске опреме за своје инструменте развија софтвере из којих се генеришу документи који нису компатибилни са софтверима других произвођача. Овај проблем је рјешив са коришћењем неких других софтвера који врше конверзију докумената из једног

формата у други, али тиме се непотребно троши вријеме и ресурси који би могли бити ефикасније искоришћени за неке друге потребе.

3.2.3. Активне SHM мреже за осматрање стања објеката

Избор репрезентативних параметара за осматрање зависи од неколико фактора, као што су врста и намјена објекта, очекивана оптерећења, коришћени материјали, особине окружења и очекиване појаве деградације саставних дијелова објекта. Параметри могу бити физички, метеоролошки или хемијски. Осматрање објеката може се изводити на локалном и структуралном нивоу, тј. могу се осматрати поједини дијелови објеката или објекат у цјелини [2]. Осматрањем објекта на локалном нивоу добијају се информације које представљају локална понашања саставних дијелова објекта. Недостатак овог типа осматрања је што пружа мање информација о понашању објекта као цјелине. Осматрање објекта на структуралном нивоу обезбјеђује више информација о глобалном понашању објекта. Примарни циљ осматрања објекта је идентификација његовог понашања и откривање помјерања изван граница дефинисаних пројектом. Таква помјерања указују на евентуалну неисправност објекта, а њено квантификовање захтијева детаљну провјеру и оцјену стања објекта. У складу са наведеним чињеницама, систем за осматрање треба да омогући:

- детектовање оштећења објекта,
- регистровање времена појаве оштећења,
- лоцирање физичког положаја оштећења на објекту,
- квантификовање оштећења и
- извршавање активности (нпр. активирање алармног система).

Регистровање понашања објекта која су изван граница дефинисаних пројектом, врши се на основу унапријед дефинисаних алгоритама. Алгоритми могу бити једноставни, напредни или веома сложени. Укупна ефикасност осматрања објекта зависи од примијењеног система за осматрање али и од примијењених алгоритама за детектовање понашања објекта.

Осматрање објеката не треба бити ограничено на објекте са већ регистрованим оштећењима, што је још увијек нериједак случај у пракси. Функционалност и безбједност објекта угрожена је оног тренутка кад су оштећења уочена. Самим тим настају и економски губици. Такође, историја догађаја који су довели до појаве оштећења, није регистрована, што представља потешкоће у постављању адекватне дијагнозе проблема [2]. Правовремене информације о стању објекта посебно су важне за комплексне објекте, како би се директним поређењима измјереног понашања објекта са пројектованим понашањем (добијеним на основу нумеричких модела) одредила одступања већа од дозвољених.

За испуњење наведених задатака у научној и стручној литератури препоручује се осматрање током читавог животног вијека објекта, које обухвата све њене битне животне фазе [2], [230]. Савремени приступи за постизање наведених циљева свакако су интегрални системи за SHM процес, који квалитетне и правовремене информације обезбјеђују управо у свим животним фазама објекта.

Процес изградње објеката једна је од најосјетљивијих и најзахтијевнијих фаза у њиховом животном вијеку. Њене специфичности посебно су изражене за конструкције објеката код којих се својства материјала мијењају током времена. За њих је посебно важно знати да ли су остварене пројектоване вриједности и да ли су одрживе током експлоатације. Ово се свакако постиже квалитетним осматрањем у току изградње. Примјеном метода за осматрање у фази изградње постиже се значајна уштеда и повећање могућности извођења компликованих технолошких операција, смањују се ризици несрећа и разних непожељних дешавања [231]. Да би се смањили трошкови осматрања и провјеравања у току животног вијека објекта, будући да се за већину објеката увид у исправност мора вршити више пута у том периоду, оптимално рјешење је успостављање SHM система на самом почетку изградње.

Поједини типови објеката се из безбиједносних разлога морају тестирати прије него што се почне са њиховом експлоатацијом. У тој фази провјеравају се пројектоване вриједности параметара конструкције, постављањем оптерећења на критичним мјестима и мјерењем параметара од интереса (напрезања, помјерања, ротације) [231][2][1]. Тестирања се спроводе у циљу разумијевања реалног понашања објекта и поређења са теоријским вриједностима, а осматрање у овој фази може се користити и за калибрацију нумеричких модела који описују понашање објекта.

Фаза експлоатације објекта сматра се најважнијом фазом у животном вијеку објекта. У току ове фазе, грађевински материјали изложени су деградацији услед старења, физичко-механичких, хемијских и других фактора. Деградацијом материјала смањује се носивост, дуготрајност и сигурност структуре. Осматрањем током експлоатације прикупљају се информације о понашању објекта под предвиђеним оптерећењима, а региструју се и промјене услед непредвиђених оптерећења.

Реконструкција објекта најчешће подразумијева додавање нових конструктивних елемената, који у принципу узрокују нова понашања објекта. Разлози за њихово осматрање исти су као и за осматрање потпуно нових објеката. На основу резултата осматрања у току реконструкције може се одредити успјешност и оправданост читавог процеса.

Када се за објекат утврди да више не испуњава пројектована очекивања и када су трошкови реконструкције превише високи и неоправдани, сматра се да је животни вијек објекта истекао и објекат се демонтира. SHM системи користе се и за успјешну демонтажу конструкција и објеката у цјелини.

3.2.3.1 Успостављање активних SHM мрежа

Основне активности приликом изградње SHM система су: избор стратегије осматрања, инсталација система за осматрање, одржавање система, управљање подацима и завршне активности у случају прекида осматрања. Свака од ових активности дијели се на подактивности (Табела 3-1). Све наведене активности важне су за процес успостављања SHM система, али се дефинисање добре стратегије осматрања ипак издваја као најважнија.

Већина фаза осматрања, данас је заснована на употреби 3Д модела објеката, чије креирање је континуиран процес и одвија се са другим процесима у поступку осматрања. 3Д модели се користе у [2]:

- структуралној и динамичкој анализи,
- одређивању критичних елемената,
- одређивању параметара за праћење,
- избору локације сензора,
- анализи математичких модела и
- ажурирању софтвера за процесирање података.

За успостављање SHM система надлежни органи морају да обезбиједу пројекат и моделе објекта и уступе их пројектанту, како би му омогућили ефикасно пројектовање. На основу расположивих података о објекту, идентификују се и моделују потенцијални ризици.

Табела 3-1. Основне активности при успостављању SHM система [2], [230]

Стратегија осматрања	Инсталација система за осматрање	Одржавање система за осматрање	Управљање подацима	Завршне активности
Циљ осматрања	Инсталација мјерних инструмената и сензора	Обезбјеђивање снабдијевања електричном енергијом	Извршење мјерења	Прекид осматрања
Избор параметара за праћење	Уградња додатне опреме	Обезбјеђивање комуникационе линије	Складиштење података	Демонтажа система за осматрање
Избор система за осматрање	Инсталација опреме за читавање мјерења	Реализација плана одржавања уређаја	Обезбјеђивање приступа подацима	Складиштење компоненти за осматрање
Пројектовање мреже сензора	Инсталација софтвера	Поправке и замјене елемената система	Визуелизација	
Временски план осматрања	Повезивање са корисницима		Извоз података	
План експлоатације података			Интерпретација	
Трошкови			Анализа и експлоатација података	

На основу дефинисаних ризика и утицаја животне средине, врши се детаљна анализа објекта. За лоцирање најслабијих тачака и дијелова објекта, као и одређивање осталих критичних елемената додатно се користе структурална и динамичка анализа. Управо ови евидентирани критични елементи користе се при одређивању локација за постављање сензора и припадајућих уређаја, као и параметара који ће се пратити како би се утврдиле реакције ових елемената на спољашња оптерећења.

Први корак у пројектовању SHM је дефинисање циља осматрања и параметара који се прате. Параметри се бирају тако да што реалније приказују понашање објекта. Параметри који се прате SHM системима нису само величине које се директно мјере сензорима, већ то могу бити и величине које се добијају на основу математичког модела или скупа алгоритама за обраду података који су добијени комбинацијом више различитих сензора. Геодетска мјерења и непознати параметри које се на основу њих оцјењују свакако су примјер тих величина, чиме се може успоставити аналогија у пројектовању геодетских мрежа за осматрање и SHM система. Сваки објекат има посебне специфичности које се морају узети у обзир при изради пројекта осматрања, па самим тим и избор параметара за осматрање се посебно бира за сваки објекат. Постоје различити приступи при избору параметара, а могу се

сврстати у три групе: параметри за статичко осматрање, параметри за динамичко осматрање и идентификацију система и параметри за модалну анализу. Ове категорије могу бити и у комбинацијама. Сваку групу карактеришу одређене предности и недостаци, а коначан избор одређеног типа зависи од понашања објекта и циљева осматрања [1].

Јединствен елемент у пројектовању система за осматрање уопште, а самим тим и SHM система је дефинисање граничних вриједности за параметре који се прате [3]. Уколико се параметри налазе изван одређених граничних вриједности, сматра се да се објекат налази у критичном подручју. Ове граничне вриједности омогућавају да се у реалном времену прате и откривају потенцијални проблеми са објектима или појединим конструктивним елементима [1]–[3].

Временски план опажања при осматрању зависи од тога колико се параметри који се прате мијењају током времена. За неке случајеве, периодично осматрање даје задовољавајуће резултате. Међутим, код овог модела осматрања, информације између двије епохе осматрања су пропуштене и изгубљене заувјек. С друге стране, перманентно осматрање током цијелог животног вијека објекта може регистровати његову комплетну историју и помоћи у томе да се региструје стварно понашање објекта и потпуно искористе могућности процеса осматрања. Процес перманентног осматрања активним SHM системима сличан је осталим активним системима за осматрање. Поступак регистровања параметра који се прате могуће је регистровати примјеном различитих мјерних система, сензора и инструмената. Два основна елемента су важна за свако регистровање мјерења: мјерена вриједност параметра који се прати и вријеме када је мјерење извршено. Данас постоји велики број SHM система за осматрање, базираних на различитим принципима рада. Међутим, сви они имају сличне компоненте: мјерне сензоре, уређаје за пренос информација, уређаје за читавање мјерених величина, комуникацијске интерфејсе и подсистеме за управљање подацима.

Сврха подсистема за управљање подацима је управљање: временским планом осматрања, прикупљањем резултата мјерења и израдом парцијалних или комплетних извјештаја осматрања добијених анализом података осматрања. Код потпуно аутоматизованих система осматрања, све компоненте система раде потпуно аутоматски [8].

Коначан избор типа система за осматрање зависи од различитих спецификација везаних за осматрање, као што су: циљ осматрања; избор параметра за праћење; захтијевана тачност; фреквенција понављања мјерења; компатибилност са окружењем (осјетљивост на електромагнетне сметње, промјену температуре, влажност, ...); процес инсталације различитих компоненти система за осматрање; могућност аутоматског функционисања, даљинског повезивања и управљања; начина управљања подацима и нивоа на којем објекат треба да се прати.

Рад сензора малих димензија зависи од локалних утицаја. Из тог разлога при избору сензора за осматрање треба тежити ка избору сензора већих димензија и сензора са већим просторним распоредом. Поред тога, сензори треба да буду правилно уграђени у конструкцију објекта, отпорни на услове у окружењу и способни да читају и детектују статичка и динамичка помјерања са одређеном фреквенцијом и тачношћу [19].

Квалитет мјерења и примјенивост добијених података зависи од особина цијелокупног система, нарочито од перформанси сензора. Такође, перформансе осталих елемената система и пратеће опреме изражене кроз осјетљивост, резолуцију, прецизност, мјерни опсег и стабилност мјерења утичу на наведене параметре [16].

Параметри који су најчешће предмет осматрања SHM системима су: средње вриједности напрезања и кривљења греда, плоча и љусака; деформације; регистровања појаве, одређивање обима и броја пукотина; као и одређивање индиректних деформација. Употреба независних система за осматрање или посебних сензора за сваки наведени параметар био би скуп и комплексан посао са становишта уградње и интерпретације података [2]. Из тог разлога је пожељно користити ограничен број сензора или независних система за осматрање [19].

На основу избора параметара који се прате бирају се одговарајући сензори којима се може извршити мјерење наведених параметара. Претходном анализом одређују се број и врсте сензора који ће се користити [31]. Критеријуми за избор сензора SHM система су: тип сензора, цијена, број сензора и њихове позиције, заштита од механичких и хемијских оштећења, могућност смањења мјерног шума у датим условима и могућност прикупљања података од интереса за праћење стања објекта. Још једана од важних особина која се узима у обзир при избору сензора, посебно при пројектовању система за перманентно осматрање, је њихова осјетљивост на влагу, која се често може појавити на локацијама гдје сензори требају бити уграђени. Неријетко су потребне и додатне дозволе за заштиту сензора и обезбјеђивање њиховог исправног рада. У случајевима када се употреба сензора планира на дужи временски период, на квалитетан и безбједан начин мора се ријешити проблем електричног напајања свих компоненти система [44].

Да би се из сензора прикупљеним подацима добили жељени резултати, сензоре је потребно поставити на одговарајуће позиције у и на објекту. Избор положаја појединих сензора врши се на основу дефинисања критичних елемената објекта и претходног избора типова сензора који ће се користити.

Пројектовање мреже сензора за SHM системе, одвија се готово по истим принципима као пројектовање пасивних геодетских мрежа за осматрање помјерања објеката. Пројектно рјешење мреже зависи од геометрије, врсте и типа објекта који је предмет осматрања, параметара који се прате и циљева осматрања. Посебно је важно што ефикасније изабрати локације на које ће сензори бити уграђени, без нарушавања функционалности објекта и уз могућност идентификације укупног понашања објекта или његових најважнијих конструктивних елемената.

Посебно осјетљива и захтијевна фаза успостављања SHM система је инсталација сензора и компоненти система. Према томе, њихово инсталирање се мора детаљно испланирати, узимајући у обзир услове на терену а посебно активности, распоред и редослијед извођења појединих елемената објекта. Уградњу сензора и пратеће опреме у конструктивне елементе и на вањску површину објекта треба вршити према званичним нацртима и упутствима произвођача и смјерницама дефинисаним пројектним рјешењем SHM система. Такође, дио процеса инсталације компоненти мреже је и физичко умрежавање појединих елемената и подешавање комуникације између сензора и сервера. Инсталација елемената SHM система углавном се одвија док је објекат у изградњи. То значи да се поступак инсталације изводи по фазама, са

постепеним пуштањем у рад појединачних сензора и компоненти система. Провјера исправности и функционалности читавог система може се вршити тек по завршетку свих радова на изградњи и инсталацији свих елемената система [19], [31]. На овај начин се још једном истиче значај пројектовања, планирања и претходних истраживања за потребе успостављања SHM система, којима ће се објекат осматрати током цијелог животног вијека.

Уградња или инсталирање компоненти система у смислу физичке материјализације врши се на различите начине, а најчешће механичким причвршћивањем или лијепљењем. Инсталација може бити дуготрајан процес који може одложити грађевинске радове уколико се она спроводи током изградње објекта. То значи да се распоред инсталације појединих компоненти система мора пажљиво планирати узимајући у обзир динамику грађевинских радова и вријеме потребно за инсталацију система. Такође, уграђене компоненте система морају бити заштићене од оштећења током изградње. Сви периодични или континуирани спољашњи утицаји се узимају у обзир при пројектовању SHM система и дефинишу у оквиру сегмента његове заштите.

Сензори се често постављају на отвореном простору. То значи да морају бити отпорни на неповољне услове у датој средини. Често се постављају у водоотпорне кутије и са додатним обезбјеђењем да функционишу у различитим временским условима као што су ниске и високе температуре, висока влажност итд. С обзиром да су савремени сензори дигитални уређаји у обзир се морају узети могући извори електромагнетних сметњи природног и вјештачког поријекла којих је у данашње вријеме све више. Такође, од идентификованих потенцијалних електромагнетних сметњи на предметној локацији зависи и избор параметара комуникације система [32].

Софистициране геодетске инструменте као што су РТС и ГНСС пријемници дизајниране за перманентно осматрање карактерише робустан дизајн, широк радни температурни опсег и отпорност на већину утицаја спољашње средине. Њихово коришћење захтјева излагање утицајима спољашње средине па их је неопходно, у мјери колико то дозвољавају услови на терену, физички заштити али тако да се не омета извршавање предвиђених мјерења. Осим мјерних инструмената дио система за перманентно осматрање су напајање, екстерни уређаји за складиштење података, као и уређаји за бежично или жично преношење података, итд. Наведене дијелове је такође неопходно добро заштити од спољашњих утицаја јер су значајно осјетљивији од самих геодетских инструмената. Свакако, поред софтверске провјере, неопходно је извршити и периодичну теренску контролу цијелог система, како би се отклонили евентуално уочени недостаци.

Након завршетка изградње објекта изводе се иницијална мјерења системима за осматрање. Скуп иницијалних мјерења од изузетне је важности из разлога што се користе за идентификацију стања објекта у потпуном и неоштећеном облику, које се често назива нултим стањем објекта. Мјерења из нулте, односно иницијалне фазе користе се у наредним епохама процеса осматрања. И код активних SHM система реализоване серије мјерења сензорима на објекту усклађују се са математичким моделом објекта који се налази у бази података, а иницијална мјерења користе се и за ажурирање пројектованог математичког модела. Уколико би се овај корак прескочио, а математички модел добијен у фази пројектовања био неадекватан,

реализована мјерења би могла указивати на проблеме са објектом или критичним елементима конструкције, иако то није случај [2]. Математички модел допуњен иницијалним мјерењима репрезентује новоизграђени објекат, који у изузетним случајевима може различито да реагује на утицаје животне средине у односу на понашање предвиђено модификованим математичким моделом. У тим случајевима, врше се додатна детаљна мјерења како би се математички модел модификовао и за ове утицаје. Код савремених активних система иницијални математички модел који се налази на серверу се аутоматски ажурира. Када сервер прима податке са сензора и региструје мјерене параметре, може се утврдити да ли постоје потенцијални проблеми везани за понашање објекта тако што се ти подаци упоређује са граничним вриједностима утврђеним у фази пројектовања.

Подацима са сензора и регистрованим параметрима који се чувају и прерачунавају на серверу приступа се преко корисничког софтвера који се налази на рачунару често инсталираном у близини сензора на објекту. Ако се праћење стања објекта врши у реалном времену, путем корисничког софтвера са сервера могу се емитовати поруке о евентуалном прекорачењу граничних вриједности за критеријуме који се прате. Након завршетка претходно наведених фаза SHM систем постаје оперативан и може се предати органу надлежном за осматрање и службама надлежним за одржавање објекта [31].

3.2.3.2 *Управљање радом SHM система и подацима осматрања*

Након пуштања SHM система у рад могуће је анализирати податке са сензора и мјерене параметре и оцијенити стање објекта, чак и када софтвер не указује на проблеме у понашању објекта. Такође, могуће је направити периодичне извјештаје о стању и особинама објекта и прослеђивати га субјектима који су одговорни за анализу извјештаја о стању објекта [2].

Управљање подацима осматрања прикупљеним SHM системима може бити на основном или напредном нивоу, као и код активних геодетских мрежа за осматрање објеката. Основни ниво управљања подацима састоји се од извршења мјерења (очитавање сензора), складиштења података (на локацији мјерења или даљински) и обезбјеђивања приступа подацима. Подаци осматрања могу бити прикупљени мануелно, полуаутоматски или аутоматски, на лицу мјеста или даљински, периодично или стално, статички и динамички [2]. Поменуте опције могу се комбиновати на различите начине. Тако на примјер, током тестирања моста на пробно оптерећење мјерења се врше полуаутоматски, на лицу мјеста и периодично после сваког корака наношења или уклањања оптерећења. За дугорочно осматрање објеката током експлоатације препоручује се употреба SHM система максималних перформанси који омогућавају аутоматско, даљинско и перманентно прикупљање података и добијање резултата осматрања без људског дјеловања.

Подаци осматрања могу се ускладиштити у електронском (дигиталном) или аналогном облику, а могу се приказивати на различите начине: у облику текстуалних извјештаја, табела, дијаграма, и сл. Начин складиштења података мора обезбиједити сигурност података и елиминисати могуће факторе који би могли произвести њихов губитак. То се остварује складиштењем података на серверима са додатним резервним копијама. Може се рећи да се и код развоја SHM система користе принципи који важе у геодезији [216], бар када је у питању безбједност података. Начин складиштења података мора да обезбиједи брз приступ

појединачним подацима, тј. подаци морају бити разврстани по појединачним групама сензора. Подаци осматрања, који се у данашње вријеме врло једноставно софтверима генеришу из база података, морају бити прегледни, прецизни, лако читљиви и разумљиви како би инжењери различитих струка (заинтересовани за податке осматрања) могли недвосмислено да их користе и тумаче [19].

Софтвер којим се управља прикупљањем и складиштењем података дио је SHM система за осматрање. Напредно управљање подацима састоји се од тумачења, визуализације, анализе и генерисања упозорења и аларма, као и даљег извоза и коришћења података. У суштини, прикупљени подаци представљају велике количине бројчаних вриједности као што су датум, вријеме и вриједности параметара за праћење, који морају да се трансформишу у корисне информације у вези са понашањем структуре. Мануелно управљање подацима састоји се од мануелног тумачења, визуализације, извоза и анализе података. Овај вид управљања подацима има практичне предности у случајевима када је количина прикупљених података ограничена. Полуаутоматско управљање подацима састоји од комбинације мануелних и аутоматских поступака. Уобичајено, извоз података извршава се мануелно, а анализа аутоматски, коришћењем одговарајућег софтвера [1], [2], [231]. Овај вид управљања подацима примјењује се у случајевима код којих ће се анализа података вршити само повремено. Најпогоднији облик управљања подацима је аутоматско управљање, јер се може изводити брзо, независно од количине података или учесталости понављања анализе. Коначно, на основу информација добијених из анализе података, могу се предузети одређене активности као што су издавање упозорења или заустављање експлоатације објекта у циљу спрјечавања људских и материјалних штета. Управљање подацима дио је система који се планира заједно са избором стратегије осматрања. То значи да се у складу са изабраним системом осматрања бирају и одговарајући алгоритми и алати за обраду и анализу података [1].

За успјешан и дуготрајан рад SHM система, неопходно је обезбиједити техничку подршку за отклањање сметњи или ремонт и одржавање компоненти система. Техничка подршка укључује и ажурирање софтвера и имплементацију нових захтјева од стране органа надлежног за осматрање, а који се односе на анализу функционалности објекта. Такође, посебно је важно обезбиједити и обуку за одговорно особље које ради на одржавању објекта, које би се могло укључити у одржавање SHM система, када је то потребно [2]. На тај начин смањује се потреба за додатним ангажовањем компаније задужене за одржавање SHM система, са становишта долазака на локацију објекта који се осматра, када се појаве проблеми у њиховом раду [31].

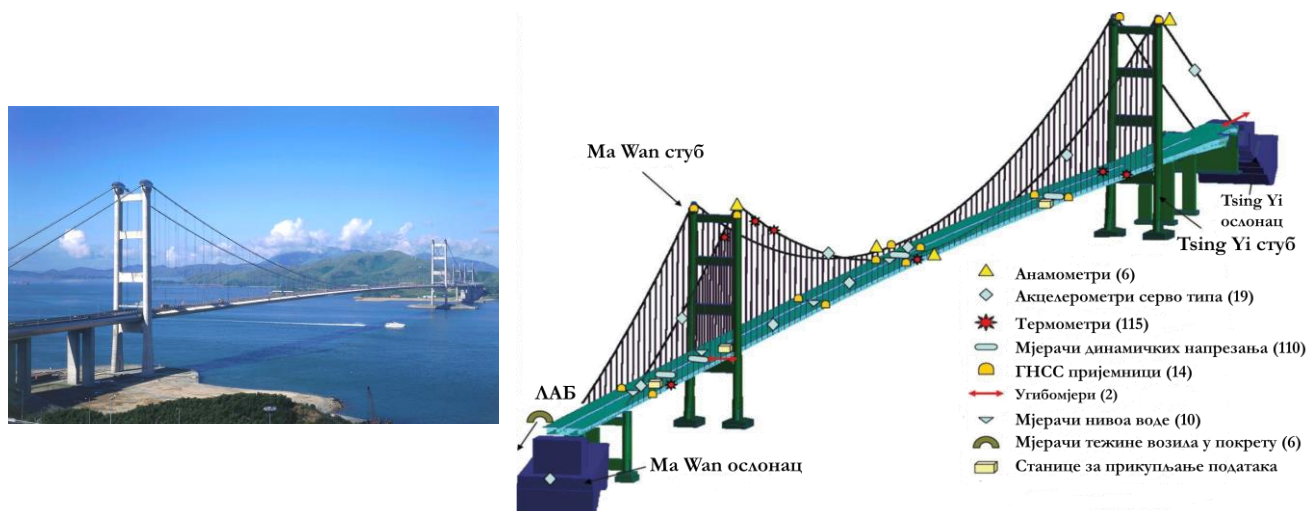
3.2.3.3 Примјер активне SHM мреже за осматрање објекта у експлоатацији

Грађевински објекти имају различите животне периоде: изградњу, испитивање, поправке, ремонт, санацију, итд. Током сваког од тих периода, осматрање се може вршити са одговарајућом динамиком мјерења. Динамика извођења мјерења зависи од очекиване фреквенције промјене параметара који се осматрају, али и од безбједносних услова. Објекти који могу доживјети колапс убрзо након појаве неисправности, морају се константно пратити, са максималном фреквенцијом мјерења. Међутим, већина објеката пројектована је на такав начин да њихов колапс наступа тек после значајног квара који се развија током дужег временског периода.

Стога, у циљу смањења трошкова осматрања, мјерења се могу обављати рјеђе, у зависности од очекиваног понашања објекта. Узимајући у обзир користи које осматрање доноси, трошкови осматрања би требало да се сматрају занемарљивим у односу на трошкове цјелокупне инвестиције изградње одређеног објекта. Из тог разлога, уштеда на имплементацији система за осматрање (не успостављање система или уштеда на количини и квалитету инструмената, сензора и пратеће опреме) може да доведе до додатних трошкова услјед непредвиђених околности које би адекватним системом за осматрање могле бити избјегнуте. Висина ових трошкова у одређеним случајевима може знатно да премаши вриједност имплементације самог система за осматрање.

Стратегија осматрања често је ограничена управо расположивим буџетом. Са становишта перформанси осматрања, најбоље је користити моћне системе за осматрање, густе сензорске мреже (много сензора инсталираних у сваком дијелу објекта), софтвер који омогућава даљински и аутоматски режим рада. С друге стране, трошкови таквог осматрања могу бити веома високи и финансијски недоступни. Зато је важно развити оптималну и приступачну стратегију SHM-а која обезбјеђује квалитетну процјену понашања објекта. Не постоје два идентична објекта, самим тим, стратегија осматрања различита је за сваки објекат. Процјењује се да се буџет за праћење новог објекта креће између 0.5% и 1.5% од укупних трошкова објекта [19].

Примјер активног SHM система дат је у наставку. Мост *Tsing Ma* (енг. *Tsing Ma Bridge*) viseћи је мост са два карактеристична распона преко којег се одвија друмски (аутопут) и жељезнички саобраћај. Дужине два viseћа распона (главни распон и бочни *Ma Wan* распон) су 1 377 m и 352,5 m. Кључна конструктивна карактеристика моста је непрекидна дужина од 2160 m система за укрућење челичних носача.

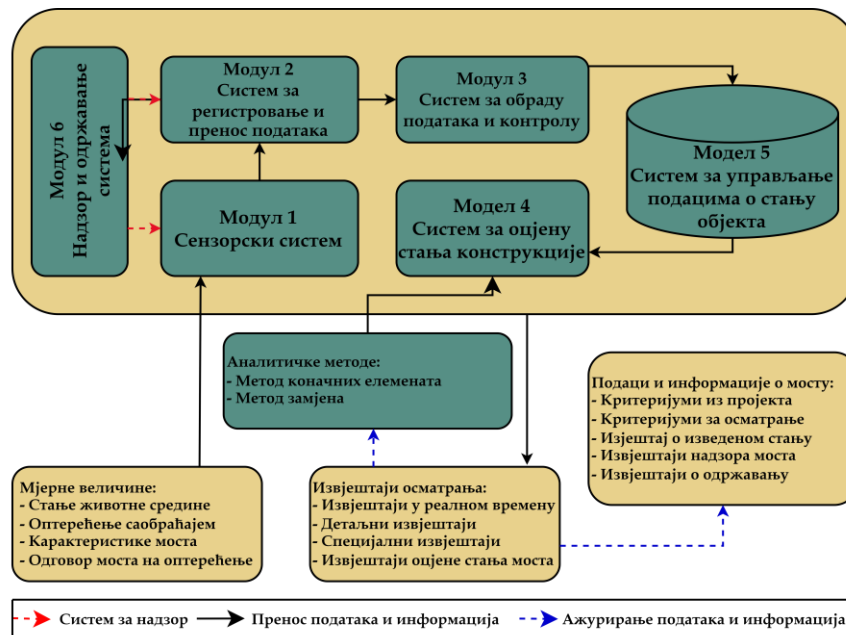


Слика 3-6. Распоред SHM сензора за осматрање моста „Tsing Ma“ [241]

Систем за осматрање стања моста, назван систем за осматрање стања конструкције и утицаја вјетра на конструкцију (енг. *Wind And Structural Health Monitoring System - WASHMC*) инсталиран је и ради на мосту од његовог пуштања у јавни саобраћај 1997. године. Састоји се од 8 типова сензора (укупно 283 сензора), и то: анемометара, акцелерометара серво типа, температурних сензора, мјерача динамичких напрезања, ГНСС пријемника, угибомјера, станица за одређивање нивоа воде и

мјерних ћелија за одређивање тежине возила у покрету. Распоред поменутих сензора и мјерних станица за осматрање *Tsing Ma* моста приказан је на *Слици 3-6*.

Систем за осматрање ове конструкције пројектован је тако да се прате четири главна параметра: реакције моста, окружење (околина, амбијенталне промјене), оптерећење саобраћаја и опште стање моста. Кључни елементи који се прате су оптерећења саобраћаја на аутопуту, оптерећења жељезничког саобраћаја, напони и вијек трајања. Остали елементи који се прате су оптерећење вјетра, температура, геометрија, глобалне динамичке карактеристике, звучне флукулације и коефицијент статичког утицаја.



Слика 3-7. Модуларна архитектура и улазно/излазни блок дијаграми система за надзор моста „*Tsing Ma*“ [241]

WASHMC систем за праћење стања моста састоји се од шест интегрисаних модула за праћење стања конструкције и процјену степена оштећења, што је шематски приказано на *Слици 3-7*:

- модул 1 (сензорски систем): обухвата сензоре и њихове одговарајуће јединице за повезивање и регистровање улазних сигнала мјерених различитим сензорима за праћење;
- модул 2 (систем за регистровање и пренос података): чине га локални уређаји (јединице) за регистровање података и кабловске мреже за регистровање, процесирање, привремено складиштење и пренос података;
- модул 3 (контролни систем и систем за процесирање): обухвата хардвер и софтвер за извршавање функција контроле система, приказивање оперативности система, приказивање оперативности моста и накнадну обраду и анализу података;
- модул 4 (систем за оцјену стања објекта): је језгро система за осматрање моста које обезбјеђује алате за анализу и дијагностификовање оштећења и предвиђање будућих дешавања на основу измјерених и симулираних података;

- модул 5 (систем за управљање подацима о стању објекта): се састоји од сервера високих перформанси, опремљеног софтвером за управљање подацима, и платформе за размјену и интероперабилност података и информација и
- модул 6 (надзор и одржавање система): чине комплети преносивих рачунара и алата за извођење надзора над системом и мањих радова на одржавању сензорског система, јединица за прикупљање података, локалних и глобалних кабловских мрежа и свих објеката за приказивање информација. Скуп софтверских алата обавља активности надзора над системом и мање корекције само у модулима 1 и 2.

4. КООРДИНАТНИ СИСТЕМИ И ТРАНСФОРМАЦИЈЕ КООРДИНАТА ЗА ГЕОДЕТСКО ОСМАТРАЊЕ ПОМЈЕРАЊА ОБЈЕКТА

Одговарајући, добро дефинисан, поновљив и објекту који се осматра прилагођен координатни систем од суштинског је значаја за изражавање положаја карактеристичних тачака објекта и описивање и интерпретацију помјерања одређених геодетским мјерним системима. Све већа тачност нових мјерних система који се користе за осматрање помјерања објекта поставља и веће захтјеве тачности за успостављање одговарајућих референтних координатних система у којима се рачунају, описују и моделују помјерања објекта. Успостављање одговарајућег координатног система посебно је важно у случају када се комбинују различити мјерни системи за осматрање једног истог објекта.

Референтни координатни системи ГНСС-а су по природи глобални и геоцентрични, јер се кретање сателита односи на центар масе Земље. Терестричка мјерења су са друге стране по природи везана за Земљино гравитационо поље и обично се описују у локалним референтним координатним системима. Међутим, за осматрање помјерања објекта важни су првенствено релативни односи карактеристичних тачака изражени у локалним координатним системима геодетских контролних мрежа и величине помјерања изражене у односу на објекат и конструктивне елементе. Посљедично се намеће закључак да односи између координатних система свих мјерних система и координатног система објекта који се осматра морају бити познати са довољном тачношћу, и то тако да је она занемарљива у односу на интензитете величина помјерања које се региструју.

Пошто се помјерања објекта дешавају у времену, регистровање, преношење и описивање времена мјерења помјерања такође има важну улогу у процесу осматрања помјерања објекта. Широм свијета користе се различити системи времена за различите намјене. За област осматрања помјерања објекта важно је детаљно познавање UTC и системских времена ГНСС технологије, њихових веза и начини синхронизације, с обзиром да се савременим геодетским мјерним системима помјерања региструју са фреквенцијама и до 100 Hz.

4.1. КООРДИНАТНИ СИСТЕМИ ТЕРЕСТРИЧКИХ И ГНСС МЈЕРНИХ СИСТЕМА

Положај тачке у n димензионалном простору јединствено је одређен уређеном n -торком реалних бројева који се називају њеним координатама. Уређена n -торка представља и компоненте вектора положаја тачке по координатним осама, ако се тај вектор посматра у његовој алгебарској представи. Скуп јасно дефинисаних правила по којима се тачкама придружују координате представља математичку дефиницију координатног система [131]. Да би координатни систем био дефинисан у простору, потребно је прописати координатни почетак, оријентацију координатних оса и размјеру. Тако усвојени координатни системи, уз неопходне константе, параметре, конвенције и правила која дефинишу координате уз недвосмислено дефинисање начина на који се оне придружују тачкама и објектима, називају се референтним системима.

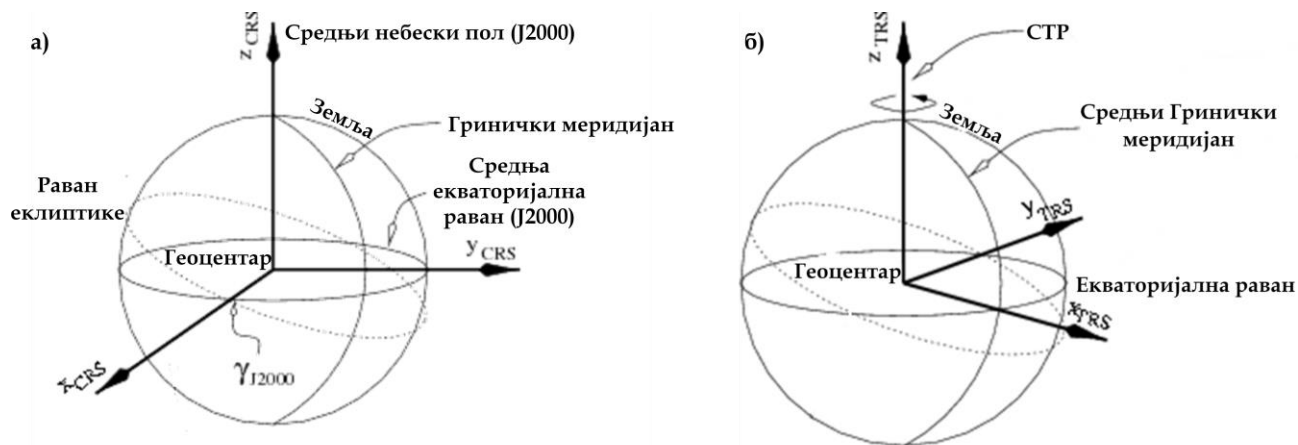
Посматрање референтног система само по његовој дефиницији, не даје никакву практичну могућност одређивања координата тачака. Стога се врши његова практична реализација и материјализација, која се назива референтним оквиром. На тај начин, референтни систем постаје доступан корисницима. Реализација референтног оквира постиже се скупом физички стабилизираних тачака (тачке геодетских мрежа) или космичких тијела и објеката, заједно са списком њихових координата које се односе на референтни систем који се материјализује [131].

Важно је разумјети разлику између референтног система и референтног оквира јер се ови појмови примјењују у савременој дискусији о координатним системима у геодезији. Према *IERS* [242], референтни систем је скуп прописа и конвенција заједно са моделовањем потребним да се у било ком тренутку дефинише тријада координатних оса. Референтни оквир представља реализацију система помоћу координата одређених тачака које су доступне директно или на основу мјерења. Према ISO 19 111 [243] референтни координатни систем је координатни систем који је са објектом од интереса повезан по геодетском датуму, односно координатни систем је скуп математичких правила за одређивање начина на који ће координате бити додијелене тачкама. Такође, према истом стандарду, изведени координатни систем је референтни координатни систем дефинисан примјеном одређене конверзије координата у координате претходно успостављеног координатног референтног система. Референтни оквир је према ISO 19 111 параметар или скуп параметара који реализују координатни почетак, размјеру и оријентацију координатног система. Експлицитна разлика између геодетског референтног система и оквира, као и њихове потпуне дефиниције, артикулисана је релативно скоро у геодетској литератури [244], јер је релативно дуго ова проблематика била оличена у терминологији геодетског датума [245], [246]. Дефиниција геодетског датума у литератури је била прилично неконзистентна и збуњујућа, а сви напори за формирање дефиниције били су усмјерени ка дефиницији хоризонталног датума у коме лежи суштина геодетско-картографских радова државних територија [247]–[249].

Данас, у ери масовне употребе савремених информационих технологија, се подаци о координатним системима све више црпе из база података успостављених према стандарду ISO 19 111 којим је дефинисана концептуална шема и минималан скуп података за дефинисање координатног система. Међутим, у овом стандарду не постоје експлицитне дефиниције прецизности [250], јер је стандард развијен за потребе геоинформационих система, а не за прецизно позиционирање. Такође, информације о координатним системима се у овом случају односе на датуме њихове реализације, па с тога овај модел није погодан за описивање континуираних кретања у простору.

4.1.1. Координатни системи и системи времена ГНСС-а

Теоријска и практична разматрања позиционирања примјеном ГНСС технологије, заснована су на познавању два типа геодетских референтних система и њима придружених координатних система: небеских инерцијалних (у којима се описују путање сателита) и терестричких (у којима се представљају положаји тачака на површи Земље).



Слика 4-1. Дефиниција ICRS (а) и ITRS (б)

Конвенционални небески референтни систем (енг. *Conventional Celestial Reference System - CRS*) је квазиинерцијални референтни систем, са координатним почетком у центру масе Земље [141], [251]. Најчешће коришћен систем овог типа је Међународни небески референтни систем (енг. *International Celestial Reference System - ICRS*). X оса овог просторног праволинијског правоуглог система усмјерења је у правцу γ тачке за епоху J2000.0 (1. јануар 2000. године у 12 часова UT (енг. *Universal Time*) времена). Z оса се поклапа са осом ротације Земље за епоху J2000.0, тј. управна је на раван дефинисану средњим екватором у епохи J2000.0. Y оса је управна на претходне двије осе, и са њима чини десно оријентисан правоугли координатни систем (Слика 4-1). Овај систем практично је реализован (конвенционалним) Међународним небеским референтним оквиром (енг. *International Celestial Reference Frame - ICRF*), преко скупа прецизних координата екстрагалактичких радио извора одређених VLBI (енг. *Very Long Base Interferometry*) техником у радиофреквентном домену и Хипаркос каталогом положаја и сопствених кретања великог броја звијезда у оптичком домену. Средњи екватор и γ тачка за епоху J2000.0 дефинисани су од стране Међународне астрономске уније (енг. *International Astronomical Union - IAU*).

Конвенционални терестрички референтни систем (енг. *Conventional Terrestrial Reference System - TRS*) је референтни систем који ротира заједно са Земљом. Координатни почетак је смјештен у центру масе Земље, а систем је чврсто фиксиран у односу на тијело Земље (енг. *Earth-Centred, Earth-Fixed - ECEF*) [252], [253]. У његову дефиницију укључени су математички модели физичких особина Земље који имају утицаја на положаје тачака и математички модели малих временских варијација због геофизичких ефеката (кретање плоча, плима и осјека, итд.). Z оса система се подударара са осом ротације Земље усмјереном из центра масе Земље ка конвенционалном терестричком полу (енг. *Conventional Terrestrial Pole - CTP*), који је дефинисан као средњи положај сјеверног Земљиног пола за период од 1900. године до 1905. године. X оса дефинисана је као пресјек равни управне на Z осу (екваторијална раван којој припада координатни почетак) и средњег положаја почетног Гриничког меридијана, чим се заправо обезбјеђује да систем ротира заједно са Земљом. Y оса управна је на претходне двије осе, односно комплетира десно оријентисан правоугли систем. Реализација овог систем назива се конвенционални терестрички референтни оквир (енг. *Conventional Terrestrial Reference Frame - TRF*), а изводи се преко координата скупа тачака на Земљиној површи које служе као референтне тачке. Примјер TRS и TRF су Међународни терестрички

референтни систем (*енг. International Terrestrial Reference System – ITRS*)(Слика 4-1) и његова реализација Међународни терестрички референтни оквир (*енг. International Terrestrial Reference Frame – ITRF*) [253]. Они су дефинисани и успостављени од стране Међународне службе за ротацију Земље и референтне системе (*енг. International Earth Rotation and Reference Systems Service – IERS*). *IERS* периодично публикује податке о новим реализацијама *ITRF*, а нове реализације се врше првенствено због утицаја геодинамичких процеса Земље на положаје тачака којима се *ITRF* материјализује. Резултати се публикују под ознаком *ITRFxx*, гдје *xx* представља посљедњу годину чији су подаци опажања коришћени. Други примјери просторних терестричких референтних оквира везани су првенствено за ГНСС технологију. Посебно се издваја Свјетски геодетски систем *WGS84* (*енг. World Geodetic System 84*), као референтна основа у позиционирању примјеном ГНСС технологије [142].

Вријеме има веома важну улогу у одређивању *PVT* примјеном ГНСС-а. Како је наведено у поглављу 2, ГНСС сигнали генеришу се веома прецизним атомским часовницима у сателитима. Мјерење растојања од сателита до пријемника засновано је на мјерењу времена часовницима сателита и часовницима у пријемнику. Такође, ГНСС генеришу и високо тачне системе времена, врше његову синхронизацију и дистрибуцију корисницима. За кориснике ГНСС технологије, најважније је познавање *UTC* и појединачних система времена сваког ГНСС-а. *UTC* је систем атомског времена заснован на Међународном атомском времену (*енг. International Atomic Time – TAI*) [142]. *TAI* је униформни систем времена, који се одређује на основу независних система времена генерисаних атомским часовницима у различитим лабораторијама за одређивање времена широм свијета. *UTC* је систем атомског времена, али није униформан јер се одржава блиским са *UT* временом. Веза између *TAI* и *UTC* математички записано гласи [141]:

$$TAI = UTC + n \cdot 1s. \quad (4.1)$$

За геодетску примјену пожељан је систем времена који је везан за ротацију Земље због обраде података мјерења, а са друге стране је употреба система атомског времена неизбјежна због његове тачности. Практична употреба оба система времена се остварује одржавањем *UTC* система времена сагласним са *UT1* временом унутар 0,9 s, додавањем преступних секунди на скалу *UT1* система времена, које даје мјеру ротације Земље. Преступне секунде уводе се повремено, 30. јуна или 31. децембра, а теоријски могу имати позитиван и негативан предзнак. Од њеног увођења до данас преступна секунда је увијек имала негативан предзнак, а посљедња преступна секунда је уведена 31. децембра 2016. године. Од тада је разлика између *UTC* и *TAI* система времена тачно 37 s (*TAI* је испред *UTC*) [254]. Појединачна системска времена ГНСС-а, која су атомског типа и њихова веза са *UTC*, описани су у наредним подпоглављима.

На основу мјерења ГНСС пријемницима, положаји тачака се рачунају и изражавају у просторном праволинијском правоуглом координатном систему који је дио изабраног *TRS*, а одређивање времена врши се у односу на изабрани референтни систем времена [142]. Пошто су *GPS*, *ГЛОНАСС*, *Galileo* и *BeiDou* међусобно независни системи, њихови координатни системи и системи времена се разликују. Међутим, сви координатни системи ГНСС-а су просторни, правоугли, праволинијски, често усклађени са *ITRF*, што даје могућност да се утврде везе између њих и начини трансформације између система. Такође, сва четири система времена

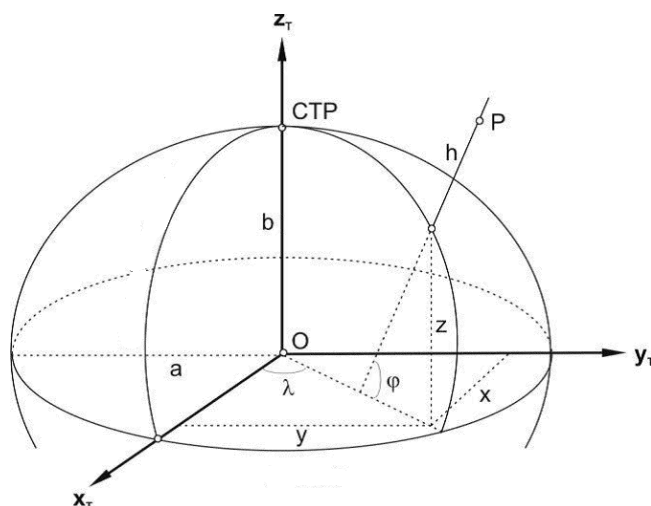
заснована су на UTC времену или се врши њихово усклађивање са овим референтним системом времена, што такође даје могућност да се независно одређена времена изразе у јединственом систему времена. На овај начин омогућава се истовремено коришћење ГНСС података са различитих система чиме се побољшава одређивање времена, тачност позиционирања и робусност PVT услуга.

Иако су са становишта математичке дефиниције просторне праволинијске правоугле координате врло једноставне, оне нису погодне за примјену у свим врстама геодетских радова, посебно у случајевима гдје се величине изражавају преко хоризонталне и вертикалне компоненте. Ово је управо случај у области осматрања помјерања објеката, гдје још увијек постоји потреба за разлагањем вектора помјерања на хоризонталну и вертикалну компоненту, како због интерпретације величина помјерања тако из због тачности која се захтијева када су у питању величине помјерања које треба открити или тачности позиционирања која се може остварити примјеном одређене технологије, мјерних система и припадајућих метода.

Најједноставнија геометријска фигура која у довољној мјери апроксимира и моделује прави облик Земље, а која омогућава дефинисање координатног система у којем се јасно изражавају хоризонтални положаји тачака и њихове висине, је двоосни обртни елипсоид. Често се елипсоид назива геодетским датумом, а у зависности од начина придруживања референтном систему може бити апсолутни (глобални) и локални. Елипсоид се назива апсолутним датумом ако му је геометријски центар у координатном почетку TRS, а мала оса се поклапа са Z осом. Такође, ова дефиниција је потпуна уз дефинисање велике и мале полуосе елипсоида, a и b , или изведених параметара као што су спљоштеност f и први нумерички ексцентрицитет e :

$$f = \frac{a-b}{a}, \quad e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2}. \quad (4.2)$$

Геодетске координате глобалног елипсоидног система су: геодетска ширина φ , геодетска дужина λ , и елипсоидна висина x (Слика 4-2).



Слика 4-2. Геодетске координате глобалног елипсоидног координатног система

Препорука IAG је да се за геодетске радове геодетске координате изражавају у односу на глобални обртни елипсоид Геодетског референтног система GRS80 (енг. *Geodetic Reference System 1980*), чији основни геометријски параметри су приказани у

Табели 4-1. Међутим, сви ГНСС користе различите елипсоиде, који су по свој дефиницији доста блиски GRS80, али са друге стране модификовани тако да најбоље одговарају територијама на којима се очекују најбоље перформансе позиционирања одређеним сателитским системом. Примјери елипсоида као локалних геодетских датума везани су првенствено за геодетско-картографске радове на територијама држава.

Табела 4-1. Геометријски параметри GRS80 елипсоида [255]

Параметар	Дефиниција
велика полуоса	$a = 6\,378\,137,0\text{ m}$
спљоштеност	$f = 1/298,257222101$

4.1.1.1. Координатни и системи времена GPS-a

Као основа за одређивање сателитских орбита и генерисање ефемерида, а касније и изражавање положаја корисничких пријемника, у случају GPS-a, користи се WGS84. WGS84 је DoD реализација ITRS, који обухвата: геоцентрични правоугли координатни систем, обртни елипсоид као геометријски модел Земље, геоид као модел Земљиног гравитационог поља и конзистентни скуп основних константи. Представља еволуцију ранијих верзија овог система: WGS60, WGS66 и WGS72 [246]. Припадајући референтни оквир WGS84 система први пут је реализован 1987. године првенствено на основу Доплерових мјерења. Сљедећа реализација, означена као WGS84(G730), извршена је на основу мјерења са 12 GPS станица распоређених широм свијета и била је усклађена са ITRF92 са тачношћу око 20 cm, по свим координатним осама [246]. G730 се односи на GPS седмицу 730, јануар 1994. године, која представља референтну епоху ове реализације WGS84. У наредним реализацијама WGS84 система, означеним као WGS84(G873), WGS84(G1150), WGS84(G1674) [256] и WGS84(G1762) [257] остварена је боља конзистентност са ITRF94, ITRF2000 и ITRF2008, са нивоом тачности 10 cm, 2 cm и 1 cm, респективно [246], [257], [258]. Основни геометријски параметри WGS84 елипсоида приказани су у Табели 4-2.

Табела 4-2. Геометријски параметри WGS84 елипсоида [258], [259]

Параметар	Дефиниција
велика полуоса	$a = 6\,378\,137,0\text{ m}$
спљоштеност	$f = 1/298,257223563$

За генерисање GPS системског времена задужена је Америчка поморска опсерваторија (енг. *US Naval Observatory - USNO*) [155]. GPS референтна временска епоха је поноћ 6. јануара 1980. године по UTC времену. Вријеме изражено у овом систему није поправљено за преступне секунде, и од UTC времена се разликује за цијели број секунди - од априла 2017. године ова разлика је 18 s [86]. GPS вријеме се ресетује на нулу, тј. покреће се ново бројање, послије сваких 1 024 седмице за наслијеђене GPS сигнале (C/A и P(Y) сигнали) и након 8 192 седмице за модернизоване сигнале (L1C, L2C, L5 и M сигнале). GPS вријеме одржава се сложеним типовима часовника, који генеришу исте стандардне фреквенције у свим сателитима и станицама за мониторинг. Системско вријеме односи се на главни часовник који одржава USNO и усклађује га са UTC, на начин да разлика ова два система времена не буде већа од 1 μs [88]. GPS навигациона порука обезбјеђује

конверзију из GPS времена у UTC вријеме. Конверзија се састоји од корекције за преступне секунде у UTC као и поправака за мале временске разлике и величине промјена између системског и UTC времена. Конверзију између GPS и UTC времена карактерише и грешка поправке за прелазак на UTC, која је обично мања од 10 ns за цијелу GPS констелацију током дана [88].

С обзиром да други ГНСС користе своја сопствена системска времена, у оквиру GPS-а се планира емитовање одступања између GPS времена и системског времена за одабране ГНСС, кроз навигационе поруке модернизованих GPS сигнала. На овај начин ће пријемницима бити омогућено да израчунају комбинована PVT рјешења користећи мјерења са појединачних сателита из различитих констелација. Посебно озбиљни напори улажу се на одређивању разлике између GPS и Galileo система времена (*енг. GPS-Galileo time offset - GGTO*) [91].

4.1.1.2. Координатни и системи времена ГЛОНАСС-а

Параметри и подаци Модела Земље ПЗ-90 (*рус. Параметры Земли 1990 года - ПЗ-90*) [260][261], познатог и као Геоцентрични референтни оквир „Параметри Земље 1990“, се примјењују за одређивање орбита ГЛОНАСС сателита и рачунање ефемерида. Систем ПЗ-90 је успостављен 1990. године и замијенио је Совјетски геодетски систем (SGS-85) који се у оквиру ГЛОНАСС система користио до 1993. године. Његова верзија ПЗ-90.11 је 2012. године одлуком Владе Руске Федерације проглашена националним референтним оквиром за орбиталне летове и геодетско обезбеђење задатака позиционирања и навигације.

Дефиниција ПЗ-90 је у складу са заједничким конвенцијама IERS и ВИН и обухвата основне геодетске константе, параметре Земљиног елипсоида и параметре Земљиног гравитационог поља. Координатни почетак система је у центру масе Земље укључујући океане и атмосферу. Z оса система усмјерена је ка СЕР-у, а X оса је усмјерена као пресјеку екваторијалне равни и нултог меридијана како је дефинисано од стране ВИН. Почетна реализација система ПЗ-90 имала је тачност од 1 m до 2 m [97]. Крајем 1990-тих година учињени су додатни напори да се успостави трансформација и веза између ПЗ-90 и WGS84 оквира на основу заједничке обраде GPS/ГЛОНАСС опажања у глобалним мрежама и поређењем накнадно обрађених и емитованих ГЛОНАСС орбита. Прва значајнија ревизија реализације ПЗ-90 референтног оквира извршена је 2002. године и позната је као ПЗ-90.02. Примјена модела ПЗ-90.02 значајно је унаприједила конзистентност емитованих ГЛОНАСС орбита са WGS84 и ITRF. Наредно ажурирање ПЗ-90 система, познато и као ПЗ-90.11 се у оквиру ГЛОНАСС система примјењује од 2013. године [97]. ПЗ-90.11 је практична реализација ITRS у епохи 2010. 0, а заснована је на резултатима обраде GPS/ГЛОНАСС података са SGN и IGS станица. Тачност ПЗ-90.11 система је у односу на центар масе Земље 0,05 m [100]. Основни геометријски параметри елипсоида ПЗ-90, приказани су у Табели 4-3.

Табела 4-3. Геометријски параметри елипсоида ПЗ-90 [97], [258]

Параметар	Дефиниција
Велика полуоса	$a = 6\,378\,136,0 \text{ m}$
Фактор спљоштености	$f = 1/298,257839303$

ГЛОНАСС системско вријеме (*енг. GLONASS System Time - GLST*) је заједничка временска референца на коју су синхронизовани часовници свих ГЛОНАСС

сателита [253]. GLST се генерише и одржава непрекидним радом атомских часовника у контролном сегменту система и синхронизовано је са универзалним координисаним временом Русије (*енг. Universal Time Coordinated of Russia - UTC(SU)*), као референтним системом времена [262]. UTC(SU) одржава Национални метролошки институт Руске Федерације у Менделјејеву код Москве. UTC(SU) се реализује радом скупа водоничких атомских часовника и континуирано се усмјерава ка UTC кроз технике сателитског преноса времена и фреквенције. Разлике UTC и UTC(SU) рутински прати ВРМ и оне су 2016. године биле мање од 2 ns [100]. Поређење националних система времена, GLST и UTC(SU) се постиже ГНСС преносом времена (коришћењем GPS или ГЛОНАСС сателита) и двосмјерним преносом времена путем геостационарних сателита. За разлику од GPS времена, GLST се од UTC не разликује за цијели број секунди, али је помјерено за 3 h (10 800 s) како би одговарало локалној временској зони Москве, што се математички може дефинисати као [97]:

$$\text{GLST} = \text{UTC(SU)} + 3 \text{ h} - C \quad (4.3)$$

Константа C се контролише тако да буде мања од 1 μs . Њена прогнозирана вриједност, која се назива параметар корекције ГЛОНАСС времена τ_c , се емитује као дио навигационе поруке и на тај начин се корисницима омогућава директан приступ UTC(SU). Поправке GLST за цијели број секунди се изводе истовремено са UTC корекцијама. Корекције спроводи ВРМ према препорукама IERS. Изводе се кад год је разлика UT1 и UTC већа од 0,9 s и обично се примјењују на прелазу годишњих квартала у 00:00:00 h (1. јануара, 2. априла, 1. јула или 1. октобра). Може се закључити да су два корака кључна у претварању ГЛОНАСС времена у UTC: из GLST у UTC(SU), затим из UTC(SU) у UTC.

4.1.1.3. Координатни и системи времена Galileo система

Galileo терестрички референтни оквир (*енг. Galileo's Terrestrial Reference Frame - GTRF*) је независна реализација ITRS заснована на раду 16 GSSs. Компатибилност GTRF и најновије реализације ITRF је таква да разлика 3Д координата било које тачке није већа од 3 cm (2σ) [112]. У практичном смислу оперативни GTRF не укључује само GSSs већ и одређени број станица постојеће IGS мреже, Galileo експерименталних сензорских станица и MGEX (*енг. Multi-GNSS Experiment*) мрежу за праћење. На основу свих поменутих мрежа врши се усклађивање GTRF са ITRF и унапрјеђење тачности његове реализације. Galileo Geodetic Reference Service Provider (GRSP) је тијело одговорно за реализацију GTRF, и врши је на основу података које обезбјеђује тијело задужено за валидацију компоненти система (*Orbit Validation Facility - OVF*). С обзиром да је GTRF заснован на ITRS, припадајући елипсоид система је GRS80, чији основни геометријски параметри су приказани у Табели 4-1.

Galileo системско вријеме (*енг. Galileo System Time - GST*) [114] је интерно генерисано референтно вријеме Galileo система. То је независан и континуиран систем времена који се реализује коришћењем искључиво атомских часовника из Galileo система. GST се синхронизује са UTC у року од 50 ns [112], како би се обезбједила интероперабилност Galileo података са другим UTC производима одређивања времена, а све се изводи према препорукама ИТУ. Компонента о времену у Galileo навигационој поруци односи се на GST. Почетна епоха GST је дефинисана као 00:00 UTC у недјељу, 22. августа 1999. године, што одговара посљедњем поновном

покретању бројања GPS седмица [111]. Разлика GST и UTC је у почетној епохи била 13 s, али се та разлика временом мијењала како су у UTC времену додаване преступне секунде, које се не примјењују у GST. GST генерише *Galileo Precise Time Faciliti (PTF)*, елемент Galileo земаљског сегмента мисије. Два PTF су опремљена најсавременијим атомским часовницима и смјештени су у два GCC. Поред тога, GTSP повезује GST са UTC тако што сваког дана обезбјеђује параметре конверзије из GST у UTC који се касније емитују као дио Galileo навигационе поруке. Ови параметри одређују се на основу улазних података из одабраних европских лабораторија за одређивање времена, и састоје се од параметара за корекцију фреквенције, података за преступне секунде и фракционог GST-UTC офсета. Даљи степен интероперабилности овог системског времена постиже се са GPST захваљујући обезбеђивању измјереног GPST-Galileo временског одступања (GGTO), који омогућава PVT било ког GPS/Galileo пријемника све док су видљива најмање четири сателита из било које од двије констелације. GGTO обезбјеђује се преко Galileo навигационе поруке и олакшава интерну калибрацију пријемника који могу пратити и примати Galileo сигнале. У овом тренутку је са становишта корисника важно нагласити чињеницу да иако је интероперабилност са другим системима времена основна идеја у Galileo систему од самог почетка, да би се избјегли кварови и остварила поузданост рада у уобичајеном режиму, захтијева се најмање један независни циклус реализације GST.

4.1.1.4. Координатни и системи времена BDS-a

Пекиншки геодетски координатни систем 1954 и Национални вертикални датум 1985 некада су коришћени као координатни системи за BDS I [130]. Са развојем BDS-a, ови застаријели координатни системи више не задовољавају потребе модерног навигационог сателитског система. Тренутно се у оквиру BDS3 примјењује Bei-Dou координатни систем (*енг. BeiDou Coordinate System - BDCS*) [136], [137], [140]. BDCS је нови термин који се појавио у најновијим ICD за B1C, B2a, и B3I. Заснован је на кинеском геодетском координатном систему 2000 (*енг. China Geodetic Coordinate System 2000 - CCGCS2000*) [263]. Дефиниција BDCS-a је у складу са спецификацијама IERS. BDCS и CGCS2000 имају исте параметре елипсоида. Дефиниција BDCS-a је следећа [132]:

- BDCS координатни почетак налази се у центру масе Земље. Z оса усмјерена је у правцу CEP. X оса се налази у пресеку IERS референтног меридијана и равни којој припада координатни почетак, а која је управна на Z осу. Y оса, заједно са Z и X осом чини десно оријентисани просторни праволинијски правоугли координатни систем. Јединица мјере за дужину у овом систему је SI метар.
- геометријски центар BDCS елипсоида поклапа се са центром масе Земље, а оса ротације је Z оса система. Остали геометријски параметри BDCS елипсоида приказани су у Табели 4-4.

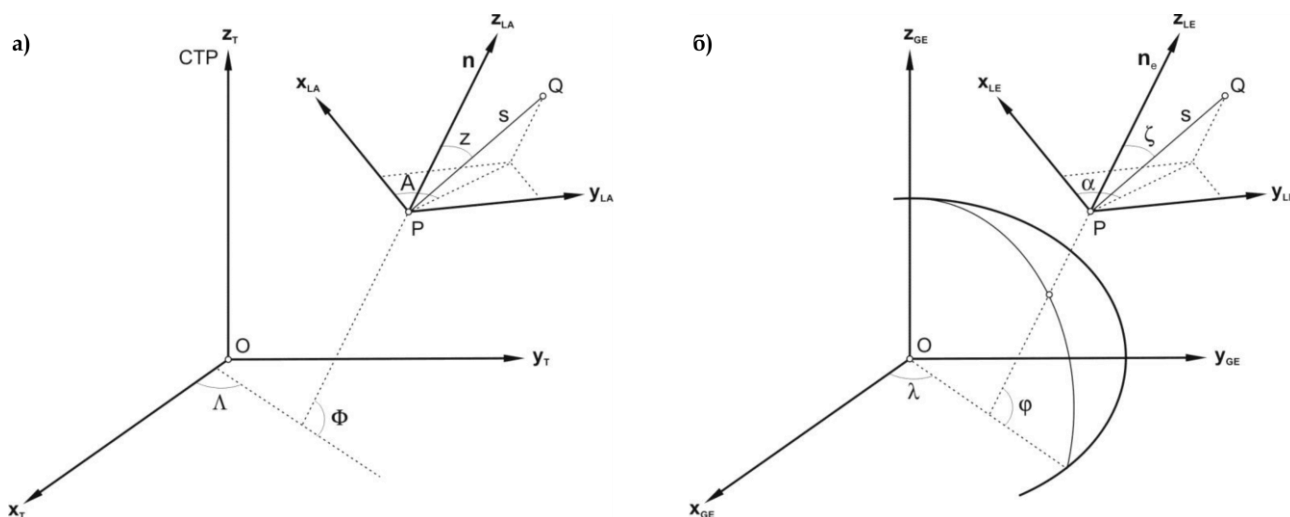
Табела 4-4. Геометријски параметри елипсоида CGCS2000 [132], [258]

Параметар	Дефиниција
велика полуоса	$a = 6\,378\,137,0$ m
спљоштеност	$f = 1/298,257222101$

Временски систем BDS-a је BeiDou Time (BDT) [136], [137], [140]. Основна јединица мјере у BDT је SI секунда. BDT је континуиран систем атомског времена, са почетном епохом у 00:00:00 h, 1. јануара 2006. године, по UTC. UTC (*National Timing Service Center of Chinese Academy of Science - NTSC*) усклађује BDT са UTC, а одступање BDT до UTC се одржава унутар 50 ns [132]. Информације о преступној секунди емитују се у навигационој поруци.

4.1.2. Координатни системи терестричких мјерних система

Терестричка геодетска мјерења у смислу њихове геометријске интрепретације зависе од Земљиног гравитационог поља. Најпогоднији геодетски референтни системи (Слика 4-3) за њихово математичко моделовање су локални астрономски референтни систем (ослања се на правац локалне вертикале у тачки опажања) и локални елипсоидни референтни систем (ослања се на правац елипсоидне нормале у тачки опажања) [131], [141], [246].



Слика 4-3. Локални астрономски (а) и елипсоидни (б) референтни координатни систем [131]

Дефиниција локалног астрономског референтног система је следећа:

- координатни почетак је у тачки опажања (P) на површи Земље,
- z_{LA} оса је у правцу вектора локалне вертикале n у тачки опажања,
- x_{LA} оса је усмјерена ка астрономском сјеверу, односно ка СТР,
- y_{LA} оса је усмјерена ка астрономском истоку.

Због неправилног облика астрономских меридијана пројекција вертикале на раван екватора не пролази кроз центар масе Земље. Оријентација локалног астрономског референтног координатног система у односу на терестричке референтне системе, врши се преко оријентације вертикале овог систем на основу астрономске ширине Φ и дужине Λ , које се одређују методама геодетске астрономије. Положаји тачака у овом координатном систему могу се дефинисати правоуглим (x_{LA} , y_{LA} , z_{LA}) и поларним (азимут A , зенитно одстојање Z , просторна дужина s) координатама.

Посматрано из угла мјерних система који су предмет ове дисертације, поларне координате у локалном астрономском референтном координатном систему су у ствари величине које се мјере роботизованим тоталним станицама.

Дефиниција локалног елипсоидног референтног система је следећа:

- координатни почетак је у тачки опажања на површи Земље,
- z_{LE} оса је у правцу елипсоидне нормале n_e у тачки опажања,
- x_{LE} оса је усмјерена ка елипсоидном сјеверу,
- y_{LE} оса је усмјерена ка елипсоидном истоку.

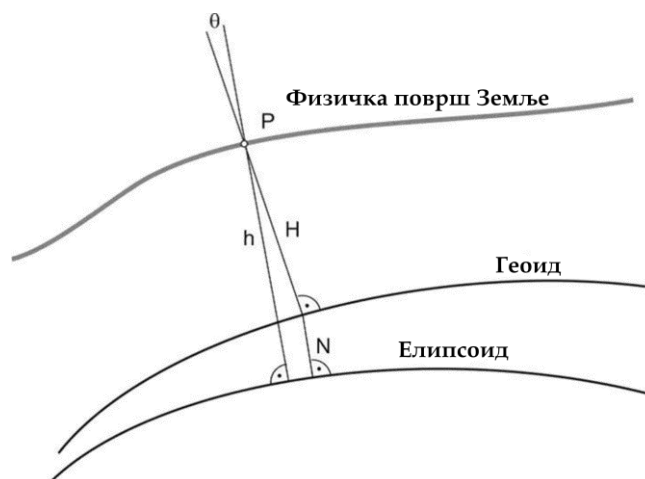
Оријентација локалног елипсоидног референтног координатног система у односу на усвојени глобални елипсоидни координатни систем врши се преко оријентације елипсоидне нормале на основу геодетске ширине φ и геодетске дужине λ . Разлика између геодетске ширине и дужине и астрономске ширине и дужине је веома мала, посебно у случајевима када усвојени елипсоид глобално апроксимира Земљу. Положаји тачака у локалном елипсоидном референтном координатном систему се могу представити локалним поларним (азимут α , зенитно одстојање Z , просторна дужина s) координатама (Слика 4-3). Просторна дужина s не зависи од разлике између нормале и вертикале, тако да је иста у локалном астрономском и локалном елипсоидном референтном координатном систему. Локални елипсоидни референтни координатни систем се користи у ситуацијама близу мјерне станице која у ствари дефинише координатни почетак. Погодан је за изравнање локалних терестричких 3Д мрежа са малим растојањима између тачака.

Због недостатака геодетских координата, везаних првенствено за елипсоидне висине које нису засноване на Земљиним гравитационим пољу, постоји потреба да се хоризонтални положаји тачака и хоризонталне компоненте вектора помјерања преведу у раван пројекције која најбоље одговара територији на којој се изводе геодетски радови, а висине тачака и вертикалне компоненте вектора помјерања да се искажу у неком од система физичких висина. У том случају ријеч је о хоризонталном и вертикалном датуму који, такође, могу бити апсолутни (глобални) и локални, односно о дводимензионалним (2Д) и једнодимензионалним (1Д) праволинијским правоуглим координатним системима. Параметри глобалног хоризонталног датума везани су за дефинисање положаја пројекционе површи у односу на глобални обртни елипсоид, којим се апроксимира површ Земље, на којем се врше рачунања, и који се потом пресликава на ту пројекциону површ. Параметри глобалног вертикалног датума, односно референтна површ у односу на коју се рачунају висине, везани су за теорију Земљиног гравитационог поља. Површ која најбоље моделује то поље назива се геоид, а растојања тачака на физичкој површи Земље од те површи, мјерена по вертикалама у тим тачкама, називају се ортометријским висинама. Однос између физичке површи Земље, површи геоида и површи елипсоида представљен је на Слици 4-4.

Величина N је ундулација геоида и представља удаљеност геоида од елипсоида мјерено по нормали, а угао θ је одступање вертикале од правца нормале. Овај угао је веома мали [131], па се у практичним радовима на малим територијама користи једноставна математичка веза:

$$h = H + N, \quad (4.4)$$

као функција трансформације из система ортометријских у систем елипсоидних висина. Параметри локалних хоризонталних датума везани су првенствено за дефинисање положаја пројекционих површи у односу на локални обртни елипсоид, којим се најбоље апроксимира површ Земље за неку државну територију, који се потом пресликава на ту пројекциону површ. Параметри локалних вертикалних датума везани су најчешће за локалне реализације геоида мареографским мјерењима, у циљу успостављања националних нивелманских референтних мрежа.



Слика 4-4. Глобалне референтне површи висина

У области осматрања помјерања објеката позиционирање и величине помјерања се посматрају у релативном смислу, на локалном нивоу и готово без било какве везе са поменутиим глобалним референтним координатним системима или локалним референтним координатним системима државних територија. Због захтијева тачности или због коришћених мјерних система и метода позиционирања, постоји потреба да се положаји тачака геодетских контролних мрежа и вектори помјерања, одређују и приказују у локалним геодетским 2Д и 1Д праволинијским, правоуглим референтним координатним системима. Ови координатни системи дефинишу се тако да најбоље одговарају објекту који се осматра и његовој непосредној околини, да се појам хоризонталног и вертикалног помјерања може недвосмислено раздвојити и представити.

За представљање хоризонталних положаја и хоризонталних помјерања најчешће се за пројекциону површ бира равна која пролази кроз средњу висину геодетске контролне мреже, тј. равна локалног хоризонта, како би рачунања и свођења мјерених величина у геодетским мрежама била што једноставнија и како би сведене величине биле ослобођене било каквих деформација које су последица избора пројекције. Параметри локалног хоризонталног датума, се за разлику од глобалних система, дефинишу произвољно. Положај и оријентација координатних оса локалног 2Д референтног координатног система дефинишу се произвољно и то тако да најбоље одговарају за представљање хоризонталних помјерања, а да се при том задржи конзистентност геодетске мреже остварена мјереним величинама. Координатни почетак и оријентација координатних оса система произвољно се могу дефинисати: а) преко приближног положаја тачака мреже дефинисаног у релативном смислу мјереним величинама, б) преко положаја карактеристичних тачака објекта који се осматра и релативних односа између њих или ц) преко положаја и оријентације карактеристичних оса објекта који се осматра. Претходним

начинима дефинише се оријентација једне осе система, а друга оса је управна на њу. Параметар размјере најчешће је дефинисан мјереним или познатим дужинама. Коначно фиксирање параметара датума везано је за рјешавање система нормалних једначина и појаву датумског дефекта (број недостајућих параметра датума) у моделу посредног изравнања контролних геодетских мрежа. Изравнањем се постиже математичка конзистентност мреже, а сами датумски параметри се фиксирају постављањем услова непромјенљивости координата или тачака мреже (тачке чије координате се усвајају као дате величине) или фиктивне тачке коју представља тежиште мреже. Постављање математичког услова непромјенљивости тежишта мреже у литератури је познато као минимални траг на свим или на дијелу стабилних тачака основне мреже. На овај начин је локални 2Д референтни координатни систем потпуно дефинисан.

Слично, за референтну површ висина локалног 1Д референтног координатног система, имајући у виду да је удаљеност између тачака мреже релативно мала због чега су промјене у Земљином гравитационом пољу и утицај закривљености Земље практично безначајни, бира се произвољна равна локалног хоризонта. Параметри вертикалног датума дефинишу се на сличан начин као код хоризонталног. На један од три поменута начина дефинише се координатни почетак, а оријентација једне осе овог координатног система дефинисана је тако да је она управна на равна локалног хоризонта, тј. поклапа се са правцем локалне вертикале. Параметар размјере у овом систему је дефинисан мјереним ортометријским висинским разликама, односно величинама које се примарно мјере дигиталним прецизним нивелирима. И код локалног 1Д референтног координатног система дефинитивна дефиниција параметара датума постиже се постављањем математичког услова, којим се вертикални датум рачунским путем смјешта на средњу висину мреже или на средњу висину мреже стабилних основних тачака. Поменути начин дефинисања локалних референтних координатних система су погодни за подручја и објекте релативно малих димензија (на локалном нивоу) и са тереном прилично једноличног рељефа [205]. У другим случајевима се прилагођеност система мора провјерити, првенствено истраживањем потребе за редукацијом мјерених величина, појавом деформација у равни пројекције након свођења мјерених величина или промјенама у гравитационом пољу Земље за конкретан локалитет.

4.2. ТРАНСФОРМАЦИЈЕ КООРДИНАТА ИЗМЕЂУ РАЗЛИЧИТИХ КООРДИНАТНИХ СИСТЕМА

Успостављање прецизних формула трансформације између координатних система различитих геодетских мјерних система, један је од важних задатака при успостављању система за осматрање. С обзиром да је тачност појединачних мјерних система и метода које се користе различита, то се мора узети у обзир при дефинисању односа између припадајућих координатних система, како не би била нарушена захтијевана тачност позиционирања или најбоља тачност која се једном од технологија може остварити.

У теорији трансформације координата срећу се два појма: трансформација и конверзија координата. Наиме, појам трансформације користи се у оним случајевима кад се говори о датумској трансформацији, односно преласку из једног геодетског датума у други [264]. Датумска трансформација доминантну примјену има у успостављању везе између глобалних референтних координатних система и

националних (локалних) геодетских датума, дефинисаних приближним положајем центара и оријентације оса обртних елипсоида у односу на терестричке референтне координатне системе или у односу на друге локалне геодетске датуме. Може се изводити у правоуглим и елипсоидним координатама. Потпуна датумска трансформација у правоуглим координатама најчешће подразумијева примјену укупно седам параметра: три параметра транслација по координатним осама (t_x, t_y, t_z) , три угла ротације око координатних оса $(\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z)$ и један параметар размјере dm . Математички записано, датумска трансформација просторних координата тачке P из датума A у датум B се изводи по формули [131]:

$$\begin{bmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{bmatrix}_B = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix}_{AB} + (1 + dm) \begin{bmatrix} 1 & \varepsilon_z & -\varepsilon_y \\ -\varepsilon_z & 1 & \varepsilon_x \\ \varepsilon_y & -\varepsilon_x & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{bmatrix}_A. \quad (4.5)$$

Број параметра трансформације може се смањивати и повећавати, у зависности од примјене и математичког модела којим се веза између два система описује. Параметри трансформације могу бити задати експлицитно, на основу познате теоријске везе између два система. Међутим, ови параметри најчешће нису познати и оцјењују се преко скупа тачака са познатим координатама у два система [264]. На тачност трансформационих параметара, а самим тим и трансформисаних координата одлучујуће утичу величина трансформационог подручја, избор идентичних тачака и тачност два референтна система. Може се закључити да је датумска трансформација погодна за успостављање везе између глобалних система, глобалних и локалних, као и између локалних система у случајевима када су познате просторне или геодетске координате одређеног броја тачака у оба система.

Прелазак из просторних у геодетске координате и обрнуто, као и прелазак између геодетских и координата у пројекцији, у литератури се назива конверзијом координата. Конверзијом координата назива се и прелазак из једног система у други у оквиру истог геодетског датума. За разлику од датумске трансформације, конверзија координата увијек се врши на прецизан начин примјеном одговарајућих математичких формула (нпр. једначине пројекције). Појам конверзије координата налазимо и у дефиницији изведеног координатног система. Наиме, директна веза између правоуглих (X, Y, Z) и геодетских (B, L, h) координата описана је сљедећим формулама [244], [246]:

$$\begin{aligned} X &= (N + h) \cos B \cos L, \\ Y &= (N + h) \cos B \sin L, \\ Z &= [N(1 - e^2) + h] \sin B. \end{aligned} \quad (4.6)$$

У претходним формулама, величина N је полупречник кривине по првом вертикалу и рачуна се као:

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}}. \quad (4.7)$$

Поступак преласка из геодетских у просторне координате је нешто сложенији и најчешће се спроводи итеративно. Геодетска дужина рачуна се директно:

$$\tan L = \frac{Y}{X}. \quad (4.8)$$

Геодетска ширина и елипсоидна висина зависе једна од друге и рачунају се итеративно:

$$\tan B = \frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \left(1 - e^2 \frac{N}{N+h} \right)^{-1}, \quad (4.9)$$

$$h = \frac{\sqrt{X^2 + Y^2}}{\cos B} - N, \quad (4.10)$$

при чему се најчешће у почетној итерацији усваја вриједност елипсоидне висине $x=0$.

У контексту описаних координатних систем важно је дефинисати и релације између локалних астрономских и елипсоидних система и глобалних терестричких система. За разлику од поменуте датумске трансформације и њених параметара, у овом случају додатно се узима у обзир различита поларност ове двије групе система. Коначна формула за трансформацију вектора положаја произвољне тачке Q из локалног астрономског система у терестрички референтни систем је [131]:

$$\mathbf{x}_{Q,T} = \mathbf{x}_{P,T} + \mathbf{R}_3(180^\circ - \Lambda) \mathbf{R}_2(90^\circ - \Phi) \mathbf{S}_2 \mathbf{x}_{Q,L} = \mathbf{x}_{P,T} + \mathbf{A} \mathbf{x}_{Q,L}, \quad (4.11)$$

гдје матрица \mathbf{A} има облик:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\sin \Phi \cos \Lambda & -\sin \Lambda & \cos \Phi \cos \Lambda \\ -\sin \Phi \sin \Lambda & \cos \Lambda & \cos \Phi \sin \Lambda \\ \cos \Phi & 0 & \sin \Phi \end{bmatrix}. \quad (4.12)$$

Ако се астрономске координате у матрици \mathbf{A} замјене елипсоидним, формула 4.9 се користи за трансформацију из локалног елипсоидног у терестрички референтни координатни систем.

Обрнуте трансформације изводе се по формули:

$$\mathbf{x}_{Q,L} = \mathbf{A}^{-1}(\mathbf{x}_{Q,T} - \mathbf{x}_{P,T}) = \mathbf{A}^T(\mathbf{x}_{Q,T} - \mathbf{x}_{P,T}). \quad (4.13)$$

За могућност потпуног комбиновања терестричких и сателитских мјерења важно је познавање релације између просторних и поларних координата, а оне су дефинисане следећим формулама:

$$x_{LA} = s \sin z \cos A, \quad y_{LA} = s \sin z \sin A, \quad z_{LA} = s \cos z, \quad (4.14)$$

за прелазак из поларних у просторне координате, док се обрнути прелазак изводи по формулама:

$$s = \sqrt{x_{LA}^2 + y_{LA}^2 + z_{LA}^2}, \quad \tan A = \frac{y_{LA}}{x_{LA}}, \quad \tan z = \frac{z_{LA}}{\sqrt{x_{LA}^2 + y_{LA}^2}}. \quad (4.15)$$

Све претходно дефинисане релације односе се на везе просторних референтних координатних система, како глобалних тако и локалних. Такође, овим релацијама дефинисан је један од начина изражавања хоризонталних и вертикалних координата. Формулом 4.2 дефинисана је веза вертикалних референтних

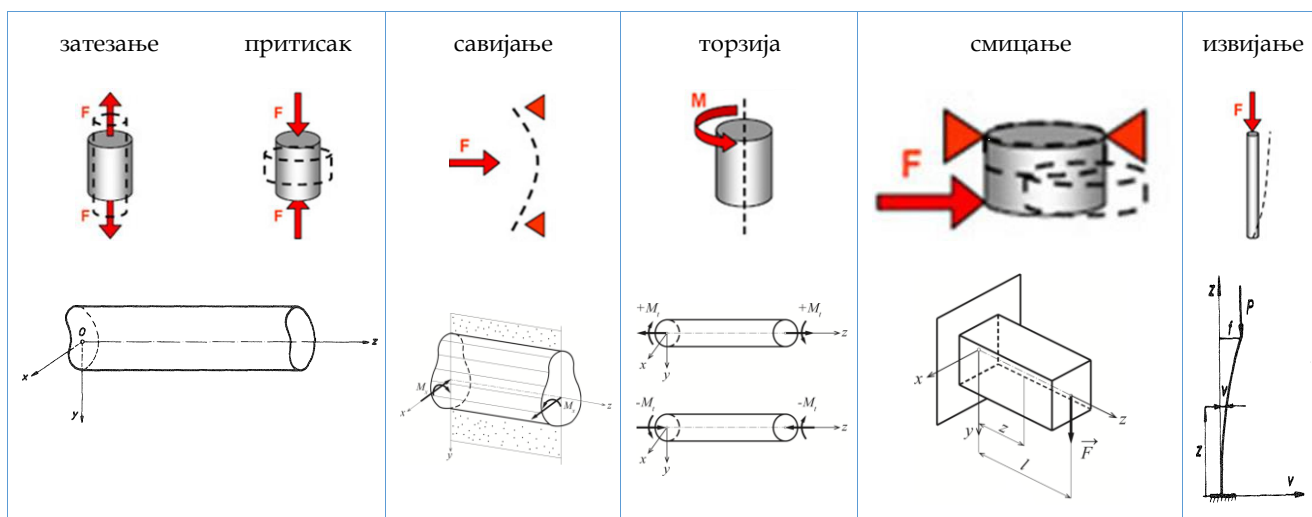
координатних система. Ова релација, која важи за подручја мале величине, довољна је за успостављање система за осматрање помјерања објекта заснованог на технологијама које су предмет овог истраживања, јер се такви системи успостављају управо на тим подручјима. Међутим, како је већ поменуто, из практичних разлога постоји потреба да се хоризонтална помјерања изражавају у локалним хоризонталним равнима. Свођење мјерених величина и прелазак из просторних и геодетских координата у координатне системе пројекционе површи, зависе од карактеристика изабране картографске пројекције. Теорија картографског пресликавања, врсте пројекција и поступци рачунања детаљно су описани у [77], [216], [265].

4.3. ТРАНСФОРМАЦИЈЕ КООРДИНАТА У ЛОКАЛНЕ КООРДИНАТНЕ СИСТЕМЕ ОБЈЕКТА

Представљање регистрованих помјерања најчешће се врши у локалном координатном систему објекта који је везан за карактеристичне тачке или осе објекта који се осматра. Избор и оријентација оса врше се тако да се на геометријски начин најбоље представе различите врсте деформација. На основу правилно регистрованих помјерања, у даљој анализи се успоставља веза са компонентама деформација [266]. Деформације се према начину дјеловања сила на деформабилно тијело (Слика 4-5), посматрано из угла координатних система у којима се описују, дијеле на [267]:

- затезање – дјеловање сила истог интензитета и правца, али различитих смјерова у случају када силе дјелују од деформабилног тијела,
- притисак – дјеловање сила истог интензитета и правца, али различитих смјерова у случају када силе дјелују ка деформабилном тијелу,
- савијање – дјеловање два једнака али супротна спрега савијања, који леже у главној равни деформабилног тијела,
- торзија (увијање) - дјеловање два једнака торзијона спрега, супротних смјерова, који дјелују у равни базиса деформабилног тијела,
- смицање – дјеловање сила истог интензитета на деформабилно тијело, супротних смјерова, и које леже на различитим правцима и
- извијање – губљење стабилности праволинијског равнотежног положаја притиснутог деформабилног тијела при дејству критичне силе притиска, тј. прелазак деформабилног тијела у савијени равнотежни облик. Извијањем се назива деформација притиснутог деформабилног тијела код којег су двије димензије доминантно мање у односу на трећу.

Претходно наведена класификација деформација односи се првенствено на промјене изазване дуготрајним оптерећењем објекта, познатим и као статичка оптерећења. Такође, ова класификација односи се на изоловане случајеве појаве деформација на конструктивним елементима објекта. То значи да се при осматрању објекта, који је у конструктивном смислу склоп више елемената, могу појавити све врсте деформација одједном.



Слика 4-5. Типови деформација према начину дјеловања сила [2]

Код динамичких оптерећења током времена мијењају се интензитети, мјеста, правци и смјерови дјеловања оптерећења. Промјене могу бити скоковите (различите врсте саобраћајног оптерећења, оптерећење вјетра, сеизмичко оптерећење), у кратким временским интервалима (ударна оптерећења) или као импулсно оптерећење. Динамичка оптерећења (Слика 4-6) најчешће се дијеле на: стохастичка, периодична и хармонијска [2]. За разлику од статичких оптерећења, при анализи динамичких оптерећења вријеме представља важну компоненту.

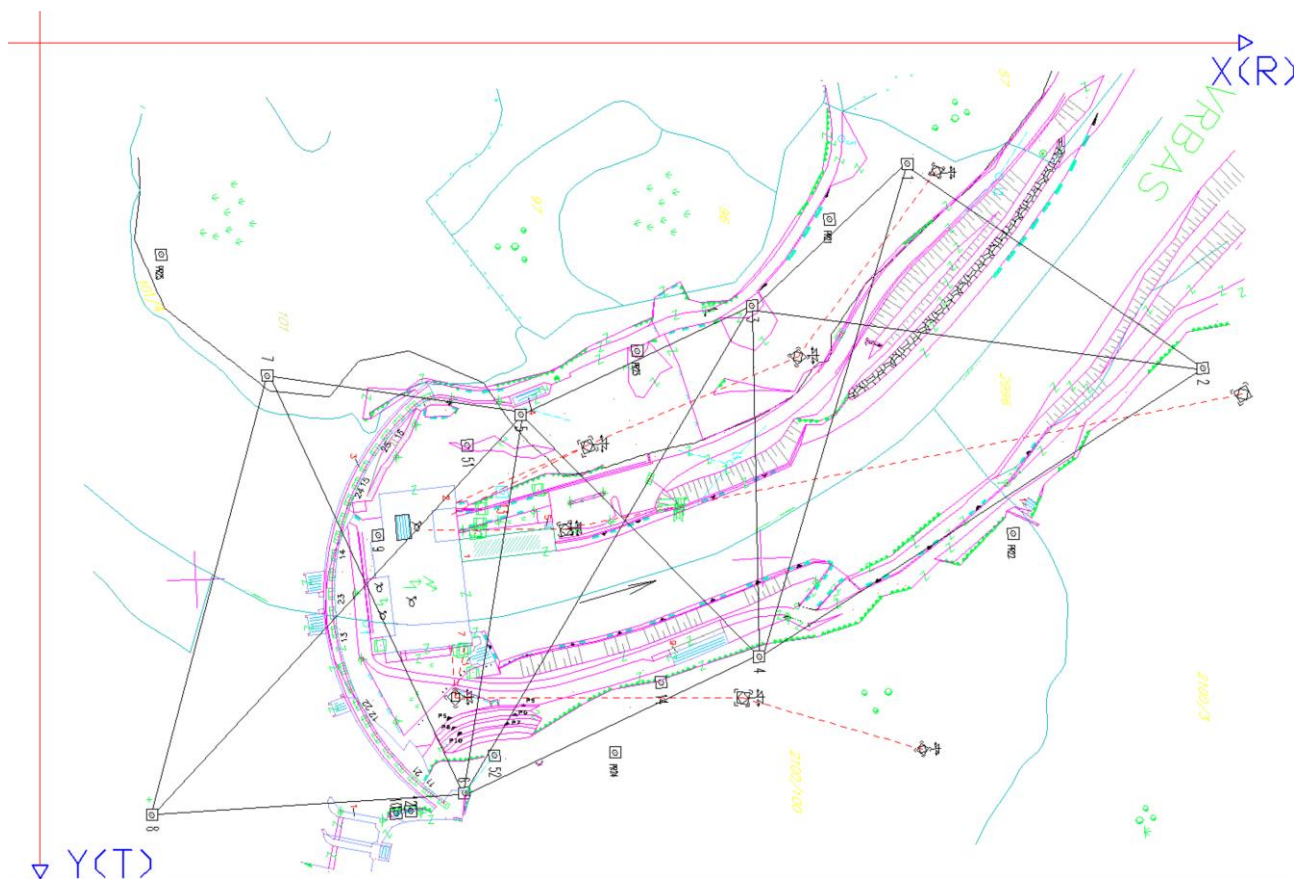


Слика 4-6. Типови динамичких оптерећења

Имајући у виду претходно наведене особине деформација у геометријском смислу и дефиниције координатних оса за поједине врсте деформација, у тренутку би се могло закључити да постоји потреба за дефинисањем већег броја координатних система у којима би се представљала регистрована помјерања. Међутим, за осматрање помјерања објеката ипак се успоставља јединствен локални координатни систем објекта у који се трансформишу помјерања регистрована геодетским мјерним системима. Дефинисање јединствених координатних система за осматрање помјерања инжењерских објеката биће описано кроз примјер координатног система за осматрање бетонске лучне бране *Боцац* у експлоатацији и моста *Severn Bridge* при одређивању квазистатичких и динамичких помјерања.

За одређивање вектора хоризонталних помјерања код лучних брана користе се 2Д праволинијски правоугли координатни системи (Слика 4-7), код којих једна оса иде кроз средишњу тачку тијела бране (радијална оса), управна је на тангенту у тој тачки и има позитиван смјер низводно. Друга оса је тангенцијална, управна на претходну и позитиван смјер јој иде ка десној обали. Оваква дефиниција хоризонталног координатног система изабрана је из неколико разлога. Прво, главни извори сила које дјелују на тијело бране *Боцац* долазе од масе стијена масе на које је

ослоњена брана, због тога што се бетонске лучне бране конструктивно рјешавају тако да се притисак који врши водени стуб пренесе на ослонце бране у стијенама. Као друго, брана ради на принципу седмичног изравнања нивоа воденог стуба акумулације, па се у анализама притисак који врши акумулација на тијело бране сматра константним.



Слика 4-7. Координатни систем за осматрање бетонске лучне бране „Бочац“

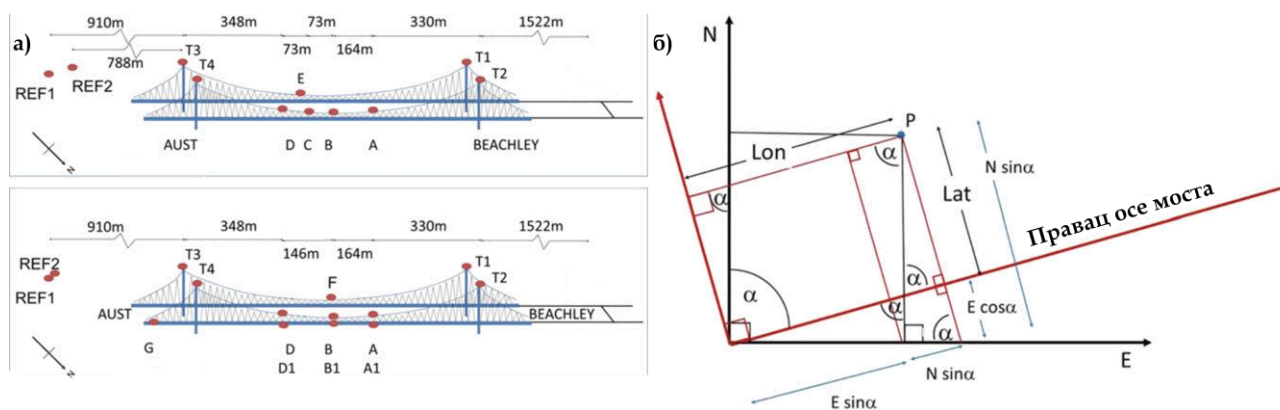
То значи да ће понашање тијела бране зависити преваходно од годишњег доба у којем се врши осматрање, тј. скушљања и ширења стијена на које је брана ослоњена услед промјене температуре. С тим у вези, геодетска мјерења у поступку осматрања ове бране се изводе два пута годишње, у периоду високих и ниских температура. Коначно, имајући у виду претходне чињенице пројектант бране је предвидио да ће се тијело бране за случај високих температура интензивније кретати у правцу узводно-низводно него, са интензитетима помјерања већим него у периоду ниских температура, што је био најзначајнији разлог да се једна оса система постави баш у том правцу. Такође, очекивано је да тачке геодетске контролне мреже уграђене у средини тијела бране имају веће интензитете помјерања од тачака на крилима бране. Контролне тачке на тијелу бране на основу којих се прате хоризонтална помјерања постављене су на два висинска нивоа и то тачке 11, 12, 13, 14, 15 и 16 на круни бране и тачке 21, 22, 23, 24 и 25 по средини тијела бране.

Увидом у анализу резултата геодетских мјерења за 2020. годину, закључује се да су на бази геодетских мјерења регистрована помјерања у складу са наведеним претпоставкама. Наиме, за тачке на круни бране регистрована су помјерања по радијалној оси мањих интензитета него за тачке по средини тијела бране, при чему

су за тачке 13 и 23 регистрована помјерања највећих интензитета. За тачку 13 је у периоду ниских температура регистровано помјерање по радијалној оси интензитета 1,1 mm, а у периоду високих температура је интензитет помјерања био - 11,9 mm. За тачку 23 у периоду ниских температура регистровано је помјерање по радијалној оси интензитета - 0,8 mm, а у периоду високих температура је интензитет помјерања био - 16,7 mm. Аналитичка веза геодетске мреже и објекта је остварена још у фази изградње, тако што је одређен број тачака геодетске основне мреже коришћен за обиљежавање бране. На основу тих података је непосредно након изградње бране успостављена веза координатног система геодетске контролне мреже и локалног координатног система бране, јер су тачке основне мреже које су коришћене за обиљежавање постале тачке мреже за осматрање.

Како би се одредила хоризонтална квазистатичка и динамичка помјерања моста *Severn Bridge*, ГНСС-ом одређене координате карактеристичних тачака су трансформисане у локални координатни систем везан за осе моста. Координатне осе овог локалног система дефинисане су тако да се једна оса (подужна оса) поклапа са главном лонгитудиналном осом моста, док је друга оса (попречна оса) управна на њу. Како би се спровела ова трансформација, извршена су мјерења и рачунање азимута главне осе моста. Азимут је израчунат на основу положаја ГНСС антена фиксираних на каблу за вјешање носеће конструкције, на *Слици 4-8 (а)* означеним као А, В, С и D. Антене су на свим локацијама причвршћене на исти начин и непосредно за носиви кабл, па се може рећи да њихове позиције представљају позиције карактеристичних тачака кабла. Коначна вриједност азимута је у конкретном случају одређена на основу позиција А и D, јер је удаљеност између њих највећа. Очекивано, грешка тако одређеног азимута је мања него у било којој другој комбинацији мјерних позиција.

Коначна трансформација ГНСС-ом одређених координата карактеристичних тачака моста (*E* и *N*) у координатни систем моста (*Lat* и *Lon*) извршена је коришћењем теорије сличности троуглова, што је графички приказано на *Слици 4-8 (б)*.



Слика 4-8. Шематски приказ распореда ГНСС пријемника (а) и трансформације ГНСС координата у координатни систем моста (б) при одређивању квазистатичких и динамичких помјерања моста „*Severn Bridge*“ [268]

Коначне формуле по којима су ГНСС координате трансформисане у координатни систем моста су:

$$Lat = N \sin \alpha - E \cos \alpha, \quad (4.16)$$

$$Lon = E \sin \alpha + N \cos \alpha, \quad (4.17)$$

и примијењене су за трансформацију ГНСС координата E и N свих карактеристичних мјерних мјеста на мосту. У конкретном случају, азимут је одређен са прецизношћу од $1'$, што је према наводима истраживача [268] била задовољавајућа прецизност оријентације координатних оса за сагледавање компоненти квазистатичких и динамичких помјерања.

Посматрано са математичког аспекта, може се рећи да постоји произвољно много трансформационих модела који функционално повезују координате које се односе на два референтна система. Исто тако је могуће на произвољно много начина дефинисати оптималност трансформационог модела, али је неколико захтјева важно за успостављање координатног система и модела трансформације координата при осматрању помјерања објеката. Као што је наведено да координатни систем за изражавање положаја карактеристичних тачака и вектора помјерања треба бити једноставан тако и изабрани модели трансформације треба да буду једноставни, што је логичан захтјев из угла корисника. Такође, координатни систем и модели трансформације координата требају бити конзистентни за цијелу територију и објекат који се осматра, без деформација или са вриједностима занемарљивим у односу на величине помјерања које се региструју. Међутим, референтни координатни системи материјализују се тачкама геодетских мрежа за осматрање, што за последицу може имати константне и промјенљиве систематске грешке реализације референтног система. Свакако, ове промјене требају бити идентификоване примјеном одговарајућег модела за одређивање помјерања, али и модел трансформације координата мора бити такав да омогући њихову детекцију на основу резултата позиционирања било којим мјерним системом. Како је већ поменуто, модел трансформације мора имати одговарајућу тачност, тј. тачност која се може остварити неком технологијом не смије бити нарушена због примјене модела трансформације. Ово се посебно мора узети у обзир ако се трансформациони параметри оцјењују на основу скупа заједничких тачака са координатама у два система, при чему сваки скуп или чак свака тачка има другачију прецизност положаја [269]. Како се из наведених примјера може закључити, трансформација у локалне координатне системе објеката изводи се на основу карактеристичних тачака на објекту чије координате се одређују у координатним системима мјерних система, а затим и у координатном систему геодетске контролне мреже. То значи да се остварена тачност геодетске контролне мреже, која је непосредно везана за осјетљивост мреже, не смије нарушити изведеном трансформацијом. С обзиром да у области осматрања помјерања објеката постоји потреба за посебним изражавањем хоризонталних и вертикалних компоненти помјерања и то у односу на карактеристичне елементе објекта, избор начина трансформације координата одређених различитим мјерним системима може бити посматран из угла 1Д и 2Д модела трансформације [77]. У зависности од улазних величина између којих треба успоставити везе, за трансформацију координата у равни могу се користити унимодална, хелмертова, афина и полиномска трансформација, а за трансформацију висина једнодимензионална (висинска) трансформација [67], [270]–[272].

5. АНАЛИЗА И ОБРАДА ПОДАТАКА ПЕРМАНЕНТНОГ ГЕОДЕТСКОГ ОСМАТРАЊА И КВАНТИФИКОВАЊЕ ПОМЈЕРАЊА ОБЈЕКТА

Први корак у анализи и обради података након спровођења мјерења, је уношење одговарајућих поправака мјерења и редукција мјерених величина. Затим се врши тестирање резултата мјерења на присуство грубих грешака, које не би требало да постоје ако су у току мјерења поштовани прописани критеријуми за праћење и контролу мјерења. За резултате мјерења преостале након спровођења ових тестова врши се оцјена тачности мјерења прије изравнања, која треба да је статистички сагласна са тачношћу мјерења, дефинисаном пројектним рјешењем. Изравнањем (оцјеном) мјерених величина оцјењују се њихове највјероватније вриједности, а формирањем функционалног модела посредног изравнања и непознати положаји тачака геодетске контролне мреже. Функционални модел изравнања дефинише се у зависности од врсте мјерених величина и методе позиционирања, а стохастички од остварене тачности мјерења. Након спровођења изравнања, врши се *a posteriori* оцјена тачности мјерења и тестирање сагласности добијених оцјена са *a priori* оцјеном тачности. Примјеном одговарајућих метода, заснованих на законима математичке статистике, врши се детектовање значајних помјерања (промјена положаја) и квантификовање величина тих помјерања.

Примјена савремених мјерних система и технологија омогућава да се процес геодетског осматрања помјерања објеката готово потпуно аутоматизује и да се изводи перманентно. Међутим, квалитет добијених информација о помјерањима зависи првенствено од оствареног квалитета мјерења. Да би се остварила захтијевана тачност мјерених величина, и за процес пројектовања и за реализацију, неопходно је детаљно познавање методе мјерења. Анализа методе мјерења једна је од најбитнијих фаза и врши се у циљу утврђивања објективне тачности мјерења одређене величине по изабраној методи. Анализом методе позиционирања утврђује се начин и квалитет одређивања положаја тачака геодетске контролне мреже, а анализом методе за идентификацију и квантификовање помјерања утврђује се начин и моћ одређивања помјерања. На бази свих претходно поменутих анализа, заснива се оптимизација процеса аутоматизације осматрања и побољшање ефикасности и брзине система у рачунарском смислу. Избор методе мјерења, позиционирања, идентификације и квантификовања помјерања при перманентном геодетском осматрању помјерања објеката у многим зависи од захтијеваног периода узорковања, односно очекиване брзине дешавања помјерања. Дакле, може се закључити да поред величине помјерања која се треба регистровати, учесталост њене појаве представља улазну величину у процесу успостављања система за перманентно геодетско осматрање помјерања објеката. То значи да број серија мјерења једне величине, или броја серија одређивања положаја карактеристичних тачака, може бити један. Ова чињеница мора се имати у виду при оцјени тачности мјерења и позиционирања у фази пројектовања и у фази реализације осматрања, јер је у наведеним случајевима поузданост мјерења изузетно ниска.

У овом поглављу описана су моделовања извора грешака мјерења геодетским мјерним системима за осматрање помјерања објеката, методе позиционирања са посебним акцентом на методе за добијање података у реалном времену, што је

основа савремених система за перманентно осматрање. Анализиране су и описане методе за утврђивање и квантификовање помјерања.

5.1. МОДЕЛОВАЊЕ ГРЕШАКА И ОЦЈЕНЕ КОМПОНЕНТИ ДИСПЕРЗИЈА МЈЕРЕЊА СИСТЕМИМА ЗА ГЕОДЕТСКО ОСМАТРАЊЕ ПОМЈЕРАЊА ОБЈЕКТА

Роботизованим тоталним станицама аутоматским поступком се мјере хоризонтални углови, зенитна одстојања и просторне дужине. Код савремених мјерених система се груба и фина мјерења праваца на инкременталним лимбовима, изводе приликом окретања алхидаде и дурбина. Мјерења се изводе у односу на непомични детектор чиме се заправо мјери релативни хоризонтални угао, а поступак мјерења се назива апсолутни. Процес мјерења се састоји од грубог и финог мјерења, а коначан резултат се добија као аритметичка средина великог броја елементарних мјерења, са најмање четири детектора распоређена на дијаметрално супротним странама лимба. Чврсти детектори одређују иницијално нулто читање, док помични имају улогу индекса за читање. У електронском мјерењу дужина свјетлосни, инфрацрвени и микроталаси служе као носачи мјерног сигнала. Њихова фреквенција назива се носећа фреквенција. Фреквенцију модулације називамо мјерном или калибрационом фреквенцијом. Вријеме путовања сигнала служи као мјера растојања, а у савременим геодетским мјерним инструментима се, на посредан начин, одређује на основу мјерења фазне разлике. Савремене роботизоване тоталне станице имају могућности аутоматизације цијелог процеса мјерења на основу претходно дефинисаног алгорита. Такође, имају могућност праћења промјена положаја рефлектора или жељеног објекта перманентним и синхронизованим читавањем основних мјерних величина. Синхронизација се врши механичко-електронским и рачунарским путем.

Дигиталним прецизним нивелирима најновије генерације аутоматским путем се, при хоризонталној визури, CCD камерама и корелационом обрадом слике одређују одсјечци на вертикално постављеној летви/летвама. За најпрецизнија мјерења кодирана подјела чија умањена референта слика се налази у рачунарској јединици нивелира наноси се на инварску траку летве или тијело специјализованог инварског лењира.

Кодне псеудодужине мјере се корелационом обрадом модулисаних основних таласа. Фазне псеудодужине добијају се сабирањем броја цијелих таласних дужина (циклуса) и остатка циклуса након поновне аквизиције сигнала. Како је већ наглашено, прецизно ГНСС одређивање позиције, што је од посебног значаја за осматрање помјерања објеката, заснива се првенствено на фазним мјерењима псеудодужина. Из тог разлога је у овом поглављу детаљно описано моделовање и управљање грешкама фазних мјерења.

5.1.1. Моделовање грешака терестричких мјерења

Модел оцјена тачности мјерења изводе се методом компоненти дисперзија. Прво се одређује укупна грешка посматраног мјерења, а затим математичко очекивање квадрата те грешке, које представља дисперзију мјерења. Такође, користи се претпоставка да извори појединачних грешака дјелују међусобно независно, из чега слиједи међусобна независност грешака произведених тим изворима. То даље повлачи претпоставку некорелисаности тих грешака, тј. коваријације су нула. За

издвајање главних компоненти користи се принцип занемарљивости. Компоненте дисперзија се наводе по величини, од веће ка мањој а затим се дисперзија приказује као збир двије дисперзије:

$$\sigma^2 = A^2 + B^2, \quad (5.1)$$

гдје се у групу B^2 сврставају дисперзије са мањим вриједностима, тако да важи принцип занемарљивости B у односу на стандардно одступање σ при коефицијенту занемарљивости α . Тако се из релације:

$$\frac{\sigma - A}{\sigma} \leq \alpha, \quad (5.2)$$

при коефицијенту занемарљивости $\alpha = 0,05$, за остатак дисперзије B^2 добија:

$$B^2 \leq \frac{1}{9} A^2. \quad (5.3)$$

То значи да σ^2 са задовољавајућом тачношћу описујемо са A^2 , тј. релација 5.1 постаје:

$$\sigma^2 \approx A^2. \quad (5.4)$$

У групи A^2 су главне компоненте дисперзија, односно оне грешке које одређују тачност оцјене мјерене величине. Коришћењем израза 5.4 се уствари добијају формуле за претходну оцјену тачности мјерених величина из припадајућих компоненти дисперзија. Вриједности појединачних компоненти дисперзија које се користе у изразима за претходну оцјену тачности добијају се експерименталним путем из великог броја мјерења и познати су као општи подаци за појединачне изворе грешака.

У занемарљиви дио дисперзије (B^2) сврставају се оне грешке које се, методом рада, избором услова при мјерењу, условима тачности или уношењем поправака могу свести на жељено малу вриједност. Услови тачности за грешке које припадају остатку B^2 , морају се дефинисати у фази пројектовања система за перманентно геодетско осматрање примјеном принципа безначајности.

5.1.1.1. *Модел оцјена тачности мјерења роботизованим тоталним станицама*

При извођењу **модела оцјена тачности мјерења хоризонталних праваца и углова**, у теоријском смислу може се увести подјела геодетских контролних мрежа према величинама растојања D у мрежи (према дужинама визура) на:

- врло кратке дужине – од 2 m до 50 m,
- кратке дужине – од 50 m до 500 m i
- велике дужине – преко 500 m.

Претходна подјела је глобална и настала је према утицају нестабилности инструмента или сигнала на грешку мјерења правца за случај да се они мјере са геодетских стубова (најповољнији случај мјерења са становишта стабилизације тачака). С обзиром да се експериментални дио овог истраживања бави могућностима одређивања помјерања терестричким технологијама на растојањима

до 500 m, у наставку су приказани модели оцјене тачности мјерења праваца и углова за први и други случај.

Тачност оцјене мјерења праваца из два положаја дурбина, инкременталним лимбовима и динамичким поступком, окарактерисана је дисперзијом:

$$\sigma_p^2 = \frac{\rho^2}{2D^2}(\sigma_{CI}^2 + \sigma_{STI}^2) + \frac{\rho^2}{2D^2}(\sigma_{CS}^2 + \sigma_{STS}^2) + \sigma_r^2 + \frac{1}{2}(\sigma_{iv}^2 + \sigma_{vz}^2 + \sigma_{dt}^2 + \sigma_{ip}^2 + \sigma_{p,t}^2), \quad (5.5)$$

гдје су:

σ_{CI} - стандардно одступање центрисања инструмента,

σ_{STI} - стандардно одступање стабилности инструмента,

σ_{CS} - стандардно одступање центрисања сигнала,

σ_{STS} - стандардно одступање стабилности сигнала,

σ_r - стандардно одступање услјед утицаја рефракције,

σ_{iv} - стандардно одступање треперења ваздуха,

σ_{vz} - стандардно одступање визирања,

σ_{dt} - стандардно одступање детекције лимба,

σ_{ip} - стандардно одступање интерполације при детекцији лимба,

$\sigma_{p,t}$ - стандардно одступање правца изазвано температурним утицајима на дијелове теодолита.

Величина у којој се могу анализирати поједине грешке јесте дефинитивни модел оцјене угла, а то је аритметичка средина u из n гируса. Дисперзија дефинитивне вриједности угла добија се као:

$$\sigma_u^2 = 2\sigma_r^2 + \frac{1}{n}(\sigma_{iv}^2 + \sigma_{vz}^2 + \sigma_{dt}^2 + \sigma_{ip}^2 + \sigma_{u,t}^2) + \frac{\rho^2}{2}(\sigma_{CI}^2 + \sigma_{CST}^2) \left(\frac{1}{D_1^2} - \frac{2\cos\beta}{D_1D_2} + \frac{1}{D_2^2} \right) + \frac{\rho^2}{2}(\sigma_{CS}^2 + \sigma_{STS}^2) \left(\frac{1}{D_1^2} + \frac{1}{D_2^2} \right), \quad (5.6)$$

гдје су: $\sigma_{u,t}$ стандардно одступање угла изазвано температурним утицајима између гируса, D_1 величина растојања до прве визурне тачке и D_2 величина растојања до друге визурне тачке, а остале величине као у изразу 5.5.

Из претходних израза и теоријских разматрања изводи се закључак да су грешке детекције и интерполације, за инструменте са динамичким лимбовима и великим бројем читавања на дијаметрално супротним мјестима лимба, у средњој вриједности апсолутно занемарљиве. Такође, са повећањем броја гируса n , грешке визирања и треперења ваздуха се у аритметичкој средини своде на занемарљиву вриједност. То значи да укупну тачност мјерења праваца и углова опредјељују грешке које се ни на који начин не могу умањити. У ову групу спадају бочна рефракција и стабилност тачака заједно са центрисањем инструмента и сигнала.

Уз претходна разматрања, могу се дефинисати дисперзије за горње границе тачности мјерења праваца и углова:

$$\sigma_{p,0}^2 = \sigma_r^2 + \frac{\rho^2}{2D^2}(\sigma_{CI}^2 + \sigma_{STI}^2) + \frac{\rho^2}{2D^2}(\sigma_{CS}^2 + \sigma_{STS}^2), \quad (5.7)$$

$$\sigma_{u,0}^2 = 2\sigma_r^2 + \frac{1}{2}\rho^2(\sigma_{CI}^2 + \sigma_{STI}^2)\left(\frac{1}{D_1^2} - \frac{2\cos u}{D_1D_2} + \frac{1}{D_2^2}\right) + \frac{1}{2}\rho^2(\sigma_{CS}^2 + \sigma_{STS}^2)\left(\frac{1}{D_1^2} + \frac{1}{D_2^2}\right), \quad (5.8)$$

које зависе првенствено од величине растојања до визуелних тачака.

Постоји неколико **модела оцјене тачности мјерења дужина**: 1) оцјена тачности једног мјерења дужине у једном смјеру, 2) оцјена тачности средње вриједности независних мјерења са станице (више мјерења у једном смјеру) и 3) оцјена тачности средње вриједности мјерења напријед-назад. Из претходних истраживања се може закључити да се дужине при перманентном геодетском осматрању мјере у једном смјеру, па се од модела оцјене тачности користе искључиво први и други.

Примјеном грешке функције на израз 2.1 и раздвајањем доминантних компоненти дисперзија на два дијела као у изразу 2.2, дисперзија једног мјерења дужине је:

$$\sigma_D^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 D^2, \quad (5.9)$$

при чему су:

$$\sigma_1^2 = \sigma_{\varphi,\varepsilon}^2 + \sigma_{\varphi,\delta}^2 + \sigma_{\xi}^2 + \sigma_z^2 + \sigma_a^2 \text{ и} \quad (5.10)$$

$$\sigma_2^2 = \left(\frac{\sigma_v}{v}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_f}{f}\right)^2. \quad (5.11)$$

Грешка мјерења разлике фаза означена је као:

$$\sigma_{\varphi,\varepsilon}^2 + \sigma_{\varphi,\delta}^2 + \sigma_{\xi}^2 = \frac{\lambda^2}{4} \sigma_{\varphi}^2, \quad (5.12)$$

а остале компоненте дисперзије су:

σ_v - стандардно одступање брзине свијетлости у ваздуху,

σ_f - стандардно одступање фреквенције,

σ_a - укупно стандардно одступање адиционе константе,

$\sigma_{\varphi,\varepsilon}$ и $\sigma_{\varphi,\delta}$ - стандардна одступања случајних и систематских грешака мјерења фазне разлике,

σ_{ξ} - стандардно одступање читавања фазе и

σ_z - стандардно одступање заокруживања резултата мјерења.

Дисперзија средње вриједности \bar{D} из n мјерења са станице је:

$$\sigma_{\bar{D}}^2 = \bar{\sigma}_1^2 + \bar{\sigma}_2^2 D^2 \quad (5.13)$$

са:

$$\bar{\sigma}_1^{-2} = \sigma_{\varphi,\delta}^2 + \sigma_a^2 + \frac{1}{n}(\sigma_{\varphi,\varepsilon}^2 + \sigma_\xi^2 + \sigma_z^2) \text{ и} \quad (5.14)$$

$$\bar{\sigma}_2^{-2} = \left(\frac{\sigma_v}{v}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_f}{f}\right)^2. \quad (5.15)$$

Како је већ наведено, произвођачи геодетских инструмената умјесто компоненти дисперзија дају стандардну грешку мјерења дужине у облику:

$$\sigma_D = \sigma' + \sigma''D \quad (5.16)$$

при чему је $\sigma' \approx \sigma_1$ и $\sigma'' \approx \sigma_2$.

Горњу границу тачности за мјерења дужина на великим растојањима одређује тачност брзине свјетлости у ваздуху σ_v , а за врло мале дужине периодична грешка фазе $\sigma_{\varphi,\delta}$ и грешке центрисања и стабилности инструмента и сигнала, које тада не могу бити у групи B^2 . То значи да је горња граница тачности, представљена у облику стандардног одступања мјерења дужине у изразу 5.14, одређена формулом:

$$\sigma_{D,0}^2 = \underbrace{\left(\sigma_{\varphi,\delta}^2 + \frac{1}{2}(\sigma_{CI}^2 + \sigma_{CS}^2 + \sigma_{SPI}^2 + \sigma_{STS}^2)\right)}_{\sigma_{1,0}^2} + \underbrace{\left(\left(\frac{\sigma_v}{v}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_f}{f}\right)^2\right)}_{\sigma_{2,0}^2} D^2 \quad (5.17)$$

За разлику од мјерења хоризонталних праваца и углова и мјерења дужина, која се на више начина могу комбиновати за потребе 2Д позиционирања, извођење **модела за оцјену тачности мјерења зенитних одстојања или вертикалних углова** готово увијек се посматра у контексту одређивања висинских разлика тригонометријским нивелманом. У овом случају поново се појављују и узимају у обзир модели оцјена тачности мјерења дужина. За разлику од 2Д позиционирања заснованог на оцјенама мјерења хоризонталних дужина, 1Д позиционирање методом тригонометријског нивелмана заснива се на оцјенама мјерења просторних (косих) дужина.

Оцјена тачности мјерења висинских разлика тригонометријским нивелманом врши се на основу израза у које улазе све грешке прве групе (A^2), а везаних за мјерење зенитних одстојања, дужина, висине инструмента и висине сигнала. У зависности од изабраног и примијењеног модела оцјене висинске разлике између тачака A и B , постоје изрази за оцјену тачности мјерења обострано истовремено одређене висинске разлике тригонометријским нивелманом, и за једнострано одређену висинску разлику. При перманентном геодетском осматрању помјерања објеката користи се једнострано одређивање висинских разлика тригонометријским нивелманом.

Главни извор грешака у тригонометријском нивелману је вертикална рефракција. Њена вриједност мијења се током дана. У формулама за рачунање висинских разлика из зенитних одстојања и вертикалних углова користи се вриједност коефицијента рефракције 0,13 који приближно одговара тој вриједности од 10 h до 16 h. Током осталих дијелова дана, поготово ноћу, коефицијент рефракције мијења вриједност и иде преко 10, или чак има негативне вриједности. Ефекат ове грешке у висинској разлици расте са квадратом дужине стране, па се изводи закључак да се њен утицај смањује првенствено са коришћењем краћих страна при одређивању

висинских разлика тригонометријским нивелманом. Нажалост, у периоду повољних услова одређивања висинске разлике из мјерења зенитних одстојања и вертикалних углова у погледу вертикалне рефракције, доминантно је треперење ваздуха чиме се опет смањује тачност методе.

За једнострано одређене висинске разлике, оцјена тачности мјерења врши се по формули:

$$\sigma_{\Delta H}^2 = \sigma_i^2 + \sigma_{STI,V}^2 + \sigma_l^2 + \sin^2 \alpha \cdot \sigma_s^2 + \left(\frac{S}{\rho''}\right)^2 \cos^2 \alpha \cdot \sigma_Z^2 + \left(\frac{D_0^2}{2r}\right) \cdot \sigma_k^2, \quad (5.18)$$

гдје су:

σ_i - стандардно одступање висине инструмента,

$\sigma_{STI,V}$ - стандардно одступање стабилности инструмента у вертикалној равни,

σ_l - стандардно одступање висине сигнала,

α - нагнутост стране AB ,

σ_s - стандардно одступање мјерења косе дужине између тачака A и B ,

S - мјерена коса дужина између тачака A и B ,

$\sigma_Z^2 = \frac{1}{2}(\sigma_{vz}^2 + \sigma_{tv}^2 + \sigma_{Z,t}^2 + \sigma_{SET}^2)$ - дисперзија мјерења зенитног одстојања Z ,

σ_{vz} - стандардно одступање визирања,

σ_{tv} - стандардно одступање треперења ваздуха,

$\sigma_{Z,t}$ - стандардно одступање промјене вертикалне колимације услијед промјене температуре,

σ_{SET} - стандардно одступање хоризонталности индекса за читавање вертикалног лимба,

D_0 - пројекција косе дужине S на референтну површ,

r - средњи полупречник сфероида на линији AB и

σ_k - стандардно одступање вертикалне рефракције.

5.1.1.2. *Модел оцјена тачности мјерења дигиталним прецизним нивелирима*

Слично као при дефинисању модела оцјене тачности мјерења зенитних одстојања и вертикалних углова роботизованим тоталним станицама, мјерења одсјечака на летвама дигиталним прецизним нивелирима посматрају се са становишта одређивања висинских разлика геометријским нивелманом.

Оцјена тачности мјерења висинских разлика геометријским нивелманом врши се на основу израза у које улазе све грешке прве групе (A^2). Постоје два основна модела за оцјену тачности мјерења геометријским нивелманом: мјерења висинске разлике на станици и висинске разлике једне нивелманске линије (висинске разлике између

два репера). Са становишта перманентног геодетског осматрања помјерања објеката важан је израз за оцјену тачности висинске разлике на станици:

$$(\sigma_{\Delta h})^2 = \frac{1}{2n} \left[\frac{\sigma_{RM}^2}{2} + d^2 \left(\frac{2\sigma_R^2 + \sigma_O^2}{\rho^{n^2}} \right) \right] + \Delta h^2 \left[\sigma_M^2 + \gamma_P^2 \cdot (\Delta t)^2 \right] + 2\sigma_Z^2, \quad (5.19)$$

при чему се σ_O и Δt рачунају као:

$$\sigma_O^2 = \sigma_u^2 + \sigma_v^2 \quad \text{и} \quad (5.20)$$

$$\Delta t = t_M - t_E, \quad (5.21)$$

и гдје су:

σ_{RM} - стандардно одступање радне мјере (код дигиталних прецизних нивелира стандардно одступање случајне грешке подјеле летве),

σ_R - стандардно одступање случајне рефракције,

σ_O - стандардно одступање грешке читавања летве,

σ_v - стандардно одступање грешке визирања летве,

σ_u - стандардно одступање успостављања визуре компензатором,

σ_M - стандардно одступање грешке средњег метра пара летава,

σ_Z - стандардно одступање заокруживања читања,

t_M - температура при мјерењу (средња на станици или просјечна на линији нивелања),

t_E - температура при еталонирању летве,

γ_P - температурни коефицијент ширења пантљике летве,

Δh - висинска разлика на станици,

n - број мјерења (за двије серије мјерења на станици или мјерење напријед-назад за нивелманску линију број мјерења је један).

Уколико се у резултате мјерења уносе поправке за средњи метар пара летава, у изразу 5.17 се изоставља члан σ_M . Ако се приликом нивелања мјери температура и у резултате мјерења уноси поправка за промјену дужине летве услијед температурних промјена, онда израз 5.17 за оцјену тачности висинске разлике на нивелманској станици има облик:

$$(\sigma_{\Delta h})^2 = \frac{1}{2n} \left[\frac{\sigma_{RM}^2}{2} + d^2 \left(\frac{2\sigma_R^2 + \sigma_O^2}{\rho^{n^2}} \right) \right] + 2\sigma_Z^2. \quad (5.22)$$

5.1.2. Параметризација ГНСС мјерења и управљање грешкама мјерења

Кодне псеудодужине су мјера времена потребног за пренос модулисаног сигнала од сателита до пријемника, а индиректно се мјере рачунањем временског помака респика кодова псеудодужине у пријемнику и долазних кодова са сателита. Псеудодужина као мјерена величина представља геометријско растојање од фазног

центра антене емитујућег сателита до фазног центра антене пријемника оптерећену систематским ефектима. Главни систематски ефекти су грешке часовника, а посљедица су тога што сваки сателит и сваки пријемник имају властите часовнике, сваки часовник има одређену грешку генерисања фреквенције и грешку синхронизације са системским временом. Како је већ наведено у поглављу 2. псеудодужине су оптерећене и бројним другим факторима, као што су атмосферска рефракција, хардверска кашњења сигнала, итд. Сви ови ефекти се параметризују и преводе у грешке са метарским јединицама мјере, тако да једначина кодне псеудодужине има облик:

$$P_{i,f,p}^k(t_i) = \rho_i^k(t^k) + E_i^k + (dt^k(t^k) - dt_i(t_i))c + I_{i,f}^k(t_i) + T_i^k(t_i) + MP_{i,f,p}^k(t_i) + d_{f,p}^k(t_i) + d_{i,f,p}(t_i) + \varepsilon_{f,p}(t_i) \quad (5.23)$$

гдје су:

- $P_{i,f,p}^k(t_i)$ - кодне псеудодужине мјерене у тренутку пријема сигнала (t_i) , за пријемник i са сателита k на фреквенцији f . GNSS сигнали осим различитих фреквенција имају и различите типове модулације кодова, различит ниво тачности кодирања, а неки су и шифровани,
- $\rho_i^k(t^k)$ - геометријско растојање између сателита k и пријемника i у тренутку времена емитовања (t^k) ,
- E_i^k - грешка кодне псеудодужине услед грешака сателитских ефемерид,
- $dt^k(t^k)$ и $dt_i(t_i)$ - грешке часовника сателита и грешка часовника пријемника,
- $I_{i,f}^k(t_i)$ - кашњење сигнала услед јоносферске рефракције дуж путање сигнала од сателита k до пријемника i на фреквенцији f ,
- $T_i^k(t_i)$ - кашњење сигнала услед тропосферске рефракције дуж путање сигнала од сателита k до пријемника i ,
- $MP_{i,f,p}^k(t_i)$ је кашњење сигнала за кодну псеудодужину услед утицаја вишеструке рефлексije сигнала на фреквенцији f ,
- $d_{f,p}^k(t_i)$ и $d_{i,f,p}(t_i)$ су хардверска кашњења сигнала у сателиту k и пријемнику i на фреквенцији f и
- $\varepsilon_{f,p}(t_i)$ је мјерни шум кодне псеудодужине на фреквенцији f .

Геометријско растојање је функција положаја сателита (\bar{x}^k) и положаја пријемника (\bar{x}_i) , при чему је, посматрано из корисничког угла, одређивање положаја пријемника примарни циљ:

$$\rho_i^k(t^k) = \|\bar{x}^k - \bar{x}_i\| = \sqrt{(x^k - x_i)^2 + (y^k - y_i)^2 + (z^k - z_i)^2}. \quad (5.24)$$

Параметризација фазних мјерења слична је параметризацији кодних мјерења, уз разлику за предзнак јоносферске рефракције и присуство фазних неодређености. За разлику од кодних мјерења, фазна мјерења не представљају мјерење синхронизације времена часовника сателита и пријемника, већ суму мјерења дијелова фазних циклуса на почетку пријема сигнала и броја цијелих циклуса примљених након

тога. Фазно мјерена псеудодужина уз параметризацију извора грешака, изражена у јединицама циклуса, има облик:

$$\begin{aligned} \varphi_{i,f}^k(t_i) = & \frac{f_f}{c} \rho_i^k(t^k) + E_i^k + f_f(dt^k(t^k) - dt_i(t_i)) - I_{i,f,\varphi}^k(t_i) + \\ & + \frac{f_f}{c} T_i^k(t_i) + N_{i,f}^k + MP_{i,f,\varphi}^k(t_i) + d_{f,\varphi}^k(t_i) + d_{i,f,\varphi}(t_i) + \varepsilon_{f,\varphi}(t_i) \end{aligned} \quad (5.25)$$

гдје је:

- $\varphi_{i,f}^k(t_i)$ - фазно мјерење у тренутку пријема сигнала (t_i) , за пријемник i са сателита k на фреквенцији f .
- $\rho_i^k(t^k)$ - као и код кодних псеудодужина, геометријско растојање између сателита k и пријемника i у тренутку времена емитовања (t^k) ,
- $dt^k(t^k)$ и $dt_i(t_i)$ - грешке часовника сателита и грешка часовника пријемника,
- $I_{i,f,\varphi}^k(t_i)$ - промјена фазе услијед акумулиране јоносферске рефракције дуж путање сигнала од сателита k до пријемника i на фреквенцији f . Ова вриједност је иста као и за кодну псеудодужину на истој фреквенцији, али је супротног предзнака,
- $T_i^k(t_i)$ - кашњење сигнала услијед акумулиране тропосферске рефракције дуж путање сигнала од сателита k до пријемника i ,
- $N_{i,f}^k$ - цјелобројна неодређеност на фреквенцији f . Овај термин представља број непознатих фазних циклуса из прве епохе мјерења и стога је константан. У случају да пријемник престане да прати сигнал, каже се да је дошло до фазног скока (енг. *cycle slip*), а поново затражен сигнал ће имати нову цјелобројну неодређеност,
- $MP_{i,f,\varphi}^k(t_i)$ је кашњење сигнала за фазну псеудодужину услијед утицаја вишеструке рефлексije сигнала на фреквенцији f ,
- $d_{f,\varphi}^k(t_i)$ и $d_{i,f,\varphi}(t_i)$ су хардверска кашњења сигнала у сателиту k и пријемнику i на фреквенцији f и
- $\varepsilon_{f,\varphi}(t_i)$ је мјерни шум фазне псеудодужине на фреквенцији f .

Једначина 5.25 може се претворити у метарске јединице, при чему има облик:

$$\begin{aligned} \Phi_{i,f}^k(t_i) = & \rho_i^k(t^k) + E_i^k + (dt^k(t^k) - dt_i(t_i))c - I_{i,f,\Phi}^k(t_i) + T_i^k(t_i) + \\ & + \lambda_f N_{i,f}^k + MP_{i,f,\Phi}^k(t_i) + d_{f,\Phi}^k(t_i) + d_{i,f,\Phi}(t_i) + \varepsilon_{f,\Phi}(t_i). \end{aligned} \quad (5.26)$$

Како је већ напоменуто, главна разлика између кодних и фазних мјерења је што су кодна мјерења стварна мјера растојања са тачношћу од неколико дециметара, а фазна мјерења су неодређена мјера растојања са тачношћу од неколико милиметара. Из претходне параметризације може се закључити да јоносферска рефракција погађа кодна и фазна мјерења са истом амплитудом, али супротивним предзнаком. Кашњења сигнала услијед вишеструке рефлексije и хардверских несавршености

сателита и пријемника су за фазна мјерења, као и шум мјерења, неколико пута мања од оних у упоредивим кодним мјерењима.

Управљање грешкама ГНСС мјерења, детаљно описаним у поглављу 2, заснива се на једној или комбинацији сљедећих опција: а) елиминација, б) моделовање, ц) оцјена или д) занемаривање. Грешке ГНСС мјерења се у доброј мјери смањују примјеном методе релативног позиционирања, што је у класификацији метода ГНСС позиционирања сврстава у прецизне. Код ове методе се примјењује неколико опција којима се елиминишу грешке мјерења. Грешке часовника сателита и пријемника, као и велики дио хардверских кашњења сигнала, елиминише се формирањем двоструких разлика. Грешке сателитских орбита, антена сателита и пријемника и одређена кашњења сигнала у сателиту елиминишу се примјеном двоструких разлика и/или моделовањем на основу екстерних оцјена изведених из ГНСС мјерења. Релативистички ефекти се моделују. Када је неопходно, као што је случај за дуге базне линије, моделује се ефекат увијања сигнала и помјерања станице на којој се налази ГНСС пријемник. Јоносферска рефракција углавном се елиминише кроз обраду мјерења на више фреквенција. За рјешавање фазних неодређености, обично се врши оцјена. Тропосферска рефракција може бити моделована у ограниченом обиму, а за преостали дио грешке врши се оцјена. Утицај вишеструке рефлексије и мјерног шума најчешће се групишу у укупни шум мјерења и смањују се кроз технике оптималне оцјене.

Из анализе извора грешака може се закључити да се због просторно-временске природе предиктованих орбита и грешака које потичу од утицаја јоносфере и тропосфере, релативним позиционирањем на кратким базним линијама ове доминантне грешке ефикасно елиминишу. Са продужавањем базне линије њихов ефекат се увећава. Имајући то у виду, изводи се закључак да се релативно позиционирање на кратким базним линијама издваја [150] као метода погодна за осматрање помјерања објеката. У поменутом истраживању доказано је да за просјечне атмосферске услове и међустанична растојања до 10 km, функционални модел садржи само координате и фазне неодређености као непознате параметре, а само повремено је потребно увођење додатног зенитног тропосферског параметра по станичном пару.

Релативно ГНСС позиционирање уопште заснива се на скупу линеарних комбинација кодних или фазних мјерења псеудодужина, познатим и као једноструке, двоструке и троструке разлике. Једноструке разлике фазних мјерења између два пријемника (A и B) и сателита j математички се могу представити једначином:

$$\begin{aligned} \Phi_{B,f}^j(t) - \Phi_{A,f}^j(t) = \Phi_{AB,f}^j(t) = \rho_{AB}^j(t) + cdt_{AB}(t) - I_{AB,f,\Phi}^j(t) + T_{AB}^j(t) + \\ + \lambda_f N_{AB,f}^j + MP_{AB,f,\Phi}^j(t) + d_{AB,f,\Phi}(t) + \varepsilon_{AB,f,\Phi}^j(t) \end{aligned} \quad (5.27)$$

Може се закључити да је грешка часовника сателита као и грешка сателитске опреме елиминисана. За кратке базне линије, атмосферски ефекти су мали, а грешка мјерења се моделује сагласно закону о преносу грешака.

Двоструке разлике између два пријемника (A и B) и два сателита (j и k) математички се представљају као:

$$\begin{aligned} \Phi_{B,f}^k(t) - \Phi_{A,f}^j(t) = \Phi_{AB,f}^{jk}(t) = \rho_{AB}^{jk}(t) - I_{AB,f,\Phi}^{jk}(t) + T_{AB}^{jk}(t) + \\ + \lambda_f N_{AB,f}^{jk} + MP_{AB,f,\Phi}^{jk}(t) + \varepsilon_{AB,f,\Phi}^{jk}(t) \end{aligned} \quad (5.28)$$

У овом случају грешке сателитског поријекла су елиминисане, а за кратке базне линије грешке услед атмосферског утицаја су смањене. Међутим, грешка мјерења се додатно повећава. Кључни елемент који се оцјењује на основу овог модела је релативни (базни) вектор између пријемника A и B . Треба имати на уму да се због разлика у методама модулације сигнала између ГЛОНАСС-а и других система користи мало другачија формулација у процесу формирања двоструких разлика за сигнале са сателита овог система [273][144].

Релативно ГНСС позиционирање засновано на двоструким разликама је својеврсан научни и индустријски стандард за прецизно позиционирање. На основу једначине 5.28 оцјењује се вектор релативног положаја између референтног и корисничког (покретног) пријемника, заједно са преосталим утицајима јоносферске и тропосферске рефракције и фазним неодређеностима двоструке разлике. Фазне неодређености непожељне су информације у функционалном моделу ГНСС мјерења. Уз њихово присуство, функционални модели релативног статичког и кинематичког позиционирања садрже дефекте, који се уклањају увођењем додатних ограничења.

Коначне разлике, које се при релативном позиционирању формирају као стратегија контроле квалитета, су троструке разлике. Ако се двоструке разлике посматрају у двије сусједне епохе, разлика ове двије сложене разлике назива се троструком разликом или двоструком разликом између епоха. Трострука разлика фазних мјерења између пријемника A и B и сателита j и k , између епоха t_1 и t_2 , представљена је једначином:

$$\begin{aligned} \Phi_{AB,f}^{jk}(t_2) - \Phi_{AB,f}^{jk}(t_1) = \Phi_{AB,f}^{jk}(t_{12}) = \rho_{AB}^{jk}(t_{12}) - I_{AB,f,\Phi}^{jk}(t_{12}) + T_{AB}^{jk}(t_{12}) + \\ + MP_{AB,f,\Phi}^{jk}(t_{12}) + \varepsilon_{AB,f,\Phi}^{jk}(t_{12}) \end{aligned} \quad (5.29)$$

Ова формулација захтијева да нема прекида праћења ни једног од пријемнику електронски доступних сигнала. Ако је тај захтјев испуњен, елиминишу се цијелобројне неодређености двоструких разлика, чиме престаје потреба за њиховом оцјеном. Међутим, резултујуће мјерење има већи шум, који ограничава могућност коришћења троструких разлика у прецизном релативном позиционирању.

Функционални модел релативног позиционирања заснован на разликама прати прилично компликовано стохастичко моделовање. Формирање разлика омогућава елиминацију различитих извора грешака обухваћених функционалним моделом, али преостале грешке мјерења се преносе и увећавају, а моделују се према закону о преносу грешака.

Значајна математичка корелација која се такође треба узети у обзир при оцјени коначног рјешења, произилази из формирања разлика. Хофман [273] наводи да је за фазна мјерења, примјеном закона о преносу грешака, коваријанса двоструке разлике фазних мјерења за необрађена, независна фазна мјерења са варијансом σ^2 :

$$\mathbf{C} = \sigma^2 \mathbf{A} \cdot \mathbf{A}^T = 2\sigma^2 \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix}. \quad (5.30)$$

Када се закон о преносу грешака примјени на фреквенцијске комбинације, уз претпоставку да фазна мјерења на свим фреквенцијама имају исту варијансу, добија се:

$$\sigma_{fk}^2 = \sigma^2 a^2 + \sigma^2 b^2 = \sigma^2 \cdot t^2. \quad (5.31)$$

Фактор t зависи од типа фреквенцијске комбинације и представља однос варијанси изабране фреквенцијске комбинације и варијансе фазних мјерења. Вриједност фактора t за двије најчешће коришћене фреквенцијске комбинације у прецизном ГНСС позиционирању су 6,38 за фреквенцијску комбинацију за повећање таласне дужине (wl) и 3,33 за фреквенцијску комбинацију ослобођену утицаја јоносфере (if).

Поред математичке корелације, кодна и фазна мјерења имају различите, односно релативне тежине. C/A на L1 сигнал може се мјерити са тачношћу од неколико дециметара у окружењима са малим присуством вишеструке рефлексије, а одговарајућа фазна мјерења са тачношћу од неколико милиметара. Пошто је $\sigma_{C/A} \cong 100 \sigma_{\phi}$, то значи да ако се кодна мјерења користе заједно са фазним, на основу њих се могу добити само приближни почетни положаји и оцјене плутајућих фазних неодређености, након чега ће се вршити прецизно позиционирање засновано на фазним мјерењима. Коначно, квалитет долазних сателитских сигнала са нижих елевационих углова у односу на кориснички пријемник је смањен због већег утицаја јоносфере и тропосфере, мање могућности појачања таквих сигнала у антени, итд. Због тога се при обради података мјерења, примјењују филтери елевационог угла или тежинска шема односа сигнал-шум за сва мјерења. Формирање тежина за елевационе углове углавном се врши у облику експоненцијалне функције која даје пуну тежину мјерењима из правца зенита и опада са опадањем елевационог угла. Својеврстан стандард је да се за елевациону маску (или граничну вриједност) постављају вриједности углова од 5° до 15° изнад хоризонта, како би се у потпуности уклонила мјерења са сателита на ниским елевационим угловима. Општи закључак је да се појединачна ГНСС мјерења под различитим вертикалним угловима α у односу на хоризонт, међусобно разликују у стохастичком смислу. Ако се повећава вертикални угао под којим се мјери псеудодужина, односно ако се смањује зенитно одстојање сателита са ког се примају сигнали у односу на положај пријемника, повећава се тачност псеудодужине. Варијанса фазних и кодних мјерења има облик:

$$\sigma^2 = \sigma_A^2 + \sigma_M^2 + \sigma_\varepsilon^2 \quad (5.32)$$

у којој је σ_A^2 варијанса мјерења псеудодужине због случајних резидуалних атмосферских варијација, σ_M^2 варијанса због случајног утицаја вишеструке рефлексије, а σ_ε^2 варијанса због случајних грешака праћења сигнала. Варијанса мјерења псеудодужина се при формирању стохастичког модела може посматрати као функција параметра p који може бити зенитно одстојање сателита или однос сигнала и шума (*енг. Signal-Noise Ratio – SNR*). Најчешћи модели варијансе мјерења у функцији висине сателита над хоризонтом α су:

$$\sigma^2(\alpha) = c_1 + c_2 e^{-\alpha/c_3}, \quad (5.33)$$

$$\sigma^2(\alpha) = c_4 / \sin \alpha, \quad (5.34)$$

$$\sigma^2(\alpha) = c_5 / \sin^2 \alpha, \quad (5.35)$$

при чему c_i означавају међусобно независне константе које се могу одређивати експерименталним путем. Главни разлог коришћења ових функција је обухватање грешака мјерења према сателитима који су ближи хоризонту. С обзиром да је квалитет сигнала приближно уједначен за сателите чије је висина већа од неке граничне вриједности α_0 , умјесто непрекидне може се користити степ функција:

$$\sigma^2(\alpha) = \begin{cases} \sigma^2 & \alpha > \alpha_0 \\ \sigma^2(\alpha) & \alpha < \alpha_0 \end{cases} \quad (5.36)$$

Општи облик модела варијансе мјерења у функцији SNR гласи:

$$\sigma^2(SNR) = c_6 / SNR \text{ или,} \quad (5.37)$$

$$\sigma^2(SNR) = c_7 + c_8 10^{\frac{SNR}{10}}. \quad (5.38)$$

Предност коришћења модела заснованих на SRN огледа се у могућности коришћења реалних показатеља квалитета актуелних мјерења, јер већина савремених пријемника може регистровати вриједност односа сигнала и шума.

Кроз истраживања је утврђено и да мјерења псеудодужина истим пријемником до истог сателита нису независна током времена. Степен физичке корелације је већи што су мјерења временски мање раздвојена. Модел коефицијената корелације ρ у функцији временске разлике мјерења τ има облик:

$$r(t_i, t_i + \tau) = r(\tau) = e^{-\frac{\tau}{T}}, \quad (5.39)$$

гдје је T корелационо вријеме, са најчешћом вриједношћу између 250 s и 350 s. Пошто је интервал регистрације података при ГНСС мјерењима константан и износи τ_0 , коефицијент корелације између мјерења која су временски раздвојена за $k\tau_0$, при чему је k цијели број рачуна се као:

$$r(k\tau_0) = e^{-\frac{k\tau_0}{T}} = r(\tau_0)^k \quad (5.40)$$

Главни узрок корелације псеудодужина је временска корелација резидуалних атмосферских утицаја, који након елиминације укупног ефекта још увијек у одређеној мјери посједују систематски ефекат. Слично важи и за псеудодужине мјерене истим пријемником ка различитим сателитима и псеудодужине мјерене са више пријемника као једном или више сателита.

5.1.3. Одређивање тачности геодетских мјерних система према ISO стандардима

Одређивање вриједности појединачних компоненти дисперзија мјерења за савремене геодетске мјерне системе је сложен процес, а врши се у специјализованим лабораторијама што га чини скупим. Због ограниченог времена и средстава, оцјена несигурности мјерења појединих величина геодетским мјерним системима врши се на основу других извора. Најчешће је то на основу података испитивања (еталонирања) инструмената и опреме, које се врши према ISO стандардима.

Постоје ISO стандарди за различите области геодезије, а серијом ISO 17 123 стандарда дефинисани су поступци за испитивање и одређивање тачности геодетских инструмената. Серија ISO 17 123 са насловом „Оптика и оптички

инструменти – поступци за тестирање геодетских и осматрачких инструмената“, (званично преведеним из верзије на енглеском језику *Optics and optical instruments – Field procedures for testing geodetic and surveying instruments*) састоји се од неколико дијелова, од којих су у смислу овог истраживања важни: 17 123 – 2 за дигиталне прецизне нивелире; 17 123 – 3, 17 123 – 4 и 17 123 – 5 за роботизоване тоталне станице; и 17 123 – 8 за ГНСС пријемнике којима се врши позиционирање RTK методом. Процедуре и тестови дефинисани овим стандардима првенствено су намењени теренској провјери подобности одређеног инструмента за очекивану примјену и провјери испуњености захтјева дефинисаних другим стандардима или конкретним пројектним условима. То значи да процедуре и тестови нису предложени за оцјене појединачних могућности компоненти мјерних система који су много комплексније природе.

У уводном дијелу ове серије стандарда, означеном као ISO 17 123 – 1 [274], наглашено је да су стандарди развијени за мјерења у теренским условима. То значи да се резултати испитивања добијају под реалним теренским утицајима (посебно реалним атмосферским утицајима) у тренутку прикупљања података. Препоручени оптимални услови за спровођење испитивања су облачно небо и мала брзина вјетра. Међутим, за потребе утврђивања тачности геодетских инструмената који се користе за високо прецизна мјерења, препоручује се да услови приликом испитивања одговарају оним условима који се очекују при реализацији мјерења (нпр. предвиђених пројектом геодетског осматрања). У току обраде података и одређивања тачности, стање метеоролошких услова обавезно се узима у обзир. Они се заједно са теренским условима у којима је спроведено испитивање наводе у званичном извјештају о извршеном испитивању (увјерење о испитивању и еталонирању). Сви стандарди из наведене серије предвиђају два начина испитивања геодетских мјерних система: поједностављене процедуре (*simplified test procedure*) и потпуне процедуре (*full test procedure*). Врсте и значења процедура, обрада резултата мјерења, оцјена тачности мјерења и статистичка тестирања, начелно су исти у свим стандардима. Наравно, поступци мјерења су прилагођен врсти мјерног инструмента и мјерној величини. Прије почетка испитивања, мјерни инструменти и прибор морају бити подешени и ректификовани према званичним упутствима и приручницима произвођача опреме. Такође, мјерни инструменти се морају користити у комбинацији са оригиналним стативима и пратећом опремом декларисаном од стране произвођача. По поједностављеним процедурама се провјерава да ли је тачност одређених мјерних инструмента у очекиваним интервалима, како је дефинисано стандардом ISO 4463 – 1 [275]. За референтну вриједност у односу на коју се провјерава добијени резултат, најчешће се усваја вриједност дефинисана од стране произвођача. Испитивање по поједностављеним процедурама базирано је на ограниченом броју мјерења, па су по њима одређене разлике и одступања мање поузданости. За високо прецизна мјерења и радове са високим захтјевима тачности, предлаже се коришћење потпуних процедура испитивања. Код потпуних процедура проводе се и статистички тестови којима се одговара на питања: 1) да ли су израчуната емпиријска стандардна одступања мања од вриједности декларисаних од стране произвођача или од неке друге, унапријед задане вриједности и 2) да ли су два стандардна одступања одређена истим инструментом за два различита статистички једнака, под условом да су одређени са

истим бројем степени слободe. Може се закључити да су циљеви спровођења потпуне процедуре испитивања:

- одређивање тачности инструмената која се може остварити са оригиналном пратећом опремом и једном теренском екипом у датим условима,
- одређивање тачности и њене промјене за један исти инструмент током времена и
- одређивање тачности неколико инструмената и међусобно поређење добијених стандардних одступања у сличним теренским условима.

Потпуне дефиниције, терминологија и ознаке које се користе у наведеним стандардима могу се пронаћи у [274]. Такође, у овом документу су дефинисане процедуре и методе оцјене мјерне несигурности и статистичка тестирања, као и интерпретација и физичка значења добијених вриједности.

ISO 17 123 – 2 стандард описује процедуре које се спроводе на терену како би се провјерила или утврдила тачност дигиталног прецизног нивелира [276]. Стандард предвиђа да се приликом испитивања, користе стативи и летве препоручени од произвођача опреме. Процедуре су развијене тако да атмосферски утицаји буду минимизирани, што је обухваћено и приједлогом образовања тестних поља. Прије извођења мјерења инструмент и прибор се морају аклиматизовати. Такође, посебна пажња се мора посветити фиксирању нивелманских летава током мјерења. Поједностављена процедура намјењена је провјери тачности одређивања висинских разлика по методи детаљног нивелмана, првенствено оптичким нивелирима, тј. за случајеве одређивања висинских разлика када су дужине визура различите. Висинска разлика одређена са неједнаким дужинама визура се пореди са познатом или прецизно одређеном висинском разликом са једнаким дужинама визура. Тестно поље се бира тако да утицај рефракције на њему буде што је могуће мањи. Изводе се два сета мјерења висинских разлика: први сет се изводи из средине, а други с краја. По потпуној процедури се одређује највећа могућа тачност нивелира и пратеће опреме у теренским условима. Процедура је намјењена оцјени тачности одређивања висинских разлика са једнаким дужинама визура. Препорука је да дужине визура буду око 30 m, и да разлика између њих не буде већа од 10%. Дужине визура могу бити и оне које се очекују у конкретном пројекту. Тесто поље се бира тако да утицај рефракције на њему буде што је могуће мањи. Подлога треба бити компактна, а терен једноликог нагиба. Треба избјегавати асфалтиране и бетонске подлоге, а инструмент мора бити заштићен од директног сунчевог утицаја. Изводе се два сета мјерења. По потпуној процедури одређује се емпиријско стандардно одступање нивелања напријед-назад на 1 km удаљености, чија се сагласност са декларисаном вриједношћу статистички тестира. Као и дужине визура и линије нивелања могу бити изабране у складу са условима који се очекују према конкретном пројекту у којем ће опрема која се испитује бити коришћена. Примјеном потпуне процедуре одређује се и тестира и евентуално непоклапање адicione константи летава, за које се очекује да су нула. Сви детаљи о образовању тестних поља, спровођењу мјерења и поступцима рачунања, могу се прочитати у [276].

Најважнији стандарди који се користе за тестирање и одређивање тачности тоталних станица су ISO 17 123 – 3, 4 и 5. ISO 17 123 – 3 стандард даје смјернице за провјеру и одређивање тачности теодолита (самосталног или интегрисаног у

тоталну станицу) и пратеће опреме [277]. Тачност теодолита одређена по овом стандарду односи се на стандардна одступања хоризонталног правца (H_z) и вертикалног угла/зенитног одстојања (V/Z) мјерених у једном гирусу. Конфигурација тестног поља за испитивање и одређивање тачности мјерења хоризонталних праваца је иста за обије процедуре. На терену се постављају фиксне визурне тачке (4 у случају поједностављене процедуре и 5 у случају потпуне процедуре), и то тако да се налазе у приближно истој хоризонталној равни као инструмент, те да су што је више могуће равномерно распоређене по хоризонту. Пожељно је да су на удаљеностима од 100 m до 250 m од инструмента. За поједностављени приступ испитивања изводи се једна серија мјерења, а за потпуни четири серије у различитим, али не екстремним условима. Код одређивања емпиријског стандардног одступања за вертикалне углове, инструмент се поставља на удаљености око 50 m од високе зграде. На згради се одаберу добро дефинисане тачке (дијелови прозора, ивице блокова, дијелови антена, итд.) или се постављају маркице на зид, тако да затварају вертикални угао од приближно 30° . За поједностављену процедуру се мјере вертикални углови у једној серији, три гируса на четири тачке. За потпуну процедуру се мјере вертикални углови у четири серије, три гируса на четири тачке. Поједностављена процедура је намјењена за инструменте којима се изводе стандардна мјерења. Уколико се ради о прецизним мјерењима, испитивање се мора изводити по потпуној процедури. Код примјене потпуне процедуре спроводе се и статистички тестови којима се поред провјере два основна питања, провјерава да ли је грешка вертикалног индекса једнака нули. Сви детаљи о образовању тестних поља, спровођењу мјерења и поступцима рачунања, могу се прочитати у [277].

Тачност ЕОД се испитује према ISO 17 123 - 4 [278]. Изражава се стандардним одступањем мјерене дужине. За вријеме испитивања на терену, по обије процедуре, мјере се и атмосферски параметри за корекције које се спроводе при обради тестних мјерења. При образовању тестног поља треба узети у обзир и врсту подлоге преко које ће се мјерити дужине, а она би требала одговарати оној на којој се очекује мјерење у конкретном пројекту. Код спровођења испитивања по овом стандарду највећи изазов представљају варијације у атмосферским условима, јер их је тешко прилагодити оним условима који се очекују у тренутку пројектних мјерења. Поједностављена процедура испитивања захтијева постојеће познате дужине на тестном пољу, или дужине одређене помоћу ЕОД високе тачности. Пожељно је да су тачке на тестном пољу стабилизowane као геодетски стубови. Међутим, ако то није могуће онда се може извршити стабилизација класичних геодетских биљега. Тестно поље се састоји од 5 тачака, а удаљеност између њих треба да је унутар радног опсега ЕОД. Свака дужина на тестном пољу мјери се три пута. Средње вриједности ових мјерења, поправљене за утицај температуре и притиска, сматрају се референтним величинама. За провјеру адиционе константе по поједноствањеној процедури, успоставља се привремена база (дужине око 50 m). Она се састоји од минимално три тачке које треба да припадају истом правцу и да леже у приближно истој хоризонталној равни. За ово испитивање се користе стативи и опрема за присилно центрисање. За прецизно испитивање даљиномјера потребно је спровести потпуни поступак. На тај начин могуће је одредити стандардно одступање мјерења дужине као и адициону константу. Потпуна процедура се заснива на мјерењу дужина у свим комбинацијама на бази, а да при томе дужине између базних тачака нису унапријед

познате. Емпиријско стандардно одступање појединачног мјерења дужине оцјењује се изравнањем дужина, мјерених у свим комбинацијама, по методи најмањих квадрата. Овим поступком се не може открити грешка размјере ЕОД. Међутим, грешка размјере нема никаквог значаја ни утицаја на стандардно одступање и адициону корекцију. Како би се одредила стабилност размјере мјерног инструмента, фреквенција мјерења се треба провјерити у лабораторији. База за испитивање по потпуној процедури треба бити дуга од 300 m до 600 m (по потреби може бити и дужа). Састоји се од 7 тачака које припадају истом правцу, а успоставља се на равном или благо нагнутом терену. Може се успоставити на два начина: 1) као база са 21 различитом дужином или 2) као база на којој се испитује и периодична грешка инструмента. Најчешће се користи први приступ. Мјерења 21 дужине се поправљају за атмосферске параметре, а изводе се када је видљивост добра и када није превелика осунчаност. Измјерене косе дужине се свде у раван локалног хоризонта. При извођењу потпуне процедуре спроводе се три статистичка теста којима се поред два редовна теста провјерава и да ли је адициона корекција једнака нули, како је декларисано од произвођача или некој познатој вриједности. Сви детаљи о образовању тестних поља, спровођењу мјерења и поступцима рачунања, могу се прочитати у [278].

Стандард ISO 17 123 – 5 дефинише теренске поступке испитивања тоталних станица који се требају примијенити када се провјерава и одређује тачност позиционирања у конкретним теренским условима [279]. И у овом случају су теренски поступци дефинисани тако да се на што једноставнији начин испита и одреди тачност 3Д позиционирања овим инструментом. Прије самог почетка испитивања потребно је осигурати исправност опреме (инструмент, призме, стативи, постоља) која ће се користити приликом мјерења. Тачност опреме као и начин испитивања су дати у проспектима произвођача. Такође, прије почетка мјерења, ако је потребно, врши се ректификација опреме према упутствима произвођача. У тренутку извођења теренских мјерења, треба користити стативе и призме који се препоручују од произвођача инструмента и који су ректификовани. Мјерења која се кроз испитивање прикупљају су заправо координате (x , y , z) у локалном координатном систему. Инструмент мора бити пажљиво хоризонтисан и центрисан, а приликом мјерења у обзир се узима и адициона константа. Резултати испитивања су под значајним утицајем атмосферских услова, посебно температурног градијента. Из тог разлога се приликом извођења геодетских мјерења, мјере се и атмосферски параметри како би се одредио њихов утицај, првенствено, на мјерене дужине. За аутоматско позиционирање у поступку испитивања може се користити софтвер у рачунарској јединици станице или самостални софтвер, али је препорука да се користи онај који ће се употребљавати за реализацију конкретних мјерења. Као и код осталих испитивања, и овдје се могу користити двије процедуре. Поједностављеном процедуром испитивања, која се заснива на малом броју мјерења координата, рачунају се и упоређују разлике појединачних и средњих вриједности за сваку координату. Поједностављеном процедуром није могуће добити стандардно одступање, већ само провјерити да ли су разлике хоризонталне и вертикалне позиције у границама дозвољених одступања, према ISO 4463 – 1. Потпуна процедура испитивања је дизајнирана тако да се емпиријска стандардна одступања координата одређују методом најмањих квадрата и представљају стварну мјеру тачности. Потпуна процедура испитивања се спроводи да би се:

- одредила тачност позиционирања тоталном станицом и пратећим прибором за мјерење (стативи, призме),
- одредиле промјене тачности позиционирања овим инструментом у дужим временским раздобљима и
- одредила тачност позиционирања са неколико тоталних станица и међусобно упоредили резултати добијени у сличним теренским условима.

Као и у претходним случајевима примјене потпуних процедура испитивања, и овдје проводе статистички тестови, и то да би се одредило: 1) да ли су добијена емпиријска стандардна одступања по координатним осама мања од одговарајућих стандардних одступања декларисаних од произвођача или мањи од неке друге предодређене вриједности и 2) да ли су два емпиријска стандардна одступања по координатним осама одређена у двије независне сесије и са истим бројем степени слободе, статистички једнаки. Сви детаљи о образовању тестних поља, спровођењу мјерења и поступцима рачунања, могу се прочитати у [279].

Стандард ISO 17 123 – 8 описује теренске процедуре којих се треба придржавати приликом провјере и одређивања тачности ГНСС мјерног система при кинематичком позиционирању у реалном времену (RTK) [280]. Стандард који је донесен 2007. године односи се на тада оперативне ГНСС, GPS и ГЛОНАСС, али и на сателитске системе чије услуге су данас већ доступне. По овом стандарду се испитују ГНСС пријемници и пратећа опрема која се користи за потребе геодетских мјерења у премјеру, инжењерској геодезији и индустрији. Тачност одређена по овом стандарду односи се на стандардна одступања хоризонталног и вертикалног положаја одређених RTK позиционирањем по систему база-ровер и NRTK позиционирањем. Базни и покретни пријемник се повезују бежичним путем. Ровер у реалном времену одређује просторне геоцентричне правоугле праволинијске координате, које се за практична рачунања трансформишу у хоризонталне правоугле праволинијске координате и елипсоидне висине. Управо ове координате се у даљем тестирању третирају као мјерене величине. Испитивање се обично примјењује на сет пријемника и антена наведених у референтном приручнику произвођача, а исправност њиховог рада према упутству се провјерава прије почетка испитивања. У случају коришћења NRTK, мора се обезбиједити конзистентност модела антена на референтним станицама (нпр. параметри за корекцију антене). Оператер треба слиједити смјернице према оригиналним упутствима произвођача за критеријуме који обезбијеђују прецизно и поуздано позиционирање као што су: минималан број сателита, максимална вриједност PDOP фактора, минимално вријеме мјерења и евентуалне друге потребне предуслове. Подаци се прикупљају након што се изврши поудана иницијализација и добије фиксно ријешење цијелобројних неодређености. Резултати тестирања у непосредној су вези са факторима који утичу на тачност позиционирања, као што су: конфигурација сателита видљивих са локације, јоносферски и тропосферски утицаји, присуство вишеструке рефлексije у близини тачке, прецизност опреме, квалитет софтвера који се користи у пријемнику за позиционирање или у систему за генерисање корекција и података са базне тачке. Испитивањем према овом стандарду се настоје узети у обзир сви ови параметри. Тестно поље се састоји од једне базне и двије ровере тачке, за које је пожељно да су близу локације на којој ће се изводити конкретна мјерења. Хоризонталне дужине и висинске разлике између ових тачака се у почетном кораку одређују за тачношћу

бољом од тачности RTK позиционирања, и служе као номиналне вриједности за детектовање грубих грешака у резултатима мјерења. Поједностављени поступак испитивања састоји се од једне серије мјерења и не подразумејева статистичке оцјене. Потпуни поступак чине три серије мјерења, а обухвата оцјену стандардних одступања и статистичка тестирања. Једна серија мјерења траје око 25 min чиме је обухваћен период промјене утицаја вишеструке рефлексije (траје око 20 min). Серије мјерења су размакнуте за по најмање 90 min, како би се одредио утицај промјене сателитске конфигурације и промјена услова у јоносфери и тропосфери. Стандардна одступања срачуната из оваквих мјерења представљају квантитативну мјеру тачности позиционирања одређену под утицајем већине доминантних фактора који одређују тачност сателитског позиционирања. Сви детаљи о образовању тестних поља, спровођењу мјерења и поступцима рачунања, могу се прочитати у [280].

Званични подаци испитивања и одређивања тачности мјерних система, прецизније речено мјерне несигурности, утврђене кроз описане поступке, корисницима су доступни путем спецификација и приручника мјерне опреме публикованим од стране произвођача или у облику званичних увјерења која издају овлашћене лабораторије за испитивање и еталонирање [69], [281]. Према наведеним стандардима корисници мјерних система могу и самостално спровести поступак испитивања у конкретним теренским условима у којима ће се изводити мјерења у оквиру пројекта (нпр. пројекат геодетског осматрања). Наравно, да би се подаци о мјерној несигурности правилно одредили потребно је опште знање о изворима грешака и искуство које се стиче праксом.

Мјерна несигурност се може утврђивати и према другим стандардима, као што су: DIN (њем. *Deutsches Institut für Normung e. V.*) стандарди њемачког националног завода за стандардизацију, ГОСТ (рус. *Государственный стандарт*) стандарди Евроазијског савјета за стандардизацију, метрологију и сертификацију, BS (енг. *British Standards*) стандарди Британске институције за стандарде, ASME (енг. *The American Society of Mechanical Engineers*) амерички стандарди за испитивање одређених геодетских инструмената и у посљедње вријеме VDI стандарди Асоцијације њемачких инжењера. У практичном смислу, готово је свеједно по којем стандарду ће домаће или стране организације (лабораторије) вршити испитивање и еталонирање неког мјерног инструмента јер су сви стандарди међусобно усклађени, а такође сви су усклађени према ISO стандардима .

5.2. ОБРАДА И АНАЛИЗА МЈЕРЕЊА СИСТЕМИМА ЗА ГЕОДЕТСКО ОСМАТРАЊЕ ПОМЈЕРАЊА ОБЈЕКТА

Хоризонтални правци и углови, се у принципу, мјере гирусном методом. Међутим, при перманентном геодетском осматрању помјерања објеката мјерења се у зависности од периода узорковања могу изводити и само у једном положају дурбина. Имајући у виду да се хоризонтални угао добија као разлика вертикалних пројекција два визурна правца у хоризонталној равни (хоризонтални правци), они се користе за 2Д позиционирање.

Дужине мјерене у геодетским контролним мрежама дефинишу њихову размјеру. Такође, ако је мјерен већи број дужина, односно ако су геодетске контролне мреже реализоване са мјереним дужинама, онда се на основу њих обезбјеђују и релативни

2Д геометријски односи између тачака мреже. Такође, мјерења просторних дужина се користе и за 1Д позиционирање по методи тригонометријског нивелмана.

Зенитна одстојања и вертикални углови такође се мјере гирусном методом. Међутим, слично као и за хоризонталне правце, мјерења се могу изводити само у једном положају дурбина. Мјерења ових величина користе се искључиво за 1Д позиционирање по методи тригонометријског нивелмана.

Из разлике регистрованих одсјечака на вертикално постављеним летвама, методом геометријског нивелмана добијамо вриједности релативних висинских разлика између двију блиских тачака изнад којих су постављене летве. Релативне висинске разлике су основа 1Д позиционирања. Ако су одсјечци регистровани на једној истој летви, што је случај при перманентном осматрању вертикалних помјерања објеката, онда разлика два читања непосредно представља промјену релативне висине тачке изнад које је летва постављена.

Развој методе прецизног релативног ГНСС позиционирања је ову технологију учинио примјенљивом за осматрање помјерања објеката уопште. Централно мјесто у обради и анализи мјерења при релативном позиционирању припада рјешавању фазних неодређености. Развој алгоритама за брзо одређивање цијелог броја таласних дужина, био је кључни предуслов за развој RTK и NRTK метода. Методе кинематичког релативног позиционирања учиниле су ову технологију примјенљивом за осматрање помјерања објеката у реалном времену. Слично као и роботизоване тоталне станице, ГНСС пријемници се могу користити за 1Д, 2Д и 3Д позиционирање.

5.2.1. Обрада и анализа терестричких мјерења

У роботизованим тоталним станицама су механичким и рачунарским путем интегрисани теодолити за мјерење хоризонталних праваца и зенитних одстојања и електрооптички даљиномјер за мјерење просторних дужина. Микропроцесор за контролу операција мјерења користи податке и ослања се на рад двоног компензатора. Такође, користе се стандардни или актуелни метеоролошки подаци за одређивање рефракционе и осталих метеоролошких корекција. Након рачунања и примјене свих потребних корекција и евентуалног уношења додатних мјерених величина (висина инструмента; висина сигнала; хоризонтални, вертикални или просторни офсет) коначне вриједности мјерења које представљају поларне координате у локалном астрономском референтном координатном систему могу се смјештати у локалну рачунарску меморију или комуникационим системима слати у екстерне рачунарске меморије. Примјеном математичких модела изабраних метода позиционирања или трансформационог поступка, поларне координате се могу преводити у тражени координати систем. Савремене роботизоване тоталне станице имају могућности аутоматизације цијелог процеса рачунања непосредно у рачунарској јединици инструмента, као и визуелизације добијених резултата. У већини случајева у пракси, рачунања и визуелизација података спроводи се у локалним и управљачким центрима система за осматрање.

5.2.1.1. *Модели оцјена мјерења роботизованим тоталним станицама*

Постоји неколико **модела оцјена мјерених хоризонталних праваца и углова**, од којих су најважнији:

- аритметичка средина више читања на истом правцу као оцјена мјерења правца из n гируса,
- аритметичка средина угла из n гируса као модел оцјене мјереног угла и емпиријске дисперзије мјерења s праваца из n гируса.

Како је наведено у поглављу 5.1.1.2., за оцјену прецизности мјерења дужина користи се неколико модела, који су настали из анализе метода одређивања дужина. За коначну **оцјену мјерених дужина**, при перманентном геодетском осматрању помјерања објеката, могу се користити модели појединачног одређивања дужина у једном смјеру и модел средње вриједности независних мјерења са станице (више мјерења у једном смјеру), уз уношење одређених поправака како би се добиле највјероватније вриједности дужине.

Да би се обезбједила репродуктивност мјерења и да би мјерења дужина била међусобно упоредива, у резултате мјерења неопходно је унијети одговарајуће поправке. Наиме, постоји неколико основних поправака које се одређују и примјењују при прецизном мјерењу дужина ЕОД и то су:

- поправка за адициону константу,
- поправка за мултипликациону константу,
- поправка за атмосферске услове и
- поправка због утицаја рефракције.

Вриједност адиционе константе обухвата све геометријске, електронске и линеарне ексцентрицитете даљиномјера и рефлектора. Може се одређивати на више начина, а најчешће се одређује заједно са мултипликационом константом. У резултате мјерења се адициона константа a додаје по компонентама:

$$a = a_I + a_R \quad (5.41)$$

гдје су

a_I - адициона константа инструмента и

a_R - адициона константа рефлектора.

Пошто се адициона константа и њене компоненте одређују као поправке, онда се коригована мјерена дужина добија њеним додавањем на мјерење дужине из израза 2.1:

$$D_{C_a} = D + a = \frac{v_0}{2nf} (N + \Delta\varphi) + a. \quad (5.42)$$

Мултипликациона константа ЕОД, која је посљедица промјене теоријске модулационе фреквенције, одређује се као количник номиналне фреквенције f_N и актуелне фреквенције f_A :

$$q = \frac{f_N}{f_A}, \quad (5.43)$$

или, што је исправније са становишта стварних теренских услова, количник номиналне дужине D_N , која се добија помоћу номиналне фреквенције, и условно тачне (актуелне) дужине D_{UT} :

$$q = \frac{D_N}{D_{UT}}. \quad (5.44)$$

Мултипликациона и адициона константа одређују се са неком случајном грешком, која зависи од грешке модуларационе фреквенције осцилатора и унутрашње тачности даљиномјера. Избор методе њиховог заједничког одређивања мора бити такав да се обезбиједи безначајност ових грешака у односу на укупну унутрашњу тачност мјерења ЕОД. Код неких ранијих типова инструмената адициона константа и њена промјена провјеравана је и одређивана заједно са периодичном грешком ЕОД. Међутим, код савремених ЕОД појава периодичне грешке се отклања коришћењем двије фреквенције за мјерење дужина. Адиционом константом обухваћена је и грешка која настаје зато што се емитовани талас кроз компоненте даљиномјера и рефлектора не креће истом брзином као кроз ваздушне слојеве. Код савремених мјерних система, који се користе за прецизна мјерења и осматрање помјерања објеката, адициона константа се одређује за сваки пар инструмент-рефлектор. Коначна вриједност мјерене дужине поправљене за утицај адиционе и мултипликационе константе се добија као:

$$D_{C_{a,q}} = D_N + a + qD_N \quad (5.45)$$

Мјерена дужина, поправљена за утицај адиционе и мултипликационе константе које се готово не мијењају током времена, код савремених роботизованих тоталних станица се добија аутоматски, ако су претходно у рачунарску јединицу унијете вриједности константи, односно њихових компоненти. Такође, при изградњи аутоматизованих система осматрања, постоји могућност да се вриједности константи унесу за све типове рефлектора и да се примјене у тренутку мјерења на тим рефлекторима. Међутим, мора се имати у виду да се вриједности константи због различитих утицаја могу промијенити током времена, с тога се морају периодично провјеравати, исправљати и поново уносити у систем.

За разлику од адиционе и мултипликационе константе које се готово не мијењају током времена, поправка за атмосферски и утицај рефракције зависе од реалних локалних атмосферских услова. Због њихове динамичке природе и разлике од референтних вриједности при еталонирању мјерног система, атмосферски параметри се морају мјерити у тренутку извођења геодетских мјерења и примјењивати за рачунање поправака. Формуле за метеоролошку поправку мјерења дужина роботизованим тоталним станицама дају произвођачи инструмената. Она се аутоматски обрачунава у рачунарској јединици уношењем (аутоматским мјерењем и читавањем) атмосферских параметара: температуре t , ваздушног притиска P и парцијалног притиска водене паре e ; или уношењем срачунатог (тренутним рачунањем) фактора јединице мјере који одговара тренутним атмосферским параметрима. Познавање формуле за рачунање атмосферске поправке неопходно је како за потребе реализације мјерења тако и за потребе пројектовања система за перманентно осматрање, како би се одредили услови тачности мјерења атмосферских параметара. Према досадашњим истраживањима, највећи утицај на

поправку има температура, тако да њу треба мјерити прецизније од притиска и влажности ваздуха. Међутим, пошто се мјерење температуре из разлога економичности, врши само на крајевима мјерене дужине, недовољно моделован индекс преламања дуж путање простирања емитованих сигнала остаје као главни извор грешака. Посебно је изражен код дужих растојања, већег нагиба терена дуж мјереног растојања или испресијецаног терена са различитом врстом рефлектујуће подлоге испод путање сигнала. Данас се истражују, са економског аспекта, два начина за унапрјеђење поправке за атмосферске услове. Један је истовремено мјерење једне исте дужине са двије или више врста осцилација. Други начин је примјена одређених метеоролошких модела на микролокацијама, уз минимална додатна мјерења атмосферских параметра на предметном подручју, поред основних мјерења на мјесту постављања инструмента и рефлектора.

За дужа растојања, код којих се просторна крива не може са довољном тачношћу апроксимирати правом линијом, уноси се поправка за утицај рефракције. Ова поправка је увијек негативна и рачуна се као:

$$\Delta_{D_R} = -k^2 \frac{D_{a,q,A}^3}{24R^2} \quad (5.46)$$

гдје су:

k - коефицијент рефракције,

$D_{a,q,A}$ - мјерена дужина поправљена за утицај адиционе и мултипликационе константе и атмосферских услова, и

R - полупречник закривљености Земље.

Прецизно 1Д позиционирање роботизованим тоталним станицама изводи се на основу мјерења релативних висинских разлика методом тригонометријског нивелмана. Висинска разлика између двију тачака (A и B) тригонометријским нивелманом се одређује на основу мјерења астрономских зенитних одстојања, просторних дужина, висине инструмента и висине сигнала. За перманентно геодетског осматрање помјерања објеката користи се метода једностраног одређивања висинске разлике, при чему је препорука да дужине страна буду максимално неколико стотина метара.

Једнострано одређена висинска разлика ΔH од тачке A до тачке B тригонометријским нивелманом, оцјењује се према једначини:

$$\Delta H_{AB} = S_{AB} \cos Z_A^B + \frac{1-k_A}{2R} D_0^2 + i_A - l_B \quad (5.47)$$

гдје су:

S_{AB} - мјерена просторна дужина од тачке A до тачке B ,

Z_A^B - мјерено зенитно одстојање са тачке A ка тачки B ,

k_A - коефицијент вертикалне рефракције у тачки A ,

R - средњи радијус сфероида на линији A_0B_0 ,

D_0 - пројекција растојања AB на референтну површ,

i_A - мјерена висина инструмента и

l_B - мјерена висина сигнала.

5.2.1.2. Модели оцјена мјерења дигиталним прецизним нивелирима

У процесу 1Д позиционирања заснованог на методи геометријског нивелмана, оцјењују се двије врсте висинских разлика: 1) висинске разлике Δh на нивелманској станици и 2) висинске разлике ΔH између два репера. Први случај је непосредно везан за област перманентног геодетског осматрања помјерања објеката, док се други користи у конвенционалним моделима осматрања.

При одређивању висинске разлике на станици, летва се може читавати на два начина, задавањем броја читања n_c или задавањем експерименталног стандардног одступања из низа читања. У првом случају је број читања фиксан на свим станицама ако су услови при мјерењу исти, док је у другом случају број читања промјенљив и непознат и мјерења се изводе све док се не оствари захтијевана вриједност.

Ако су Z и P аритметичке средине из n_c читања задње и предње летве и ако су I и II прва и друга серија мјерења, тада се по стандардној методологији висинска разлика на станици оцјењује као:

$$\Delta h_I = Z_I - P_I - \text{оцјена висинске разлике за прву серију}, \quad (5.48)$$

$$\Delta h_{II} = Z_{II} - P_{II} - \text{оцјена висинске разлике за другу серију и} \quad (5.49)$$

$$\Delta h = \frac{1}{2}(\Delta h_I + \Delta h_{II}) - \text{оцјена висинске разлике на станици из двије серије}. \quad (5.50)$$

5.2.2. Обрада и анализа ГНСС мјерења

За потребе оцјењивања параметара при ГНСС позиционирању, најчешће се користе метод најмањих квадрата и Калманов филтер, са модификацијама. Оцјењивање по МНК карактерише могућност елиминације параметара и суперпозиције система нормалних једначина, чиме се омогућава смањење димензија система нормалних једначина, као и секвенцијално и рекурзивно оцјењивање параметара. Елиминацијом параметара смањују се димензије система нормалних једначина, при чему се не губе информације. Секвенцијално оцјењивање је МНК оцјењивање у којем се користе сва извршена мјерења, што је еквивалентно разлагању процеса оцјењивања на више дијелова и комбиновању појединачних рјешења у коначан резултат [131]. Рекурзивно оцјењивање, које се за разлику од секвенцијалног оцјењивања заснива на коришћењу коваријационих матрица, користи се када је поред комбинованих рјешења секвенцијалног оцјењивања, доступна и нова група мјерења. Калманов филтер је алгоритам за оптимално оцјењивање временски варијабилних параметара линеарног динамичког система. Изузетно је погодан за обраду ГНСС мјерења јер се координате станице и брзине њихових промјена, фазне неодређености, атмосферски утицаји или стања часовника могу посматрати као параметри промјенљиви у функцији времена.

5.2.2.1. Математички модели релативног позиционирања

Постоји неколико начина да се формира свеобухватни модел релативног позиционирања. Један од њих је и комбинација кодних и фазних мјерења. Модел са четири мјерене величине, за процесирање кратких базних линија, дефинисан је једначином [173]:

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ \Phi_1 \\ P_2 \\ \Phi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & \lambda_1 & 0 \\ 1 & (f_1/f_2)^2 & 0 & 0 \\ 1 & -(f_1/f_2)^2 & 0 & \lambda_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \rho + c(dt^k - dt_i) + T \\ I \\ N_1 \\ N_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_{P_1} \\ \varepsilon_{\Phi_1} \\ \varepsilon_{P_2} \\ \varepsilon_{\Phi_2} \end{bmatrix} \quad (5.51)$$

гдје је номенклатура из Једначина 5.23 и 5.26 поједностављена, а већина појмова занемарена. Овај модел је познат и као геометријски слободно рјешење (*eng. geometry-free*) једне епохе мјерења. За кратке базне линије са двоструким разликама, први елемент вектора непознатих параметара се може свести само на ρ . Тада се систем једначина састоји од четири једначине са четири непознате и може се директно ријешити ако не постоји висок ниво шума у кодним мјерењима. У идеалним случајевима и при статичким ГНСС мјерењима, кроз више епоха се акумулира довољно мјерења, на основу којих се могу оцијенити фазне неодређености, а самим тим и прецизне позиције. Међутим, у реалним условима ситуација је другачија.

Обрада мјерења се може учинити много ефикаснијом, примјеном математички синтетизоване линеарне комбинације фазних мјерења са великом таласном дужином (*eng. wide lane*):

$$\varphi_{wl} = \varphi_1 - \varphi_2 \text{ гдје је } \lambda_{wl} = \frac{c}{f_1 - f_2} \cong 86 \text{ cm.} \quad (5.52)$$

Једначине 5.51 и 5.52 могу бити примијењене у филтеру заснованом на методи најмањих квадрата, којим се оцјењује фазна неодређеност ове фреквенцијске комбинације. Пошто је таласна дужина ове фреквенцијске комбинације приближно четири пута дужа од таласне дужине оригиналних носећих таласа, тачна оцјена фазне неодређености је много једноставнија јер ова фреквенцијска комбинација задржава цјелобројну периоду. Линеарна комбинација фазних мјерења са великом таласном дужином се, и поред појачаног утицаја јоносферске рефракције, често користи за геодетску обраду ГНСС мјерења. Када се оцијени фазна неодређеност фреквенцијске комбинације са великом таласном дужином, формира се фреквенцијска комбинација која у потпуности елиминише утицај јоносфере (*eng. ionosphere free*) и која производи фазну неодређеност као линеарну комбинацију N_1 и познате фазне неодређености велике таласне дужине, што омогућава одређивање N_1 и N_2 [173].

Основни линеаризовани модел заснован само на фазним мјерењима у једној епохи има облик:

$$\begin{bmatrix} \Phi_{AB,f}^{jk} \\ \Phi_{AB,f}^{jl} \\ \vdots \\ \Phi_{AB,f}^{jn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{x^k - x_{B_0}}{\rho_{B_0}^k} - \frac{x^j - x_{B_0}}{\rho_{B_0}^j} & \frac{y^k - y_{B_0}}{\rho_{B_0}^k} - \frac{y^j - y_{B_0}}{\rho_{B_0}^j} & \frac{z^k - z_{B_0}}{\rho_{B_0}^k} - \frac{z^j - z_{B_0}}{\rho_{B_0}^j} & \lambda_f & 0 & \dots & 0 \\ \frac{x^l - x_{B_0}}{\rho_{B_0}^l} - \frac{x^j - x_{B_0}}{\rho_{B_0}^j} & \frac{y^l - y_{B_0}}{\rho_{B_0}^l} - \frac{y^j - y_{B_0}}{\rho_{B_0}^j} & \frac{z^l - z_{B_0}}{\rho_{B_0}^l} - \frac{z^j - z_{B_0}}{\rho_{B_0}^j} & 0 & \lambda_f & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{x^n - x_{B_0}}{\rho_{B_0}^n} - \frac{x^j - x_{B_0}}{\rho_{B_0}^j} & \frac{y^n - y_{B_0}}{\rho_{B_0}^n} - \frac{y^j - y_{B_0}}{\rho_{B_0}^j} & \frac{z^n - z_{B_0}}{\rho_{B_0}^n} - \frac{z^j - z_{B_0}}{\rho_{B_0}^j} & 0 & 0 & \dots & \lambda_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X_B \\ \Delta Y_B \\ \Delta Z_B \\ N_{AB,f}^{jk} \\ N_{AB,f}^{jl} \\ \vdots \\ N_{AB,f}^{jn} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_{\Phi_{AB,f}^{jk}} \\ \varepsilon_{\Phi_{AB,f}^{jl}} \\ \vdots \\ \varepsilon_{\Phi_{AB,f}^{jn}} \end{bmatrix} \quad (5.53)$$

гдје се индекс 0 односи на приближну позицију/координату и који не садржи грешке атмосферске рефракције и/или вишеструке рефлексије. Овај модел користи први сателит као референтни за све независне парове двоструких разлика и не узима у обзир фазне скокове или било какве промјене сигнала.

За случај статичких мјерења једне базне линије, оцјењивање по методи најмањих квадрата у групном или секвенцијалном облику може довести до рјешења и поузданих података позиционирања. Математичке корелације које настају из двоструких разлика мјерења се морају узети у обзир при формирању стохастичког модела. Секвенцијални облик методе најмањих квадрата обезбјеђује већу рачунарску ефикасност за веће скупове података. Други облици секвенцијалног оцјењивања подразумевају примјену Калмановог или Бајесовог приступа. Примјена секвенцијалног оцјењивања олакшава управљање промјенама мјерења услед пораста промјене положаја сателита, појаве фазних скокова, итд. Са повећањем дужине базне линије захтијева се и додатно моделовање грешака, посебно грешака сателитских орбита и атмосферске рефракције. Продужетак интервала мјерења при статичком позиционирању, дјелимично компензује повећање грешака мјерења, јер повећање броја мјерења смањује средњу вриједност грешке у процесу оцјењивања. Још кроз прва истраживања релативног позиционирања, дефинисани су појмови плутајућих фазних неодређености (*eng. float*), које врло лако могу бити заокружене на фиксне цијеле бројеве (*eng. fixed*). Касније су развијене много робусније и ефикасније методе, о којима ће бити ријечи у сљедећем подпоглављу.

Додатна контрола оцјене мјерених базних вектора се свакако остварује при њиховом групном изравнању у оквиру геодетских мрежа. Осим узимања у обзир математичке корелације мјерења, при формирању мреже и модела изравнања бирају се само независни вектори. Међутим, предности формирања геодетских мрежа и изравнања великог броја мјерених величина могу се користити само при перманентном осматрању помјерања објекта са накнадном обрадом података.

За осматрање помјерања објеката у реалном времену, захтијева се примјена методе кинематичког ГНСС позиционирања. При обради кинематичких мјерења, без увођења додатних услова, постоји дефект ранга функционалног модела. У том случају, за оптимално оцјењивање обично се користе секвенцијални облик методе најмањих квадрата и проширени Калманов филтер. Моћ осредњавања мјерења за оцјену положаја је знато смањена у овим случајевима, па се морају користити методе

које врло поуздано и готово тренутно оцјењују цијели број таласних дужина фазних мјерења.

5.2.2.2. Рјешавање фазних неодређености и RTK

Како се може закључити из претходних разматрања релативног позиционирања, посебна пажња се усмјерава на жељу и потребу да се фазне неодређености заокруже на цјелобројне вриједности. Увођење овог цјелобројног ограничења у процесу оцјене непознатих параметара је својеврсно увођење њиховог физичког значења у процес оцјене стања система. С тога је коришћење свих доступних информација у процесу оцјене готово неопходно. У практичном смислу, рјешавање фазних неодређености (*енг. Ambiguity Resolution – AR*) омогућава брзу иницијализацију рјешења положаја и поновну иницијализацију за статичко и кинематичко запосједање тачака, као и за конзистентнија рјешења из епохе у епоху. Тренутна оцјена цијелог броја таласних дужина је у ствари кључни услов за примјену прецизног релативног позиционирања у виду RTK/NRTK методе.

Код статичких базних линија су многобројна моделовања грешака и прикупљање велике количине података омогућавали једноставно заокруживање плутајућих рјешења фазних неодређености двоструких разлика на фиксне вриједности. Међутим, већ кроз почетна истраживања је уочено да брзо фиксирање фазних неодређености на њихове тачне цјелобројне вриједности увелико побољшава тачност и поновљивост позиционирања које се одвија у кратким временским интервалима [173]. Из тог разлога су савремена истраживања са статичких базних линија, усмјерена ка много тежим случајевима који изискују брзо фиксирање фазних неодређености, као што је позиционирање пријемника у покрету на кратким и средње дугим базним линијама. Претходно описани концепт просторно-временске корелације за грешке сателитских орбита, утицај јоносфере и тропосфере на базне линије, има централну улогу у оцјени плутајућих рјешења, при чему остаци немоделиваних грешака негативно утичу на тачност оцјене положаја и стања фазних неодређености.

Резултујућа оцјена вектора положаја \hat{x} и припадајућа оцјена кофакторске матрице Q_x добијени релативним позиционирањем и формирањем двоструких разлика називају се плутајућим оцјенама положаја и његовог кофактора и могу се подијелити на подвекторе:

$$\hat{x} = \begin{bmatrix} \hat{a} \\ \hat{b} \end{bmatrix} ; \quad Q_x = \begin{bmatrix} Q_a & Q_{ab} \\ Q_{ab} & Q_b \end{bmatrix} \quad (5.54)$$

гдје је \hat{a} вектор плутајућег положаја и других елемената из модела базне линије, а \hat{b} представља вектор n плутајућих фазних неодређености $[N_1 \dots N_n]^T$. AR се још назива фиксирање фазних неодређености или идентификација цијелог броја таласних дужина двоструких фазних разлика. AR у ствари представља процес одабира скупа цјелобројних вриједности фазних неодређености који је статистички компатибилан са плутајућим рјешењима фазних неодређености. Конкретно, то је процес минимализовања пондерисане норме:

$$[\hat{b} - \tilde{b}]^T Q_b^{-1} [\hat{b} - \tilde{b}] \quad (5.55)$$

гдје је \vec{b} вектор цјелобројних фазних неодређености. Процеса минимализовања се провјерава статистичким тестовима.

Постоје три корака за AR:

1. Генерисање потенцијалних цјелобројних вриједности фазних неодређености,
2. Идентификација оптималних цјелобројних вриједности фазних неодређености и
3. Валидација (верификација или прихватање) изабраних цјелобројних вриједности фазних неодређености.

Потенцијалне цјелобројне вриједности фазних неодређености су претпоставке рјешења фазних неодређености за дату епоху. Свака вриједност налази се унутар простора за претрагу фазних неодређености која се може описати као вишедимензионална површ комбинација фазних неодређености. Што је овај простор за претрагу већи, већа је вјероватноћа да садржи тачну цјелобројну фазну неодређеност; а што је мањи простор за претрагу, свака потенцијална цјелобројна вриједности се може брже тестирати. Дакле, најбоља опција је баланс ове двије могућности. Оцјене фазних неодређености двоструких разлика ће за краће базне линије, које се одређују статичким мјерењима, бити блиске цјелобројним вриједностима током дужег временског периода. Ако базне линије постају дуже, а период мјерења краћи, вриједности плутајућих рјешења све више одступају од тачних цјелобројних вриједности. Узрок томе су додатни немоделовани извори грешака и слабости рјешења изазване губитком информација. Појединачни простор за претрагу фазних неодређености је у суштини сконцентрисан на плутајуће фазне неодређености и запремину дефинисану несигурношћу плутајућих фазних неодређености (оцјена коваријансе фазних неодређености). Број потенцијалних цјелобројних вриједности фазних неодређености зависи од броја сателита и опсега за претрагу.

Критеријум за идентификацију оптималних цјелобројних вриједности фазних неодређености обично је потенцијална цјелобројна вриједност која минимизира збир квадрата резидуала рјешења (метод најмањих квадрата). Подразумијева се да су оригиналне оцјене вриједности плутајућих фазних неодређености двоструких разлика најбоље оцјене у смислу МНК, док фиксне цјелобројне вриједности производе веће резидуале у процесу оцјене (пошто се не уклапају ни у функционални ни стохастички модел). Међутим, оне се не би требале статистички значајно разликовати.

Валидација је процјена исправности добијених цјелобројних вриједности фазних неодређености. Заснива се на функционалном и стохастичком моделу процеса оцјењивања и AR методе. Таква валидација је обично у облику теста односа норми између најмањег и следећег најмањег пондерисаног збира квадрата резидуала. Ако је однос већи од неке постављене вриједности, онда се користи претходна потенцијална цјелобројна вриједност фазне неодређености. У супротном, задржава се изабрана вриједност. Међутим, овакви тестови односа са фиксном критичном вриједношћу не тестирају исправност цјелобројног рјешења добијеног по МНК. Приступ са одбацивањем фиксне стопе омогућава да стопа одбачених рјешења не пређе кориснички дефинисану вриједност [282]. Међутим, ни један приступ

валидације не може у потпуности гарантовати исправност изабраних цјелобројних фазних неодређености [173].

До сада су развијене бројне AR методе, од којих су неке најпопуларније укратко представљене у наставку. Метода функције фазних неодређености (*eng. ambiguity function method*), коју су развили [283] је претраживање коцке, правилно подијељене на мање сегменте, око оцјене плутајућих фазних неодређености користећи такозвану функцију фазних неодређености за све једноструке разлике између пријемника. Техника претраживања фазних неодређености методом најмањих квадрата (*eng. Least-Squares Ambiguity Search Technique - LSAST*) коју је развио [284] издваја цјелобројне фазне неодређености формирањем примарног и секундарног скупа сателита и коришћењем секвенцијалног метода најмањих квадрата. Брзи AR приступ (*eng. Fast AR Approach - FARA*), развијен од стране [285], користи статистичке информације из почетне плутајуће оцјене како би се изабрао опсег претраживања. Затим користи коваријациону матрицу како би се одбацио скуп неприхватљивих вриједности фазних неодређености. На крају, за избор исправних вриједности цјелобројних неодређености овај метод подразумијева тестирање хипотеза. Изравнање декорелисаних фазних неодређености по методи најмањих квадрата (*eng. Least-squares AMBiguity Decorrelation Adjustment - LAMBDA*) је метода рјешавања фазних неодређености коју је развио [285] и која условно речено декорелише фазне неодређености двоструких разлика. У оквиру ове методе спроводи се условна МНК претрага цјелобројних вриједности фазних неодређености. Филтер за брзу претрагу фазних неодређености (*eng. Fast Ambiguity Search Filter - FASF*), који је развио [286] је метода којом се Калмановим филтером предвиђа вектор стања. Претраживање фазних неодређености се за сваку епоху спроводи док се све не фиксирају. Код ове методе постоји и рекурзивно израчунавање опсега за претраживање фазних неодређености.

Осим директне оцјене неодређености фазних мјерења, поменуте методе користе и друге начине за њихову оцјену. Наиме, линеарне комбинације фазних мјерења, као што су комбинације за повећање таласне дужине фазних мјерења повећавају успјех оцјене фазних неодређености. Дјелимично фиксирање фазне неодређености омогућава избјегавање фиксирања плутајућих фазних неодређености мјерења са високим шумом, што је случај за сигнале са сателита који се тек појављују, са пријемом сигнала вишеструке рефлексије, или сигнале са великом грешком атмосферске рефракције.

LAMBDA метода је, с обзиром на њену оптималност и брзину, веома популарна, посебно са становишта софтверске имплементације. Имајући у виду њену распрострањеност и примјену, у наставку ће бити изложени најважнији детаљи ове методе.

LAMBDA је данас вјероватно најпопуларнија AR метода, чије су главне одлике тачне МНК оцјене цјелобројних вриједности. Такође, LAMBDA је оцјењивач са највећом вјероватноћом оцјене тачне вриједности цијелог броја таласних дужина међу свим оцјењивачима и великом брзином у проналажењу скупа цјелобројних рјешења. Ако је кофакторска матрица Q_b , из Једначине 5.13 дијагонална, односно ако фазне неодређености нису у корелацији:

$$Q_b = \begin{bmatrix} q_{\hat{N}_1 \hat{N}_1} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & q_{\hat{N}_n \hat{N}_n} \end{bmatrix} \quad (5.56)$$

онда би најбољи скуп цјелобројних вриједности, у МНК смислу, био скуп заокружених плутајућих фазних неодређености:

$$\frac{(\hat{N}_1 - \check{N}_1)^2}{q_{\hat{N}_1 \hat{N}_1}} + \dots + \frac{(\hat{N}_2 - \check{N}_2)^2}{q_{\hat{N}_1 \hat{N}_1}}. \quad (5.57)$$

Верзија претходне једначине са два члана се геометријски може представити као елипса с почетком у пару плутајућих фазних неодређености и осама које су скалиране имениоцима. Трочлана верзија се слично приказује елипсоидом, а верзија са n чланова хиперелипсоидом. Подручје или запремина унутар елипсе/елипсоида/хиперелипсоида назива се простором за претрагу цјелобројних неодређености.

Међутим, у стварности је кофакторска матрица плутајућих фазних неодређености потпуно попуњена и, посебно за мале скупове података и дуге базе линије, плутајуће неодређености су високо корелисане што резултира издуженим фигурама, ротираним даље од главних оса. Ефекат је обично велики простор за претрагу цјелобројних рјешења фазних неодређености. LAMBDA метода управо има за циљ да у великој мјери смањи простор претраге кроз процес познат као декорелација Z трансформацијом.

Математички је симетричну квадратну матрицу, као што је Q_b , једноставно дијагонализовати, кроз декомпозицију сопствених вриједности. Међутим, декомпозиција сопствених вриједности производи трансформисану дијагоналну матрицу кофактора, али не чува цјелобројну природу трансформисаних цјелобројних неодређености. LAMBDA примјењује такозвану Z трансформацију [287], гдје је:

$$\begin{aligned} \tilde{z} &= Z^T \tilde{b} \\ \hat{z} &= Z^T \hat{b} \\ Q_{\tilde{z}} &= Z^T Q_b Z \end{aligned} \quad (5.58)$$

и гдје Z мора садржавати само цијеле бројеве. Такође, детерминанта од Z мора бити једнака ± 1 , ограничавајући Z^{-1} да садржи само цјелобројне елементе ако их садржи Z . Резултат је очување цјелобројне природе и за директну и за инверзну трансформацију у *Једначини 5.58*. Процес одређивања одговарајућег Z за дату кофакторску матрицу ослања се на примјену серије Гаусових трансформација које укључују заокружене подјеле дијагоналних елемената кофакторске матрице плутајућих рјешења [288]. Геометријски посматрано, резултат се може тумачити као серија компресованих издужених елипси/елипсоида који се приближавају облику круга или сфере уз очување површине/запремине, респективно.

Након трансформације се врши секвенцијално условно изравнање цјелобројних вриједности, како би се одредиле њихове највјероватније вриједности. Процес претражује све потенцијалне цјелобројне вриједности фазних неодређености, при

чему се свака неодређеност оцјењује на основу претходне фиксне вриједности фазне неодређености. То јест, $\hat{b}_{i/I}$, $i=1, \dots, m$, као МНК оцјена i -те фазне неодређености, условљена је фиксирањем претходне $i-1$ фазне неодређености, што се математички записује као:

$$\hat{b}_{i/I} = \hat{b}_i - \sum_{j=1}^{i-1} \sigma_{\hat{b}_i \hat{b}_j} \sigma_{\hat{b}_j}^{-2} \hat{b}_{j/J}. \quad (5.59)$$

Овај процес је једноставан јер оцјене секвенцијалног условног изравнања цјелобројних вриједности нису корелисане. Статистичко тестирање хипотеза се спроводи на оцјенама потенцијалних цјелобројних вриједности фазних неодређености како би се изабрао оптималан скуп у МНК смислу. Када се заврши минимизирање трансформисаних цијелих бројева, могу се израчунати инверзно трансформисане оцјене цјелобројних вриједности \tilde{z} (које нису експлицитно потребне), како би се добиле МНК оцјене цјелобројних вриједности тражених чланова \tilde{y} неке базне линије.

Сама оригинална LAMBDA метода није имала дефинисане процедуре валидације, које су касније развијене [282]. Валидација квалитета добијених цјелобројних фазних неодређености изводи се из несигурности оцјена. Саме стандардне девијације могу се користити као мјера прихватљивости добијених оцјена, али не и као мјера њихове тачности. Мјере валидације укључују и стопу успјеха добијања оцјена фазних неодређености, које квантификују вјероватноћу да су вриједности исправно оцијењене. Такође, као мјера у процесу валидације користи се и функција стопе успјеха, којом је обухваћен функционални и стохастички модел и изабрана метода оцјене цјелобројних вриједности коришћењем стварних мјерења. Тест валидације упоређује квадратне норме вектора резидуала друге најбоље и најбоље вриједности фазне неодређености, са прагом који показује да су два рјешења статистички блиска или различита са неким нивоом повјерења.

Након LAMBDA методе, развијена је MLAMBDA (*енг. Modified LAMBDA*) метода [289]. Алгоритам MLABDA методе је заснован на рачунарској ефикасности у LAMBDA декорелацији и у цјелобројним секвенцијалним МНК компонентама, чијом примјеном се значајно смањује вријеме израчунавања. Ове модификације су првобитно направљене у едукативној верзији MLAMBDA, а затим су примијењене у професионалној верзији [290].

Главни кораци LAMBDA AR процеса цјелобројних вриједности фазних неодређености су:

- Претходна LAMBDA фаза: релативно позиционирање са плутајућим рјешењима фазних неодређености двоструких разлика и припадајућом коваријационом матрицом израчунатом из конвенционалног МНК за релативно позиционирање или оцјењивања примјеном Калмановог филтера,
- LAMBDA декорелација: такозвана Z трансформација декорелише висококорелисане фазне неодређености, трансформишући обично веома издужен хиперелипсоид претраге фазних неодређености у облик који је скоро сферни, омогућавајући много ефикаснију претрагу цјелобројних неодређености,

- LAMBDA претраживање цјелобројних вриједности: минимизирање цјелобројних вриједности користи се као дискретна претрага декорелисаног простора претраге како би се одредиле најбоље трансформисане цјелобројне фазне неодређености које се затим поново трансформишу коришћењем инверзне Z трансформације.
- Post-LAMBDA фаза: фиксне вриједности фазних неодређености користе се за поновну оцјену параметара базне линије како би се добило фиксно рјешење за ту базну линију.

5.2.2.3. Процес оцјењивања у релативном позиционирању

Имајући у виду различите поставке функционалног и стохастичког модела и метода оцјена фазних неодређености, софтверске имплементације за релативно позиционирање могу се чак и значајно разликовати. Једна од популарних имплементација отвореног кода је RTKLIB [179][178]. Основни модули који карактеришу методологију обраде релативног позиционирања и који се имплементирају у програмским пакетима представљени су на Слици 5-1 и важе за релативно позиционирање са накнадном обрадом и у реалном времену за једну епоху. Перформансе позиционирања које остварују поједини процесори за обраду података су функција не само комплетности алгорита и модула на лијевој страни, већ и нивоа детаља који се налазе у опционим, али готово обавезним модулима за контролу квалитета на десној страни алгорита.

Сложеност функционалности за улазна мјерења са базног и покретног пријемника зависе од формата мјерења и формата улазних података, који су објашњени у поглављу 2. Претходна обрада мјерења (*енг. pre-processing*) може укључивати откривање и уклањање грубих грешака у кодним и фазним мјерењима, уклањање дјелимичних записа мјерења, итд. Типично, овај модул укључује и алгоритам за откривање и потенцијалну поправку фазних скокова у мјерењима.



Слика 5-1. Дијаграм тока основних и опционих корака релативног/RTK позиционирања

Почетна навигациона рјешења базног и покретног пријемника се рачунају коришћењем концепта апсолутног позиционирања. У овом кораку се најчешће примјењује основно моделовање грешака, кроз МНК оцјену рјешења једне по једне епохе. Иницијална мјерења се затим могу оцијенити на основу статистичке анализе

резидуала након спровођења регресије. Аутономно праћење интегритета пријемника (*енг. Receiver Autonomous Integrity Monitoring - RAIM*) је један такав приступ, који обезбјеђује специфичне критеријуме за одбацавање мјерења.

Одабрана мјерења са базног и покретног пријемника се даље користе за формирање једначина двоструких разлика и, потенцијално, њихових линеарних комбинација за различита рјешења плутајућих фазних неодређености. Напредно моделовање грешака се примјењује, посебно за дуже базне линије, кроз секвенцијално МНК оцјењивање или Калманов филтер. Резидуали добијени кроз претходни процес се могу користити за анализу потенцијално преосталих грубих грешака.

За оцјену вриједности фазних неодређености и припадајућих коваријанси, користи се нека од описаних AR метода, при чему се LAMBDA метода најчешће користи. Добијене оцјене се, ради повећања повјерења у добијена рјешења, могу валидирати стандардним статистичким методама.

Коначно, фиксне вриједности фазних неодређености и припадајућих коваријација се поново процесирају како би се добиле оцјене фиксних вриједности компоненти базних линија и са њима повезане коваријансе. Оцјене плутајућих рјешења положаја и њихова коваријација најчешће се користе као улазне вриједности при сљедећој обради епохе.

5.2.2.4. Обрада мјерења на референтним станицама и генерисање корекција

Главни извори грешака, у смислу величине њиховог утицаја на опсег ГНСС сигнала, који ограничавају перформансе релативног RTK позиционирања на центиметарски ниво су грешке сателитских орбита и грешке настале под утицајем јоносферске и тропосферске рефракције. Оне се могу успјешно оцијенити (интерполовати) унутар мреже правилно распоређених перманентних ГНСС станица [291].

Задатак њихове оцјене стављен је на мрежног провајдера RTK сервиса, са основним задатком да прецизно оцијени компоненте грешака у континуираним дневним рјешењима релативног NRTK позиционирања. Због тога се цјелобројне нејасноће морају рјешавати континуирано и у реалном времену. За такве мреже се, како је описано, користе све доступне *a priori* информације које омогућавају скраћење параметризације вектора стања у процесу оцјењивања, или коришћење јако ограничених стохастичких модела.

Очување такозваног заједничког нивоа неодређености у мрежним рјешењима је потребно да би се генерисале досљедне корекције. Заједнички ниво неодређености односи се на све неодређености двоструких разлика за све станице у мрежи које треба фиксирати у односу на исти референтни сателит. Посебно за веће мреже може бити изазовно одржавати конзистентан скуп заједничких сателита на видику. Не само да сателити могу да напусте видно поље антене на станици, већ пријемник на станици може изгубити праћење сателитског сигнала. Када референтни сателит треба да се промјени, мрежни процесор мора непримјетно да се пребаца на сателит који ће бити видљив најдужи временски период. Ниједна неодређеност се не реиницијализује употребом линеарних трансформација. На примјер, за пребацавање са референтног сателита i на сателит k , у односу на сателит j , потребна је сљедећа трансформација двоструких разлика:

$$N_{AB,f}^{ij} \rightarrow N_{AB,f}^{kj} \quad (5.60)$$

и ова трансформација може се једноставно изразити као:

$$N_{AB,f}^{ij} - N_{AB,f}^{ik} = N_{AB,f}^{kj} . \quad (5.61)$$

Једначина 5.61 показује да за промјену са референтног сателита i на k , линеарне комбинације цјелобројних вриједности фазних неодређености у односу на тренутни сателит i се могу користити за извођење цјелобројних неодређености у односу на нови референтни сателит k [291]. Одржавање заједничког нивоа фазних неодређености се може користити за смањење простора претраге за потенцијалним цјелобројним вриједностима фазних неодређености и за валидацију. За веће мреже, обрада података може се подијелити на мање скупове мрежа и области које се преклапају како би се ублажио значајан терет процеса рачунања.

Након оцјене рјешења двоструких разлика за мрежу перманентних станица, софтвер за мрежну обраду мора да генерише корекције за мрежне станице. Модел двоструких разлика се може преформулисати као:

$$\lambda \left(N_{AB,f}^{jk} + \Phi_{AB,f}^{jk}(t) \right) = \rho_{AB}^{jk}(t) - I_{AB,f,\Phi}^{jk}(t) + T_{AB}^{jk}(t) . \quad (5.62)$$

Члан фазне неодређености је већ ријешен. Члан који се односи на фазу мјерења је познат из фазних мјерења, док је геометријско растојање одређено из познатих координата референтних станица и сателита. То значи да за оцјену преостају грешке утицаја јоносфере и тропосфере.

Генерисање корекција коришћењем **VRS** алгоритма, подразумијева подјелу грешака у Једначини 5.62 на дисперзивне (јоносфера) и недисперзивне (све остало) компоненте [292]. С обзиром да су станице за мрежни RTK удаљене десетине километара, највећу грешку у рјешењу позиције изазваће јоносферска рефракција. Ове компоненте су изоловане, за случај коришћења вишефреквентних пријемника, коришћењем јоносферске линеарне комбинације, а рачунања се изводе према формулама:

$$V(t) = V^{disp}(t) + V^{non-disp}(t) , \quad (5.63)$$

$$V(t) = T_{AB}^{jk}(t) - I_{AB,f,\Phi}^{jk}(t) = \lambda \left(N_{AB,f}^{jk} + \phi_{AB,f}^{jk}(t) \right) - \rho_{AB}^{jk}(t) , \quad (5.64)$$

$$I_{AB,\Phi}^{jk}(t) = \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \left[\lambda_{L1} \phi_{AB,L1}^{jk}(t) - \lambda_{L2} \phi_{AB,L2}^{jk}(t) + \lambda_{L1} N_{AB,L1}^{jk} - \lambda_{L2} N_{AB,L2}^{jk} \right] , \text{ и} \quad (5.65)$$

$$V^{non-disp}(t) = V(t) - V^{disp}(t) = V(t) + I_{AB,\Phi}^{jk}(t) . \quad (5.66)$$

МАС алгоритам генерисања корекција такође разлаже корекције на њихове дисперзивне и недисперзивне компоненте. Међутим, једноструке разлике од главне станице до такозваних помоћних референтних станица (секундарне референтне станице које су даље од корисника у односу на главну станицу) користе се за генерисање корекција за ровер [291]. Једноструке разлике мјерења су довољне за процесе интерполације и генерисања корекција пошто интерполацију у потпуности обавља пријемник, без генерисања VRS. Корекције на основу једноструких разлика са главне и помоћних станица се рачунају као:

$$V_{AB}^i(t) = \rho_{AB}^i(t) - \lambda \phi_{AB}^i(t) + cdt_{AB}^i(t) - I_{AB}^i(t) + T_{AB}^i(t) + \lambda N_{AB}^i . \quad (5.67)$$

Геометријско растојање оцјењује се као и у претходном случају. Члан који се односи на пријемник часовника одређује се на основу кодних мјерења. Фазне неодређености одређују се према сљедећој једначини:

$$N_{AB}^{il} = N_{AB}^i - N_{AB}^1 \rightarrow N_{AB}^i = N_{AB}^{il} + N_{AB}^1 \quad (5.68)$$

гдје је N_{AB}^1 произвољно одабран податак, који се касније елиминише или оцјењује у процесу обраде. Коначно, компоненте корекција се одређују према формулама:

$$V_{AB,L1}^{i,disp}(t) = \frac{f_2^2}{f_2^2 - f_1^2} V_{AB,L1}^i(t) - \frac{f_2^2}{f_2^2 - f_1^2} V_{AB,L2}^i(t) \quad \text{и} \quad (5.69)$$

$$V_{AB,L1}^{i,non-disp}(t) = \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} V_{AB,L1}^i(t) - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} V_{AB,L2}^i(t). \quad (5.70)$$

Генерисање корекција по **FKP** алгоритму је слично као код VRS и MAC алгоритма. FKP алгоритам користи двоструке разлике за генерисање дисперзивних и недисперзивних корекција. Свака референтна станица преноси скуп параметра за корекцију. Чланови се групишу у модел корекције који има облик [173]:

$$V_{AB}^{lj}(t) = \rho_{AB}^{lj}(t) - \lambda \phi_{AB,f}^{lj}(t) - I_{AB,f,\Phi}^{lj}(t) + T_{AB}^{lj}(t) + \lambda N_{AB,f}^{lj}. \quad (5.71)$$

Сателит 1 је референтни сателит у односу на који се рјешавају све фазне неодређености између референтних станица. Дисперзивне и недисперзивне корекције се одређују према *Једначинама 5.69 и 5.70*.

Корекције за грешке сателитских орбита, утицаја тропосфере и јоносфере процијењене на свакој референтној станици требају се интерполовати на положај корисника да би се поправила мјерења корисничким пријемником, а затим и оцјена положаја. Постоје различите методе интерполације које се користе у NRTK, а најчешће су то: једноставна линеарна интерполација, линеарна интерполација заснована на удаљености, модел линеарне комбинације, моделовање полиномима нижег степена и колокација по методи најмањих квадрата.

Код једноставне линеарне интерполације, потребне су најмање три референтне станице како би се одредио јединствен пар дводимензионалних коефицијената [293]:

$$V_{u,m}^{li} = \begin{bmatrix} \Delta X_{u,m} & \Delta Y_{u,m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} \quad (5.72)$$

гдје је $V_{u,m}^{li}$ резидуал двоструке разлике између покретног пријемника и референтне станице, $\Delta X_{u,m}$ и $\Delta Y_{u,m}$ су координате разлике између двије станице, а a и b су коефицијенти регресије.

Метода линеарне интерполације зависна од удаљености користи инверзну вриједност квадрата растојања од референтних станица до корисничке станице за дефинисање тежина у поступку интерполације. Ова метода има ограничену тачност и нешто лошије перформансе у односу на остале методе јер је оцјена грешака мјерења једнодимензионална [293].

Модел линеарне комбинације заснива се на рачунању скупа од $n+1$ коефицијената за n референтних станица:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 & 1 \\ \Delta X_{1,m} & \Delta X_{2,m} & \cdots & \Delta X_{n,m} & 0 \\ \Delta Y_{1,m} & \Delta Y_{2,m} & \cdots & \Delta Y_{n,m} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_{12} \\ \vdots \\ a_{n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ \Delta X_{u,m} \\ \Delta Y_{u,m} \end{bmatrix}. \quad (5.73)$$

Корекције се за корисничку позицију интерполују као:

$$V_{u,m} = a_1 V_{1,m} + a_2 V_{2,m} + \dots + a_n V_{n,m}. \quad (5.74)$$

Метода моделовања полиномом нижег степена користи развој модела грешака мјерења у Тејлоров ред другог степена, слично моделовању полином првог степена:

$$Fitting_{error} = \hat{a} + \hat{b}(\Delta X) + \hat{c}(\Delta Y) + \hat{d}(\Delta Z) \quad (5.75)$$

гдје су коефицијенти од \hat{a} до \hat{d} коефицијенти првог степена.

Колокација по методи најмањих квадрата је метода која користи не само вриједности корекција већ и придружене матрице коваријансе за процјену корекција положаја корисничког пријемника. Израчуната геометријска удаљеност референтне станице се одузима од фазних мјерења:

$$\bar{\phi} = \phi - \rho. \quad (5.76)$$

Резидуали се за корисничку позицију интерполују као:

$$V_{u,m} = C_{V_u V_m} D^T (D C_{V_m} D^T)^{-1} (D \bar{\phi} - \lambda N_{um}^{jk}) \quad (5.77)$$

гдје су $C_{V_u V_m}$ и C_{V_m} коваријационе матрице резидуала, а D је матрица оператора једноструких или двоструких разлика, у зависности од приступа који се користи у NRTK систему.

5.3. КВАНТИФИКОВАЊЕ ПОМЈЕРАЊА ОБЈЕКТА

Задаци геодетског осматрања инжењерских објеката у непосредној су вези са укупним задацима осматрања стања објеката, односно елементима који се мјере и моделом за оцјену стања који се користи. У принципу се могу подијелити на [3][4]:

- одговарајућу дискретизацију објекта и одређивање периода регистравања величина од интереса,
- утврђивање стабилности тачака геодетских котролних мрежа и одређивање величине и карактера помјерања,
- оцјењивање параметара модела постојећег стања објекта и предвиђање будућих понашања.

У савременој литератури из ове области, дефинисана је нова терминологија деформација инжењерских објеката и деформационих мјерења. Деформације објеката су резултат процеса [294], [295]. Данашњи развој технике омогућава детаљно мјерење и анализу процеса. У складу са наведеним, може се закључити да тренд у области деформационих мјерења није само одређивање геометријских промјена објекта као феномена већ као динамичког процеса. То значи да је коначан циљ осматрања узимање у обзир узрочних сила и физичких особина објекта, јер управо узрочне силе и резултујуће деформације чине динамички систем. Може се рећи да

постоје четири категорије модела за оцјену стања инжењерских објеката и деформација (Слика 5-2). Најопштији и најсвеобухватнији модел стања објекта је динамички модел, а његовим упрошћавањем добијају се: статички, кинематички и модел конгруенције.



Слика 5-2. Хијерархија модела у деформационој анализи

Конвенционална деформациона анализа у времену и простору заснива се на двије класе тзв. описних модела: моделу конгруенције и кинематичком моделу. Модел конгруенције заснива се на тестирању подударности карактеристичних тачака геодетских контролних мрежа у различитим временским епохама, али у њему фактор времена фигурише посредно. Овај модел подразумева геометријско упоређивање оцјењених координата карактеристичних тачака у двије временске епохе. Иако се временски интервал између епоха експлицитно не узима у обзир, јер није битан за ову врсту анализе, информације о понашању објекта и околине могу се узети у обзир. Ово се првенствено односи на коришћење информација о стабилности тачака геодетских основних мрежа на основу геолошких и геотехничких истраживања и анализа. Улазни параметри у моделу су геодетска опажања а излазни оцјењене координате карактеристичних тачака у одређеном временском тренутку. Подударност тачака текуће епохе у односу на нулту (иницијалну) утврђује се примјеном статистичког тестирања [296]. Нулта хипотеза у овом моделу гласи: координате у текућој епохи исте су као у нултој епохи. Прије тестирања нулте хипотезе за обе епохе мјерења примјењује се МНК за случај Гаус-Марковљевог модела:

$$\begin{aligned}
 E(\mathbf{l}) &= \mathbf{Ax}, \\
 H_0 : \mathbf{Hx} &= 0, \\
 \sum_1 &= \sigma_0^2 \mathbf{Q} = \sigma_0^2 \mathbf{P}^{-1}.
 \end{aligned} \tag{5.78}$$

Основна величина статистичког тестирања је средње неуклапање:

$$\Theta = \sqrt{\frac{\mathbf{d}^T \mathbf{Q}_{dd}^+ \mathbf{d}}{h}} \tag{5.79}$$

гдје је:

\mathbf{d} - вектор разлика оцјењених координата између нулте и текуће епохе,

\mathbf{Q}_d - кофакторска матрица вектора координатних разлика \mathbf{d} и

$$h = \text{rang}(\mathbf{Q}_d).$$

Тест статистика нулте хипотезе, општег теста подударности, је количник квадрата средњег неуклапања и оцјене заједничког дисперзионог фактора за нулту и текућу епоху. Ако важи нулта хипотеза онда тест статистика има F расподелу, за усвојену вјероватноћу и бројеве степени слободе h и f из изравнања нулте и текуће епохе, односно:

$$P \left\{ \frac{\Theta^2}{s_0^2} \leq F_{h,f,1-\alpha} \mid H_0 \right\} = 1 - \alpha. \quad (5.80)$$

На овај начин се у ствари тестира диференцијална једначина $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{0}$ [3]. Глобалним тестом открива се да ли постоје значајно помјерене тачке геодетске контролне мреже. Ако постоје, у следећем кораку се локализују прво нестабилне тачке у основној мрежи, а затим на објекту. Неке од најпознатијих процедура спровођења овог статистичког тестирања, познате и као методе конвенционалне деформационе анализе, су: *Пелцерова метода* или *Хановерски поступак*, *Каспаријева метода*, *Метода Делфт*, *Метода Карлсруе*, *Велшова метода*, итд. [297]–[304].

Кинематички модел описује деформације на основу усвојене функције у којој вријеме фигурише непосредно, односно узимају се у обзир брзина и убрзање промјена. Описивање понашања, тј. помјерања и дисторзије објекта у простору и времену, омогућио је развој аутоматизованих мјерних система и метода мјерења. Иако су кинематички модели погодни за описивање помјерања тачака у функцији времена, у овим моделима се занемарује потенцијални однос између узрочних сила и деформација. Полиномска интерполација и хармонијске функције најчешће су коришћени математички алати у овим моделима. Просторно-временски однос између координата \mathbf{x}_1 у иницијалној епохи t_1 и координата \mathbf{x}_2 у текућој епохи t_2 описује се временски зависном функцијом:

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &= \mathbf{x}_1 + \frac{d\mathbf{x}}{dt}(t_2 - t_1) + \frac{1}{2} \frac{d^2\mathbf{x}}{dt^2}(t_2 - t_1)^2 + \dots \\ &= \mathbf{x}_1 + \dot{\mathbf{x}}\Delta t + \frac{1}{2} \ddot{\mathbf{x}}\Delta t^2 + \dots \end{aligned} \quad (5.81)$$

гдје су: $\dot{\mathbf{x}}$ и $\ddot{\mathbf{x}}$ средња брзина и убрзање тачака (параметри модела) у временском интервалу Δt . Ови параметри се оцјењују, а линеаризована једначина опажања у матричном облику је:

$$\mathbf{1} + \mathbf{v} = \begin{bmatrix} \mathbf{a}^T & \mathbf{a}^T \Delta t & \frac{1}{2} \mathbf{a}^T \Delta t^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}} \\ \dot{\mathbf{x}} \\ \ddot{\mathbf{x}} \end{bmatrix}. \quad (5.82)$$

У општем случају, овај систем припада регресионој анализи. Примјењује се као секвенционални алгоритам за изравнање, јер се на већ оцјењене координате додају мјерења из најновије епохе. Кинематички модел најчешће се примјењује кроз двокорачну анализу. У првом кораку независно се изравнавају епохе мјерења са датумом дефинисаним минималним трагом. Затим се упоређују оцијењене координате и утврђују стабилне тачке. У другом кораку се из кинематичког модела одређују брзине помјерања, при чему се ради поновно изравнање са датумом

дефинисаним стабилним тачкама. Модел је у теорији система познат и као временска серија, имајући у виду да се региструје и вријеме прикупљања података.

Напредни модели деформационе анализе не разматрају само промјену геометрије објекта у простору и времену. Они испитују и укључују узрочне унутрашње и спољашње силе које дјелују на објекат и одређују реакцију објекта на њих узимајући у обзир физичке особине објекта. Динамички систем објекта (динамички процес) образују три елемента: узрочне силе као улазни сигнали, транзиција њиховог дјеловања кроз објекат као процес трансфера и реакција објекта као излазни сигнал.

Статички модели, као облик узрочно-посљедичних динамичких модела, описују функционалну зависност узрочних сила и деформација. Узрочне силе посљедица су дјеловања оптерећења на објекат, а резултат њиховог дјеловања је промјена геометрије објекта. Пошто фактор времена није експлицитно садржан у статичким моделима, објекат треба да буде довољно дуго у стању равнотеже у обје епохе осматрања, односно прије и после оптерећивања објекта. Под довољно дуго у стању равнотеже подразумијева да се објекат, колико је то могуће, налази у стању мировања док се изводе мјерења. Кретање и дисторзије објекта сматрају се функцијом оптерећења, а не времена. За статичке моделе, физичка и геометријска структура, материјални параметри и друге карактеристичне величине објекта морају бити познате и формулисане у облику диференцијалних једначина које описују однос напона и деформација објекта. У литератури постоји још неколико термина којима се називају статички модели, а то су: теоријски модели, модели стања, параметарски, структурни или детерминистички модели. Поступак примјене статичких модела назива се моделски приступ. Ови модели често се примјењују при испитивању објеката на оптерећења која могу да поднесу.

Динамички модели су најоопштенији и свеобухватни модели, а служе за потпуно описивање природе динамичких система. Помјерање и дисторзије објекта сматрају се функцијом оптерећења и времена. Динамички модели могу бити параметарски и непараметарски. Имајућу у виду да су у реалним условима објекти стално у покрету, осматрање таквих објеката у смислу динамичких система мора бити перманентно, а то је могуће постићи само савременим аутоматизованим мјерним системима и методама.

Коначан избор модела деформационе анализе за утврђивање стања инжењерских објеката или њихових помјерања, осим од особина модела зависи од још два фактора. Како је већ наведено у поглављу 3, геодетски мјерни системи могу бити дио интегралних система осматрања стања објеката или самостални системи за одређивање само помјерања објеката. У складу с тим бира се и одговарајући модел деформационе анализе и метода за утврђивање помјерања. Такође, избор модела зависи од намјене система у погледу времена добијања информација о помјерањима. То значи да се могу бирати модели за утврђивање помјерања при накнадној обради података и/или у реалном времену.

Модели деформационе анализе и методе за утврђивање помјерања, само су један дио система за осматрање стања објеката. Неки од познатијих геодетских система за осматрање помјерања објеката описани су у поглављу 3, а у наставку су дате њихове специфичности у погледу третирања података мјерења и метода за утврђивање

помјерања. Нагласак је стављен на специфичности система за осматрање помјерања објеката у реалном времену.

Сагласно начину на који третирају мјерења, геодетски системи за осматрање помјерања објеката могу се подијелити у три категорије. Прва категорија су системи са потпуном накнадном обрадом података, гдје се сва опажања чувају у датотекама, а затим се сви подаци накнадно анализирају и обрађују. Ови системи не раде у реалном времену, али су због количине прикупљених података погодни за напредне моделе деформационе анализе и методе утврђивања помјерања.

Друга категорија система су они који користе резултате позиционирања, одређене директно у мјерним инструментима. Резултати ове дјелимичне обраде, најчешће скуп координата карактеристичних тачака и припадајуће кофакторске матрице, се затим користе у неком софтверском пакету који врши анализу помјерања [296]. У случајевима када се користи више мјерних система или више истих мјерних инструмената, системи за осматрање могу бити проширени функционалностима за додатно изравнање мрежа. Неки од уочених недостатака ових система су неодговарајуће стохастичко моделовање и неправилно третирање корелације мјерења. Ови проблеми су наглашени и обрађени у поглављу 3. Системи из ове категорије подржавају накнадну и обраду података у реалном или блиском реалном времену.

Трећу категорију чине системи који користе необрађене податке мјерења. Код ових система сва мјерења се шаљу у контролни центар система, где се врши анализа и обрада података и утврђивање помјерања. Подржавају и накнадну обраду података, али су најпогоднији за обраду података у реалном времену.

Дио система за осматрање помјерања, поред модула за анализу и обраду података и модула за утврђивање помјерања може бити и алармни систем (модул) који се активира кад се утврди да су се догодила значајна помјерања. При изградњи система који су алармно оријентисани, мора се водити рачуна о неколико важних особина које модул за алармирање мора имати. Прво, аларм се мора укључити што је прије могуће након што су утврђена значајна помјерања. Друго, број активирања „лажних аларма“ мора бити што је могуће мањи. Посљедња, али ништа мање важна особина, је да се сигурно региструје најмања могућа величина помјерања. Општи закључак је да ови системи морају радити у реалном времену, користити брзе алгоритме обраде података и алгоритме за утврђивање наглих помјерања узимајући у обзир тачност мјерења. Претходно описани деформациони модели и методе утврђивања помјерања, нису се показали као најбоља рјешења за системе осматрања помјерања у реалном времену. Из тог разлога је пажња истраживача у посљедње вријеме усмјерена на прилагођавање постојећих и проналазак нових метода за брзо утврђивање статистички значајних помјерања. Прве методе за откривање наглих помјерања развијене су у производној индустрији, у оквиру система за контролу квалитета производа. Неке од најпознатијих, чије могућности су истражене и примјењене у области геодетског осматрања помјерања, су: контролни графикони (енг. *Shewhart-chart*), различити облици филтера промјенљивих средина са тежинама (енг. *Weighted Moving Average - WMA*), контролни графикони са кумулативним сабирањем (енг. *CUMulative sUMmation - CUsUM chart*), итд.

6. ПРАКТИЧНА ИСТРАЖИВАЊА

Кроз практични дио истраживања испитана је могућност расположивих геодетских мјерних система (роботизоване тоталне станице, дигиталног прецизног нивелира и ГНСС пријемника) за регистровање дискретних и континуираних помјерања објеката. Испитивања у оквиру овог истраживања су, за разлику од сличних испитивања других истраживача, спроведена у реалним теренским условима и над прецизним симулаторима помјерања. Планирање експеримената практичних истраживања вршено је по методологији која се предлаже за планирање перманентног геодетског осматрања поменутих технологијама. Посебна пажња посвећена је испитивању могућности ГНСС технологије за регистровање помјерања, као релативно нове технологије у области осматрања објеката и са сталним побољшањима у погледу тачности и поузданости позиционирања. Такође, велике могућности и предности ове технологије очекују се од развоја све већег броја мрежа перманентних станица, и релативно добре покривености корекцијама било које територије која може бити предмет осматрања.

Извођени (симулирани) вектори помјерања изабрани су тако да се по интензитету обухвате вриједности могуће за већину инжењерских објеката, а са друге стране да су у одређеној математичкој (статистичкој) вези са тачношћу геодетских мјерних система којима се региструју. На тај начин омогућено је да се изведу закључци о односу планиране тачности, остварене тачности и вектора помјерања. Са сличним теоријским разматрањем изабране су и вриједности фреквенција (учесталости) извођења (симулирања) вектора континуираних помјерања, с тим да су за иницијалне вриједности усвојене декларисане (граничне) вриједности препоручене за сваки мјерни систем од стране произвођача геодетске опреме.

Процес регистровања изведених помјерања је у одређеној мјери аутоматизован, како би се испитала могућност контроле и управљања системима за перманентно геодетско осматрање. За приказивање резултата регистровања помјерања коришћени су одговарајући координатни системи и модели трансформације координата, такви да се на правилан начин могу сагледати компоненте вектора помјерања (интензитет и смјер) у просторном, хоризонталном и вертикалном смислу. За сваку мјерну технологију коришћене су методе позиционирања које су у теоријским разматрањима дефинисане као методе погодне за позиционирање, а самим тим и регистровање помјерања, у реалном и блиском реалном времену. Посебно су истражене могућности регистровања помјерања коришћењем мреже перманентних ГНСС станица.

Претходна оцјена тачности урађена је на основу тачности мјерне технологије, која је декларисана од стране произвођача и одређена према међународним (*ISO*) стандардима, што је савремени приступ у дефинисању претходне оцјене тачности мјерених величина и метода позиционирања. При планирању експеримената идентификовани су, посебно за сваку технологију, извори грешака који у датим условима могу утицати на процес регистровања помјерања и дефинисани начини њиховог елиминисања и минимизирања приликом извођења мјерења. Сви закључци о регистрованим помјерањима засновани су на примјени више од једног статистичког теста, како би се обезбиједила њихова тачност и поузданост.

6.1. ПЛАНИРАЊЕ ЕКСПЕРИМЕНТА

Планом практичних истраживања било је предвиђено да се експерименти спроведу на привременом геодетском полигону у Универзитетском граду у Бањој Луци. Полигон (Слика 6-1) је симулација геодетске контролне мреже. Планирано је да инструменти изнад тачака основне мреже буду присилно центрисани на стативу, а као тачка на којој се постављају симулатори помјерања да се користи претходно материјализован геодетски стуб са плочом за присилно центрисање.



Слика 6-1. Полигон за практична истраживања

За спровођење практичних истраживања у оквиру ове дисертације, на располагању су били сљедећи геодетски мјерни системи:

- роботизована тотална станица *Leica TS15 I* у комбинацији са *Leica CS15* котролером (плус *CTR16* радио модем) и *Leica GRZ 122* призматичним пасивним 360° рефлексором (Слика 6-2),
- дигитални прецизни нивелир *Leica DNA 03* у комбинацији оригиналном инварском летвом *GWCL60* (Слика 6-3) и
- ГНСС пријемник (са интегрисаном антенном) *GEOMAX Zenith40* у комбинацији са *GEOMAX ZeniusX* котролером (Слика 6-4).

Leica TS15 I је роботизована тотална станица која може бити коришћена самостално или у комбинацији са *Leica CS15* котролером за даљинско управљање у „remote control“ радном режиму. Ова тотална станица се користи са *Leica SmartWorxViva* софтвером, инсталираном на самој станици и на котролеру за даљинско управљање. Веза између станице и котролера најчешће се успоставља преко радио модема.



Слика 6-2. Роботизована тотална станица Leica TS15, припадајући контролер за даљинско управљање и 360° рефлектор

Као роботизована тотална станица новије генерације произвођача *Leica*, *TS15 I* је опремљена системом за аутоматско препознавање рефлектора (*Automatic Target Recognition – ATR*), који уз режим рада *Lock* омогућава праћење препознатог рефлектора у покрету. Кратки прекиди догледања између инструмента и рефлектора елиминишу се софтверским путем, предвиђањем путање рефлектора на основу претходних мјерења. Уколико се догоде дужи прекиди у праћењу рефлектора, коришћењем напредне функционалности „*Power Search*“ инструмент има могућност да поново релативно брзо пронађе рефлектор. Основне техничке карактеристике ове мултифункционалне роботизоване тоталне станице, коришћене у планирању експеримента, приказане су у Табели 6-1. Више информација се може пронаћи у [305].

Табела 6-1. Основне техничке карактеристике роботизоване тоталне станице *Leica TS15*

Мјерење углова	тачност Hz, V, Z ¹	1 "
	резолюција читавања	0,1 "
	метода	апсолутна, континуирано, читање на дијаметрално супротним мјестима
	врста и тачност компензације при мјерењу углова	четвороосна компензација, 0,5 "
Мјерење дужина	домет мјерења на призматични 360° рефлектор (GRZ 122) ²	2 000 m
	тачност и просјечно вријеме мјерења ^{3 4}	стандардно: 1 mm + 1,5 ppm / просјечно 2,4 s
		брзо: 2 mm + 1,5 ppm / просјечно 0,8 s
		континуално: 3 mm + 1,5 ppm / просјечно 0,15 s
	резолюција читавања	0,1 mm
најкраће растојање за мјерење дужина	1,5 m	
Моторизација	максимална брзина ротације	45 °/s

¹ Стандардно одступање према *ISO 17 123 – 3*,

² Облачно вријеме, без измаглице, видљивост до 40 km, без исијавања топлоте,

³ Стандардно одступање према *ISO 17 123 – 4*,

⁴ На стандардни (округли) призматични рефлектор.

ATR	домет на призматични 360° рефлектор	само ATR мод 800 m, Lock мод 600 m
	најкраће растојање за мјерење дужина на призматични 360° рефлектор	само ATR мод 1,5 m, Lock мод 5 m
	тачност мјерења углова у ATR моду (Hz, V, Z) ¹	1"
	просјечно вријеме мјерења на стандардни призматични рефлектор	од 3 s до 4 s
	максимална тангенцијална брзина кретања рефлектора коју инструмент у стандардном Lock моду може пратити	5 m/s на 20 m, 25 m/s на 100 m
	максимална радијална брзина кретања рефлектора коју инструмент у Tracking Lock моду може пратити	4 m/s
Температурни радни опсег		од - 20 °C до + 50 °C

Роботизована тотална станица *TS15 I* има могућност да кроз модул „*Survey – Auto Points*“ (аутоматски режим рада) врши аутоматско регистровање мјерених величина и позиционирање рефлектора у покрету. Могуће је дефинисати неколико критеријума по којима се врши аутоматско регистровање. У области осматрања помјерања објеката могу се задавати компонентне вектора помјерања који се треба десити да би се извршило поновно регистровање или временски интервал између два узастопна мјерења. Ова тотална станица додатно је опремљена и камером која кроз модул „*Image Assited Surveying*“ у реалном времену (*live streaming*) омогућава визирање и регистровање мјерења ка објекту од интереса без оператеровог визирања кроз дурбин. Модул „*Image Notes*“ омогућава фотографисање, снимање екрана, скицирање и повезивање прикупљених информација са било којим објектом који је предмет осматрања.

Leica DNA03 је дигитални прецизни нивелир нове генерације. Намјењен је за обављање великог броја геодетских задатака у областима премјера, инжењерске геодезије, геодетских референтних система и мрежа и геодетског осматрања инжењерских објеката. Користи се у комбинацији са бар-код летвама различитог типа, а њихов избор зависи од захтијеване тачности и могућности примјене одређеног типа летве у конкретним условима гдје се обавља задатак.



Слика 6-3. Дигитални прецизни нивелир *Leica DNA03* са припадајућом инварском летвом и системом за аутоматско управљање

Теренски софтвер инсталиран у рачунарској јединици нивелира омогућава аутоматско читавање и регистровање одсјечака на летвама, рачунање висинских разлика и висина тачака. Основне техничке карактеристике *Leica DNA03* дигиталног прецизног нивелира, коришћене при планирању експеримента приказане су у Табели 6-2. Више информација може се пронаћи у [306].

Дигитални прецизни нивелир *Leica DNA03* може се користити као мобилни или стационарни мјерни инструмент. Такође, коришћењем спољног рачунара могу се регистровати мјерења и вршити њихова даља обрада. У том случају се екстерним командама конфигурише инструмент и покрећу мјерења.

Табела 6-2. Основне техничке карактеристике дигиталног прецизног нивелира *Leica DNA03*

Тачност електронског мјерења ⁵	са инварским летвама	0,3 mm
	са стандардним фибер-глас летвама	1,0 mm
Домет електронског мјерења	од 1,8 m до 110 m	
Резолуција електронског читавања	0,01 mm	
Просјечно вријеме појединачног мјерења	3 s	
Врста и тачност компензације	тип компензатора	компензатор са клатном и магнетним пригушењем
	подручје компензације	± 10'
	тачност компензације	0,3"
Температурни радни опсег	од -20 °C до + 50 °C	

Произвођач *Leica Geosystems* је за аутоматско даљинско управљање инструментима развио *GeoCOM* протокол, који омогућава израду и извршавање корисничких апликација за обављање задатака недоступних кроз функције уграђене у софтвер инструмента. Управо ова чињеница искоришћена је да се нивелир *Leica DNA03* испита као могући мјерни систем за перманентно геодетско осматрање помјерања објеката. *GeoCOM* протокол може се користити на два начина, као једноставни *ASCII* (*American Standard Code for Information Interchange*) протокол или као потпуно развијени интерфејс корисничких функција. *ASCII* протокол састоји се од захтјева и одговора. То значи да се при коришћењу *GeoCOM* протокола у овом облику прво формира захтјев, који се са рачунарске јединице серијском везом (протоколом) шаље ка инструменту. Инструмент извршава задатак и шаље одговор, а затим се примљена порука декодира. У другом случају, користи се уобичајено позивање функција у неком од напредних програмских језика (*Python, Java, C/C++, C#...*). Посматрано из геодетског угла, *GeoCOM* протокол је синхронизована комуникација од тачке до тачке, заснована на *RPC* (*Remote Procedure Call*) протоколу. У тој комуникацији су два учесника: корисник (вањски рачунарски уређај) и извршилац (геодетски мјерни инструмент или сервер са подацима). Комуникација се састоји од корисничког захтјева, спровођења захтјева са стране извршиоца и слања одговора кориснику. *RPC* протокол омогућава да се при извођењу једноставних задатака на инструменту, којим се управља путем рачунара, сваком задатку придружује индентификациони број. Тај број се у инструменту користи за препознавање захтјева, укључујући и све задане параметре. У сложенијим примјенама, *GeoCOM* кроз напредне програмске језике омогућава позивање свих функција на инструменту из корисничког интерфејса припремљеног на екстерној рачунарској јединици. Код овакве примјене протокола, корисник припрема апликацију на рачунару као да се она извршава директно на инструменту. Значи, *GeoCOM* и *RPC* протокол омогућавају да се функције система позивају са рачунара, а извршавају на инструменту. Поменуте могућности *GeoCOM* протокола препознате су и искоришћене за припрему корисничке апликације у *Python* програмском језику, кроз коју је управљано инструментом, регистровани одсјечци на летви и вријеме извршења мјерења, без учешћа оператера.

Zenith40 један је од ГНСС пријемника нове генерације произвођача *GeoMax*. Опремљен је *NovAtel, SATEL* и *Lemo* технологијама како би испунио високе корисничке захтјеве и најновије стандарде у области ГНСС мјерења. Овим ГНСС

⁵ Стандардно одступање мјерења висинске разлике на 1 km, нивелањем напријед-назад, према *ISO 17 123 - 2*

пријемником може се управљати различитим типовима корисничких контролера на којима могу бити инсталирани различити теренски ГНСС софтвери.



Слика 6-4. ГНСС пријемник GeoMax Zenith40 са припадајућим контролером за даљинско управљање

Приликом планирања експеримента узета је у обзир препорука произвођача да се користи GeoMax ZeniusX контролер, са инсталираним X-PAD Ultimate теренским софтвером, како би се обезбиједила потпуна компатибилност мјерног система. Основне техничке карактеристике Zenith40 ГНСС пријемника, коришћене при планирању експеримента, приказане су у Табели 6-3. Више информација може се пронаћи у [307].

Табела 6-3. Основне техничке карактеристике ГНСС пријемника GeoMax Zenith40

Сигнали које пријемник може да прати	GPS	L1, L2, L2C, L5
	ГЛОНАСС	L1, L2, L2C, L3
	BeiDou	B1, B2, B3
	Galileo	E1, E5a, E5b, AltBOC, E6
Учесталост понављања мјерења (<i>positioning rates</i>)	препоручено 5 Hz (20 HZ опционо)	
Могуће методе позиционирања и тачност ⁶	RTK	хоризонтално 8 mm + 1 ppm вертикално 15 mm + 1 ppm
	NRTK	хоризонтално 8 mm + 0,5 ppm вертикално 15 mm + 0,5 ppm
	вријеме потребно за иницијализацију	просјечно 4 s
Комуникација	GSM	Quad - Band GSM
	Bluetooth®	уређај класе 2
	RTK протоколи	CMR, CMR+, RTCM 2.2, 2.3, 3.0, 3.1, 3.2 MSM
	NRTK	VRS, FKP, iMAX, MAC (RTCM SC 104)
Температурни радни опсег	од -40 °C до 65 °C	

ГНСС пријемник Zenith40 нуди могућност пријема више сигнала са свих тренутно постојећих сателитских система. Опремљен је са 555 канала. GeoMax Q-Lock Pro RTK напредна функционалност смањује вријеме рјешавања фазних неодређености и елиминира вишеструку рефлексију сигнала, чиме омогућава једноставно позиционирање чак и у изазовним окружењима. Такође, ова функционалност омогућава да пријемник аутоматски детектује доступне сервисе ГНСС корекција и примјени податке са оног који обезбијеђује највећу тачност.

⁶ У каталогу произвођача наводи се да прецизност, тачности и поузданост позиционирања као и вријеме потребно за иницијализацију зависе од многих фактора, укључујући број сателита, вријеме мјерења, атмосферске услове, постојање вишеструке рефлексије сигнала, итд. Приказане бројке односе се на нормалне па чак идеалне услове.

Практична истраживања планирана су као два главна експеримента. Први експеримент односи се на регистровање дискретних помјерања, а други на регистровање континуираних помјерања.

Циљ првог експеримента је утврђивање могућности расположивих мјерних система за регистровање дискретних помјерања познатог интензитета и смјера, на основу једног читавања мјерних величина за одређену методу позиционирања и у аутоматизованом режиму рада мјерних система. Сви мјерни системи коришћени су у истим условима и над истим симулаторима помјерања. На основу резултата добијених у експериментима, утврђен је однос тачности позиционирања појединим технологијама и вектора помјерања, за конкретне амбијенталне услове при којима су експерименти извођени. Основе за планирање и спровођење овог експеримента биле су смјернице из *ISO* стандарда по којима се расположиви мјерни системи испитују у теренским условима. Резултати експеримента упоређени су са резултатима сличних експеримената у лабораторисјким условима, приказаним у претходним истраживањима. Одређени закључци су примјенљиви у области пасивних мрежа за геодетско осматрање, као и области активних геодетских мрежа за дугопериодична осматрања. Међутим, примарни закључци односе се на област активних геодетских мрежа и краткостројичних осматрања објеката и представљали су полазну основу за други експеримент.

Циљ другог експеримента, који се заснива на закључцима првог, је утврђивање могућности расположивих мјерних система за регистровање континуираних помјерања, познатог интензитета, смјера и брзине дешавања најмањег вектора помјерања, на основу аутоматског регистровања положаја геодетског сензора у покрету. Овај експеримент је, такође, проведен у теренским условима, па се може рећи да представља теренско испитивање мјерних система у динамичком режиму рада. Закључци експеримента примјенљиви су на активне геодетске мреже за краткостројична осматрања објеката, тј. осматрање објеката у реалном времену.



Слика 6-5. Координатни столови и симулатор дискретних помјерања

Као уређаји за прецизно извођење дискретних помјерања изабрани су машински координатни столови за хоризонтално и вертикално помјерање, широког радног опсега и робусности у погледу причвршћивања предмета од интереса на њиховој радној површини (Слика 6-5). Столови су израђени од ливеног алуминијума и челика, са прецизно изглоданим клизачима у облику „ластиног репа“. Помјерања се изводе помоћу ручних точкова са изведеном подјелом. Нулта или почетна вриједност на подјели може се подесити у било ком тренутку, а најмањи подиок на подјели који се може извести је 0,05 mm на столу за хоризонтална помјерања и

0,02 mm на столу за вертикална помјерања. Ове вриједности уједно су и декларисане тачности координатних столова. Максимални ход радне површине координатног стола за хоризонтална помјерања је 150 mm x 150 mm, а радне површине координатног стола за вертикална помјерања 80 mm.



Слика 6-6. Симулатор континуираних помјерања

За извођење континуираних помјерања намјенски је пројектован и израђен једноосни симулатор (робот, манипулатор) (Слика 6-6). Кинематика симулатора осмишљена је тако да се може вршити подешавање жељене вриједности нагиба радне површине (равни у којој се врши симулација), у опсегу од -90° до 90° , са кораком 30° . Наведени степен слободе рачуна се као пола осе, а може се подешавати само у фази мировања симулатора. Ова оса може се називати и позициона оса. Други степен слободе оснажен је корачним електро мотором NEMA23, и каишним преносником чија вриједност преносног односа износи $i=2$. Овај степен слободе служи као контурна оса, у оквиру које се врши помјерање геодетског мјерног сензора у простору, заједно са конзолом (тетивом) на којој се он налази. Тако изведен механички склоп омогућава кретање сензора по кружници која је нагнута под пројектованим углом. С обзиром да корачни електро мотори имају основни корак од $1,8^\circ$, што је за планиране експерименте било недовољно са становишта резолуције помјерања, у управљачком систему је извршен *microstepping* чија вриједност износи $1/128$. На овај начин постигнуто је да за један импулс који управљачка јединица пошаље драјву корачног електро мотора, ротор заокрене мотор за $360^\circ/25\ 600$. Узимајући у обзир и преносни однос преносника, вриједност угла ротације конзоле на којој се налази геодетски сензор, за један импулс који управљачка јединица проследи драјву мотора, износи $0,007^\circ$. То значи да за дужину конзоле од 100 mm, од центра ротације до центра сензора, најмање помјерање сензора (најмањи инкремент помјерања) износи 0,01 mm. Сљедећи услов који је постављен при пројектовању симулатора континуираних помјерања је да се геодетски сензор након кретања врати на почетну позицију и да та почетна позиција буде иста за све експерименте проведене при једном постављању експеримента и симулатора. Овај услов испуњен је тако што је симулатор опремљен индуктивним сензором. Прије процеса симулације континуираних помјерања радна конзола на којој је причвршћен геодетски сензор пролази циклус иницијализације и уз помоћ индуктивног сензора увијек заузима исти почетни положај. За управљање радом симулатора предвиђено је коришћење HMI (*Human-Machine Interface*) уређаја и управљачке јединице посебно развијене за обављање планираних експеримената. Управљање симулатором помоћу овог HMI уређаја омогућава оператору дефинисање путање геодетског сензора према плану експеримента. То

подразумијева дефинисање планиране брзине ротације и број пуних ротација конзоле и геодетског сензора причвршћеног на њој. Да би се избијегло спровођење експеримента без претходне иницијализације симулатора, оператер добија одговарајућа упозорења и информације на *HMI* уређају.

У експерименту регистровања дискретних помјерања извођене су сљедеће величине помјерања: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 и 50 mm. Вектори просторних помјерања извођени су тако што су по осама координатних столова извођена помјерања једнаких интензитета, чија резултанта је једна од наведених вриједности. Овакав распон и вриједности изабрани су из два разлога. Први разлог је што су овим распонем обухваћене вриједности амплитуда помјерања великих и високих објеката [308]. Други разлог је што су за расположиве мјерне системе коришћене у практичним истраживањима, имајући у виду тачности позиционирања, обухваћене величине помјерања које су у интервалу од $\sigma_{\text{POZ}}/3$ до $5 \cdot \sigma_{\text{POZ}}$, гдје је σ_{POZ} стандардно одступање позиционирања. Смјер извођења дискретних помјерања дефинисан је осама координатних столова, чија оријентација је вршена на начин описан у наставку текста.

У експерименту регистровања континуираних помјерања, испитана је могућност расположивих геодетских мјерних система за одређивање путање тачке у покрету. Планом експеримента било је предвиђено да се призматични рефлектор, ГНСС пријемник и нивелманска летва хармонично крећу на конзоли симулатора одређене дужине и са унапријед познатим вриједностима инкремента ротације и брзине. Циљ експеримента био је да се утврди могућност регистровања помјерања, која симулирају динамичка помјерања објеката настала услјед дјеловања динамичког оптерећења на њега. Вриједности инкремента ротације, тј. намањи интензитети вектора помјерања који су извођени у експерименту, одабрани су тако што су усвојене вриједности које се сигурно могу регистровати одређеном технологијом и у одређеном периоду дана. Ове вриједности су за сваки мјерни систем утврђене у претходно описаном експерименту регистровања дискретних помјерања.

За номиналне вриједности фреквенција регистровања помјерања (f_n), усвојене су вриједности декларисане од стране произвођача коришћене геодетске опреме. За роботизовану тоталну станицу и ГНСС пријемник, који су кроз пратеће софтвере опремљени модулима за аутоматско регистровање тачака, препоручена фреквенција регистровања је 5 Hz (сваких 0,2 s) и та вриједност коришћена је као номинална при планирању експеримента. Дигитални прецизни нивелир коришћен у оквиру практичних истраживања није од стране произвођача декларисан као мјерни систем за перманентно и осматрање геодетског сензора у покрету, стога није опремљен програмима и модулима за аутоматско регистровање положаја као што је то случај са РТС и ГНСС пријемником. За планирање експеримента регистровања континуираних вертикалних помјерања овим мјерним системом вриједност номиналне фреквенције регистровања положаја одређена је на основу средње (просјечне) вриједност времена потребног за регистровање одсјечака на летви. Декларисана средња вриједност времена потребног за регистровање одсјечака на летви код нивелира *Leica DNA03* је 3 s, па је вриједност номиналне фреквенције 0,33 Hz. На симулатору континуираних помјерања, инкременти помјерања су

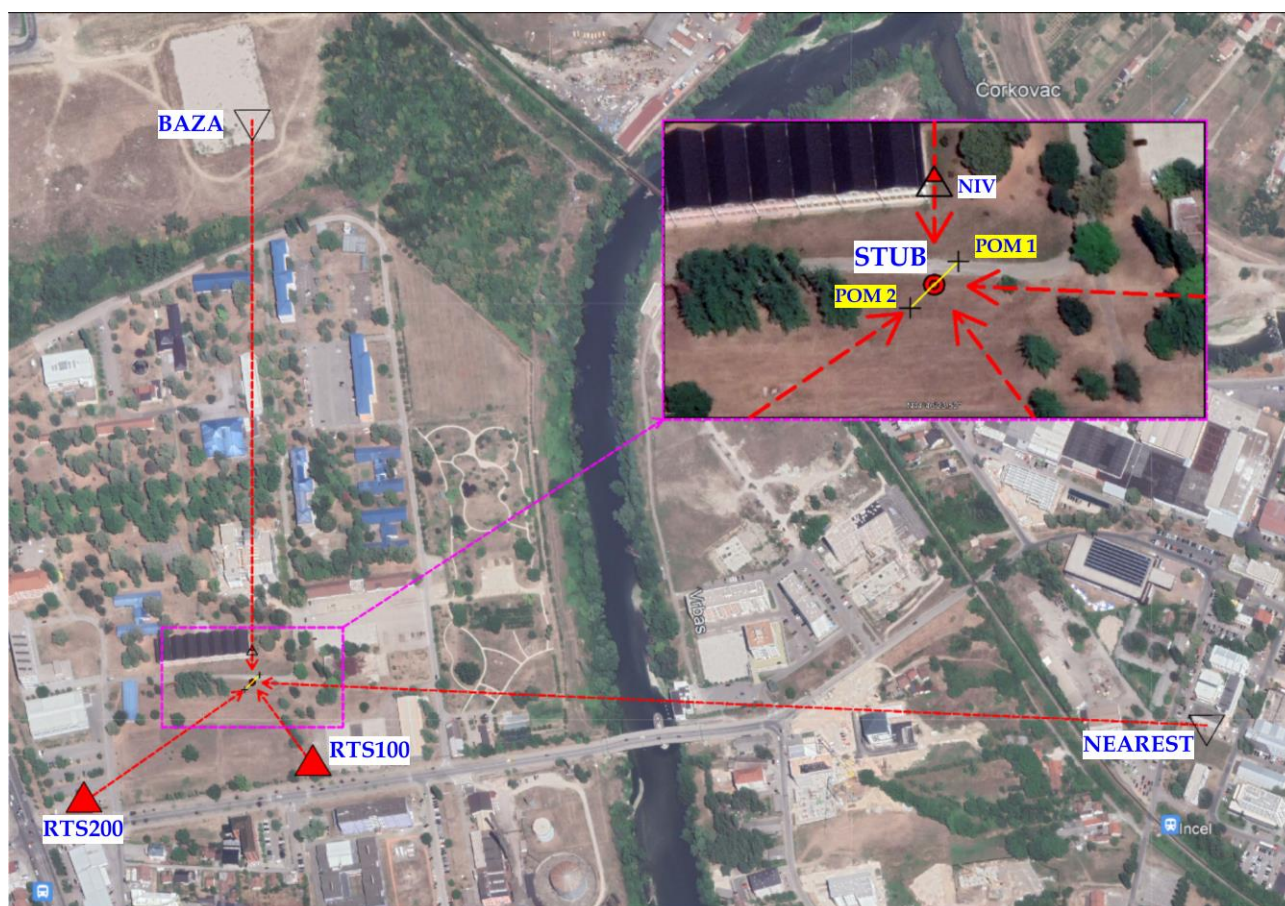
извођени при неколико фреквенција: f_n , $f_n/2$, $f_n/3$ и $f_n/5$. Мјерења су извођена са истих мјерних мјеста са којих су регистрована дискретна помјерања. Приликом провођења експеримента са тоталном станицом и ГНСС пријемником, конзола симулатора постављана је у хоризонталан положај, док је при регистрању помјерања дигиталним прецизним нивелиром конзола постављана у вертикалан положај. Сви случајеви експеримента поновљени су пет пута, како би се обезбиједила поузданост добијених резултата. У дисертацији су приказани само случајеви првог извођења. Имајући у виду техничке карактеристике симулатора континуираних помјерања, може се констатовати да је изведена путања геодетских сензора теоријски позната, са одређеним стандардним одступањем које је занемарљиво у односу на декларисану тачност регистрања помјерања. На овај начин обезбијеђена је основа за извођење закључака о могућностима геодетских мјерних система за одређивање путање тачке у покрету.

Симулатор континуираних помјерања генерише путању која се може описати једначином просторне кружнице у равни локалног хоризонта. Овакав положај теоријске путање изабран је како би се испитало сљедеће:

- тачност и поузданост регистрања положаја рефлектора у покрету,
- утицаји мјерења углова и дужине ка рефлектору у покрету на могућност регистрања помјерања,
- тачност и поузданост регистрања положаја ГНСС пријемника у покрету,
- утицај кретања фазног центра антене ГНСС пријемника на регистрање помјерања,
- тачност и поузданост регистрања положаја летве у покрету и
- утицај кретања вертикално постављене летве на регистрање положаја тачака и регистрање помјерања.

Распоред тачака симулиране геодетске контролне мреже (Слика 6-7) изабран је у зависности од два критеријума: теренских услова и експерименталних поставки везаних за циљеве истраживања. Тачке изнад којих је постављана роботизована тотална станица изабране су тако да се налазе на удаљеностима 100 m (*RTS100*) и 200 m (*RTS200*) од симулатора помјерања (*STUB*) и да су правци визирања са њих управни или се поклапају са смјером извођења дискретних помјерања. На овај начин испитана је зависност регистрања помјерања по правцу вектора опажања или управно на њега, односно, утицај тачности мјерења дужина, хоризонталних и вертикалних углова на регистрање вектора просторних, хоризонталних и вертикалних помјерања.

Положај нивелира (*NIV*) изабран је тако да у току извођења мјерења инструмент буде што је могуће више заштићен од директног утицаја Сунца, да при томе првац визуре буде управан на симулаторе и вертикално постављену летву и да је удаљеност од инструмента до летве 20 m, што је за изабрани тип летве максимална удаљеност препоручена од стране произвођача.



Слика 6-7. Скица распореда тачака геодетске контролне мреже за практична истраживања

Положај тачке изнад које се поставља базни ГНСС пријемник (*BAZA*) за регистровање помјерања по систему база-ровер изабран је тако да отвореност неба буде што је могуће боља, да у близини нема објеката који би могли бити извор вишеструке рефлексије и да је удаљеност до симулатора 500 m. Правац од почетне позиције на симулатору до тачке изнад које се поставља базни пријемник оријентисан је југ-сјевер и са правцем извођења дискретних помјерања, образују угао од 45° . Распоред перманентних ГНСС станица у односу на које је вршено позиционирање ГНСС технологијом, дефинисан је геометријом Мреже перманентних станица Републике Српске (СРПОС). Најближа перманентна станица ове мреже (*NEAREST*), која је у једном дијелу истраживања коришћена као замјена за базни кориснички успостављен пријемник налази се на удаљености око 1 km од симулатора помјерања.

За правилно приказивање и анализирање изазваних и регистрованих помјерања изабрани су локални координатни системи, из разлога што је у претходним истраживањима [264] закључено да постојећи референтни координатни системи и модели трансформације координата за подручје гдје се спроводе истраживања, не задовољавају теоријске критеријуме описане у поглављима 4.1 и 4.2. Резултати позиционирања и регистровања помјерања роботизованом тоталном станицом, прво су анализирани у локалном 3Д координатном систему, који према теоријским основама представља локални астрономски (топоцентрични) координатни систем. Затим су резултати приказивани и анализирани у локалним 2Д и 1Д координатним системима, дефинисаним у односу на раван локалног хоризонта. За приказивање и анализу резултата регистровања дискретних помјерања дигиталним прецизним

нивелиром, изабран је локални 1Д координатни систем, дефинисан такође у односу на раван локалног хоризонта. Резултати позиционирања и регистровања помјерања ГНСС технологијом, прво су анализирани у локалном 3Д координатном систему, који по теоријским основама представља локални елипсоидни координатни систем. Почетне (приближне) 3Д координате тачака система одређене су RTK позиционирањем коришћењем високо-прецизног сервиса позиционирања у реалном времену у оквиру СРПОС мреже [264]. Слично као и за случај роботизоване тоталне станице, резултати регистровања помјерања су у наставку експеримента анализирани у локалном 2Д и 1Д координатном систему.

Оријентација симулатора помјерања извршена је сагласно избору координатних система за поједине технологије. Координатне осе описаних симулатора оријентисане су тако да се поклапају са осамима локалних координатних система. За усмјеравање оса симулатора према плану експеримента, коришћене су двије помоћне тачке (*POM1* и *POM2*), којима је дефинисан правац по коме се изводе дискретна помјерања.

Планом експеримента предвиђено је да се позиционирање роботизованом тоталном станицом изводи поларном методом и тригонометријским нивелманом, са по једним читавањем хоризонталних и вертикалних углова и просторне дужине. Извођење и регистровање помјерања овим мјерним системом планирано је у неколико периода у току дана, како би се испитао утицај атмосферских прилика и адекватности постојећих модела корекција мјерења на регистровање помјерања.

Дигиталним прецизним нивелиром позиционирање је извођено геометријским нивелманом, са по једним читавањем вертикално постављене летве, која се постепено спушта за планиране вриједности вертикалних помјерања. Слично као за тоталну станицу, мјерења су реализована у неколико епоха током дана.

За ГНСС технологију планирано је позиционирање RTK методом, у два режима рада. Прво су регистровања помјерања вршена у односу на базни кориснички успостављен пријемник, при чему је веза базног и покретног пријемника успосваљена GSM путем.

Затим је регистровање помјерања вршено на основу позиционирања у оквиру СРПОС мреже и коришћењем расположивих алгоритама за генерисање корекција: *NEAREST*, *VRS*, *MAX* и *iMAX*. Регистровање дискретних помјерања ГНСС технологијом вршено је у два карактеристична случаја: у случајно изабраном дневном тренутку и у току ноћи, при повољном геометријском распореду сателита и очекиваним минималним грешкама усљед утицаја јонсфере.

Опште посматрано за све три технологије, дискретна помјерања регистрована су у неколико карактеристичних случајева: 1) у случајно изабраним периодима дана и условима на полигону, 2) у периодима дана са релативно неповољним условима за извођење мјерења у којим се очекује најмања тачност позиционирања и 3) у периодима дана са повољним условима за извођење мјерења у којима се очекује највећа тачност позиционирања.

За прорачуне тачности, обраду, анализу и тестирање добијених резултата коришћени су подаци о тачности мјерења и позиционирања појединим технологијама, који су дефинисани у складу са описаним *ISO* стандардима. Прије почетка практичних истраживања расположиви мјерни системи и њихова

сљедивост, у складу са поменутиим стандардима, испитани су у акредитованој метролошкој лабораторији.

Прорачун тачности позиционирања роботизованом тоталном станицом заснован је на избору поларне методе за хоризонтална позиционирања и тригонометријског нивелмана за вертикална позиционирања. Имајући у виду декларисану тачност мјерења роботизованом тоталном станицом, наведену у *Табели 6-1* и примјеном Гаусовог закона о преносу грешака на наведене методе позиционирања, очекивана тачност хоризонталног позиционирања са позиције RTS200 је 1,6 mm, а вертикалног 1,0 mm. Очекивана укупна тачност просторног позиционирања овим мјерним системом је 1,8 mm. За позиционирање са позиције RTS100, очекивана тачност хоризонталног позиционирања 1,4 mm, а вертикалног 0,5 mm, па је очекивана укупна тачност просторног позиционирања 1,5 mm. Наведени прорачун односи се на регистровање дискретних помјерања. За регистровање континуираних помјерања, прорачун тачности позиционирања роботизованом тоталном станицом је нешто другачији, имајући у виду да је декларисана тачност мјерења дужина нешто нижа него у претходном случају (*Табела 6-1*). Узимајући у обзир наведене бројчане вриједности, добија се да очекивана тачност хоризонталног позиционирања при регистровању континуираних помјерања са позиције RTS200 износи 3,4 mm, а вертикалног 1 mm. Очекивана тачност просторног позиционирања у наведеном случају је 3,5 mm.

Очекивана тачност вертикалног позиционирања дигиталним прецизним нивелиром по методи геометријског нивелмана, према подацима из *Табеле 6-2* и на основу израза за прорачун тачности је 0,1 mm. Иста вриједност очекивана је и при регистровању континуираних помјерања.

За регистровање дискретних помјерања ГНСС пријемником, имајући у виду декларисану тачност приказану у *Табели 6-3*, очекивана тачност хоризонталног позиционирања RTK методом је 8 mm, вертикалног 15 mm, а просторног 17 mm. Исте вриједности очекиване су и при регистровању континуираних помјерања.

6.2. ПРИКУПЉАЊЕ ПОДАТАКА

Подаци за практична истраживања прикупљани су сагласно плану експеримената. Мјерења су вршена у августу 2021. године, у периоду високих температура. Каснијом анализом извјештаја Републичког хидрометеоролошког завода Републике Српске утврђено је да је период прикупљања података био најтоплији дио године [309].

Процес мјерења у сваком експерименту метролошки је обезбијеђен, узимајући у обзир теоријска разматрања и поставке везане за изворе грешака мјерних система изложене у првом поглављу и процедуре из *ISO* стандарда за еталонирање инструмената. Циљ пажљивог планирања експеримента и метролошког обезбијеђења је свођење грешака регистровања помјерања искључиво на грешке мјерних инструмената. Сви мјерни инструменти, опрема и прибор прије процеса мјерења изложени су дјеловању спољних услова (акомодација инструмената и прибора), у трајању према препорукама произвођача. Такође, на полигону практичних истраживања провјерени су основни теоријски услови о исправности свих мјерних система. Услови су провјеравани према поступцима испитивања

савремених мјерних система, описаним у стручној литератури и према упутствима од стране произвођача.

Симулатори помјерања постављани су на геодетски стуб, а веза је остварена преко постоља са три положајна завртња и носача геодетских инструмента и прибора који се може ротирати, како би се могло извршити хоризонтисање и оријентација симулатора (Слика 6-8).



Слика 6-8. Постављање симулатора на полигону практичних истраживања

За хоризонтисање симулатора коришћен је високо-прецизни инклинометар, са тачношћу хоризонтисања од $0,005^\circ$ (Слика 6-9).



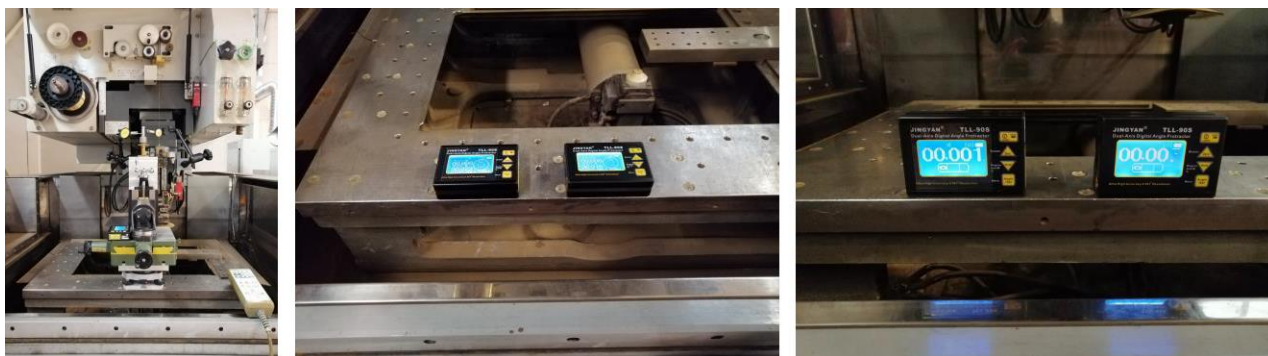
Слика 6-9. Хоризонтисање симулатора помјерања

Симулатори су оријентисани помоћу тоталне станице, преко помоћних тачака и поступком описаним у претходном поглављу (Слика 6-10).



Слика 6-10. Оријентација симулатора помјерања

Инклинометар и симулатори претходно су испитани и провјерени на високопрецизним уређајима производног машинства (Слика 6-11). У току експеримената у периодима високих температура симулатори су били заштићени од директног сунчевог утицаја.



Слика 6-11. Испитивање симулатора помјерања

Роботизована тотална станица је у току мјерења постављана на статив и била је заштићена од директног сунчевог утицаја, што се предлаже као обавезан услов при перманентном геодетском осматрању (Слика 6-12).



Слика 6-12. Постављање и заштита роботизоване тоталне станице у току регистравања помјерања

Процесом мјерења управљало се преко контролера, без директног контакта оператера и инструмента, како би се избјегле грешке услед дјеловања оператера на инструмент и како би се потпуно симулирао рад система за перманентно геодетско осматрање примјеном РТС. Мјерења у експерименту регистравања дискретних помјерања извођена су у пет периода дана: 1) рано ујутро, 2) у случајном јутарњем периоду (приближно на половини периода од изласка Сунца до поднева), 3) у подне, 4) касно поподне и 5) у току ноћи (приближно на половини периода од заласка до изласка Сунца). Иако је прикупљање података у експериментима извођено у релативно кратким временским интервалима и без прекида, вршене су аутоматске корекције мјерења, директним уношењем атмосферских параметара у меморију инструмента (Слика 6-13). Атмосферски параметри (температура, влажност и притисак) мјерени су вишенамјенским мјерним уређајем *Testo-435* и припадајућом сондом [310].

Прикупљање података у експерименту регистравања континуираних помјерања подразумијевало је аутоматско регистравање 3Д положаја призматичног 360° рефлектора у покрету. Мјерења су извођена у случајном јутарњем периоду. Положај центра ротације и почетне тачке ротације регистровани су у двије серије са по десет читавања у статичком режиму рада мјерног система, како би се одредиле највјероватније вриједности положаја ових карактеристичних тачака.



Слика 6-13. Мјерење атмосферских параметара за корекцију мјерења

Дигитални прецизни нивелир је у току мјерења постављан на статив и додатно је био заштићен од директног сунчевог утицаја (Слика 6-14).



Слика 6-14. Постављање и заштита дигиталног прецизног нивелира у току регистравања помјерања

Процесом мјерења управљало се преко рачунара, кроз корисничку апликацију која је за потребе практичних истраживања написана у *Python* програмском језику. На тај начин је и при испитивању могућности дигиталног прецизног нивелира избјегнут контакт оператера и инструмента. Прикупљање података у експерименту регистравања дискретних помјерања вршено је у осам периода дана: 1) рано ујутро (један сат прије изласка Сунца); 2) у случајном јутарњем периоду (оквирно један сат послје изласка Сунца); у три случајна дневна периода: 3) оквирно на половини периода од изласка Сунца до поднева, 4) у подне, 5) на половини периода од поднева до заласка Сунца, 6) у случајном послјеподневном периоду (оквирно један сат прије заласка Сунца), 7) у касном поподневном периоду (један сат послје заласка Сунца) и 8) у току ноћи (оквирно на половини периода од заласка до изласка Сунца). При извођењу мјерења у току ноћи коришћен је вјештачки извор монохроматске свијетлости, распоређене и усмјерене управно на вертикално постављену летву (Слика 6-15).



Слика 6-15. Регистравање помјерања дигиталним прецизним нивелиром у току ноћи

Прикупљање података у експериментима извођено је у релативно кратким временским интервалима и без прекида. Такође, вршено је и мјерење атмосферских параметара сензором у нивелиру, који су коришћени за рачунање корекција читања директно у софтверу инструмента и у тренутку читавања. На почетку сваког

експеримента, температура коју је читавао нивелир поређена је са температуром читаном *Testo* уређајем. Резултати су били сагласни до вриједности $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Мјерења у експерименту регистровања континуираних помјерања подразумевала су аутоматско регистровање 1Д положаја вертикалне летве у покрету и вршена су оквирно на половини периода од изласка Сунца до поднева.

Базни кориснички успостављен ГНСС пријемник је у току експеримента био постављен на статив, у окружењу са максималном отвореношћу неба и без вјештачких објеката у близини (Слика 6-16).



Слика 6-16. Кориснички успостављен базни пријемник са панорамским приказом локације

Веза са покретним пријемником успостављана је коришћењем GSM модема, интегрисаних у пријемнике. Исти тип комуникације коришћен је и при позиционирању у односу на мрежу перманентних ГНСС станица. Процесом мјерења покретним пријемником управљано је путем контролера, кроз оригинални софтвер произвођача опреме. Мјерења у експерименту регистровања дискретних помјерања су, сагласно плану практичних истраживања, извођена у два периода: у случајно изабраном пријеподневном периоду и у току ноћи при повољном геометријском распореду сателита. За планирање периода мјерења и прорачун повољних DOP параметара, коришћено је веб оријентисано софтверско рјешење отвореног кода *GNSS Planning Online* [311] развијено од стране компаније *Trimble*. Мјерења у експерименту регистровања континуираних помјерања вршена су у случајном пријеподневном периоду и подразумевала су аутоматско регистровање положаја ГНСС пријемника у покрету.

6.3. ОБРАДА, АНАЛИЗА И ТЕСТИРАЊЕ ДОБИЈЕНИХ РЕЗУЛТАТА

Подаци мјерења обрађени су аутоматски током регистровања помјерања, у софтверима мјерних система. За роботизовану тоталну станицу и ГНСС пријемник софтвери су били доступни на теренским контролерима. Мјерења дигиталним прецизним нивелиром обрађена су у процесору инструмента, на основу наредби послатих са рачунара на који су се враћали готови резултати позиционирања. Претходно је провјерена усклађеност математичких модела који се користе уз поједине мјерне системе, са моделима описаним у теоријским поглављима дисертације. Обрада података односи се на рачунање корекција мјерења и позиционирање по планираним методама, описаним у поглављима 2 и 5. Коначни

резултати позиционирања у експерименту регистровања дискретних помјерања записани су и приказани у облику координата карактеристичних тачака, у изабраним и претходно описаним координатним системима. У експерименту регистровања континуираних помјерања су поред координата карактеристичних позиција геодетских сензора у покрету регистровани, записани и приказани временски тренуци у којим је извршено позиционирање, у јединственом систему времена.

6.3.1. Анализа и тестирање регистровања дискретних помјерања

Регистрована дискретна помјерања анализирана су и тестирана према теориској поставци да су геодетски сензори помјерани за тачно одређен просторни вектор (познатог интензитета, правца и смјера) и то тако да су по свакој оси изабраног локалног координатног система извођена помјерања једнаких интензитета. Сагласно теоријским разматрањима тестирано је сљедеће:

- једнакост изведених и регистрованих просторних вектора помјерања и
- једнакост изведених и регистрованих хоризонталних и вертикалних компоненти вектора помјерања.

За основну провјеру једнакости изведених и регистрованих вектора помјерања, односно провјеру њихове опште сагласности у границама тачности мјерења, примјењено је тестирање линеарних хипотеза у облику [226], [296]:

$$T = \frac{d^T Q_d^{-1} d}{k \sigma_0^2} \sim F_{1-\frac{\alpha}{2}}(f_1, f_2) \Big|_{H_0}, \quad (5.83)$$

гдје је:

$d = d^P - d^M$ - разлика изведеног d^P и регистрованог d^M вектора помјерања,

Q_d - кофакторска матрица разлике изведеног и регистрованог вектора помјерања,

k - ранг кофакторске матрице Q_d ,

σ_0^2 - дисперзиони фактор формиране разлике,

α - ниво статистичке значајности (у овом истраживању коришћено 0,05) и

f_1 и f_2 - бројеви степени слободе оцјена изведеног и регистрованог вектора помјерања.

Детаљна провјера једнакости изведених и регистрованих вектора помјерања подразумијевала је тестирање и за интензитете и оријентације. Интензитети и оријентација регистрованих вектора помјерања рачунати су из координата карактеристичних тачака. Како је у теоријским разматрањима наведено и закључено, тачност позиционирања и одређивања вектора помјерања дефинише се за сваки пројекат посебно и у односу на очекивану величину вектора помјерања. Према резултатима и закључцима претходних истраживања и захтјевима који се постављају у пројектима геодетског осматрања, тачност одређивања вектора помјерања треба бити од 10% до 20% очекиване вриједности вектора помјерања [4], [77], [312]. Услов је провјераван за сваки регистровани вектор помјерања рачунањем односа стандардног одступања и интензитета вектора помјерања σ_{d^M} / d^P . Такође, овај

критеријум је у оквиру практичних истраживања ове дисертације, коришћен и као други тест да се утврди једнакост изведеног и регистрованог вектора помјерања. Очекивано је да разлика изведеног и регистрованог вектора помјерања не буде већа од наведене вриједности, при чему је у тестирању као гранична вриједност коришћена горња граница од 20%.

6.3.1.1. Анализа и тестирање регистровања дискретних помјерања роботизованом тоталном станицом

За векторе дискретних помјерања регистроване роботизованом тоталном станицом у случајном јутарњем периоду, у Табелама 6-4 и 6-6 су са позиција RTS100 и RTS200, детаљно приказани резултати тестирања. Ова два случаја су детаљно приказана јер су у тим периодима регистрована континуирана помјерања истим инструментом, а закључци експеримената регистровања дискретних помјерања коришћени су за планирање експеримената регистровања континуираних помјерања. У Табелама 6-5 и 6-7 су за остале случајеве извођења вектора дискретних помјерања регистрованих роботизованом тоталном станицом у различитим периодима дана приказани сумарни резултати тестирања.

Табела 6-4. Резултати регистровања дискретних просторних помјерања роботизованом тоталном станицом у случајном јутарњем периоду са позиције RTS100

Интензитет изведеног вектора помјерања d_{XYZ}^P [mm]	Интензитет регистрованог вектора помјерања d_{XYZ}^M [mm]	Стандардно одступање регистрованог вектора помјерања $\sigma_{d_{XYZ}^M}$ [mm]	Разлика $r_{d_{XYZ}} = d_{XYZ}^P - d_{XYZ}^M$ [mm]	T	F	Однос $\sigma_{d_{XYZ}^M} / d_{XYZ}^P$ [%]	Однос $r_{d_{XYZ}} / d_{XYZ}^P$ [%]
1	1,1	±0,7	-0,1	0,0	5,0	70	10
2	2,3	±0,7	-0,3	3,9	5,0	35	16
3	2,8	±0,7	0,2	0,1	5,0	23	7
4	4,1	±0,7	-0,1	0,0	5,0	18	3
5	4,5	±0,7	0,5	1,9	5,0	14	9
6	5,6	±0,7	0,4	2,8	5,0	12	7
7	6,9	±0,7	0,1	0,0	5,0	10	1
8	7,3	±0,7	0,7	1,1	5,0	9	9
9	8,7	±0,7	0,3	0,2	5,0	8	4
10	9,7	±0,7	0,3	0,2	5,0	7	3
15	14,3	±0,7	0,8	1,4	5,0	5	5
20	20,4	±0,7	-0,4	2,6	5,0	4	2
25	25,6	±0,7	-0,6	1,7	5,0	3	2
30	30,1	±0,7	-0,1	0,0	5,0	2	0
35	35,6	±0,7	-0,6	1,0	5,0	2	2
40	40,2	±0,7	-0,2	0,1	5,0	2	0
45	45,3	±0,7	-0,3	3,9	5,0	2	1
50	49,9	±0,7	0,1	0,0	5,0	1	0

За све векторе просторних помјерања, регистроване роботизованом тоталном станицом у случајном јутарњем периоду са позиције RTS100, тестирањем линеарних хипотеза утврђено је да не постоји статистички значајна разлика од изведених вектора помјерања, за остварене резултате мјерења и усвојени ниво статистичке значајности. Стандардно одступање регистрованих вектора помјерања је ±0,7 mm.

Оптимальна тачност регистравања помјерања остварена је у 83 % случајева, и то за величине помјерања веће од 3 mm. Распон разлика изведених и регистрованих интензитета вектора помјерања креће се од -0,6 mm до +0,8 mm, средња вриједност је 0,0 mm са стандардним одступањем $\pm 0,4$ mm. Односи разлика добијених између изведених и регистрованих интензитета вектора помјерања и интензитета изведених вектора помјерања су мањи или једнаки 20 % за све величине помјерања веће или једнаке 1 mm. Добијене разлике су у 94 % случајева мање од $1 \cdot \sigma_{d_{xyz}}$, а у свим случајевима су мање од $2 \cdot \sigma_{d_{xyz}}$. Такође, за све векторе помјерања је угловна разлика изведених и регистрованих смјерова мања од вриједности угла која се добије као однос оствареног стандардног одступања и интензитета вектора помјерања. Закључак је да су роботизованом тоталном станицом у наведеном периоду и са наведене позиције регистроване све изведене величине помјерања веће или једнаке 1 mm.

Табела 6-5. Сумарни резултати регистравања дискретних просторних помјерања роботизованом тоталном станицом са позиције RTS100

Период регистравања помјерања	T_{\min} T_{\max}	мин. $r_{d_{xyz}}$ макс. $r_{d_{xyz}}$ [mm]	Средња вриједност $r_{d_{xyz}}$ [mm]	$\sigma_{d_{xyz}}$ [mm]	$r_{d_{xyz}}$ мање од $1\sigma_{d_{xyz}}$ [%]	$r_{d_{xyz}}$ мање од $2\sigma_{d_{xyz}}$ [%]	$r_{d_{xyz}}$ мање од $3\sigma_{d_{xyz}}$ [%]	Минимална величина помјерања за коју је регистрован интензитет и смјер [mm]
Рано ујутро	0,0	-0,6	+0,1	$\pm 0,2$	100 %	100 %	100 %	1
	2,8	+0,4						
Подне	0,0	-1,0	+0,6	$\pm 0,7$	39 %	100 %	100 %	5
	5,0	+1,4						
Касно послеподне	0,0	-1,3	+0,6	$\pm 0,7$	39 %	100 %	100 %	4
	4,5	+0,9						
Ноћни период	0,0	-1,3	-0,6	$\pm 0,7$	39 %	100 %	100 %	4
	4,5	+0,9						

За све векторе просторних помјерања, регистроване роботизованом тоталном станицом у различитим периодима дана, са позиције RTS100, тестирањем линеарних хипотеза утврђено је да не постоји статистички значајна разлика од изведених вектора помјерања, за остварене резултате мјерења и усвојени ниво статистичке значајности. Стандардно одступање регистрованих вектора помјерања је у свим случајевима $\pm 0,7$ mm, што значи да је оптимальна тачност регистравања помјерања остварена у свим периодима за величине помјерања веће од 3 mm. Распон разлика изведених и регистрованих интензитета вектора помјерања креће се од -1,3 mm до +1,4 mm, тј. добијене разлике у свим случајевима су мање од $2 \cdot \sigma_{d_{xyz}}$. Односи разлика добијених између изведених и регистрованих интензитета вектора помјерања и интензитета изведених вектора помјерања су мањи или једнаки 20 % за све величине помјерања веће од 5 mm, у свим периодима. Такође, у свим периодима и за све векторе помјерања веће од 5 mm, угловна разлика изведених и регистрованих смјерова мања је од вриједности угла која се добије као однос оствареног стандардног одступања и интензитета вектора помјерања.

Општи закључак је да су роботизованом тоталном станицом у свим наведеним периодима, са позиције RTS100, регистроване све изведене величине помјерања веће од 5 mm. Разлике изведених и регистрованих интензитета вектора помјерања су у свим случајевима мање од $2 \cdot \sigma_{d_{XYZ}}$. Може се закључити да су у свим периодима регистроване величине помјерања веће од $5 \cdot \sigma_{POZ}$, чиме су потврђени претпоставка и прорачун из плана практичних истраживања. Такође, може се закључити да су у периодима дана повољнијим за позиционирање РТС добијени бољи резултати и да су регистроване величине помјерања веће од $3 \cdot \sigma_{POZ}$.

Табела 6-6. Резултати регистрања дискретних просторних помјерања роботизованом тоталном станицом у случајном јутарњем периоду са позиције RTS200

Интензитет изведеног вектора помјерања	Интензитет регистрованог вектора помјерања	Стандардно одступање регистрованог вектора помјерања	Разлика	T	F	Однос	Однос
d_{XYZ}^P [mm]	d_{XYZ}^M [mm]	$\sigma_{d_{XYZ}^M}$ [mm]	$r_{d_{XYZ}} = d_{XYZ}^P - d_{XYZ}^M$ [mm]			$\sigma_{d_{XYZ}^M} / d_{XYZ}^P$ [%]	$r_{d_{XYZ}} / d_{XYZ}^P$ [%]
1	1,1	±1,8	-0,1	0,0	5,0	183	10
2	2,5	±1,8	-0,5	0,1	5,0	92	23
3	4,2	±1,8	-1,2	1,7	5,0	61	39
4	5,7	±1,8	-1,7	1,2	5,0	46	43
5	5,0	±1,8	0,0	0,0	5,0	37	1
6	5,6	±1,8	0,4	0,1	5,0	31	6
7	6,9	±1,8	0,1	0,0	5,0	26	2
8	8,8	±1,8	-0,8	0,2	5,0	23	9
9	10,1	±1,8	-1,1	2,3	5,0	20	13
10	10,9	±1,8	-0,9	3,6	5,0	18	9
15	15,6	±1,8	-0,6	0,1	5,0	12	4
20	19,2	±1,8	0,8	0,2	5,0	9	4
25	24,5	±1,8	0,5	0,1	5,0	7	2
30	29,6	±1,8	0,4	0,1	5,0	6	2
35	34,5	±1,8	0,5	0,2	5,0	5	1
40	39,3	±1,8	0,7	3,2	5,0	5	2
45	44,8	±1,8	0,2	0,0	5,0	4	0
50	49,9	±1,8	0,1	0,0	5,0	4	0

За све векторе просторних помјерања, регистроване роботизованом тоталном станицом у случајном јутарњем периоду са позиције RTS200, тестирањем линеарних хипотеза утврђено је да не постоји статистички значајна разлика од изведених вектора помјерања, за остварене резултате мјерења и усвојени ниво статистичке значајности. Стандардно одступање регистрованих вектора помјерања је $\pm 1,8$ mm. Оптимална тачност регистрања помјерања остварена је у 56 % случајева, и то за величине помјерања веће од 8 mm. Распон разлика изведених и регистрованих интензитета вектора помјерања креће се од -1,7 mm до +0,8 mm, средња вриједност је -0,2 mm са стандардним одступањем $\pm 0,7$ mm. Односи разлика добијених између изведених и регистрованих интензитета вектора помјерања и интензитета изведених вектора помјерања су мањи или једнаки 20 % за све величине помјерања веће од 4 mm. Добијене разлике су у свим случајевима мање од $1 \cdot \sigma_{d_{XYZ}}$. За све векторе помјерања је угловна разлика изведених и регистрованих смјерова мања од

вриједности угла која се добије као однос оствареног стандардног одступања и интензитета вектора помјерања. Закључак је да су роботизованом тоталном станицом у наведеном периоду и са наведене позиције регистроване све величине помјерања веће од 4 mm.

Табела 6-7. Сумарни резултати регистровања дискретних просторних помјерања роботизованом тоталном станицом са позиције RTS200

Период регистровања помјерања	Tmin Tmax	мин. $r_{d_{XYZ}}$ макс. $r_{d_{XYZ}}$ [mm]	Средња вриједност $r_{d_{XYZ}}$ [mm]	$\sigma_{d_{XYZ}}$ [mm]	$\Gamma_{d_{XYZ}}$ мање од $1\sigma_{d_{XYZ}}$ [%]	$\Gamma_{d_{XYZ}}$ мање од $2\sigma_{d_{XYZ}}$ [%]	$\Gamma_{d_{XYZ}}$ мање од $3\sigma_{d_{XYZ}}$ [%]	Минимална величина помјерања за коју је регистрован интензитет и смјер
Рано ујутро	0,0	-1,1	-0,1	$\pm 0,6$	100 %	100 %	100 %	3 mm
	3,2	+0,8						
Подне	0,0	-3,5	-0,4	$\pm 1,6$	78 %	100 %	100 %	7 mm
	4,0	+2,5						
Касно послеподне	0,0	-2,7	+0,4	$\pm 1,1$	89 %	100 %	100 %	5 mm
	3,7	+2,0						
Ноћни период	0,0	-2,9	+0,1	$\pm 1,4$	78 %	100 %	100 %	2 mm
	3,7	+2,2						

За све векторе просторних помјерања, регистроване роботизованом тоталном станицом у различитим периодима дана, са позиције RTS200, тестирањем линеарних хипотеза утврђено је да не постоји статистички значајна разлика од изведених вектора помјерања, за остварене резултате мјерења и усвојени ниво статистичке значајности. Стандардно одступање регистрованих вектора помјерања је у свим случајевима $\pm 1,8$ mm, што значи да је оптимална тачност регистровања помјерања остварена у свим периодима за величине помјерања веће од 8 mm. Распон разлика изведених и регистрованих интензитета вектора помјерања креће се од -3,5 mm до +2,5 mm, тј. добијене разлике у свим случајевима су мање од $2 \cdot \sigma_{d_{XYZ}}$. Односи разлика добијених између изведених и регистрованих интензитета вектора помјерања и интензитета изведених вектора помјерања су мањи или једнаки 20 % за све величине помјерања веће од 7 mm, у свим периодима. Такође, у свим периодима и за све векторе помјерања веће од 5 mm, угловна разлика изведених и регистрованих смјерова је мања од вриједности угла која се добије као однос оствареног стандардног одступања и интензитета вектора помјерања.

Општи закључак је да су роботизованом тоталном станицом у свим наведеним периодима, са позиције RTS200, регистроване све изведене величине помјерања веће од 7 mm. Разлике изведених и регистрованих интензитета вектора помјерања су у свим случајевима мање од $2 \cdot \sigma_{d_{XYZ}}$. Може се закључити да су у свим периодима регистроване величине помјерања веће од $5 \cdot \sigma_{POZ}$, чиме је и за регистровање помјерања са ове позиције потврђена претпоставка и прорачун из плана практичних истраживања. И у овом случају су у периодима дана повољнијим за позиционирање РТС добијени бољи резултати, односно регистроване су величине помјерања веће од $3 \cdot \sigma_{POZ}$.

6.3.1.2. Анализа и тестирање регистровања дискретних помјерања дигиталним прецизним нивелиром

У Табели 6-8 приказани су резултати тестирања регистровања вектора дискретних вертикалних помјерања дигиталним прецизним нивелиром, у случајном јутарњем периоду, а у Табели 6-9 сумарни резултати тестирања регистровања у осталим периодима дана.

Табела 6-8. Резултати регистровања дискретних вертикалних помјерања дигиталним прецизним нивелиром у случајном јутарњем периоду

Интензитет изведеног вектора вертикалних помјерања	Интензитет регистрованог вектора вертикалних помјерања	Стандардно одступање регистрованог вектора вертикалних помјерања	Разлика	T	F	Однос	Однос
d_H^P [mm]	d_H^M [mm]	$\sigma_{d_H^M}$ [mm]	$r_{d_H} = d_H^P - d_H^M$ [mm]			$\sigma_{d_H^M} / d_H^P$ [%]	r_{d_H} / d_H^P [%]
-0,10	-0,21	±0,1	0,11	1,7	5,0	100	110
-0,20	-0,27	±0,1	0,07	0,3	5,0	50	35
-0,30	-0,39	±0,1	0,09	0,4	5,0	33	30
-0,40	-0,49	±0,1	0,09	0,4	5,0	25	23
-0,50	-0,41	±0,1	-0,09	0,4	5,0	20	18
-0,60	-0,70	±0,1	0,10	2,0	5,0	17	17
-0,70	-0,73	±0,1	0,03	0,1	5,0	14	4
-0,80	-0,90	±0,1	0,10	2,0	5,0	13	13
-0,90	-0,87	±0,1	-0,03	0,1	5,0	11	3
-1,00	-1,13	±0,1	0,13	1,2	5,0	10	13
-1,10	-1,31	±0,1	0,21	2,2	5,0	9	19
-1,74	-1,76	±0,1	0,02	0,0	5,0	6	1
-2,32	-2,46	±0,1	0,14	1,0	5,0	4	6
-2,91	-2,84	±0,1	-0,07	0,3	5,0	3	2
-3,45	-3,45	±0,1	0,00	0,0	5,0	3	0
-4,03	-4,15	±0,1	0,12	1,4	5,0	2	3
-4,65	-4,64	±0,1	-0,01	0,0	5,0	2	0
-5,23	-5,34	±0,1	0,11	1,7	5,0	2	2
-5,77	-5,91	±0,1	0,14	1,0	5,0	2	2
-8,68	-8,79	±0,1	0,11	1,7	5,0	1	1
-11,55	-11,49	±0,1	-0,06	0,2	5,0	1	1
-14,39	-14,56	±0,1	0,17	1,5	5,0	1	1
-17,32	-17,40	±0,1	0,08	0,3	5,0	1	0
-20,18	-20,14	±0,1	-0,04	3,4	5,0	0	0
-23,09	-23,32	±0,1	0,23	2,7	5,0	0	1
-25,95	-26,19	±0,1	0,24	4,0	5,0	0	1
-28,86	-29,03	±0,1	0,17	1,5	5,0	0	1

За све векторе вертикалних помјерања, регистроване дигиталним прецизним нивелиром у случајном јутарњем периоду, тестирањем линеарних хипотеза утврђено је да не постоји статистички значајна разлика од изведених вектора помјерања, за остварене резултате мјерења и усвојени ниво статистичке значајности. Стандардно одступање регистрованих вектора помјерања је ±0,1 mm. То значи да је оптимална тачност регистровања помјерања остварена у 85 % случајева, и то за

величине помјерања веће од 0,4 mm. Распон разлика изведених и регистрованих интензитета вектора помјерања креће се од -0,09 mm до +0,24 mm, средња вриједност је +0,08 mm са стандардним одступањем $\pm 0,09$ mm. Односи разлика добијених између изведених и регистрованих интензитета вектора помјерања и интензитета изведених вектора помјерања су мањи или једнаки 20 % за све величине помјерања веће од 0,4 mm. Добијене разлике су у 56 % случајева мање од $1 \cdot \sigma_{d_H}$, у 89 % су мање од $2 \cdot \sigma_{d_H}$, и у свим случајевима су мање од $3 \cdot \sigma_{d_H}$. Смјер вертикалних помјерања правилно је регистрован за сва изведена помјерања. Закључак је да су дигиталним прецизним нивелиром у наведеном периоду регистроване све величине помјерања веће од 0,4 mm.

Табела 6-9. Сумарни резултати регистровања дискретних вертикалних помјерања дигиталним прецизним нивелиром

Период регистровања помјерања	Tmin Tmax	мин. r_{d_H} макс. r_{d_H} [mm]	Средња вриједност r_{d_H} [mm]	σ_{d_H} [mm]	r_{d_H} мање од $1\sigma_{d_H}$ [%]	r_{d_H} мање од $2\sigma_{d_H}$ [%]	r_{d_H} мање од $3\sigma_{d_H}$ [%]	Минимална величина помјерања за коју је регистрован интензитет и смјер [mm]
Рано ујутро	0,0	-0,14	-0,02	$\pm 0,07$	70 %	93 %	100 %	0,1
	4,5	+0,14						
Случајни дневни период прије подне	0,0	-0,26	+0,03	$\pm 0,13$	26 %	67 %	85 %	0,8
	9,7	+0,25						
Подне	0,0	-0,07	+0,19	$\pm 0,12$	26 %	74 %	100 %	1,0
	28,9	+0,38						
Случајни дневни период после подне	0,0	-0,14	+0,10	$\pm 0,15$	59 %	89 %	100 %	0,9
	30,4	+0,39						
Случајни послеподневни период	0,0	-0,22	+0,05	$\pm 0,13$	33 %	56 %	89 %	0,9
	13,5	+0,26						
Вечерњи период	0,0	-0,16	+0,02	$\pm 0,10$	30 %	85 %	100 %	0,4
	4,9	+0,15						
Ноћни период	0,0	-0,14	-0,01	$\pm 0,07$	78 %	96 %	100 %	0,2
	4,8	+0,14						

За већину вектора вертикалних помјерања, регистрованих дигиталним прецизним нивелиром у различитим периодима дана, тестирањем линеарних хипотеза је утврђено да не постоји статистички значајна разлика од изведених вектора помјерања, за остварене резултате мјерења и усвојени ниво статистичке значајности. Стандардно одступање регистрованих вектора помјерања је у интервалу од $\pm 0,07$ mm до $\pm 0,14$ mm, што значи да је оптимална тачност регистровања помјерања остварена у свим периодима за величине помјерања веће од 0,6 mm. У повољним периодима дана оптимална тачност остварена је за величине помјерања веће од 0,3 mm. Распон разлика изведених и регистрованих интензитета вектора помјерања креће се од -0,26 mm до +0,39 mm, тј. добијене разлике у свим случајевима мање су од $3 \cdot \sigma_{d_H}$. Односи разлика добијених између изведених и регистрованих интензитета вектора помјерања и интензитета изведених вектора помјерања су мањи или једнаки 20 % за све величине помјерања веће од 1,0 mm, у свим периодима дана. Такође, у свим периодима и за све изведене векторе вертикалних помјерања смјер је правилно регистрован.

Општи закључак је да су дигиталним прецизним нивелиром у свим наведеним периодима, регистроване све изведене величине помјерања веће од 1,0 mm. Такође, може се закључити да су у периодима дана повољним за вертикално позиционирање, по методи прецизног геометријског нивелмана, разлике изведених и регистрованих интензитета вектора помјерања у свим случајевима мање од $2 \cdot \sigma_{d_H}$. У наведеним условима су регистроване величине помјерања веће од $5 \cdot \sigma_{POZ}$, чиме је и за регистровање вертикалних помјерања дигиталним прецизним нивелиром потврђена претпоставка и прорачун из плана практичних истраживања. У периодима дана неповољним за вертикално позиционирање по методи прецизног геометријског нивелмана, разлике изведених и регистрованих интензитета вектора помјерања у свим случајевима мање су од $3 \cdot \sigma_{d_H}$. Такође, у наведеним периодима могућност регистровања вертикалних помјерања двоструко је лошија, односно могуће је регистровати величине помјерања веће од $10 \cdot \sigma_{POZ}$. И за регистровање дискретних помјерања дигиталним прецизним нивелиром у најповољнијим периодима дана добијени су бољи резултати, односно регистроване су величине помјерања веће од $3 \cdot \sigma_{POZ}$.

6.3.1.3. *Анализа и тестирање регистровања дискретних помјерања ГНСС технологијом у односу на кориснички успостављен базни пријемник*

Имајући у виду да је кроз план и циљеве истраживања посебан акценат стављен на испитивање могућности ГНСС технологије за регистровање помјерања, добијени резултати за ову технологију су у тексту дисертације детаљно приказани. У првом кораку су, за све изведене случајеве, анализирани и тестирани резултати регистровања дискретних просторних помјерања. Затим су анализирани и тестирани резултати регистровања хоризонталне и вертикалне компоненте тих истих помјерања.

Регистровање дискретних помјерања ГНСС технологијом у односу на кориснички успостављен базни пријемник, било је први корак у истраживању могућности ове технологије. Како је већ поменуто, помјерања су регистрована у два карактеристична случаја: случајни и повољни услови.

У Табелама 6-10, 6-11 и 6-12 су за векторе дискретних помјерања регистроване ГНСС технологијом у случајним условима и у односу на кориснички успостављен базни пријемник, детаљно приказани резултати тестирања.

Табела 6-10. Резултати регистравања просторних помјерања ГНСС технологијом, у случајним условима и у односу на кориснички успостављен базни пријемник

Интензитет изведеног вектора помјерања	Интензитет регистрованог вектора помјерања	Стандардно одступање регистрованог вектора помјерања	Разлика	Γ	F	Однос	Однос	Просторни угао између изведеног и регистрованог вектора помјерања	Просторна дужина између изведеног и регистрованог положаја	Однос просторне дужине између изведеног и регистрованог положаја и интензитета вектора помјерања
d_{XYZ}^P	d_{XYZ}^M	$\sigma_{d_{XYZ}^M}$	$r_{d_{XYZ}} = d_{XYZ}^P - d_{XYZ}^M$			$\sigma_{d_{XYZ}^M} / d_{XYZ}^P$	$r_{d_{XYZ}} / d_{XYZ}^P$			
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]			[%]	[%]	[°]	[mm]	[%]
1	11,9	±11,2	-10,9	1,1	5,0	1121	1090	54	11,4	1139
2	14,2	±11,4	-12,2	1,2	5,0	570	609	60	13,3	664
3	9,8	±8,2	-6,8	1,5	5,0	274	228	68	9,1	304
4	7,0	±7,7	-3,0	0,0	5,0	194	75	57	5,8	146
5	3,7	±5,7	1,4	0,0	5,0	114	27	48	3,7	75
6	12,6	±12,4	-6,6	3,5	5,0	207	110	39	8,8	147
7	14,8	±12,5	-7,8	2,6	5,0	179	111	48	11,4	162
8	18,6	±8,8	-10,6	1,5	5,0	110	133	65	16,8	210
9	15,7	±8,4	-6,7	1,6	5,0	93	74	59	13,5	150
10	15,0	±10,6	-5,0	0,2	5,0	106	50	24	7,1	71
15	19,2	±8,7	-4,2	0,2	5,0	58	28	21	7,6	50
20	23,1	±8,0	-3,1	0,2	5,0	40	16	20	8,1	40
25	33,1	±9,3	-8,1	1,3	5,0	37	32	6	8,6	34
30	35,5	±9,7	-5,5	3,1	5,0	32	18	4	6,0	20
35	33,3	±10,6	1,7	0,0	5,0	30	5	9	5,4	15
40	38,1	±8,5	2,0	0,1	5,0	21	5	12	8,4	21
45	48,5	±9,1	-3,5	0,2	5,0	20	8	4	4,9	11
50	50,9	±9,5	-0,9	0,0	5,0	19	2	3	3,0	6

За све векторе просторних помјерања, регистроване ГНСС технологијом у случајним условима и у односу на кориснички успостављен базни пријемник, тестирањем линеарних хипотеза утврђено је да не постоји статистички значајна разлика од изведених вектора помјерања, за остварене резултате мјерења и усвојени ниво статистичке значајности. Стандардно одступање регистрованих вектора помјерања је у интервалу од ±5,7 mm до ±12,5 mm. Просјечно стандардно одступање је ±9,5 mm. Оптимална тачност регистравања помјерања остварена је у 6 % случајева, и то за величине помјерања веће од 40,0 mm. Распон разлика изведених и регистрованих интензитета вектора помјерања креће се од -12,2 mm до +2,0 mm, средња вриједност је -5,0 mm са стандардним одступањем ±4,2 mm. Односи разлика добијених између изведених и регистрованих интензитета вектора помјерања и интензитета изведених вектора помјерања мањи су или једнаки 20 % за величине помјерања веће од 25,0 mm. Разлике су у 89 % случајева мање од $1 \cdot \sigma_{d_{XYZ}}$, и у свим случајевима су

мање од $2 \cdot \sigma_{d_{xyz}}$. Просторни углови између изведених и регистрованих вектора помјерања мањи су од вриједности угла која се добије као однос оствареног стандардног одступања и интензитета вектора помјерања, за све величине помјерања веће од 40,0 mm. Закључак је да су ГНСС технологијом у наведеним условима регистроване величине просторних помјерања веће од 40,0 mm.

Табела 6-11. Резултати регистрација хоризонталних помјерања ГНСС технологијом, у случајним условима и у односу на кориснички успостављен базни пријемник

Интензитет изведеног хоризонталног вектора помјерања	Интензитет регистрованог хоризонталног вектора помјерања	Стандардно одступање регистрованог хоризонталног вектора помјерања	Разлика	T	F	Однос	Однос	Хоризонтални угао између изведеног и регистрованог хоризонталног вектора помјерања	Хоризонтална дужина између изведеног и регистрованог положаја	Однос хоризонталне дужине између изведеног и регистрованог положаја и интензитета хоризонталног помјерања
d_{IX}^P	d_{IX}^M	$\sigma_{d_{IX}^M}$	$r_{d_{IX}} = d_{IX}^P - d_{IX}^M$			$\sigma_{d_{IX}^M} / d_{IX}^P$	$r_{d_{IX}} / d_{IX}^P$			
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]			[%]	[%]	[°]	[mm]	[%]
0,8	5,6	±4,9	-4,8	1,1	5,0	600	586	286	5,4	660
1,6	4,8	±5,8	-3,2	3,5	5,0	355	194	266	5,2	316
2,4	8,7	±6,1	-6,3	1,0	5,0	249	255	24	6,5	266
3,3	6,7	±6,1	-3,4	3,0	5,0	187	105	26	4,1	125
4,1	3,5	±7,3	0,6	0,0	5,0	179	14	51	3,3	81
4,9	4,5	±5,5	0,4	0,0	5,0	112	8	36	2,9	60
5,7	2,8	±5,1	2,9	2,9	5,0	89	51	311	4,4	77
6,5	16,3	±7,3	-9,8	1,8	5,0	112	150	5	9,8	151
7,3	14,4	±7,4	-7,1	1,1	5,0	101	96	4	7,1	97
8,2	11,2	±5,6	-3,0	3,3	5,0	69	37	30	5,8	71
12,2	18,4	±6,9	-6,2	1,2	5,0	56	50	11	6,8	56
16,3	21,5	±7,6	-5,2	2,1	5,0	47	32	16	7,4	45
20,4	28,4	±6,7	-8,0	1,4	5,0	33	39	5	8,2	40
24,5	30,4	±7,4	-5,9	1,5	5,0	30	24	1	6,0	24
28,6	25,5	±7,6	3,1	0,2	5,0	27	11	9	5,2	18
32,7	34,0	±7,2	-1,3	0,0	5,0	22	4	10	6,0	18
36,7	41,1	±6,5	-4,4	2,2	5,0	18	12	3	4,9	13
40,8	43,2	±7,1	-2,4	0,1	5,0	17	6	0	2,4	6

За све векторе хоризонталних помјерања, регистроване ГНСС технологијом у случајним условима и у односу на кориснички успостављен базни пријемник, тестирањем линеарних хипотеза утврђено је да не постоји статистички значајна разлика од изведених вектора помјерања, за остварене резултате мјерења и усвојени ниво статистичке значајности. Стандардно одступање регистрованих вектора помјерања је у интервалу од ±4,9 mm до ±7,6 mm. Просјечно стандардно одступање је ±6,6 mm. Оптимална тачност регистрација помјерања остварена је у 11 % случајева, и то за величине помјерања веће од 32,7 mm. Распон разлика

изведених и регистрованих интензитета вектора помјерања се креће од $-9,8$ mm до $+3,1$ mm, средња вриједност је $-3,5$ mm са стандардним одступањем $\pm 3,6$ mm. Односи разлика добијених између изведених и регистрованих интензитета вектора помјерања и интензитета изведених вектора помјерања су мањи или једнаки 20 % за величине помјерања веће од $24,5$ mm. Разлике су у 83 % случајева мање од $1 \cdot \sigma_{d_{yx}}$, и у свим случајевима су мање од $2 \cdot \sigma_{d_{yx}}$. Хоризонтални углови између изведених и регистрованих вектора помјерања су мањи од вриједности угла која се добије као однос оствареног стандардног одступања и интензитета вектора помјерања за све величине помјерања веће од $16,3$ mm. Закључак је да су ГНСС технологијом у наведеним условима регистроване величине хоризонталних помјерања веће од $24,5$ mm.

Табела 6-12. Резултати регистровања вертикалних помјерања ГНСС технологијом, у случајним условима и у односу на кориснички успостављен базни пријемник

Интензитет изведеног вертикалног вектора помјерања	Интензитет регистрованог вертикалног вектора помјерања	Стандардно одступање регистрованог вертикалног вектора помјерања	Разлика	T	F	Однос	Однос
d_H^P [mm]	d_H^M [mm]	$\sigma_{d_H^M}$ [mm]	$r_{d_H} = d_H^P - d_H^M$ [mm]			$\sigma_{d_H^M} / d_H^P$ [%]	r_{d_H} / d_H^P [%]
-0,6	-10,6	$\pm 11,8$	10,0	1,4	5,0	2044	1736
-1,2	-13,4	$\pm 11,7$	12,2	1,1	5,0	1013	1060
-1,7	4,6	$\pm 12,6$	-6,3	3,9	5,0	727	366
-2,3	1,9	$\pm 12,6$	-4,2	0,1	5,0	546	182
-2,9	-1,2	$\pm 11,2$	-1,7	0,0	5,0	388	58
-3,5	-11,7	$\pm 12,5$	8,2	2,3	5,0	361	238
-4,0	-14,5	$\pm 12,4$	10,5	1,4	5,0	307	259
-4,6	9,0	$\pm 13,4$	-13,6	1,0	5,0	290	295
-5,2	6,2	$\pm 13,4$	-11,4	1,4	5,0	258	219
-5,8	-9,9	$\pm 12,1$	4,1	0,1	5,0	210	71
-8,7	-5,5	$\pm 12,9$	-3,2	0,1	5,0	149	36
-11,5	-8,3	$\pm 13,2$	-3,2	0,1	5,0	114	28
-14,4	-17,0	$\pm 12,4$	2,6	0,0	5,0	86	18
-17,3	-18,2	$\pm 13,0$	0,9	0,0	5,0	75	5
-20,2	-21,5	$\pm 13,7$	1,3	0,0	5,0	68	6
-23,1	-17,1	$\pm 12,9$	-6,0	0,2	5,0	56	26
-26,0	-25,8	$\pm 12,1$	-0,2	0,0	5,0	47	1
-28,9	-27,0	$\pm 12,7$	-1,9	0,0	5,0	44	6

За све векторе вертикалних помјерања, регистроване ГНСС технологијом у случајним условима и у односу на кориснички успостављен базни пријемник, тестирањем линеарних хипотеза утврђено је да не постоји статистички значајна разлика од изведених вектора помјерања, за остварене резултате мјерења и усвојени ниво статистичке значајности. Стандардно одступање регистрованих вектора помјерања је у интервалу од $\pm 11,2$ mm до $\pm 13,7$ mm. Просјечно стандардно одступање је $\pm 12,6$ mm. За изведене величине помјерања ни у једном случају није утврђено да је

остварена оптимална тачност регистравања помјерања, што је и било очекивано с обзиром да је највећа изведена величина помјерања 28,9 mm, а очекивано стандардно одступање регистрованих вектора помјерања 21 mm. Распон разлика изведених и регистрованих интензитета вектора помјерања креће се од -13,6 mm до +12,2 mm, средња вриједност је -0,1 mm са стандардним одступањем $\pm 7,2$ mm. Односи разлика добијених између изведених и регистрованих интензитета вектора помјерања и интензитета изведених вектора помјерања су мањи или једнаки 20 % за величине помјерања веће од 23,1 mm. Добијене разлике су у 89 % случајева мање од $1 \cdot \sigma_{d_H}$, и у свим случајевима су мање од $2 \cdot \sigma_{d_H}$. Смјер вертикалних помјерања правилно је регистрован за величине помјерања веће од 5,8 mm. Закључак је да су ГНСС технологијом у наведеним условима регистроване величине вертикалних помјерања веће од 23,1 mm.

У Табелама 6-13, 6-14 и 6-15 су за векторе дискретних помјерања регистроване ГНСС технологијом у повољним условима и у односу на кориснички успостављен базни пријемник, детаљно приказани резултати тестирања.

Табела 6-13. Резултати регистравања просторних помјерања ГНСС технологијом, у повољним условима и у односу на кориснички успостављен базни пријемник

Интензитет изведеног вектора помјерања	Интензитет регистрованог вектора помјерања	Стандардно одступање регистрованог вектора помјерања	Разлика	T	F	Однос	Однос	Просторни угао између изведеног и регистрованог вектора помјерања	Просторна дужина између изведеног и регистрованог положаја	Однос просторне дужине између изведеног и регистрованог положаја и интензитета вектора помјерања
d_{XYZ}^P	d_{XYZ}^M	$\sigma_{d_{XYZ}^M}$	$r_{d_{XYZ}} = d_{XYZ}^P - d_{XYZ}^M$			$\sigma_{d_{XYZ}^M} / d_{XYZ}^P$	$r_{d_{XYZ}} / d_{XYZ}^P$			
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]			[%]	[%]	[°]	[mm]	[%]
1	9,4	$\pm 12,2$	-8,4	2,1	5,0	1219	840	51	8,8	884
2	2,1	$\pm 7,3$	-0,1	0,0	5,0	367	3	19	0,7	33
3	13,9	$\pm 12,7$	-10,9	1,4	5,0	424	363	27	11,3	377
4	8,6	$\pm 8,0$	-4,6	3,0	5,0	199	115	20	5,0	125
5	8,4	$\pm 13,0$	-3,4	0,1	5,0	260	67	111	11,2	224
6	5,6	$\pm 5,2$	0,4	0,0	5,0	87	7	55	5,4	90
7	8,3	$\pm 11,5$	-1,3	0,0	5,0	165	19	97	11,5	165
8	21,0	$\pm 12,4$	-13,0	1,1	5,0	155	163	30	14,7	184
9	14,7	$\pm 10,3$	-5,7	3,3	5,0	115	63	20	6,9	77
10	11,5	$\pm 8,2$	-1,5	0,0	5,0	82	15	12	2,7	27
15	17,3	$\pm 10,5$	-2,3	0,1	5,0	70	15	10	3,7	24
20	14,9	$\pm 9,5$	5,1	3,5	5,0	48	26	7	5,5	28
25	29,6	$\pm 10,7$	-4,6	0,2	5,0	43	19	11	6,9	28
30	26,4	$\pm 8,5$	3,6	0,2	5,0	28	12	9	5,7	19
35	27,1	$\pm 6,4$	8,0	1,6	5,0	18	23	18	12,5	36
40	31,7	$\pm 8,1$	8,3	1,0	5,0	20	21	7	9,4	24

45	45,8	±9,1	-0,8	0,0	5,0	20	2	3	2,2	5
50	43,1	±7,6	6,9	1,2	5,0	15	14	8	9,3	19

За све векторе просторних помјерања, регистроване ГНСС технологијом у повољним условима и у односу на кориснички успостављен базни пријемник, тестирањем линеарних хипотеза утврђено је да не постоји статистички значајна разлика од изведених вектора помјерања, за остварене резултате мјерења и усвојени ниво статистичке значајности. Стандардно одступање регистрованих вектора помјерања је у интервалу од $\pm 5,2$ mm до $\pm 13,0$ mm. Оптимална тачност регистровања помјерања је остварена у 11 % случајева, и то за величине помјерања веће од 30,0 mm. Просјечно стандардно одступање је $\pm 9,5$ mm. Распон разлика изведених и регистрованих интензитета вектора помјерања се креће од -13,0 mm до +8,3 mm, средња вриједност је -1,4 mm са стандардним одступањем $\pm 6,1$ mm. Односи разлика добијених између изведених и регистрованих интензитета вектора помјерања и интензитета изведених вектора помјерања су мањи или једнаки 20 % за величине помјерања веће од 40,0 mm. Добијене разлике су у 83 % случајева мање од $1 \cdot \sigma_{d_{xyz}}$, и у свим случајевима су мање од $2 \cdot \sigma_{d_{xyz}}$. Просторни углови између изведеног и регистрованог вектора помјерања су мањи од вриједности угла која се добије као однос оствареног стандардног одступања и интензитета вектора помјерања за све величине помјерања веће од 35,0 mm. Закључак је да су ГНСС технологијом у наведеним условима регистроване просторне величине помјерања веће од 40,0 mm.

Табела 6-14. Резултати регистровања хоризонталних помјерања ГНСС технологијом, у повољним условима и у односу на кориснички успостављен базни пријемник

Интензитет изведеног хоризонталног вектора помјерања	Интензитет регистрованог хоризонталног вектора помјерања	Стандардно одступање регистрованог хоризонталног вектора помјерања	Разлика	T	F	Однос	Однос	Хоризонтални угао између изведеног и регистрованог хоризонталног вектора помјерања	Хоризонтална дужина између изведеног и регистрованог положаја	Однос хоризонталне дужине између изведеног и регистрованог положаја и интензитета хоризонталног помјерања
d_{IX}^P	d_{IX}^M	$\sigma_{d_{IX}^M}$	$r_{d_{IX}} = d_{IX}^P - d_{IX}^M$			$\sigma_{d_{IX}^M} / d_{IX}^P$	$r_{d_{IX}} / d_{IX}^P$			
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]			[%]	[%]	[°]	[mm]	[%]
0,8	2,3	±4,3	-1,5	0,1	5,0	527	182	300	2,0	243
1,6	1,8	±4,4	-0,2	0,0	5,0	269	10	20	0,6	39
2,4	6,7	±5,2	-4,3	1,4	5,0	212	174	12	4,4	178
3,3	7,6	±5,1	-4,3	1,4	5,0	156	133	21	4,7	145
4,1	3,2	±4,6	0,9	0,0	5,0	113	22	304	3,5	85
4,9	5,4	±4,4	-0,5	0,0	5,0	90	10	303	5,0	102
5,7	4,8	±4,5	0,9	0,1	5,0	79	16	43	3,9	69
6,5	9,0	±5,0	-2,5	3,9	5,0	77	38	15	3,2	49
7,3	9,9	±4,9	-2,6	3,5	5,0	67	35	21	4,1	56
8,2	10,2	±5,0	-2,0	0,2	5,0	61	25	10	2,6	32
12,2	12,2	±4,9	0,0	0,0	5,0	40	0	5	1,0	8

16,3	12,5	±5,2	3,8	1,8	5,0	32	23	8	4,4	27
20,4	20,6	±4,9	-0,2	0,0	5,0	24	1	3	1,0	5
24,5	22,7	±4,9	1,8	0,1	5,0	20	7	9	4,2	17
28,6	25,8	±4,8	2,8	3,0	5,0	17	10	4	3,3	11
32,7	27,9	±5,1	4,8	1,1	5,0	16	15	2	4,8	15
36,7	36,2	±4,7	0,5	0,0	5,0	13	1	0	0,6	2
40,8	36,2	±4,7	4,6	2,8	5,0	12	11	4	3,9	9

За све векторе хоризонталних помјерања, регистроване ГНСС технологијом у повољним условима и у односу на кориснички успостављен базни пријемник, тестирањем линеарних хипотеза утврђено је да не постоји статистички значајна разлика од изведених вектора помјерања, за остварене резултате мјерења и усвојени ниво статистичке значајности. Стандардно одступање регистрованих вектора помјерања је у интервалу од $\pm 4,3$ mm до $\pm 5,2$ mm. Оптимална тачност регистравања помјерања остварена је у 22 % случајева, и то за величине помјерања веће од 20,4 mm. Просјечно стандардно одступање је $\pm 4,8$ mm. Распон разлика изведених и регистрованих интензитета вектора помјерања креће се од -4,3 mm до +4,8 mm, средња вриједност је 0,0 mm са стандардним одступањем $\pm 2,6$ mm. Односи разлика добијених између изведених и регистрованих интензитета вектора помјерања и интензитета изведених вектора помјерања су мањи или једнаки 20 % за величине помјерања веће од 16,3 mm. Разлике су у свим случајевима мање од $1 \cdot \sigma_{d_{yx}}$. Хоризонтални угао између изведеног и регистрованог вектора помјерања је мањи од вриједности угла која се добије као однос оствареног стандардног одступања и интензитета вектора помјерања за све величине помјерања веће од 7,3 mm. Закључак је да су ГНСС технологијом у наведеним условима регистроване величине хоризонталних помјерања веће од 16,3 mm.

Табела 6-15. Резултати регистравања вертикалних помјерања ГНСС технологијом, у повољним условима и у односу на кориснички успостављен базни пријемник

Интензитет изведеног вертикалног вектора помјерања	Интензитет регистрованог вертикалног вектора помјерања	Стандардно одступање регистрованог вертикалног вектора помјерања	Разлика	T	F	Однос	Однос
d_H^P [mm]	d_H^M [mm]	$\sigma_{d_H^M}$ [mm]	$r_{d_H} = d_H^P - d_H^M$ [mm]			$\sigma_{d_H^M} / d_H^P$ [%]	r_{d_H} / d_H^P [%]
-0,6	-9,1	±12,6	8,5	2,2	5,0	2182	1476
-1,2	-0,9	±13,0	-0,3	0,0	5,0	1126	22
-1,7	-12,2	±14,0	10,5	1,8	5,0	808	604
-2,3	-3,9	±13,7	1,6	0,0	5,0	593	69
-2,9	7,7	±13,5	-10,6	1,6	5,0	468	367
-3,5	-1,4	±12,9	-2,1	0,0	5,0	372	60
-4,0	6,8	±13,2	-10,8	1,5	5,0	327	268
-4,6	-19,0	±13,3	14,4	1,2	5,0	288	311
-5,2	-10,8	±12,9	5,6	0,2	5,0	248	108
-5,8	-5,4	±14,5	-0,4	0,0	5,0	251	6
-8,7	-12,2	±13,8	3,5	0,1	5,0	159	41

-11,5	-8,1	±14,8	-3,4	0,1	5,0	128	30
-14,4	-21,2	±13,8	6,8	0,2	5,0	96	47
-17,3	-13,5	±14,1	-3,8	0,1	5,0	81	22
-20,2	-8,1	±13,4	-12,1	1,2	5,0	66	60
-23,1	-15,0	±14,1	-8,1	3,0	5,0	61	35
-26,0	-28,1	±13,1	2,1	0,0	5,0	50	8
-28,9	-23,4	±13,3	-5,5	2,4	5,0	46	10

За све векторе вертикалних помјерања, регистроване ГНСС технологијом у повољним условима и у односу на кориснички успостављен базни пријемник, тестирањем линеарних хипотеза утврђено је да не постоји статистички значајна разлика од изведених вектора помјерања, за остварене резултате мјерења и усвојени ниво статистичке значајности. Стандардно одступање регистрованих вектора помјерања је у интервалу од $\pm 12,6$ mm до $\pm 14,8$ mm. Просјечно стандардно одступање је $\pm 13,6$ mm. Оптимална тачност регистровања помјерања није остварена ни за једну изведену величину помјерања. Распон разлика изведених и регистрованих интензитета вектора помјерања се креће од $-12,1$ mm до $+14,4$ mm, средња вриједност је $-0,4$ mm са стандардним одступањем $\pm 7,8$ mm. Односи разлика добијених између изведених и регистрованих интензитета вектора помјерања и интензитета изведених вектора помјерања су мањи или једнаки 20 % за величине помјерања веће од 23,1 mm. Добијене разлике су у 94 % случајева мање од $1 \cdot \sigma_{d_H}$, и у свим случајевима су мање од $2 \cdot \sigma_{d_H}$. Смјер вертикалних помјерања правилно је регистрован за величине помјерања веће од 6,5 mm. Закључак је да су ГНСС технологијом у наведеним условима регистроване величине вертикалних помјерања веће од 23,1 mm.

Општи закључак је да су ГНСС технологијом и у случајним и повољним условима, позиционирањем у односу на кориснички успостављен базни пријемник, регистроване све изведене величине просторних, хоризонталних и вертикалних помјерања веће од 40 mm, 25 mm и 23 mm, респективно. Разлике минималних величина помјерања које су сигурно регистроване у случајним и повољним условима су у интервалу $1 \cdot \sigma_{POZ}$. Разлике изведених и регистрованих интензитета вектора помјерања су у свим случајевима и за све величине помјерања мање од $2 \cdot \sigma_d$. Може се закључити да су у свим случајевима регистроване величине помјерања веће од $3 \cdot \sigma_{POZ}$, чиме су и за регистровање помјерања ГНСС технологијом, и позиционирањем у односу на кориснички успостављен базни пријемник, потврђени претпоставка и прорачун из плана практичних истраживања. Регистроване величине вертикалних помјерања у оба случаја су веће од $2 \cdot \sigma_{POZ}$, што су вриједности боље од добијених при планирању практичних истраживања.

6.3.1.4. *Анализа и тестирање регистровања дискретних помјерања ГНСС технологијом на основу позиционирања у оквиру мреже перманентних ГНСС станица*

Истраживање могућности ГНСС технологије за регистровање помјерања настављено је анализом и тестирањем регистровања дискретних помјерања на основу позиционирања у оквиру мреже перманентних ГНСС станица. За анализу и тестирање прикупљених података коришћена је иста методологија као и за регистровање дискретних помјерања у односу на кориснички успостављен базни пријемник.

У Табелама 6-16, 6-17 и 6-18 приказани су сумарни резултати тестирања регистровања дискретних просторних, хоризонталних и вертикалних помјерања, респективно, за случајне и повољне услове позиционирања и за све моделе генерисања корекција доступне у оквиру СРПОС мреже.

Табела 6-16. Сумарни резултати регистровања просторних помјерања ГНСС технологијом позиционирањем у оквиру мреже перманентних ГНСС станица

Коришћени алгоритам за генерисање корекција и услови при којима су регистрована помјерања	T_{\min} T_{\max}	мин. $r_{d_{XYZ}}$ макс. $r_{d_{XYZ}}$ [mm]	Средња вриједност $r_{d_{XYZ}}$ [mm]	$\sigma_{d_{XYZ}}$ [mm]	$r_{d_{XYZ}}$ мање од $1\sigma_{d_{XYZ}}$ [%]	$r_{d_{XYZ}}$ мање од $2\sigma_{d_{XYZ}}$ [%]	$r_{d_{XYZ}}$ мање од $3\sigma_{d_{XYZ}}$ [%]	Минимална величина помјерања за коју је регистрован интензитет и смјер [mm]
NEAREST - случајни услови	0,0	-11,2	-5,4	$\pm 3,7$	89 %	100 %	100 %	45
	3,0	+2,0						
NEAREST - повољни услови	0,0	-11,6	-4,0	$\pm 2,8$	100%	100%	100%	35
	3,9	-0,9						
VRS - случајни услови	0,0	-5,9	+0,4	$\pm 4,1$	89%	100%	100%	40
	3,8	+8,8						
VRS - повољни услови	0,0	-7,2	-3,2	$\pm 2,0$	100%	100%	100%	40
	3,9	-0,2						
MAX - случајни услови	0,0	-7,1	-1,7	$\pm 2,6$	100%	100%	100%	30
	2,8	+2,2						
MAX - повољни услови	0,0	-5,8	-1,8	$\pm 2,7$	100%	100%	100%	30
	2,7	+2,7						
iMAX - случајни услови	0,0	-12,5	+0,7	$\pm 7,1$	78%	100%	100%	45
	4,1	+13,8						
iMAX - повољни услови	0,0	-6,5	+1,6	$\pm 4,7$	100%	100%	100%	40
	3,6	+10,0						

За све векторе просторних помјерања, регистроване ГНСС технологијом на основу позиционирања у оквиру мреже перманентних ГНСС станица, тестирањем линеарних хипотеза утврђено је да не постоји статистички значајна разлика од изведених вектора помјерања, за остварене резултате мјерења и усвојени ниво статистичке значајности, у свим случајевима. Стандардно одступање регистрованих вектора просторних помјерања у случајним условима је у интервалу од $\pm 5,5$ mm до $\pm 16,1$ mm, а просјечно је $\pm 9,4$ mm. Стандардно одступање регистрованих вектора просторних помјерања у повољним условима је у интервалу од $\pm 7,2$ mm до $\pm 16,6$ mm, а просјечно је $\pm 10,4$ mm. Оптимална тачност регистровања просторних помјерања је у оба случаја остварена за величине помјерања веће од 45 mm. Распон разлика изведених и регистрованих интензитета вектора просторних помјерања се у случајним условима креће од -12,5 mm до +13,8 mm, средња вриједност је -1,2 mm, са стандардним одступањем $\pm 9,5$ mm. Распон разлика изведених и регистрованих интензитета вектора просторних помјерања у повољним условима креће се од -11,6 mm до +10,0 mm, средња вриједност је -2,4 mm са стандардним одступањем $\pm 6,8$ mm. Добијене разлике су у свим случајевима мање од $2 \cdot \sigma_{d_{XYZ}}$.

Општи закључак је да су у случајним условима и за све примјењене моделе генерисања корекција регистроване величине просторних помјерања веће од 45 mm, а у повољним условима и у свим примјењеним моделима генерисања корекција регистроване су величине помјерања веће од 40 mm. Најбољи резултати добијени су

примјеном МАХ модела за генерисање корекција, 30 mm и у случајним и у повољним условима. Разлике минималних величина помјерања регистрованих примјеном различитих модела за генерисање корекција су у интервалу $1 \cdot \sigma_{POZ}$. Разлике минималних величина помјерања регистрованих појединим моделима генерисања корекција у случајним и повољним условима су у интервалу $\sigma_{POZ} / 3$, тј. разлике су статистички безначајне. Може се закључити да су у свим условима регистроване величине просторних помјерања веће од $3 \cdot \sigma_{POZ}$. У најповољнијем случају регистроване су величине просторних помјерања веће од $2 \cdot \sigma_{POZ}$.

Табела 6-17. Сумарни резултати регистровања хоризонталних помјерања ГНСС технологијом позиционирањем у односу на мрежу перманентних ГНСС станица

Коришћени алгоритам за генерисање корекција и услови при којима су регистрована помјерања	T_{min} T_{max}	мин. $r_{d_{yx}}$ макс. $r_{d_{yx}}$ [mm]	Средња вриједност $r_{d_{yx}}$ [mm]	$\sigma_{r_{d_{yx}}}$ [mm]	$r_{d_{yx}}$ мање од $1\sigma_{d_{yx}}$ [%]	$r_{d_{yx}}$ мање од $2\sigma_{d_{yx}}$ [%]	$r_{d_{yx}}$ мање од $3\sigma_{d_{yx}}$ [%]	Минимална величина помјерања за коју је регистрован интензитет и смјер [mm]																																																																						
NEAREST - случајни услови	0,0	-3,7	-1,4	$\pm 1,5$	100 %	100 %	100 %	36,7																																																																						
	5,0	+0,9							NEAREST - повољни услови	0,0	-7,5	-1,2	$\pm 3,8$	100%	100%	100%	36,7	4,0	+5,2	VRS - случајни услови	0,0	-4,2	+1,4	$\pm 3,0$	100%	100%	100%	28,6	3,9	+5,9	VRS - повољни услови	0,0	-7,4	-1,8	$\pm 3,4$	100%	100%	100%	24,5	3,9	+4,6	MAX - случајни услови	0,0	-3,9	-0,9	$\pm 1,7$	100%	100%	100%	24,5	3,0	+2,4	MAX - повољни услови	0,0	-6,5	-2,0	$\pm 2,8$	100%	100%	100%	24,5	4,0	+3,7	iMAX - случајни услови	0,0	-4,6	+1,8	$\pm 3,5$	94%	100%	100%	36,7	3,8	+8,1	iMAX - повољни услови	0,0	-6,2	+1,5
NEAREST - повољни услови	0,0	-7,5	-1,2	$\pm 3,8$	100%	100%	100%	36,7																																																																						
	4,0	+5,2							VRS - случајни услови	0,0	-4,2	+1,4	$\pm 3,0$	100%	100%	100%	28,6	3,9	+5,9	VRS - повољни услови	0,0	-7,4	-1,8	$\pm 3,4$	100%	100%	100%	24,5	3,9	+4,6	MAX - случајни услови	0,0	-3,9	-0,9	$\pm 1,7$	100%	100%	100%	24,5	3,0	+2,4	MAX - повољни услови	0,0	-6,5	-2,0	$\pm 2,8$	100%	100%	100%	24,5	4,0	+3,7	iMAX - случајни услови	0,0	-4,6	+1,8	$\pm 3,5$	94%	100%	100%	36,7	3,8	+8,1	iMAX - повољни услови	0,0	-6,2	+1,5	$\pm 4,1$	100%	100%	100%	32,7	3,3	+8,6				
VRS - случајни услови	0,0	-4,2	+1,4	$\pm 3,0$	100%	100%	100%	28,6																																																																						
	3,9	+5,9							VRS - повољни услови	0,0	-7,4	-1,8	$\pm 3,4$	100%	100%	100%	24,5	3,9	+4,6	MAX - случајни услови	0,0	-3,9	-0,9	$\pm 1,7$	100%	100%	100%	24,5	3,0	+2,4	MAX - повољни услови	0,0	-6,5	-2,0	$\pm 2,8$	100%	100%	100%	24,5	4,0	+3,7	iMAX - случајни услови	0,0	-4,6	+1,8	$\pm 3,5$	94%	100%	100%	36,7	3,8	+8,1	iMAX - повољни услови	0,0	-6,2	+1,5	$\pm 4,1$	100%	100%	100%	32,7	3,3	+8,6															
VRS - повољни услови	0,0	-7,4	-1,8	$\pm 3,4$	100%	100%	100%	24,5																																																																						
	3,9	+4,6							MAX - случајни услови	0,0	-3,9	-0,9	$\pm 1,7$	100%	100%	100%	24,5	3,0	+2,4	MAX - повољни услови	0,0	-6,5	-2,0	$\pm 2,8$	100%	100%	100%	24,5	4,0	+3,7	iMAX - случајни услови	0,0	-4,6	+1,8	$\pm 3,5$	94%	100%	100%	36,7	3,8	+8,1	iMAX - повољни услови	0,0	-6,2	+1,5	$\pm 4,1$	100%	100%	100%	32,7	3,3	+8,6																										
MAX - случајни услови	0,0	-3,9	-0,9	$\pm 1,7$	100%	100%	100%	24,5																																																																						
	3,0	+2,4							MAX - повољни услови	0,0	-6,5	-2,0	$\pm 2,8$	100%	100%	100%	24,5	4,0	+3,7	iMAX - случајни услови	0,0	-4,6	+1,8	$\pm 3,5$	94%	100%	100%	36,7	3,8	+8,1	iMAX - повољни услови	0,0	-6,2	+1,5	$\pm 4,1$	100%	100%	100%	32,7	3,3	+8,6																																					
MAX - повољни услови	0,0	-6,5	-2,0	$\pm 2,8$	100%	100%	100%	24,5																																																																						
	4,0	+3,7							iMAX - случајни услови	0,0	-4,6	+1,8	$\pm 3,5$	94%	100%	100%	36,7	3,8	+8,1	iMAX - повољни услови	0,0	-6,2	+1,5	$\pm 4,1$	100%	100%	100%	32,7	3,3	+8,6																																																
iMAX - случајни услови	0,0	-4,6	+1,8	$\pm 3,5$	94%	100%	100%	36,7																																																																						
	3,8	+8,1							iMAX - повољни услови	0,0	-6,2	+1,5	$\pm 4,1$	100%	100%	100%	32,7	3,3	+8,6																																																											
iMAX - повољни услови	0,0	-6,2	+1,5	$\pm 4,1$	100%	100%	100%	32,7																																																																						
	3,3	+8,6																																																																												

За све векторе хоризонталних помјерања, регистроване ГНСС технологијом, на основу позиционирања у оквиру мреже перманентних ГНСС станица, тестирањем линеарних хипотеза је утврђено да не постоји статистички значајна разлика од изведених вектора помјерања, за остварене резултате мјерења и усвојени ниво статистичке значајности, у свим случајевима. Стандардно одступање регистрованих вектора хоризонталних помјерања у случајним условима је у интервалу од $\pm 5,2$ mm до $\pm 14,9$ mm, а просјечно је $\pm 9,1$ mm. Стандардно одступање регистрованих вектора хоризонталних помјерања у повољним условима је у интервалу од $\pm 5,0$ mm до $\pm 15,9$ mm, а просјечно је $\pm 9,9$ mm. У оба случаја, за изведене величине хоризонталних помјерања није утврђено да је остварена оптимална тачност регистровања помјерања, што је било очекивано с обзиром да је највећа изведена величина хоризонталног помјерања 40,8 mm, а очекивано стандардно одступање регистрованих вектора помјерања 11,3 mm. Распон разлика изведених и регистрованих интензитета вектора помјерања се у случајним условима креће од -4,6 mm до +8,1 mm, средња вриједност је 0,1 mm са стандардним одступањем $\pm 5,0$

mm. Распон разлика изведених и регистрованих интензитета вектора помјерања се у повољним условима креће од -7,5 mm до +8,6 mm, средња вриједност је -0,7 mm са стандардним одступањем $\pm 6,8$ mm. Добијене разлике су у свим случајевима мање од $2 \cdot \sigma_{d_{yx}}$.

Општи закључак је да су у случајним условима и за све примјењене моделе генерисања корекција регистроване величине хоризонталних помјерања веће од 37 mm, а у повољним условима су регистроване величине помјерања веће од 33 mm. И при регистровању хоризонталних помјерања најбољи резултати добијени су примјеном MAX модела за генерисање корекција (25 mm и у случајним и у повољним условима), а разлике са минималним величинама помјерања регистрованим примјеном других модела су у интервалу $1,5 \cdot \sigma_{POZ}$. Разлике минималних величина помјерања регистрованих појединим моделима генерисања корекција у случајним и повољним условима су у границама $\sigma_{POZ} / 2$. Може се закључити да су у свим условима и за све моделе генерисања корекција регистроване величине хоризонталних помјерања веће од $5 \cdot \sigma_{POZ}$. У најповољнијем случају регистроване су величине хоризонталних помјерања веће од $3 \cdot \sigma_{POZ}$.

Табела 6-18. Сумарни резултати регистровања вертикалних помјерања ГНСС технологијом позиционирањем у односу на мрежу перманентних ГНСС станица

Коришћени алгоритам за генерисање корекција и услови при којима су регистрована помјерања	T_{\min} T_{\max}	мин. r_{d_H} макс. r_{d_H} [mm]	Средња вриједност r_{d_H} [mm]	σ_{d_H} [mm]	r_{d_H} мање од $1\sigma_{d_H}$ [%]	r_{d_H} мање од $2\sigma_{d_H}$ [%]	r_{d_H} мање од $3\sigma_{d_H}$ [%]	Минимална величина помјерања за коју је регистрован интензитет и смјер [mm]
NEAREST - случајни услови	0,0	-4,4	+5,2	$\pm 5,9$	94 %	100 %	100 %	непознато
	2,8	+13,5						
NEAREST - повољни услови	0,0	-7,6	+2,6	$\pm 5,7$	100%	100%	100%	непознато
	3,8	+13,9						
VRS - случајни услови	0,0	-14,9	-3,0	$\pm 6,9$	89%	100%	100%	непознато
	2,5	+10,6						
VRS - повољни услови	0,0	-9,6	+1,1	$\pm 5,1$	100%	100%	100%	28,9
	3,9	+8,8						
MAX - случајни услови	0,0	-6,9	+0,8	$\pm 4,5$	100%	100%	100%	26,0
	4,0	+8,4						
MAX - повољни услови	0,0	-2,6	-0,2	$\pm 1,6$	100%	100%	100%	20,2
	3,9	+3,3						
iMAX - случајни услови	0,0	-14,8	-1,9	$\pm 7,7$	83%	100%	100%	28,9
	2,5	+12,3						
iMAX - повољни услови	0,0	-7,3	-1,6	$\pm 4,5$	100%	100%	100%	23,1
	3,7	+7,5						

За све векторе вертикалних помјерања, регистроване ГНСС технологијом на основу позиционирања у оквиру мреже перманентних ГНСС станица, тестирањем линеарних хипотеза утврђено је да не постоји статистички значајна разлика од изведених вектора помјерања, за остварене резултате мјерења и усвојени ниво статистичке значајности, у свим случајевима. Стандардно одступање регистрованих вектора помјерања, у случајним условима, је у интервалу од $\pm 10,4$ mm до $\pm 16,5$ mm, а просјечно је $\pm 12,4$ mm. Стандардно одступање регистрованих вектора помјерања, у

повољним условима, је у интервалу од $\pm 9,0$ mm до $\pm 15,1$ mm, а просјечно је $\pm 11,9$ mm. У оба случаја, за изведене величине помјерања није утврђено да је остварена оптимална тачност регистровања помјерања, што је било очекивано с обзиром да је највећа изведена величина помјерања 28,9 mm, а очекивано стандардно одступање регистрованих вектора помјерања 21,1 mm. Распон разлика изведених и регистрованих интензитета вектора помјерања се у случајним условима креће од -14,9 mm до +13,5 mm, средња вриједност је 0,5 mm са стандардним одступањем $\pm 12,1$ mm. Распон разлика изведених и регистрованих интензитета вектора помјерања се у повољним условима креће од -9,6 mm до +13,9 mm, средња вриједност је 0,8 mm са стандардним одступањем $\pm 8,8$ mm. Добијене разлике су у свим случајевима мање од $1 \cdot \sigma_{dH}$.

На основу изведених величина вертикалних помјерања није било могуће утврдити јединствену минималну величину помјерања регистровану у случајним и повољним условима. Најбољи резултати поново су добијени примјеном MAX модела за генерисање корекција, при чему су регистроване величине помјерања веће од 26 mm у случајним условима и 20 mm у повољним условима. Разлике минималних величина помјерања које су регистроване примјеном других модела су у интервалу $1 \cdot \sigma_{POZ}$, а у истом интервалу су и разлике минималних величина помјерања регистрованих појединим моделима генерисања корекција у случајним и повољним условима. Општи закључак је да су најбољи резултати за регистровање вертикалних помјерања ГНСС технологијом на основу позиционирања у оквиру мреже перманентних ГНСС станица, добијени пријеном MAX модела за генерисање корекција, при чему је минимална величина сигурно регистрованог помјерања већа од $1 \cdot \sigma_{POZ}$.

6.3.2. Анализа и тестирање регистровања континуираних помјерања

Регистровање континуираних помјерања анализирано је и тестирано у складу са основном теоријском поставком да су се геодетски сензори кретали по просторој кружници у равни локалног хоризонта (локалне вертикале код дигиталног прецизног нивелира), при чему је била позната (задана) вриједност инкремента помјерања и полупречника конзоле која ротира. Сагласно томе, за роботизовану тоталну станицу и ГНСС пријемник тестирано је следеће:

- једнакост изведених и регистрованих инкремента помјерања,
- припадност регистрованих позиција просторној (3Д) кружници познатих параметара,
- припадност регистрованих позиција хоризонталној (2Д) кружници познатих параметара и
- припадност регистрованих позиција истој (1Д) равни хоризонта.

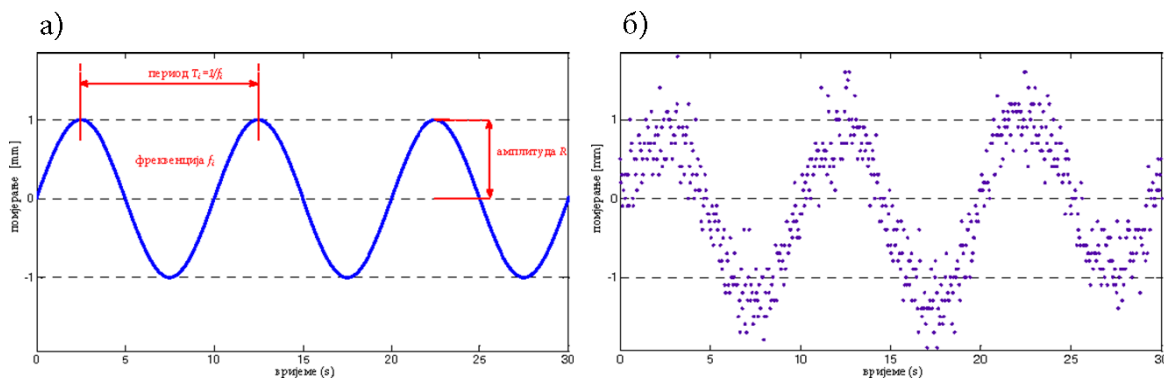
При тестирању једнакости изведених и регистрованих инкремента помјерања коришћена је методологија и поступак као за тестирање регистровања дискретних помјерања. За дигитални прецизни нивелир тестирана је припадност регистрованих позиција кружници у вертикалној равни.

Изведена континуирана помјерања геодетских сензора могу се описати на више начина, а самим тим може се извршити и више тестирања да ли су изведена

помјерања регистрована. Прво су помјерања описана као просторне и хоризонталне кружнице познатих параметара: највјероватнијих вриједности координата центра ротације, највјероватнијих вриједности координата почетне тачке ротације и полупречника конзоле која ротира. Такве путање су заправо функције координата тачака изведених инкремента помјерања. Изведене путање се, посматрано по координатним осама, могу описати и као осцилације (синусиодалне криве) у функцији времена (t), што се математички може описати једначином:

$$f(t) = A \sin(2\pi f_i t + \varphi) \quad (5.84)$$

Графички представљено, континуирано кретање у функцији времена се може приказати као синусиодална крива периода T_i . Период T_i представља вријеме трајања једне пуне ротације (временски интервал између два проласка кроз почетну тачку ротације). Фреквенција ротације f_i представља број ротација у јединици времена ($f_i = 1/T_i$), док се амплитудом A може сматрати максимална удаљеност од средњег положаја ротације, што је у наведеном случају полупречник конзоле симулатора континуираних помјерања R . Описано тестирање шематски се може приказати као на *Слици 6-17*.



Слика 6-17. Шематски приказ тестирања регистровања континуираних помјерања: а) изведено симулатором континуираних помјерања уз задано R и f_i и б) регистровано геодетским мјерним системима

Као мјере квалитета регистровања континуираних помјерања (изведених путања) рачуната су одступања од просторних и хоризонталних кружница, као и одступања по координатним осама. Добијене вриједности поређене су са прорачунатим и очекиваним вриједностима стандардних одступања, како би се утврдио степен њихове статистичке сагласности. Додатно, за сваки спроведени експеримент рачунат је коефицијент корелације укупне изведене путање и њене најбоље оцјене из регистрованих положаја. Тестирања су спроведена кроз апликације намјенски развијене у оквиру програмског пакета *MATLAB*.

6.3.2.1. *Анализа и тестирање регистровања континуираних помјерања роботизованом тоталном станицом*

Роботизованом тоталном станицом у случајним јутарњим условима и са позиције *RTS200*, регистрована су континуирана помјерања, при чему је инкремент помјерања био 15 mm. Инкремент је према плану практичних истраживања извођен у експериментима са фреквенцијама од 5 Hz, 2,5 Hz, 1,67 Hz и 1 Hz. Имајући у виду наведене податке, може се закључити да су брзине кретања призматичног пасивног 360° рефлектора биле у интервалу од 0,015 m/s до 0,075 m/s.

У Табели 6-19 приказани су најважнији статистички показатељи успјешности регистровања инкремената помјерања, добијени за поједине фреквенције, што је био први дио анализе и тестирања регистровања континуираних помјерања.

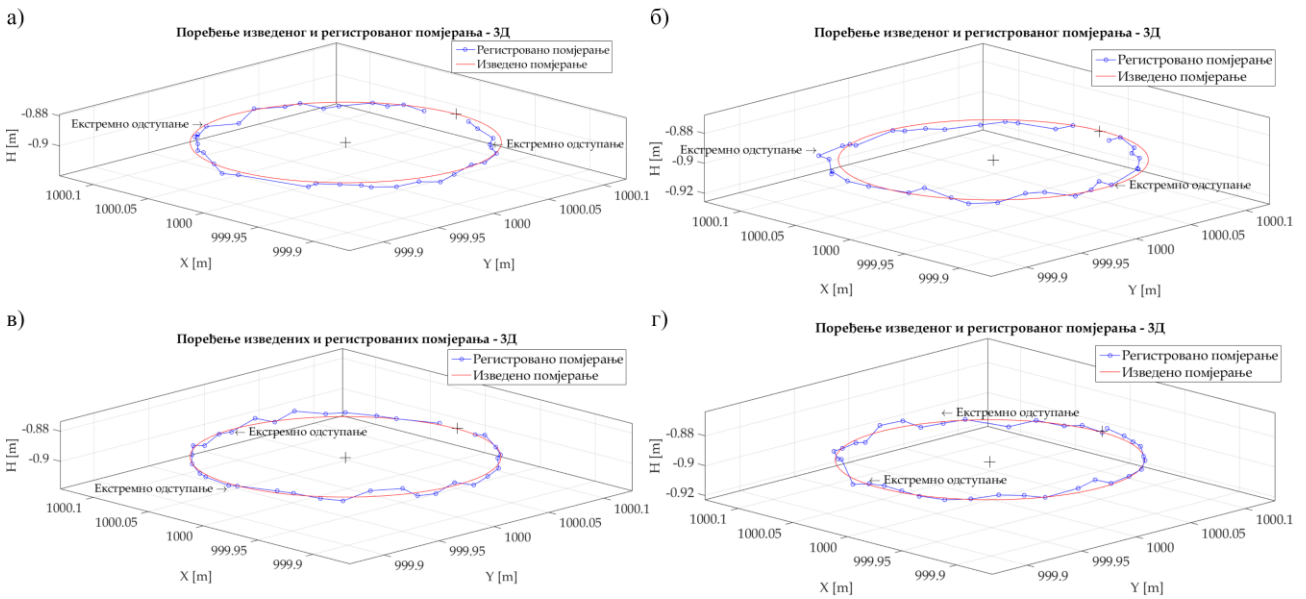
Табела 6-19. Сумарни резултати регистровања континуираних помјерања роботизованом тоталном станицом – инкременти помјерања

Фреквенција понављања инкремента просторног помјерања	Разлика изведеног и регистрованог инкремента просторног помјерања $r_{d_{XYZ}} = d_{XYZ}^p - d_{XYZ}^m$ [mm]			$r_{d_{XYZ}} / d_{XYZ}^p < 20\%$	$r_{d_{XYZ}} < 1 \cdot \sigma_{d_{XYZ}}^m$	$r_{d_{XYZ}} < 2 \cdot \sigma_{d_{XYZ}}^m$	$r_{d_{XYZ}} < 3 \cdot \sigma_{d_{XYZ}}^m$	$r_{d_{XYZ}} < 5 \cdot \sigma_{d_{XYZ}}^m$
	min	$\bar{r}_{d_{XYZ}}$	$\sigma_{d_{XYZ}}$	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
	max							
f_n	-38,5	-1,4	$\pm 8,5$	44	44	81	92	94
	8,9							
$f_n / 2$	-20,3	-2,7	$\pm 6,0$	43	54	77	86	97
	6,6							
$f_n / 3$	-16,9	-2,8	$\pm 4,8$	50	62	85	94	100
	3,3							
$f_n / 5$	-13,6	-2,8	$\pm 3,4$	67	72	86	97	100
	1,0							

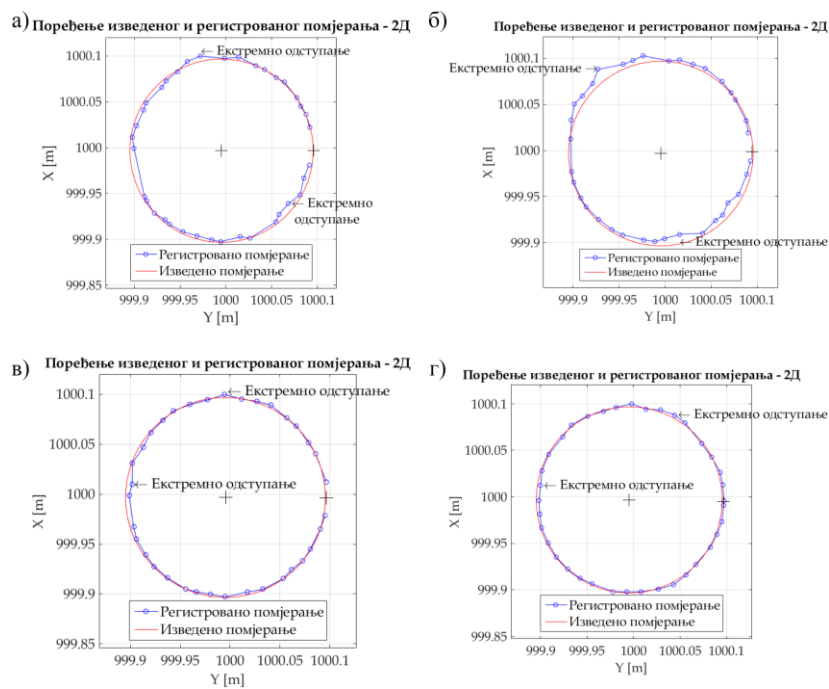
Тестирањем линеарних хипотеза утврђено је да постоје разлике између изведених и регистрованих инкремента помјерања, за остварене резултате мјерења и усвојени ниво статистичке значајности. Разлике се крећу у интервалу од -38,5 mm до 8,9 mm. Односи разлика добијених између изведених и регистрованих инкремената помјерања и изведених инкремената помјерања су мањи или једнаки 20 % за релативно мали проценат изведених инкремената помјерања, имајући у виду да је на основу закључака експеримената регистровања дискретних помјерања и прорачуна из плана експеримената регистровања континуираних помјерања било очекивано да буду регистровани сви изведени инкременти. Општи закључак је да су се на већим фреквенцијама извођења инкремената помјерања појавила већа одступања, тј. при већим брзинама кретања рефлектора мањи је проценат регистрованих инкремената помјерања.

Други дио анализе и тестирања регистровања континуираних помјерања роботизованом тоталном станицом подразумијевао је утврђивање могућности регистровања тачно изведене просторне кружнице, посматране из неколико аспеката у локалном координатном систему.

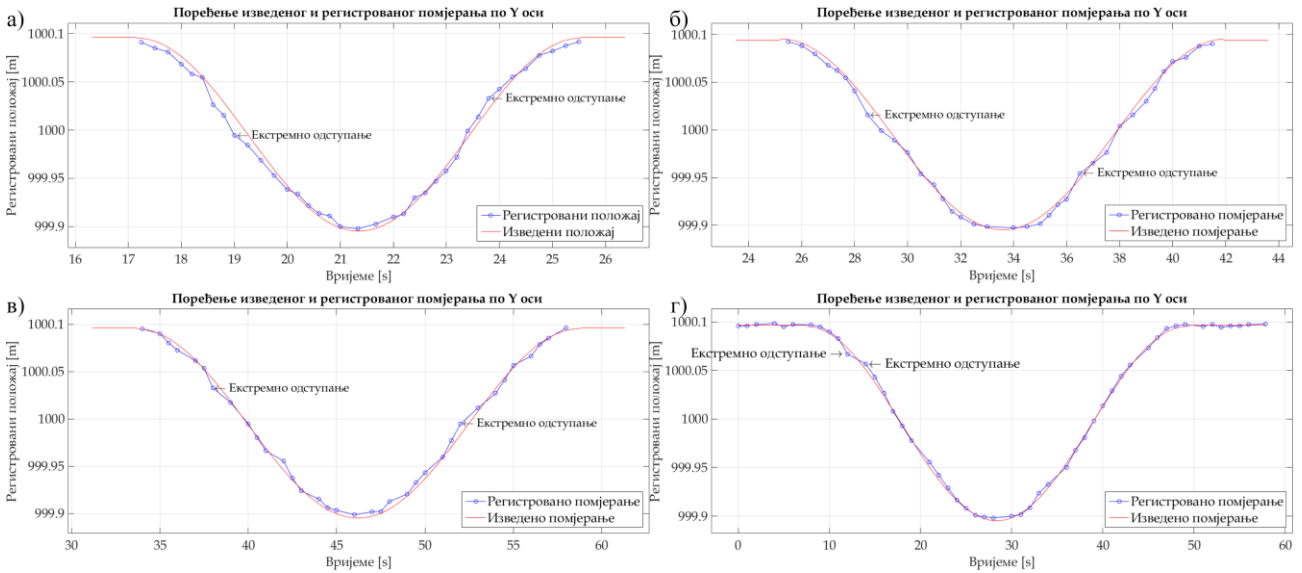
У циљу сагледавања квалитета регистровања континуираних помјерања роботизованом тоталном станицом и доношења правилних закључака, за сваки изведени експеримент генерисани су графички прикази остварених симулирања и резултата мјерења. На Слици 6-18 приказани су резултати регистровања просторне кружнице при претходно наведеним фреквенцијама, на Слици 6-19 резултати регистровања хоризонталне кружнице, а на Сликама 6-20, 6-21 и 6-22 резултати регистровања континуираних помјерања у односу на осе изабраног локалног координатног система.



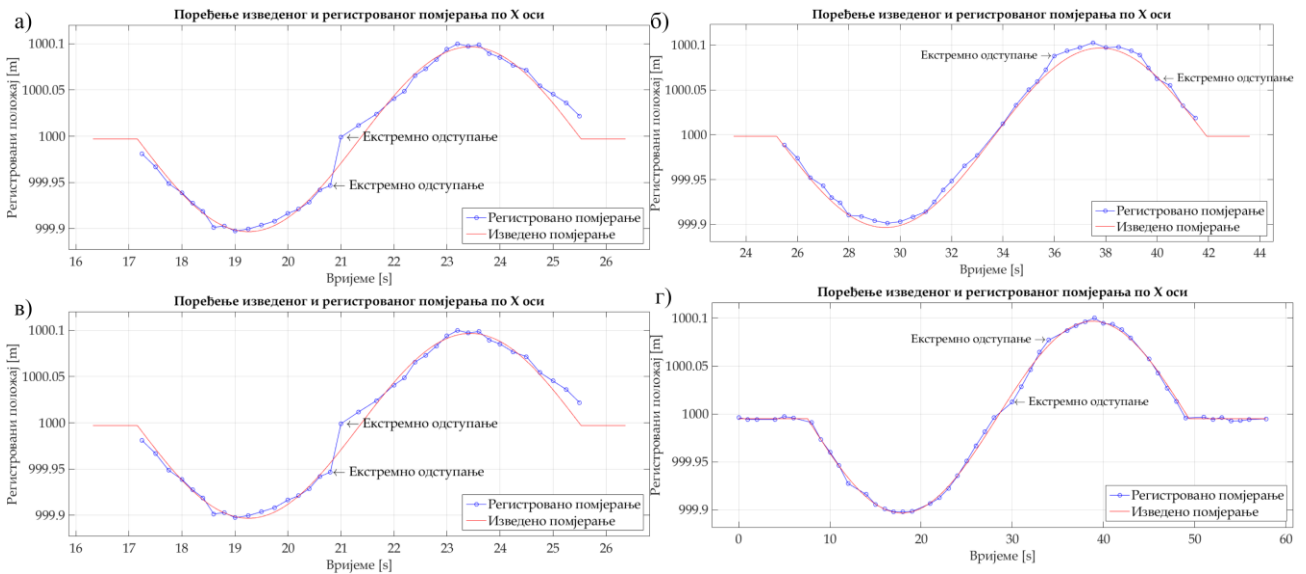
Слика 6-18. Регистровање континуираних помјерања роботизованом тоталном станицом – просторне кружнице: а) f_n , б) $f_n / 2$, в) $f_n / 3$, г) $f_n / 5$



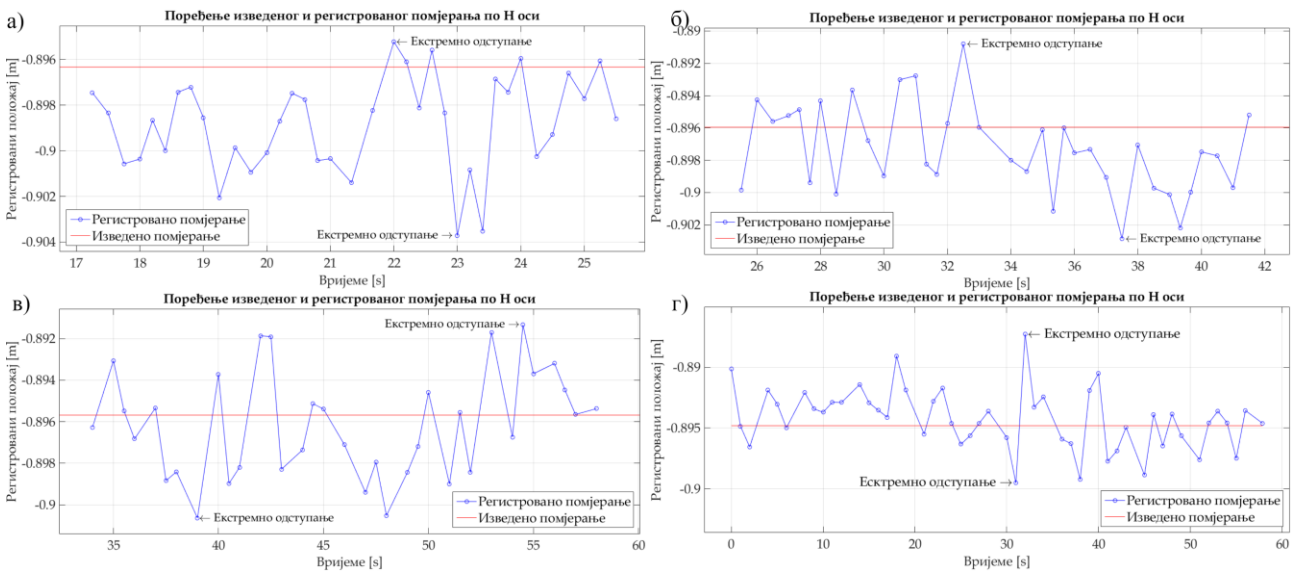
Слика 6-19. Регистровање континуираних помјерања роботизованом тоталном станицом – хоризонталне кружнице: а) f_n , б) $f_n / 2$, в) $f_n / 3$, г) $f_n / 5$



Слика 6-20. Регистровање континуираних помјерања роботизованом тоталном станицом – Y оса: а) f_n , б) $f_n/2$, в) $f_n/3$, г) $f_n/5$

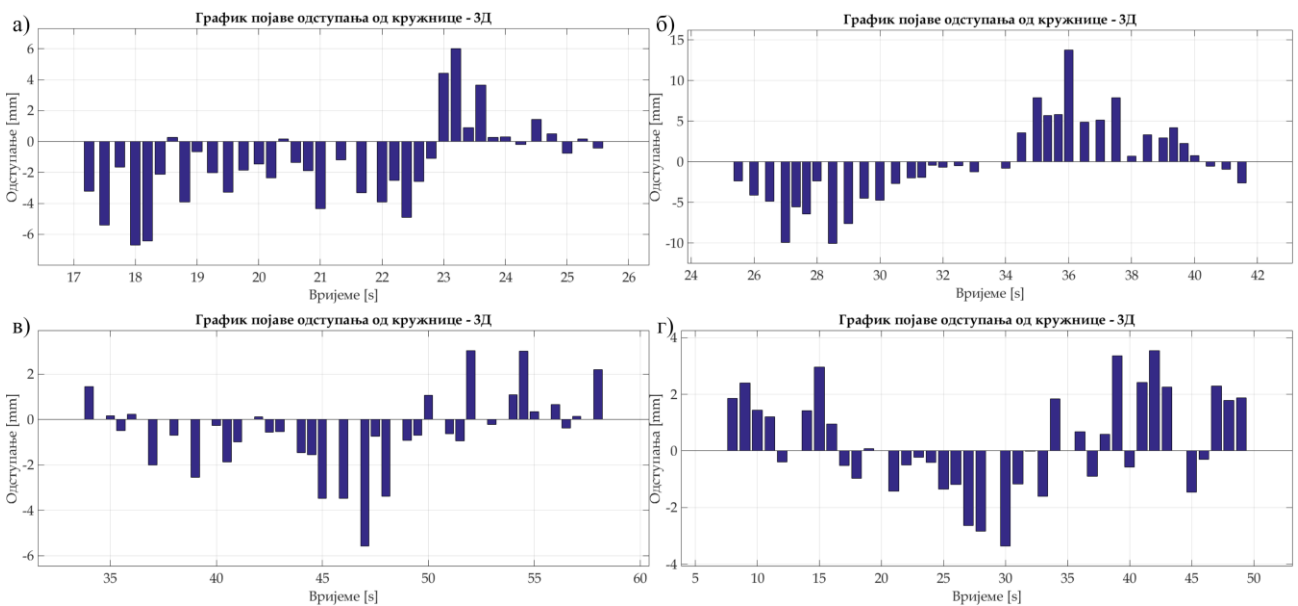


Слика 6-21. Регистровање континуираних помјерања роботизованом тоталном станицом – X оса: а) f_n , б) $f_n/2$, в) $f_n/3$, г) $f_n/5$

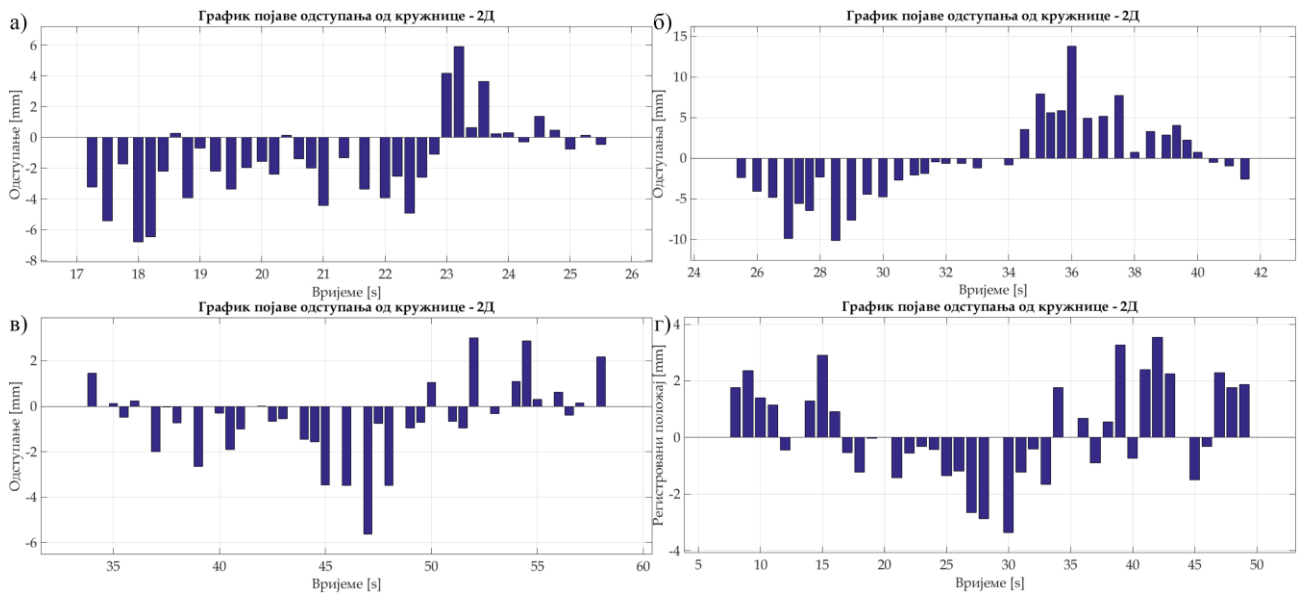


Слика 6-22. Регистровање континуираних помјерања роботизованом тоталном станицом – Н оса: а) f_n , б) $f_n/2$, в) $f_n/3$, г) $f_n/5$

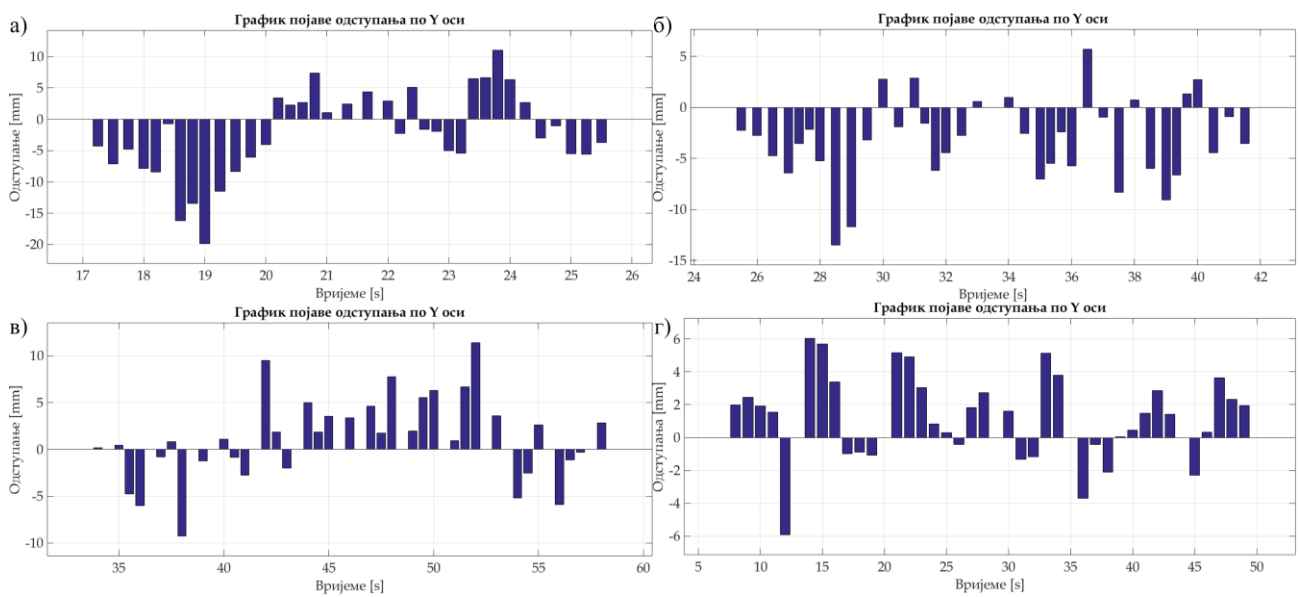
С обзиром да су у претходној графичкој анализи уочена значајна одступања регистрованих од изведених путања, подаци су додатно анализирани и генерисани су графици појаве одступања у времену. На Сликама 6-23, 6-24 и 6-25 приказане су појаве одступања у времену, за исте експерименталне случајеве приказане на претходним графицима.



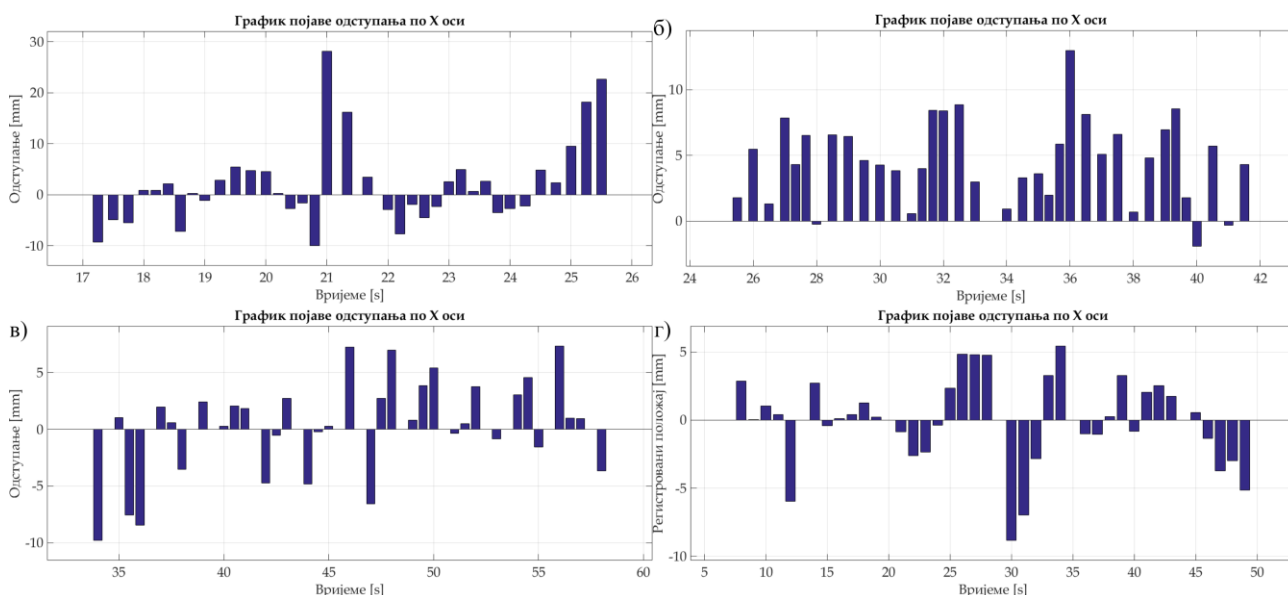
Слика 6-23. Одступања при регистровању континуираних помјерања роботизованом тоталном станицом – просторне кружнице: а) f_n , б) $f_n/2$, в) $f_n/3$, г) $f_n/5$



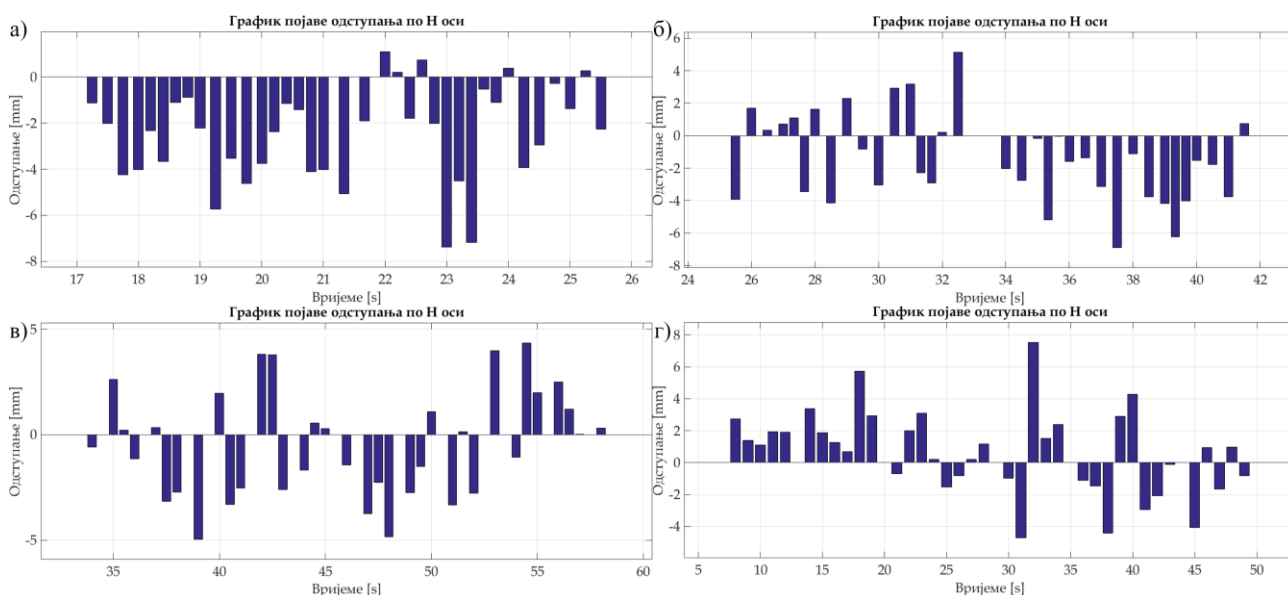
Слика 6-24. Одступања при регистровању континуираних помјерања роботизованом тоталном станицом – хоризонталне кружнице: а) f_n , б) $f_n / 2$, в) $f_n / 3$, г) $f_n / 5$



Слика 6-25. Одступања при регистровању континуираних помјерања роботизованом тоталном станицом – Y оса : а) f_n , б) $f_n / 2$, в) $f_n / 3$, г) $f_n / 5$



Слика 6-26. Одступања при регистровању континуираних помјерања роботизованом тоталном станицом – X оса : а) f_n , б) $f_n / 2$, в) $f_n / 3$, г) $f_n / 5$



Слика 6-27. Одступања при регистровању континуираних помјерања роботизованом тоталном станицом – N оса : а) f_n , б) $f_n / 2$, в) $f_n / 3$, г) $f_n / 5$

Анализирајући графике регистровања континуираних помјерања и графике одступања може се уочити постојање проблема праћења рефлектора у покрету, и повећање интензитета разлика са повећањем брзине његовог кретања.

У Табели 6-20 дати су сумарни статистички показатељи квалитета регистровања континуираних помјерања и изведених путања роботизованом тоталном станицом у наведеним условима.

Табела 6-20. Сумарни резултати регистравања континуираних помјерања роботизованом тоталном станицом - путање

Учесталост	Одступање 3Д		Одступање 2Д			Одступање по Y оси			Одступање по X оси			Одступање по H оси	
	min [mm]	просјечно [mm]	min [mm]	просјечно [mm]	R_{yx}	min [mm]	просјечно [mm]	R_y	min [mm]	просјечно [mm]	R_x	min [mm]	просјечно [mm]
	max [mm]		max [mm]			max [mm]			max [mm]			max [mm]	
f_n	2.6	9.8	2.3	9.2	0.9877	-19.9	7.1	0.9887	-10.0	8.4	0.9867	-7.4	3.2
	28.5		28.2			11.1			28.2			1.1	
$f_n/2$	1.5	7.4	1.0	6.7	0.9942	-13.5	5.2	0.9942	-1.9	5.6	0.9941	-6.9	3.1
	15.6		15.0			5.7			13.0			5.2	
$f_n/3$	1.0	6.0	1.0	5.2	0.9960	-9.3	4.6	0.9954	-9.3	4.2	0.9966	-5.0	2.6
	12.3		12.0			11.4			7.4			4.4	
$f_n/5$	0.9	4.7	0.9	3.8	0.9981	-5.9	2.9	0.9983	-8.8	3.3	0.9978	-4.7	2.7
	9.0		9.0			6.0			5.4			7.5	

И на основу резултата приказаних у Табели 6-20, изводи се општи закључак да су лошија подударана изведених и регистрованих путања са порастом фреквенције извођења инкремента помјерања, односно са повећањем брзине кретања рефлектора. У свим случајевима су просјечне вриједности одступања мање од $3 \cdot \sigma_{POZ}$. У случајевима када је брзина регистравања помјерања била три и више пута већа од брзине њиховог извођења, екстремне вриједности су биле мање од $5 \cdot \sigma_{POZ}$. Добијене вриједности коефицијената корелације додатно потврђују чињеницу да су путање успјешно регистроване.

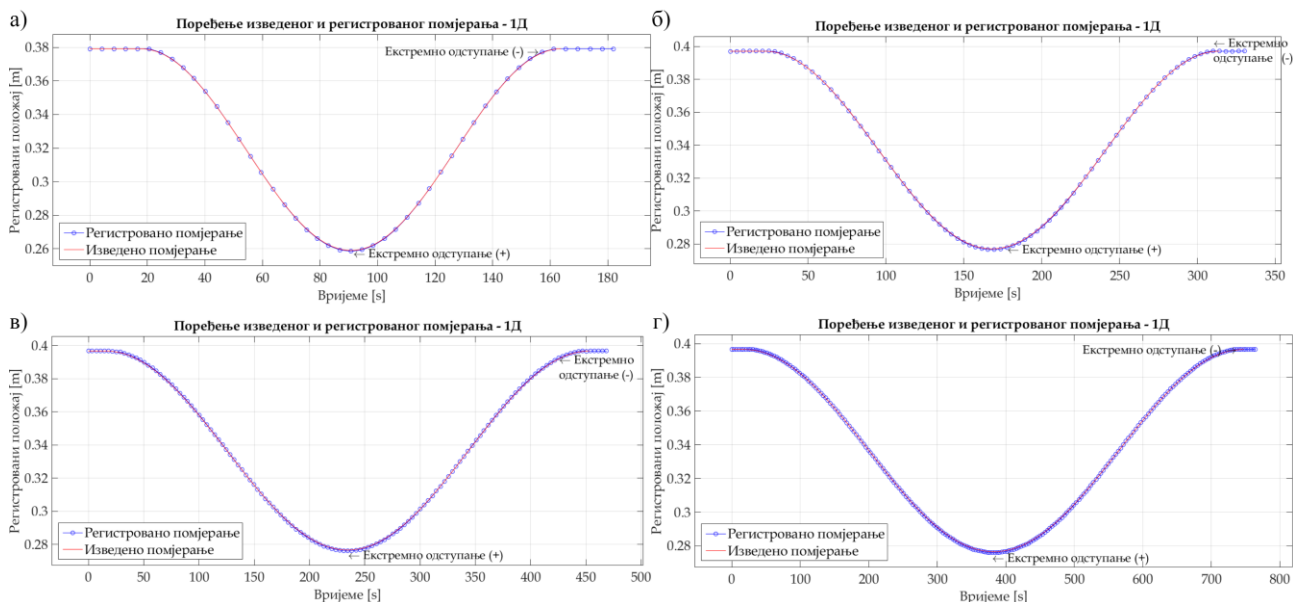
Разлози за појаву одступања при регистравању континуираних помјерања роботизованом тоталном станицом су несавршеност система за праћење рефлектора у покрету, посебно ако се креће брзинама блиским брзини регистравања помјерања, што су закључци до којих су дошли и други истраживачи. И у овом истраживању се показало да постоје проблеми регистравања релативно малих помјерања, тј. помјерања блиских тачности њиховог регистравања, при високој фреквенцији регистравања, која је у изведеним експериментима била максимална могућа за примјењени мјерни систем. Додатно се појава ових одступања може довести у везу са промјеном оријентације рефлектора, који је у току извођења експеримента био чврсто везан за конзолу симулатора. Овакви закључци могу се довести у везу са резултатима истраживања приказаним у [313]. Наведене чињенице би требало узети у обзир при планирању перменетног осматрања уколико се желе регистровати помјерања као што је торзија и сл. Кроз даља истраживања може се испитати могућност смањења утицаја оријентације рефлектора на тачност регистравања помјерања, тј. његове елиминације или моделовања.

6.3.2.2. Анализа и тестирање регистравања континуираних помјерања дигиталним прецизним нивелиром

Дигиталним прецизним нивелиром, у случајном јутарњем периоду, и са позиције са које су регистрована дискретна помјерања, регистрована су континуирана помјерања симулирана вертикалном кружницом. Према плану практичних истраживања континуирана помјерања су извођена са фреквенцијама од 0,33 Hz, 0,16 Hz, 0,11 Hz и 0,07 Hz.

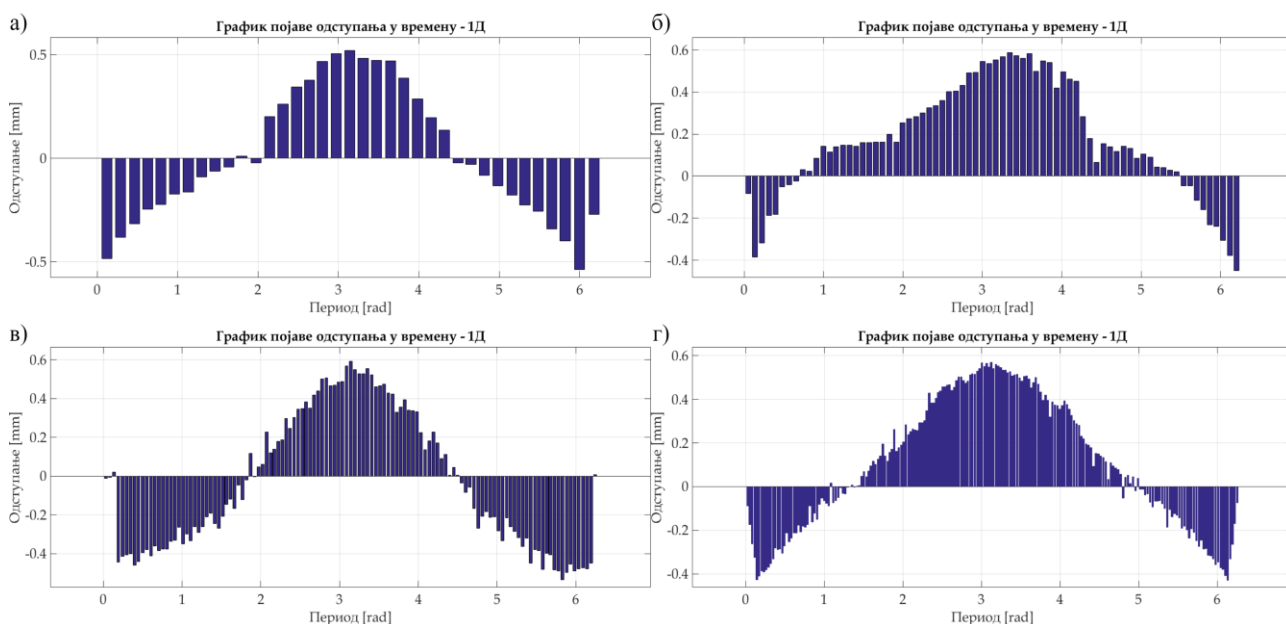
Имајући у виду концепт извођења симулираних помјерања, анализа и тестирање подразумијевали су утврђивање могућности дигиталног прецизног нивелира за регистровање континуираних помјерања летве на вертикалној кружници, посматрано по вертикалној оси локалног координатног система.

Као и у случају претходног мјерног система, за потребе утврђивања квалитета регистровања континуираних помјерања генерисани су графички прикази остварених резултата регистровања и симулирања (Слика 6-28).



Слика 6-28. Регистровање континуираних помјерања дигиталним прецизним нивелиром:
а) f_n , б) $f_n/2$, в) $f_n/3$, г) $f_n/5$

Анализирајући графике регистровања континуираних помјерања може се уочити добра општа сагласност изведених и регистрованих путања. Овакав закључак додатно потврђују добијене вриједности коефицијената корелације (Табела 6-21). За додатну анализу квалитета регистровања континуираних вертикалних помјерања генерисани су графици појаве одступања у времену, за исте експерименталне случајеве приказане на претходним графицима.



Слика 6-29. Одступања при регистровању континуираних помјерања дигиталним прецизним нивелиром: а) f_n , б) $f_n / 2$, в) $f_n / 3$, г) $f_n / 5$

Анализирајући графике одступања може се уочити појава одступања различитог интензитета у зависности од промјене интензитета вертикалног помјерања и удаљености летве од инструмента. Најмања одступања су у случајевима када је интензитет промјене вертикалних помјерања био већи од интензитета промјене удаљености, и обрнуто. То значи да се при пројектовању и изградњи система за перманентно осматрање вертикалних помјерања објеката заснованих на примјени дигиталних прецизних нивелира мора узети у обзир и величина промјене хоризонталне удаљености од инструмента до летве, која може утицати на тачност вертикалног позиционирања.

Табела 6-21. Статистички показатељи успјешности регистровања континуираних помјерања дигиталним прецизним нивелиром

Фреквенција извођења помјерања	Одступања по Н оси		
	min [mm] max [mm]	просјечно [mm]	индекс криволинијске корелације
f_n	-0,54 0,52	0,31	0,9999
$f_n / 2$	-0,45 0,53	0,31	0,9999
$f_n / 3$	-0,53 0,54	0,31	0,9999
$f_n / 5$	-0,43 0,50	0,31	0,9999

На основу резултата приказаних у Табели 6-21, изводи се закључак да су у свим случајевима добијене готово исте вриједности одступања регистрованих положаја од изведених. Екстремне вриједности одступања у свим изведеним експерименталним случајевима су мање или једнаке $5 \cdot \sigma_{POZ}$, док су вриједности просјечних одступања мање или једнаке $3 \cdot \sigma_{POZ}$.

6.3.2.3. Анализа и тестирање регистровања континуираних помјерања ГНСС технологијом у односу на кориснички успостављен базни пријемник

ГНСС технологијом, у односу на кориснички успостављен базни пријемник и у случајним условима регистрована су континуирана помјерања, при чему је инкремент помјерања био 17 mm. Према плану практичних истраживања, инкремент помјерања извођен је са фреквенцијама од 5 Hz, 2,5 Hz, 1,67 Hz и 1 Hz. То значи да су брзине кретања ГНСС пријемника биле у интервалу од 0,017 m/s до 0,085 m/s.

Најважнији статистички показатељи успијешности регистровања инкремената помјерања, за изведене фреквенције, приказани су у Табели 6-22.

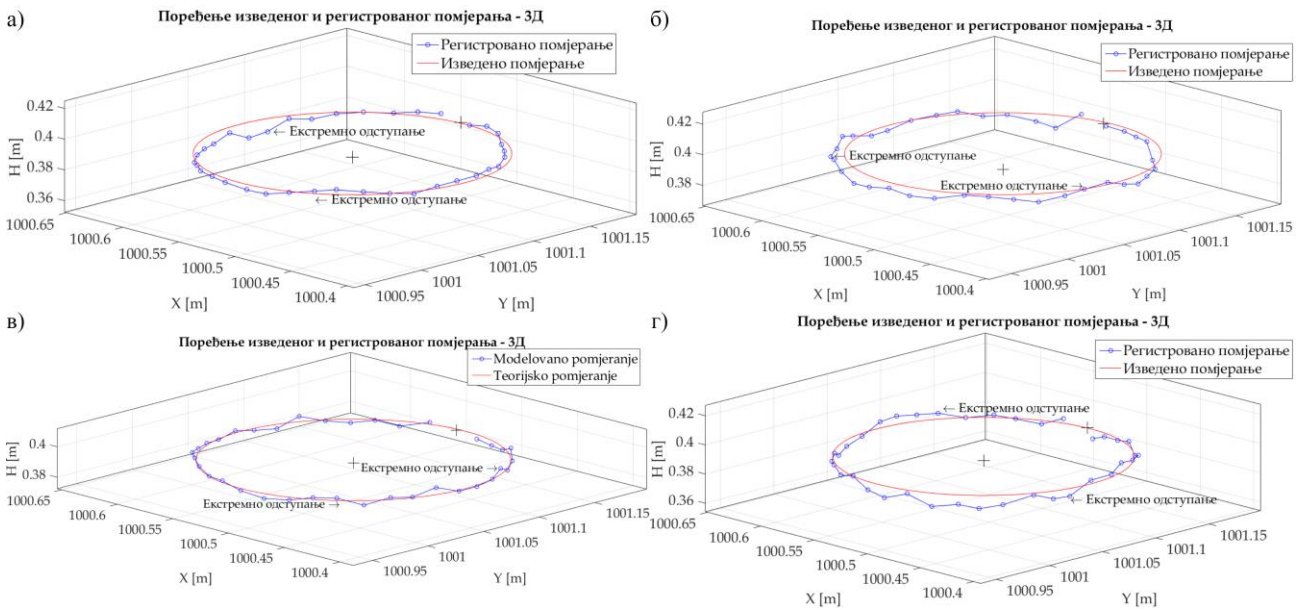
Табела 6-22. Сумарни резултати регистровања континуираних помјерања ГНСС технологијом у односу на кориснички успостављен базни пријемник – инкременти помјерања

Фреквенција понављања инкремента просторног помјерања	Разлика изведеног и регистрованог инкремента просторног помјерања $r_{d_{XYZ}} = d_{XYZ}^P - d_{XYZ}^M$ [mm]			$r_{d_{XYZ}} / d_{XYZ}^P < 20 \%$	$r_{d_{XYZ}} < 1 \cdot \sigma_{d_{XYZ}}^M$	$r_{d_{XYZ}} < 2 \cdot \sigma_{d_{XYZ}}^M$	$r_{d_{XYZ}} < 3 \cdot \sigma_{d_{XYZ}}^M$	$r_{d_{XYZ}} < 5 \cdot \sigma_{d_{XYZ}}^M$
	min	$\bar{r}_{d_{XYZ}}$	$\sigma_{d_{XYZ}}$	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
	max							
f_n	-7,4	-0,3	$\pm 2,1$	86	100	100	100	100
	3,5							
$f_n / 2$	-4,7	0,0	$\pm 1,2$	97	100	100	100	100
	1,3							
$f_n / 3$	-3,3	-0,4	$\pm 1,7$	100	100	100	100	100
	2,8							
$f_n / 5$	-2,4	0,4	$\pm 1,0$	100	100	100	100	100
	2,8							

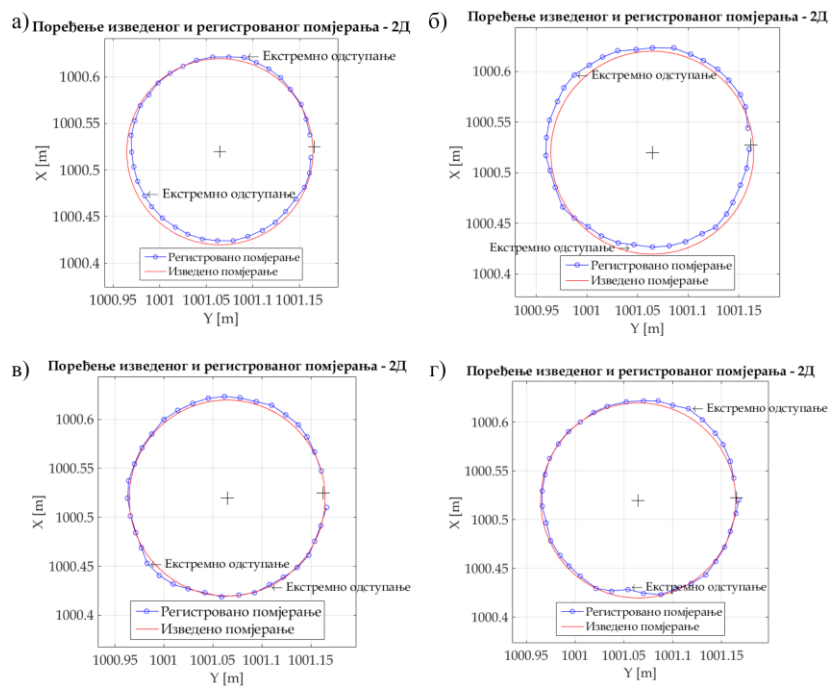
Тестирањем линеарних хипотеза утврђено је да су у свим изведеним експерименталним случајевима регистровани сви изведени инкременти помјерања, за остварене резултате и усвојени ниво статистичке значајности. Разлике изведених и регистрованих инкремената помјерања налазе се у интервалу од -7,4 mm до +3,5 mm, при чему су средње вриједности разлика мање од 1 mm. Односи разлика добијених између изведених и регистрованих инкремената помјерања мањи су или једнаки 20 % за све изведене инкременте помјерања у случајевима када је брзина њиховог извођена била бар три пута мања од брзине њиховог регистровања. У свим експерименталним случајевима су ове разлике мање од $1 \cdot \sigma_{POZ}$.

Слично као и код роботизоване тоталне станице, други дио анализе и тестирања регистровања континуираних помјерања ГНСС пријемником подразумијевао је утврђивање могућности регистровања тачно изведене просторне кружнице. И у овом случају, континуирана помјерања посматрана су из неколико аспеката.

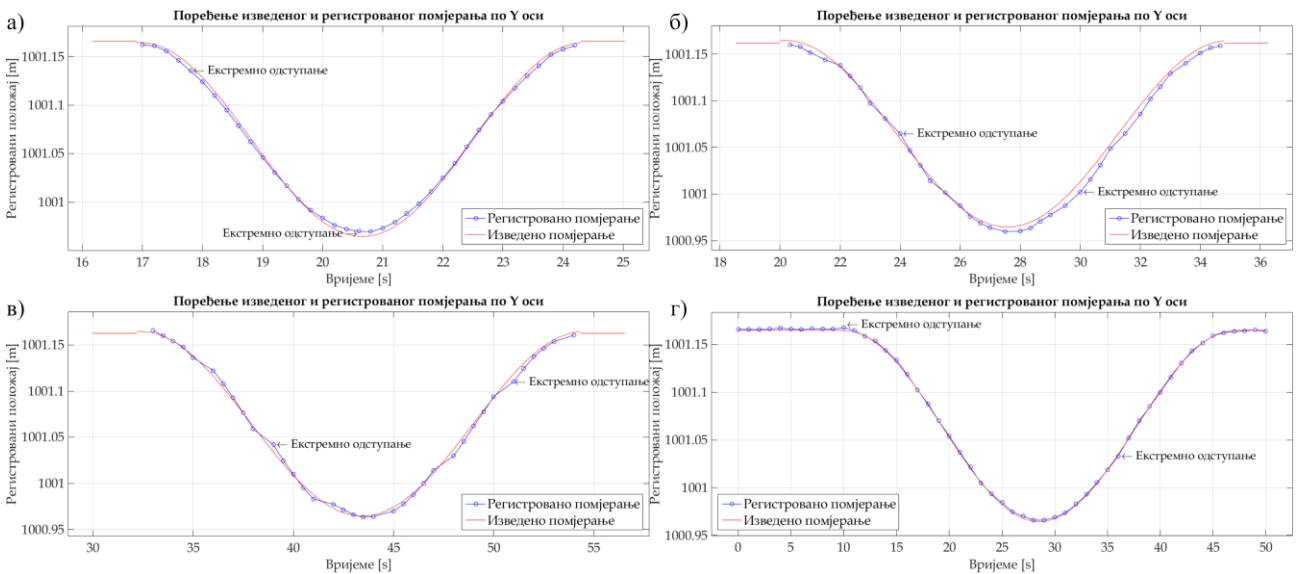
За сваки изведени експеримент генерисани су графички прикази, на основу којих је анализиран квалитет регистровања просторне (Слика 6-30) и хоризонталне (Слика 6-31) кружнице, и регистровање континуираних помјерања посматраних по координатним осама локалног координатног система (Слика 6-32, 6-33 и 6-34).



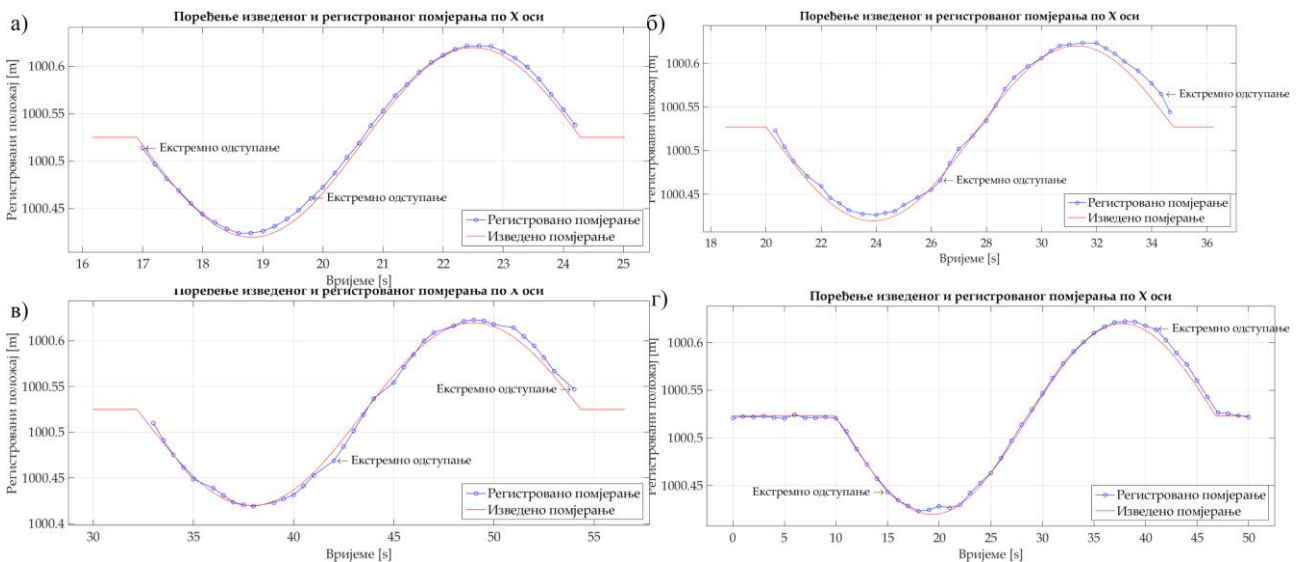
Слика 6-30. Регистравање континуираних помјерања ГНСС технологијом у односу на кориснички успостављен базни пријемник – просторне кружнице: а) f_n , б) $f_n / 2$, в) $f_n / 3$, г) $f_n / 5$



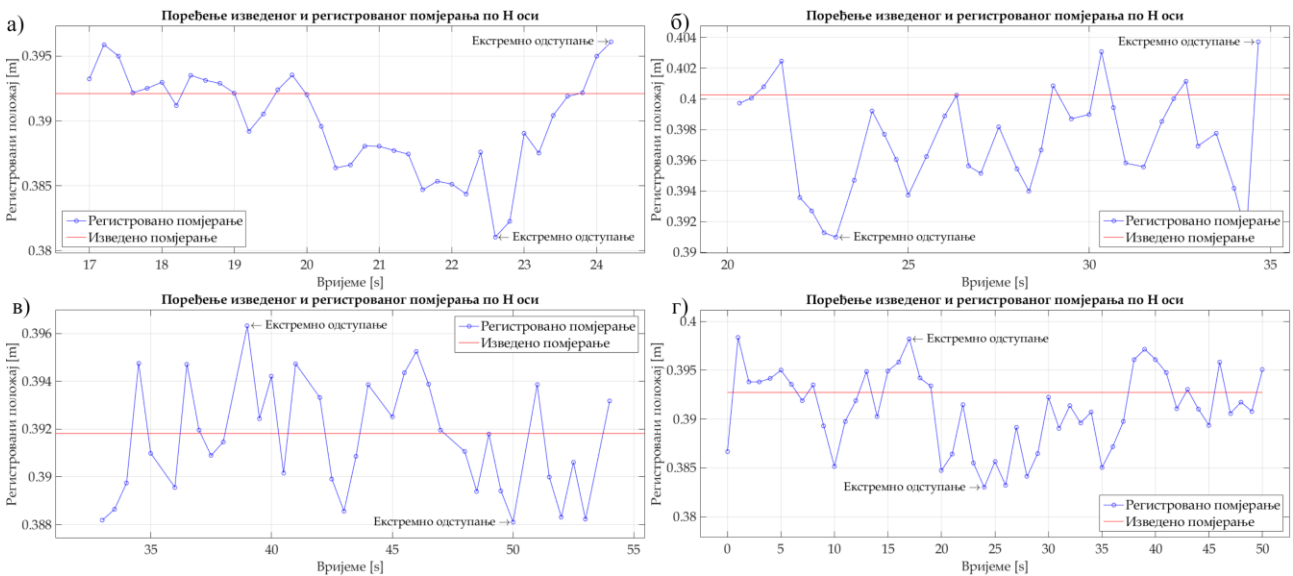
Слика 6-31. Регистравање континуираних помјерања ГНСС технологијом у односу на кориснички успостављен базни пријемник – хоризонталне кружнице: а) f_n , б) $f_n / 2$, в) $f_n / 3$, г) $f_n / 5$



Слика 6-32. Регистравање континуираних помјерања ГНСС технологијом у односу на кориснички успостављен базни пријемник – по Y оси: а) f_n , б) $f_n/2$, в) $f_n/3$, г) $f_n/5$

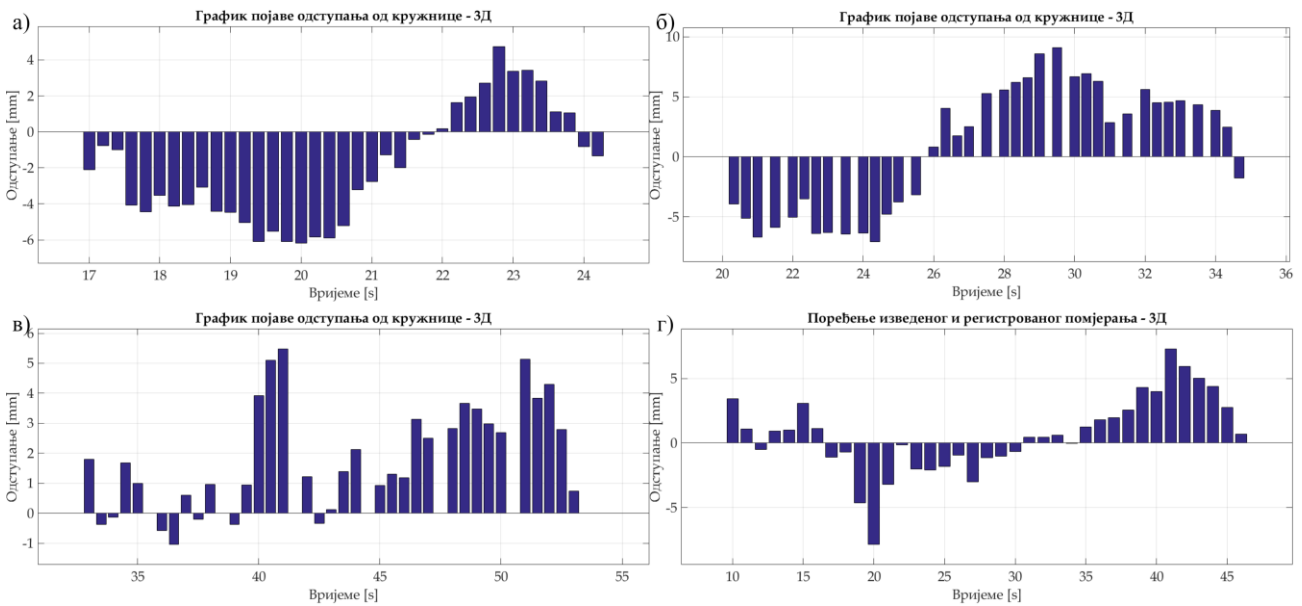


Слика 6-33. Регистравање континуираних помјерања ГНСС технологијом у односу на кориснички успостављен базни пријемник – по X оси: а) f_n , б) $f_n/2$, в) $f_n/3$, г) $f_n/5$

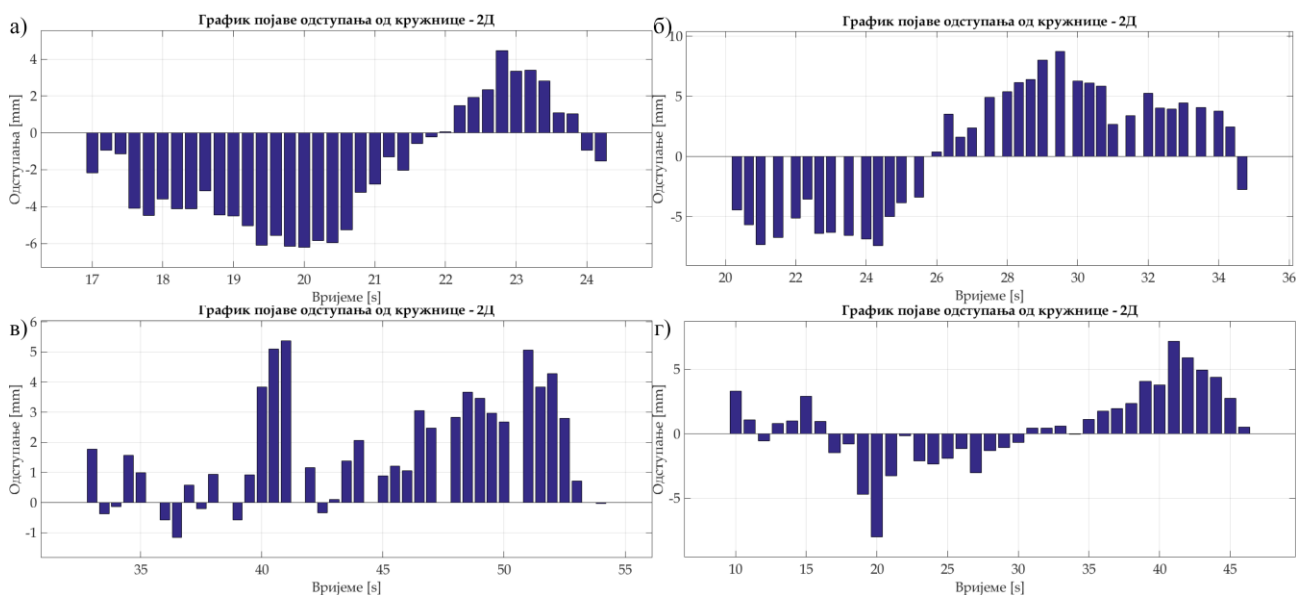


Слика 6-34. Регистравање континуираних помјерања ГНСС технологијом у односу на кориснички успостављен базни пријемник – по Н оси: а) f_n , б) $f_n/2$, в) $f_n/3$, г) $f_n/5$

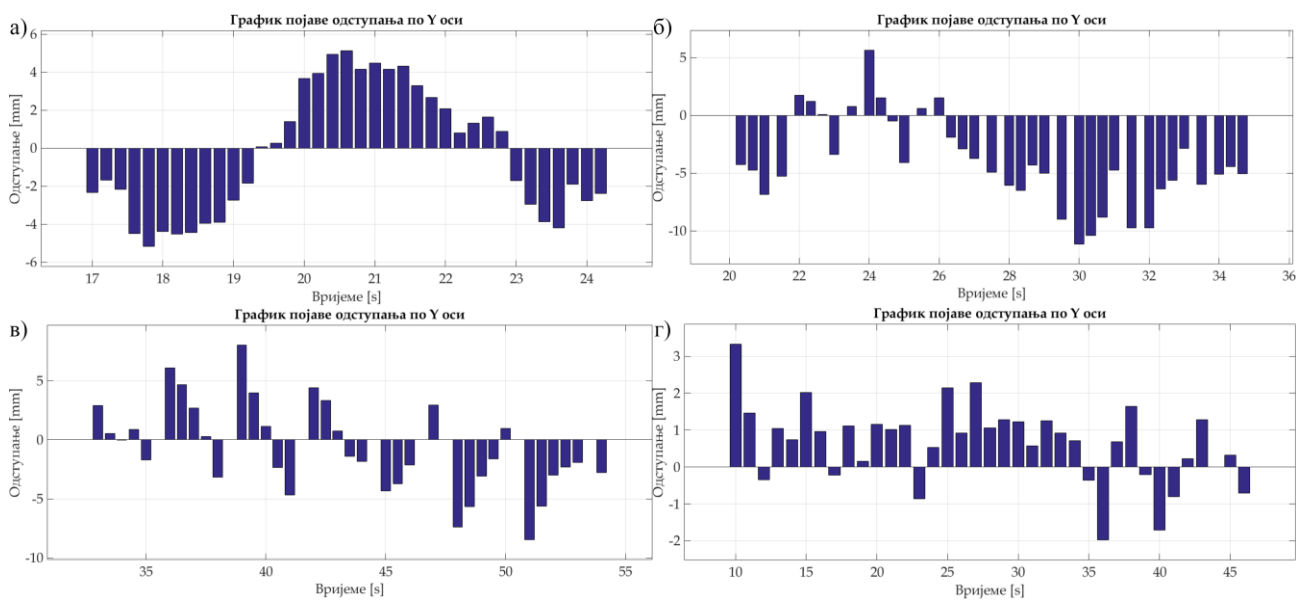
На основу претходне анализе, може се закључити да постоји добра сагласност регистрованих и изведених путања. Додатно је сагласност анализирана на основу вриједности одступања, графички приказаних на Сликама 6-35, 6-36, 6-37, 6-38 и 6-39.



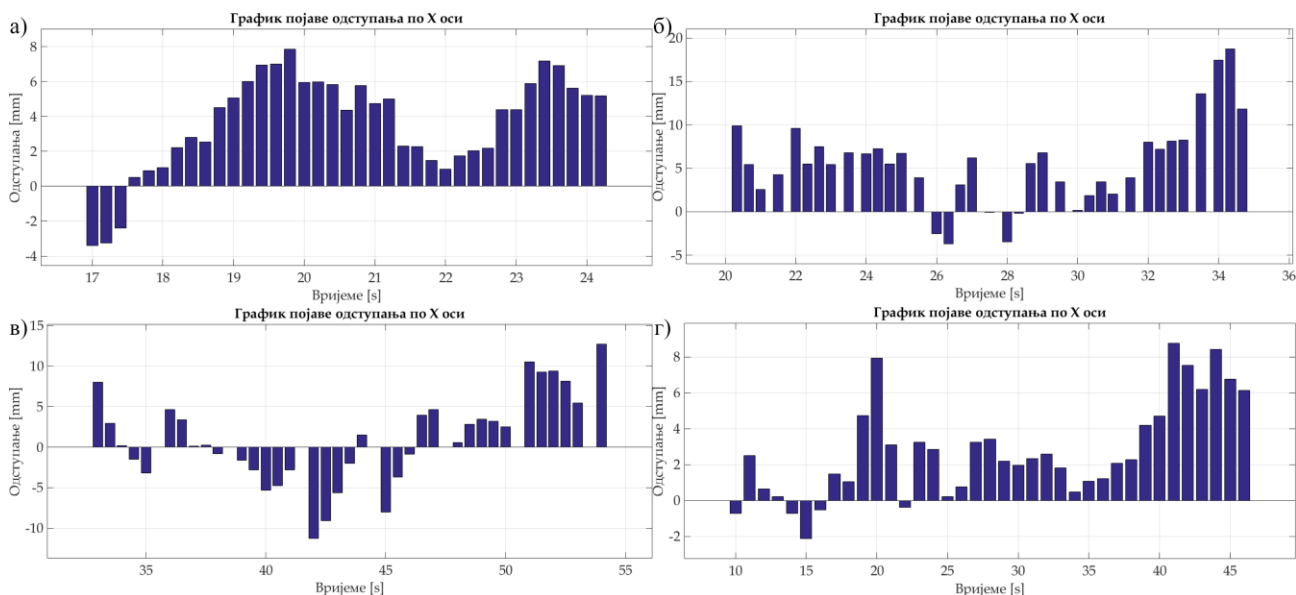
Слика 6-35. Одступања при регистравању континуираних помјерања ГНСС технологијом у односу на кориснички успостављен базни пријемник – просторне кружнице: а) f_n , б) $f_n/2$, в) $f_n/3$, г) $f_n/5$



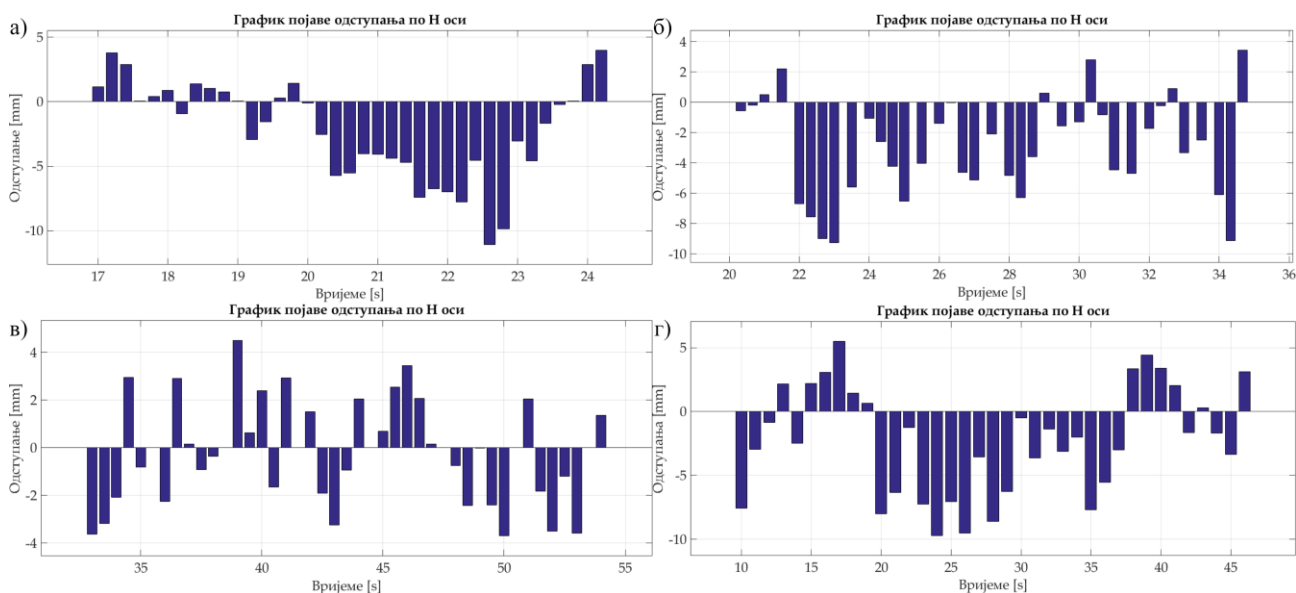
Слика 6-36. Одступања при регистравању континуираних помјерања ГНСС технологијом у односу на кориснички успостављен базни пријемник – хоризонталне кружнице: а) f_n , б) $f_n / 2$, в) $f_n / 3$, г) $f_n / 5$



Слика 6-37. Одступања при регистравању континуираних помјерања ГНСС технологијом у односу на кориснички успостављен базни пријемник – Y оса: а) f_n , б) $f_n / 2$, в) $f_n / 3$, г) $f_n / 5$



Слика 6-38. Одступања при регистравању континуираних помјерања ГНСС технологијом у односу на кориснички успостављен базни пријемник – X оса: а) f_n , б) $f_n / 2$, в) $f_n / 3$, г) $f_n / 5$



Слика 6-39. Одступања при регистравању континуираних помјерања ГНСС технологијом у односу на кориснички успостављен базни пријемник – N оса: а) f_n , б) $f_n / 2$, в) $f_n / 3$, г) $f_n / 5$

Анализирајући графике појаве одступања може се закључити да при већим брзинама извођења инкремента помјерања постоје одређени систематски ефекти. Међутим, у свим случајевима када су брзине регистравања помјерања три и више пута веће од брзине њиховог извођења, вриједности одступања су у интервалу $1 \cdot \sigma_{POZ}$.

У Табели 6-23 дати су сумарни статистички показатељи квалитета регистравања континуираних помјерања ГНСС технологијом у наведеним условима.

Табела 6-23. Сумарни резултати регистравања континуираних помјерања ГНСС технологијом у односу на кориснички успостављен базни пријемник - путање

Учесталост	Одступање 3Д		Одступање 2Д			Одступање по Y оси			Одступање по X оси			Одступање по H оси	
	min [mm]	просјечно [mm]	min [mm]	просјечно [mm]	R_{yx}	min [mm]	просјечно [mm]	R_y	min [mm]	просјечно [mm]	R_x	min [mm]	просјечно [mm]
	max [mm]		max [mm]			max [mm]			max [mm]			max [mm]	
f_n	4,3	6,9	1,9	5,4	0,9967	-5,2	3,3	0,9976	-3,4	4,6	0,9958	-11,1	4,3
	11,4		8,1			5,1			7,9			4,0	
$f_n/2$	3,3	9,6	2,9	8,6	0,9915	-11,2	5,6	0,9938	-3,7	7,4	0,9891	-9,3	4,4
	21,3		19,3			5,7			18,8			3,5	
$f_n/3$	0,9	6,4	0,2	5,8	0,9957	-8,5	3,8	0,9971	-11,3	5,6	0,9943	-3,7	2,3
	13,7		13,5			8,0			12,7			4,5	
$f_n/5$	1,1	5,7	0,7	3,4	0,9984	-2,0	1,5	0,9997	-2,1	3,9	0,9971	-9,7	4,8
	11,3		8,8			3,3			8,8			5,5	

На основу података приказаних у Табели 6-23, може се закључити да у свим случајевима постоји добра сагласност изведених и регистрованих помјерања. Са повећањем брзине извођења инкремента помјерања појављују се веће вриједности разлика. У свим експерименталним случајевима су просјечне вриједности одступања мање од $1 \cdot \sigma_{POZ}$, а екстремне вриједности су мање од $3 \cdot \sigma_{POZ}$. И у случају ГНСС технологије, добијене вриједности коефицијаната корелације показују висок ниво сагласности изведених и регистрованих путања.

6.3.2.4. Анализа и тестирање регистравања континуираних помјерања ГНСС технологијом на основу позиционирања у оквиру мреже перманентних ГНСС станица

Могућност коришћења ГНСС технологије за регистравање континуираних помјерања, је као и при регистравању дискретних помјерања истражена коришћењем мреже перманентних ГНСС станица. Како би резултати експеримента били упоредиви, и у овом случају су извођени инкременти помјерања од 17 mm, а регистровани су позиционирањем у односу на најближу перманентну станицу (NEAREST). Такође, инкременти помјерања извођени су са фреквенцијама од 5 Hz, 2,5 Hz, 1,67 Hz и 1 Hz, што значи да су брзине кретања ГНСС пријемника биле у интервалу од 0,017 m/s до 0,085 m/s.

Најважнији статистички показатељи успијешности регистравања инкремената помјерања, за описане експерименталне услове, приказани су у Табели 6-24. Тестирањем линеарних хипотеза је за све изведене инкременте помјерања, регистроване ГНСС технологијом на основу позиционирања у оквиру мреже перманентних ГНСС станица, утврђено да не постоји статистички значајна разлика од изведених инкремената помјерања, за остварене резултате мјерења и усвојени ниво статистичке значајности, у свим случајевима. Разлике изведених и регистрованих инкремената помјерања налазе се у интервалу од -6,2 mm до +4,0 mm, при чему су средње вриједности разлика мање од 1 mm. Односи разлика добијених између изведених и регистрованих инкремената помјерања и изведених инкремената помјерања су мањи или једнаки 20 % у свим експерименталним

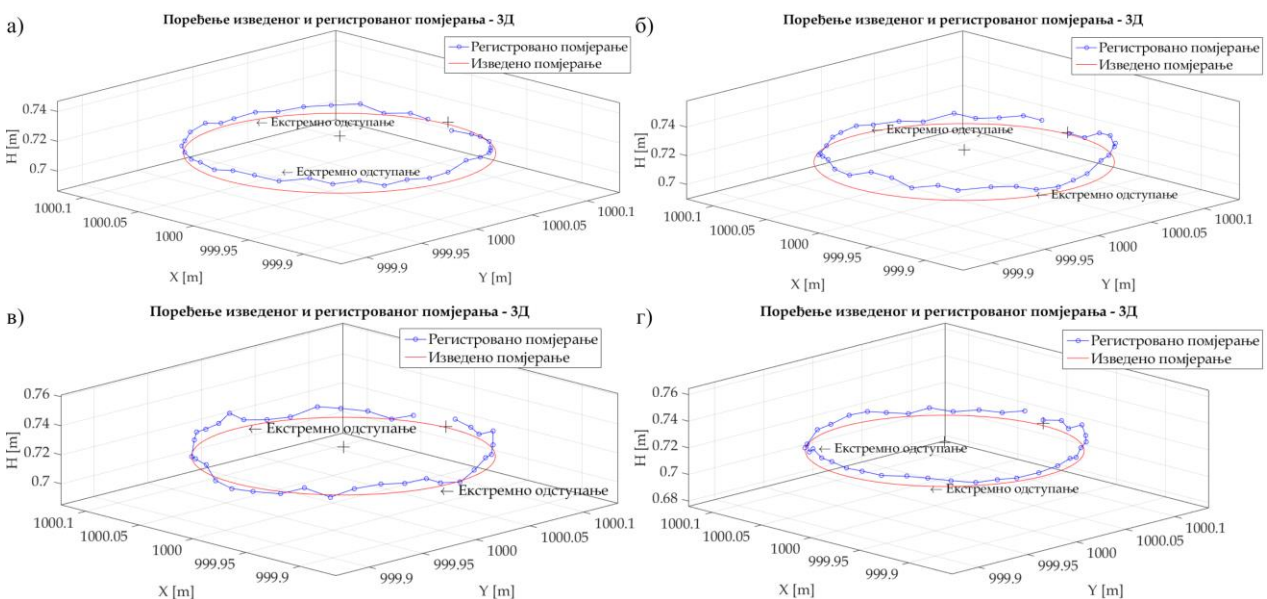
условима за 94 % изведених инкремената помјерања. У свим експерименталним случајевима разлике су мање од $1 \cdot \sigma_{POZ}$.

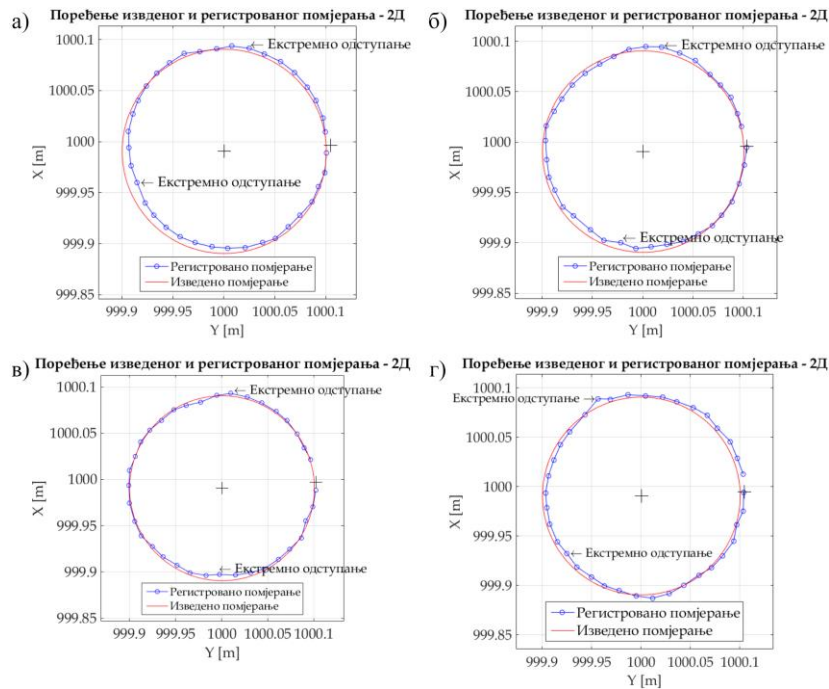
Табела 6-24. Сумарни резултати регистравања континуираних помјерања ГНСС технологијом позиционирањем у оквиру мреже перманентних ГНСС станица – инкременти помјерања

Фреквенције понављања инкремента просторног помјерања	Разлика изведеног и регистрованога инкремента просторног помјерања $r_{d_{XYZ}} = d_{XYZ}^p - d_{XYZ}^m$ [mm]			$r_{d_{XYZ}} / d_{XYZ}^p < 20 \%$	$r_{d_{XYZ}} < 1 \cdot \sigma_{d_{XYZ}}^m$	$r_{d_{XYZ}} < 2 \cdot \sigma_{d_{XYZ}}^m$	$r_{d_{XYZ}} < 3 \cdot \sigma_{d_{XYZ}}^m$	$r_{d_{XYZ}} < 5 \cdot \sigma_{d_{XYZ}}^m$
	min	$\bar{r}_{d_{XYZ}}$	$\sigma_{d_{XYZ}}$	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
	max							
f_n	-4,8 +4,0	0,2	$\pm 1,6$	94	100	100	100	100
$f_n / 2$	-4,9 +3,2	-0,1	$\pm 2,0$	92	100	100	100	100
$f_n / 3$	-6,2 +2,2	-0,4	$\pm 1,4$	94	100	100	100	100
$f_n / 5$	-3,7 +2,9	-0,5	$\pm 1,8$	97	100	100	100	100

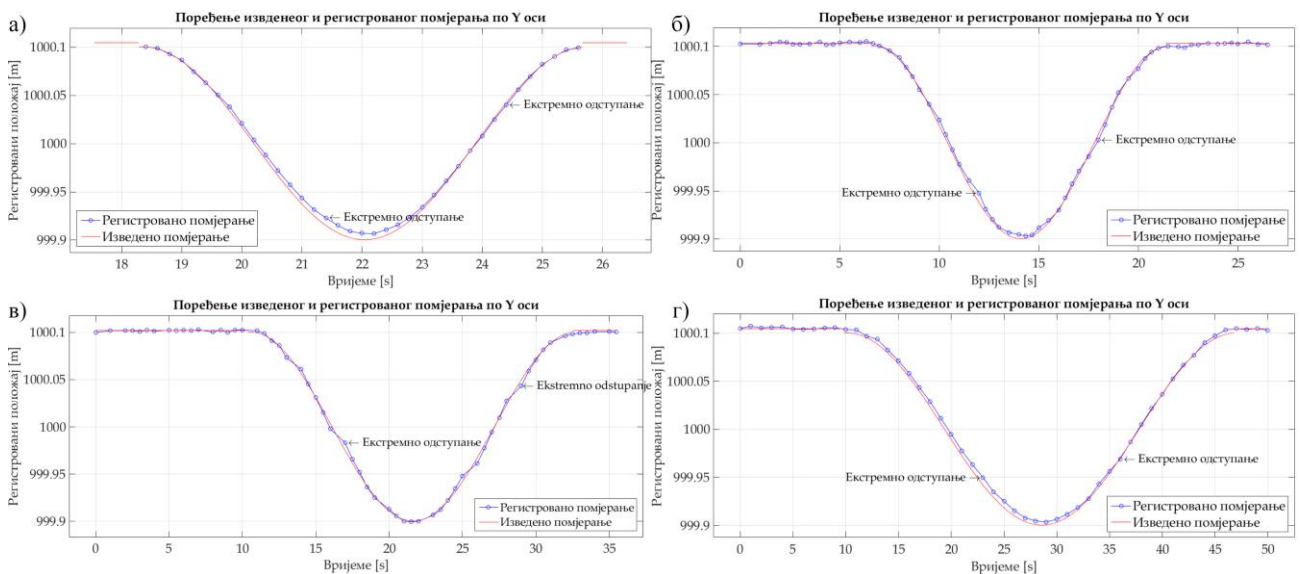
Као и у претходним експериментима, други дио анализе и тестирања регистравања континуираних помјерања ГНСС пријемником позиционирањем у оквиру мреже перманентних ГНСС станица, подразумијевао је утврђивање могућности регистравања тачно изведене просторне кружнице. И у овом случају, континуирана помјерања и квалитет њиховог регистравања посматрани су из неколико аспеката.

За изведене просторне (Слика 6-40) и хоризонталне (Слика 6-41) кружнице, и континуирана помјерања посматрана по координатним осама локалног координатног система (Слика 6-42, 6-43 и 6-44), генерисани су графички прикази резултата регистравања.

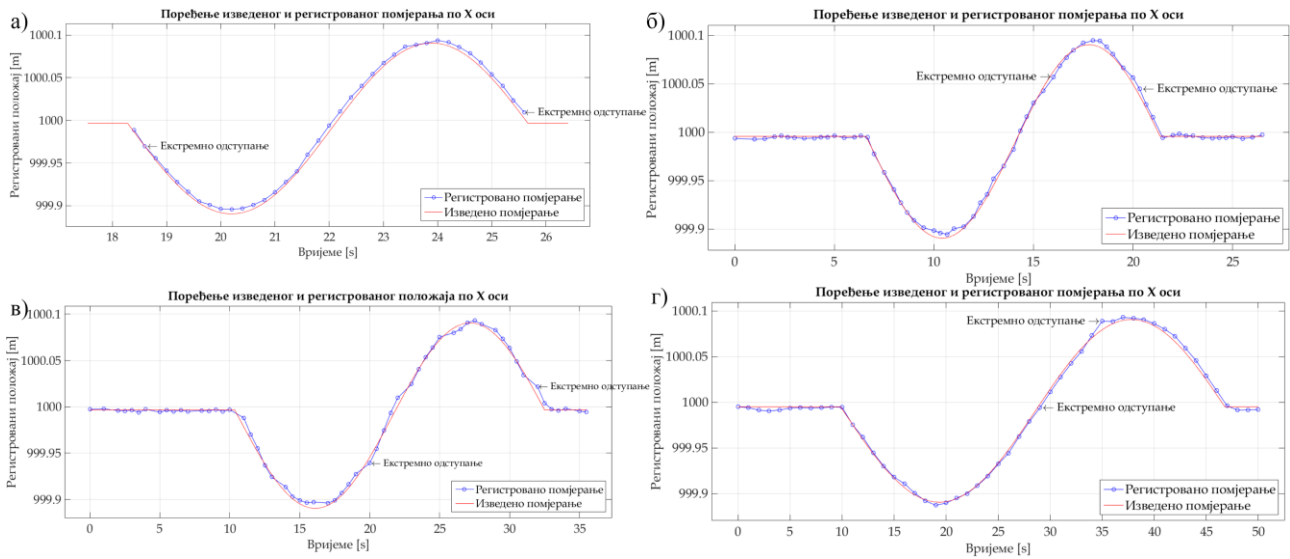




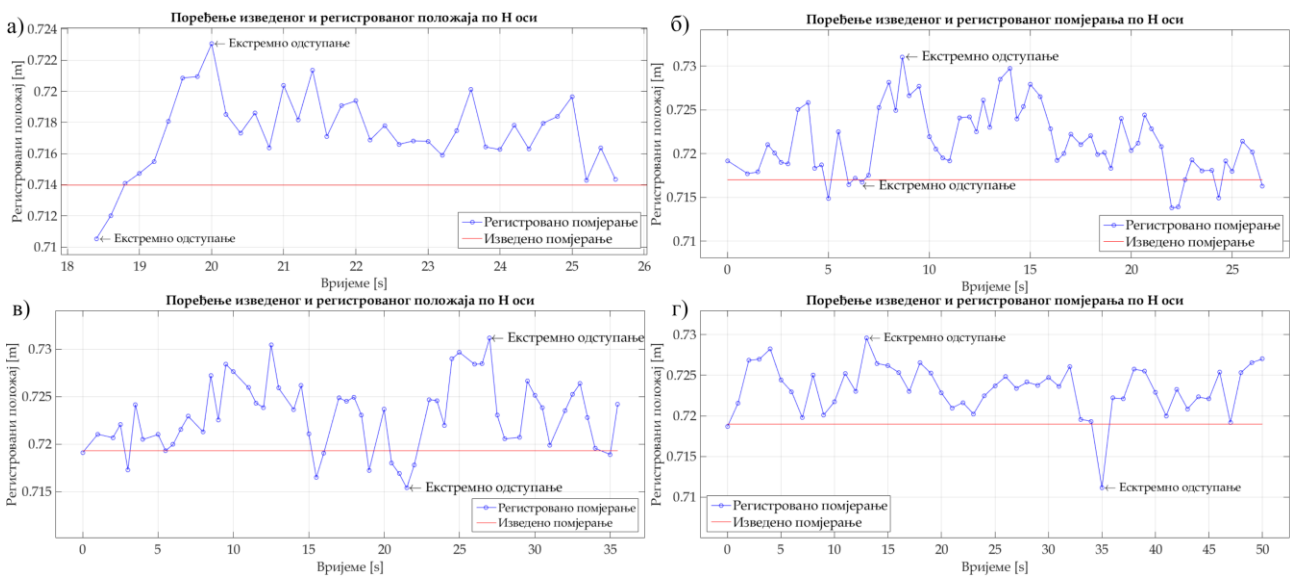
Слика 6-41. Регистровање континуираних померања ГНСС технологијом на основу позиционирања у оквиру мреже перманентних ГНСС станица – хоризонталне кружнице: а) f_n , б) $f_n / 2$, в) $f_n / 3$, г) $f_n / 5$



Слика 6-42. Регистровање континуираних померања ГНСС технологијом на основу позиционирања у оквиру мреже перманентних ГНСС станица – по Y оси: а) f_n , б) $f_n / 2$, в) $f_n / 3$, г) $f_n / 5$

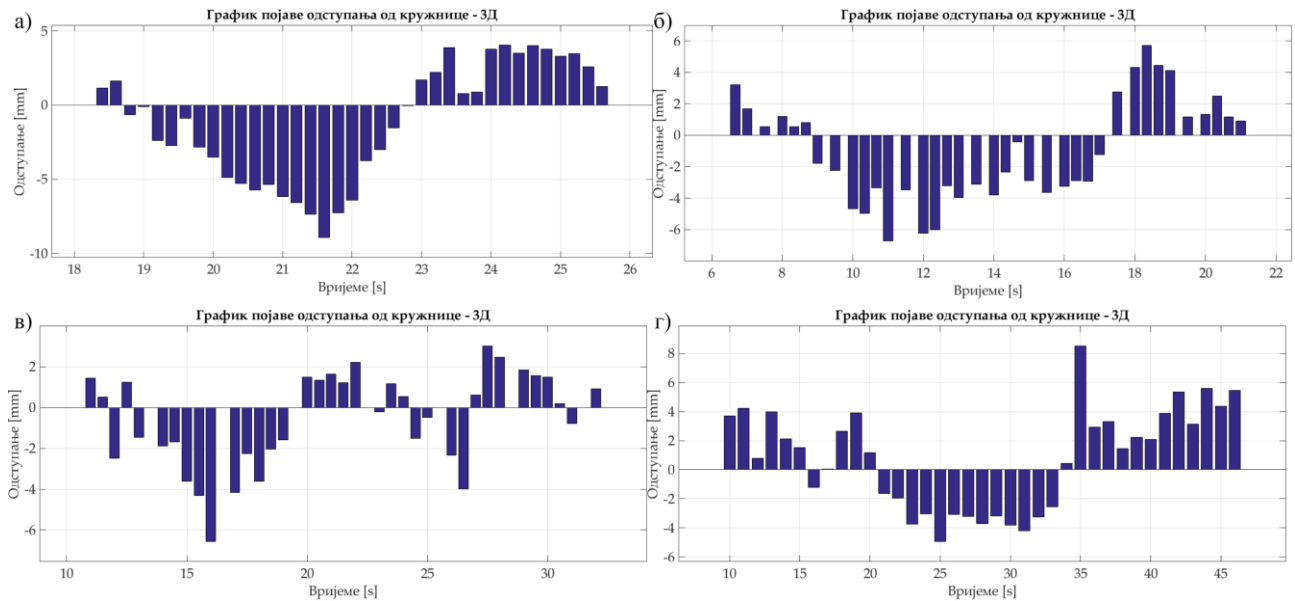


Слика 6-43. Регистровање континуираних помјерања ГНСС технологијом на основу позиционирања у оквиру мреже перманентних ГНСС станица – по Х осци: а) f_n , б) $f_n / 2$, в) $f_n / 3$, г) $f_n / 5$

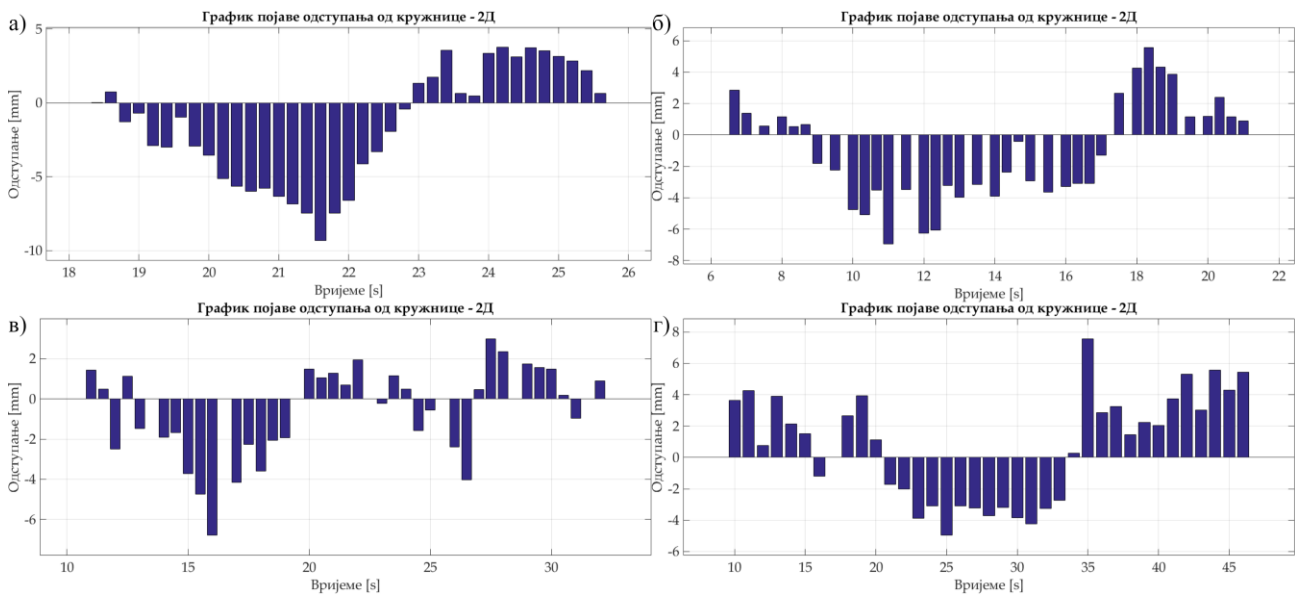


Слика 6-44. Регистровање континуираних помјерања ГНСС технологијом на основу позиционирања у оквиру мреже перманентних ГНСС станица – по Н осци: а) f_n , б) $f_n / 2$, в) $f_n / 3$, г) $f_n / 5$

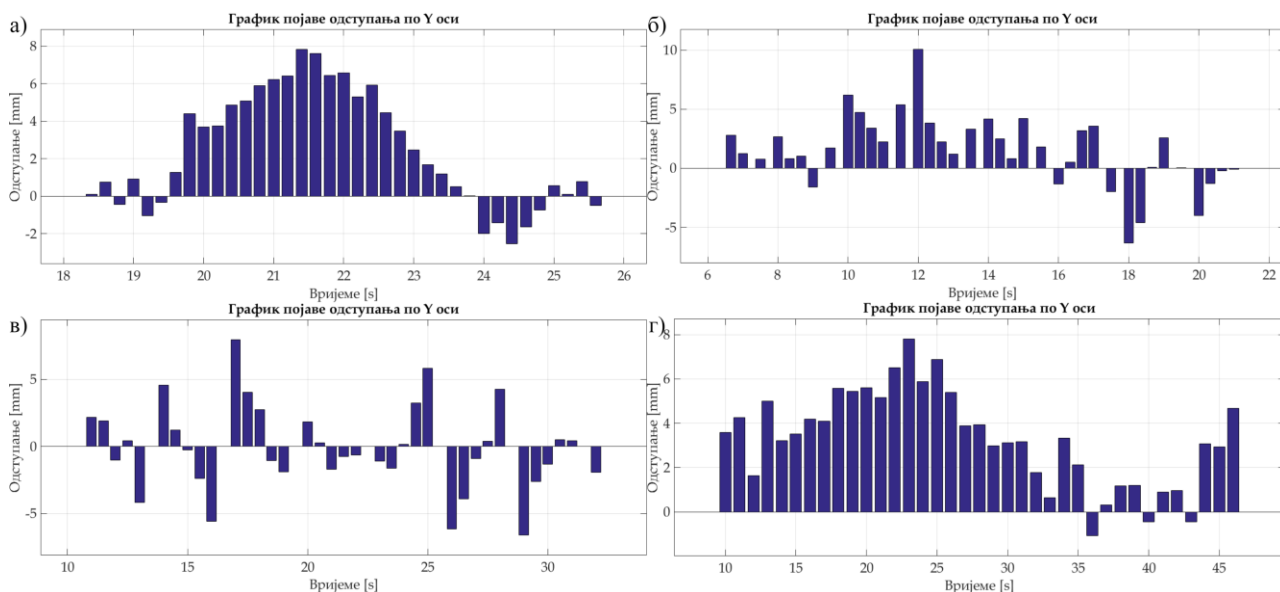
На основу претходне анализе, може се закључити да постоји добра сагласност регистрованих и изведених путања, уз постојање одређеног систематског одступања регистрованих путања по висини. Додатна анализа сагласности извршена је на основу вриједности одступања, графички приказаних на Сликама од 6-45 до 6-49.



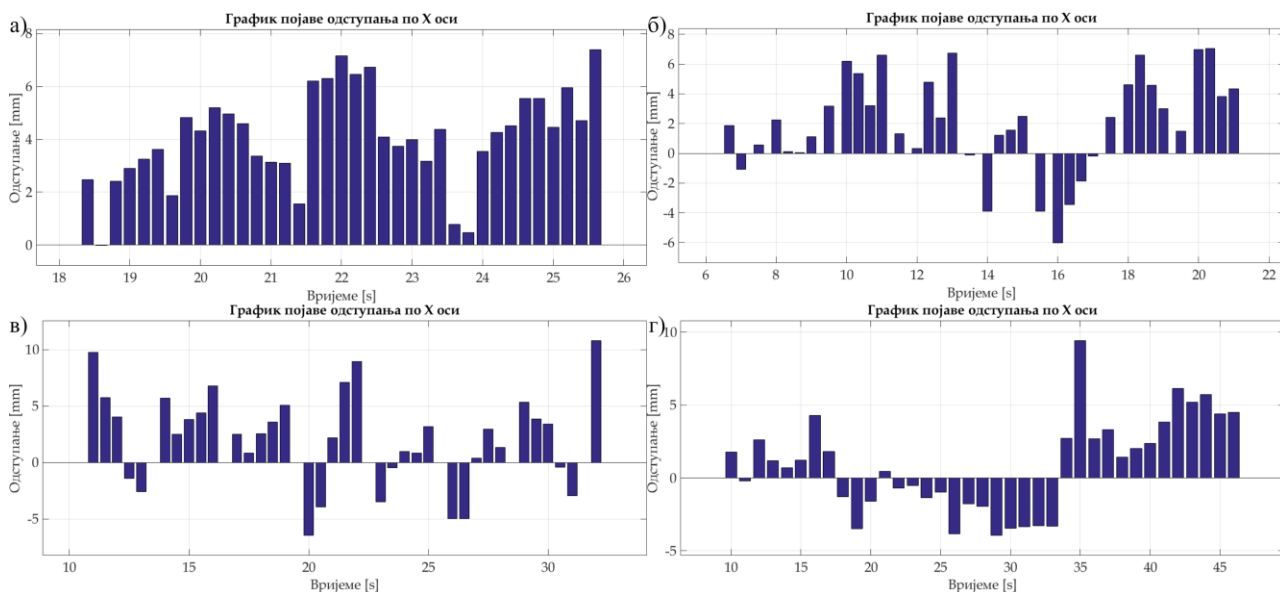
Слика 6-45. Одступања при регистровању континуираних помјерања ГНСС технологијом на основу позиционирања у оквиру мреже перманентних ГНСС станица – просторне кружнице: а) f_n , б) $f_n / 2$, в) $f_n / 3$, г) $f_n / 5$



Слика 6-46. Одступања при регистровању континуираних помјерања ГНСС технологијом на основу позиционирања у оквиру мреже перманентних ГНСС станица – хоризонталне кружнице: а) f_n , б) $f_n / 2$, в) $f_n / 3$, г) $f_n / 5$

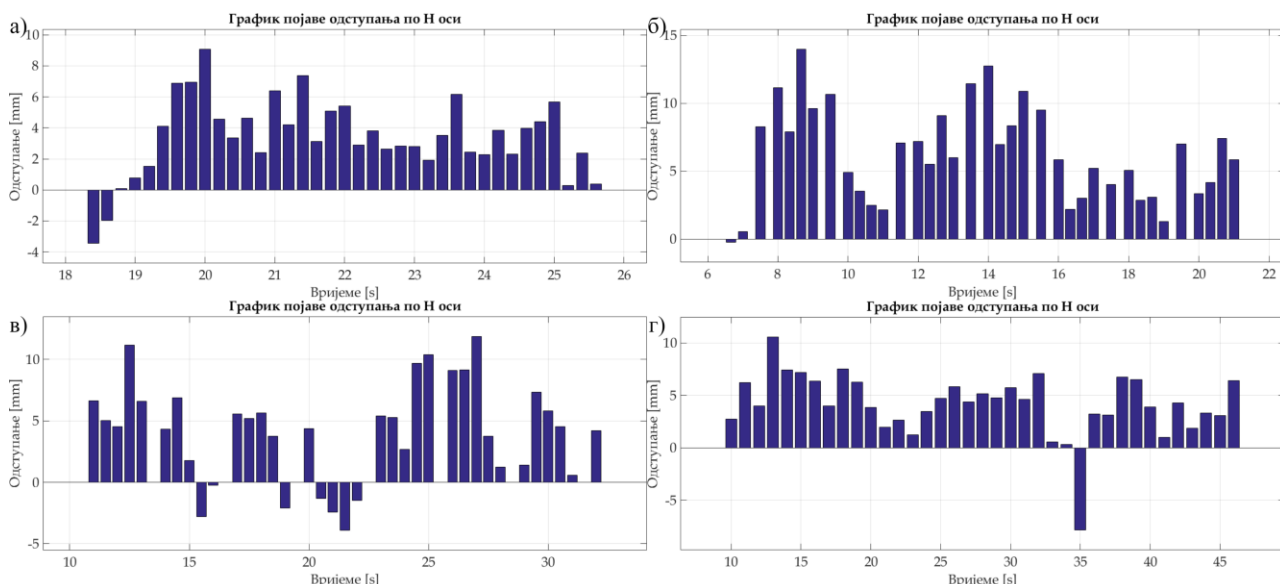


Слика 6-47. Одступања при регистровању континуираних помјерања ГНСС технологијом на основу позиционирања у оквиру мреже перманентних ГНСС станица – Y оса: а) f_n , б) $f_n / 2$, в) $f_n / 3$, г) $f_n / 5$



Слика 6-48. Одступања при регистровању континуираних помјерања ГНСС технологијом на основу позиционирања у оквиру мреже перманентних ГНСС станица – X оса: а) f_n , б) $f_n / 2$, в) $f_n / 3$, г) $f_n / 5$

Анализирајући графике појаве одступања може се закључити да при већим брзинама извођења инкремената помјерања постоје одређени систематски ефекти. Међутим, у свим случајевима вриједности одступања су у интервалу $\pm 1 \cdot \sigma_{POZ}$.



Слика 6-49. Одступања при регистровању континуираних помјерања ГНСС технологијом на основу позиционирања у оквиру мреже перманентних ГНСС станица –
 Н оса: а) f_n , б) $f_n / 2$, в) $f_n / 3$, г) $f_n / 5$

У Табели 6-25 дате су сумарне статистике квалитета регистровања континуираних помјерања ГНСС технологијом у наведеним условима.

Табела 6-25. Сумарни резултати регистровања континуираних помјерања ГНСС технологијом позиционирањем у оквиру мреже перманентних ГНСС станица - путање

Фреквенција	Одступање 3Д		Одступање 2Д			Одступање по Y оси			Одступање по X оси			Одступање по N оси	
	min [mm]	просјечно [mm]	min [mm]	просјечно [mm]	R_{yx}	min [mm]	просјечно [mm]	R_y	min [mm]	просјечно [mm]	R_x	min [mm]	просјечно [mm]
	max [mm]		max [mm]			max [mm]			max [mm]			max [mm]	
f_n	2,1	6,8	0,5	5,4	0,9964	-2,5	3,8	0,9969	0,0	4,5	0,9960	-3,5	4,2
	11,1		9,8			7,8			7,4			9,1	
$f_n / 2$	1,7	8,3	0,8	4,6	0,9973	-6,3	3,4	0,9976	-6,0	3,8	0,9970	-0,2	7,1
	14,0		10,1			10,0			7,1			14,0	
$f_n / 3$	2,9	7,6	0,7	4,9	0,9968	-6,6	3,2	0,9979	-6,5	4,7	0,9957	-3,9	5,8
	12,3		10,0			8,0			11,0			12,0	
$f_n / 5$	3,4	7,0	1,8	4,9	0,9973	-1,1	3,9	0,9969	-3,9	3,4	0,9978	-7,9	5,1
	12,5		9,7			7,8			9,4			11,0	

На основу података приказаних у Табели 6-25, може се закључити да у свим случајевима постоји добра сагласност изведених и регистрованих помјерања. Са повећањем брзине извођења инкремената помјерања појављују се веће вриједности разлика. У свим експерименталним случајевима просјечне вриједности одступања су мање од $1 \cdot \sigma_{POZ}$, а екстремне вриједности су мање од $3 \cdot \sigma_{POZ}$. И у случају регистровања помјерања у односу на мрежу перманентних ГНСС станица, добијене вриједности коефицијаната корелације показују висок ниво сагласности изведених и регистрованих путања.

7. ЗАКЉУЧАК

7.1. ЗАКЉУЧНА РАЗМАТРАЊА

У овој дисертацији анализирани су теоријске и испитане практичне могућности савремених ГНСС и терестричких мјерних система за перманентно геодетско осматрање помјерања објеката. Захваљујући технолошком развоју геодетских инструмената и метода позиционирања, геодетски мјерни системи могу се користити за осматрање дискретних и континуираних помјерања, чак и у реалном времену. Међутим, ови мјерни системи поред великих могућности и предности имају и одређене недостатке и ограничења. Континуирани развој и промјене ових мјерних система намећу потребу за сталним истраживањем достигнућа како би се у стручној пракси њихове могућности максимално користиле.

Циљ геодетског осматрања грађевинских конструкција и објеката у цјелини је да се у сваком тренутку животног вијека објекта може сагледати његово стање и дати оцјена безбједности његове даље експлоатације. Теоријски посматрано, стање конструкције и објекта мора бити изведено у пројектованом облику, а стање и понашање у току експлоатације мора бити у складу са стандардима и изведеним прорачунима. Пројектовано стање и понашање конструкције и објекта може се мијењати у границама дозвољених одступања услјед различитих утицаја: оптерећења, старења конструкције, промјене амбијенталних параметара, елементарних непогода, итд. Међутим, различити утицаји могу довести и до промјена изван пројектованог опсега и појаве деформација конструкције које могу угрозити носивост, трајност и употребљивост објекта. Управо перманентно геодетско осматрање обезбјеђује информације о карактеру промјена геометрије објеката кроз вријеме, те омогућава увид у историју понашања објекта и прогнозе будућих дешавања: еволуцију оштећења, брзину њихових промјена, преостали животно вијек, итд.

За успостављање и функционисање оптималног система осматрања неопходно је суштинско разумијевање понашања објекта или процеса који се осматра. Правилним сагледавањем свих елемената може се изградити квалитетан систем осматрања који ће омогућити оцјену стања и понашања објекта у било ком временском тренутку. Данас се савремени геодетски мјерни системи за осматрање, користе као дио SHM система. Посљедично, перманентно геодетско осматрање се заснива на знању о сензорима, њиховим могућностима, савременим рјешењима за складиштење података, технологијама за комуникацију и размјену података и напредним методама обраде и анализе. Неспорно је да ће у будућности технологије за осматрање бити једноставније за употребу, јефтиније, доступније, а потреба за осматрањем стања објеката све израженија. Истраживање савремених мјерних система и технологија свакако је неопходно за развој перманентног геодетског осматрања и унапређење његове примјене у пракси.

Успјешно пројектовање и реализација пројекта геодетског осматрања помјерања објеката, коришћењем технологија које су предмет истраживања ове дисертације подразумијева детаљно познавање метода позиционирања, геодетских мрежа уопште и метода за анализу и обраду мјерења и метода за идентификацију и квантификовање статистички значајних помјерања. Пројектовањем геодетског система за осматрање помјерања објеката се претходном анализом утврђује првенствено очекивана несигурност положаја тачака геодетске контролне мреже.

Она је у непосредној вези са величинама помјерања које се сигурно требају регистровати. На основу вриједности очекиваног стандардног одступања положаја тачака (σ_{POZ}), експериментално познатих граница тачности мјерења, метода позиционирања и осталих елемената који могу утицати на реализацију пројекта осматрања, бира се мјерна технологија и метода мјерења. Такође, на основу вриједности очекиваног стандардног одступања положаја тачака може се утврдити потребна прецизност мјерених величина. Анализом методе мјерења и претходном оцјеном тачности, узимајући у обзир потребну прецизност мјерених величина, дефинишу се технички услови за реализацију мјерења. Поштовањем принципа рада, квалитетним метролошким обезбјеђењем мјерења, идентификацијом и моделовањем свих спољашњих услова, елиминисањем или редуковањем извора грешака могуће је остварити високу прецизност и поузданост позиционирања и регистровања помјерања.

Роботизоване тоталне станице, припадајући рефлектори и остали уређаји, чине основни мјерни систем за перманентно геодетско регистровање просторних, хоризонталних и вертикалних помјерања. Уградња процесора, микрорачунара, јединица за меморисање података, јединица за управљање радом система и улазно-излазних јединица у РТС омогућило је многе функционалности, као што су: аутоматско испитивање исправности и функционалности појединих дијелова; аутоматско мјерење инструменталних грешака и уношење поправака у резултате мјерења; аутоматски проналазак, визирање и праћење рефлектора; потпуно аутоматско читавање; корекцију резултата мјерења; дјелимичну или потпуну обраду података на лицу мјеста; приказ резултата позиционирања; регистрацију или прослеђивање резултата на удаљене локације; итд. Комуникационе везе између инструмента и теренског контролера или екстерног рачунара, додатно омогућавају потпуну аутоматизацију процеса мјерења и позиционирања. Наведене функционалности, поред могућности прецизног позиционирања у било којем окружењу, временским приликама и периоду дана, чине роботизовану тоталну станицу оптималним и најчешће коришћеним мјерним системом за перманентно геодетско осматрање.

Поред многобројних предности и могућности РТС, постоје основни услови који морају бити испуњени при успостављању система за перманентно осматрање заснованог на њима:

- мора постојати несметано догледање између инструмента и рефлектора,
- мјерена растојања не би требало да прелазе неколико стотина метара и
- угаона брзина кретања рефлектора не би требало да прелази максималну угаону брзину сервомотора РТС.

Квалитет позиционирања и могућност регистровања помјерања РТС, како у статичком тако и динамичком режиму, зависе од особина мјерног инструмента и кинематичких карактеристика његових компоненти:

- тачности и фреквенције мјерења углова и дужина,
- тачности синхронизације мјерења углова и дужина, појаве кашњења и празног хода између два мјерења,

- максималног мјерног домета и његовог утицаја на тачност мјерења,
- динамичког понашања интегрисаних двоосних компензатора у РТС,
- калибрације и самокалибрације мјерног инструмента, посебно јединице за праћење рефлектора и ЕДМ-а,
- карактеристика технологије која се користи за проналазак рефлектора и максималне брзине праћења рефлектора,
- тачности праћења рефлектора при различитим или промјенљивим условима (јако сунце, киша, снијег, мрак, магла, појава рефлексије),
- могућности поновног проналазак рефлектора у случају прекида праћења,
- могућности конфигурисања и управљања укупним процесом мјерења,
- начина меморисања или преноса података, итд.

Дигитални прецизни нивелири и инварске летве за геометријско одређивање висинских разлика током времена су претрпјели различите модификације у дизајну, материјалима од којих су израђени и начину читавања подјеле. Међутим, основни дијелови инструмента и принципи мјерења остали су исти. ДПН од стране произвођача геодетске опреме нису развијани као мјерни системи за перманентно регистровање помјерања. Међутим, захваљујући појави технологија и протокола за управљање њиховим радом путем рачунара уочена је могућност примјене ових система за перманентно осматрања и спроведено неколико претходних истраживања. Иновативност савремене аутоматизације ДПН на овај начин додатно је оснажена чињеницом да се може развити врло функционалан систем високих перформанси по ниској цијени. Главни извор ограничења у примјени оваквих система, при перманентном геодетском осматрању вертикалних помјерања, је промјена температуре, а посљедично и осталих атмосферских параметара. У условима споре и правилне промјене температуре могуће је извршити моделовање овог утицаја и поправити резултате осматрања. Међутим, у условима наглих и значајних промјена ових параметра, што реални спољашњи теренски услови јесу, моделовање утицаја и оцјена поправака још увијек су изазов. Имајући у виду осјетљивост система на промјене амбијенталних услова, геодетска контролна мрежа за дугопериодично осматрање би требала имати неколико тачака основне мреже на различитим растојањима за контролу регистровања помјерања у реалном времену. Други начин је да се одреди модел корекција читавања за конкретан инструмент у конкретним теренским условима што је за сада могуће у условима споре и правилне промјене температуре.

Развој ГНСС технологије уопште и прецизних кинематичких метода позиционирања донијело је нове могућности и концепте осматрања са удаљених локација и ријешило неке од проблема у погледу избора мјеста за стабилизацију тачака и плана опажања. Константно унапређивање ГНСС пријемника, у погледу побољшања тачности позиционирања, повећања брзине регистровања мјерења, смањења димензија и тежине, повећање доступности уређаја на тржишту и смањење цијене прецизних пријемника доприноси њиховој све чешћој употреби у области осматрања објеката. С обзиром да представљају сензоре који се могу комбиновати са другим геодетским сензорима и чији резултати мјерења телекомуникационим и другим технологијама могу бити прослијеђени на удаљене локације, постају

неизоставни дио савремених система за перманентно осматрање. ГНСС технологија кроз краткoпериодична перманентна осматрања може да обезбиједи благовремене и тачне информације о вибрацијама објеката и конструктивних елемената, првенствено величине динамичких помјерања и модалне фреквенције, и то у неким случајевима са квалитетом већим од традиционалних акцелерометара.

Да би се од ГНСС технологије добио максимум у погледу прецизности и поузданости позиционирања и одређивања помјерања, у фази пројектовања система за перманентно осматрање заснованог на овој технологији, потребно је:

- анализирати могућност ГНСС позиционирања уопште на локацији од интереса и могућност непрекидног позиционирања у временским интервалима у којима се желе обезбиједити подаци осматрања,
- анализирати факторе који утичу на тачност ГНСС позиционирања на одређеној локацији, као што су: број и геометријски распоред видљивих сателита, повољни периоди за извођење мјерења уколико претходно нису дефинисани периоди у којима се требају прикупити резултати осматрања, одговарајући тип антене и ГНСС пријемника,
- анализирати постојање одређених природних и вјештачких извора деградације сигнала у окружењу гдје се планира ГНСС осматрање, као и ризика од могуће намјерне деградације ГНСС позиционирања.

Геодетско осматрање помјерања објеката уопште заснива се на успостављању геодетских контролних мрежа прилагођених сваком објекту појединачно у конкретном пројекту. Начин пројектовања геодетских мрежа за осматрање условљен је врстом и особинама објеката (величина, облик и просторни распоред елемената објекта) и терена (рељеф, вегетација, изграђеност околног подручја, геолошки састав тла, ...) на којем се објекат налази. Са геометријског аспекта, геодетска мрежа мора бити оптимална по питању геометрије, прецизности и поузданости. Пожељно је да мрежа има што правилнији геометријски облик, а тачке да буду квалитетно стабилизоване. Коначан циљ је постићи захтијевану тачност геодетске мреже унутар неких оквира: вријеме мјерења, расположива опрема, омогућена финансијска средства. Перманентно геодетско осматрање као савремени облик осматрања подразумијева успостављање активних геодетских мрежа. Циљ успостављања активних система осматрања је правовремено обезбјеђивање тачних информација о стању објекта и његовим карактеристикама. Ови системи репрезентативне параметре могу прикупљати перманентно (континуирано), периодично перманентно и периодично, током краћих и дужих периода. Може се рећи да је њихова изградња прије свега повезана са питањем безбједности објеката. Ако се понашања објекта који се осматра, а која су изван граница дефинисаних пројектом, открију у раној животној фази објекта, ризик од изненадног колапса сведен је на минимум, а људски животи, природа и остали објекти ће бити сачувани. Међутим, важно је истаћи још једну предност ових система. Наиме, перманентним осматрањем могу се открити и непознате (скривене) позитивне особине конструкције и објеката у цјелини, на основу којих се може организовати ефикаснија експлоатација традиционалних материјала и искоришћавање постојећег објекта. У таквим случајевима може се, првенствено повећавати дозвољена носивост, чиме се постижу перформансе веће од дозвољених, без додатних трошкова изградње.

Кључна побољшања у области активних геодетских мрежа за осматрање која су се десила задњих неколико година и која подстичу њихову примјену су:

- развој прецизних инструмената/сензора ниже цијене и широк спектар избора доступних инструмената на тржишту,
- инструменти се развијају као „паметни сензори“ што омогућава висок ниво аутоматизације процеса мјерења и развој система за перманентно осматрање и
- побољшана отпорност сензора на амбијенталне прилике и услове омогућава изградњу поузданих система за осматрање у свим временским приликама и током дужег временског периода.

Предности употребе паметних сензора у области осматрања помјерања објеката, које се на бази проучене литературе и примјера из праксе могу истаћи су:

- интегрисана могућност контроле рада система и аутоматско издавање упозорења у случају појаве значајних одступања или прекида рада система,
- аутоматска компензација појединих одступања у мјерним инструментима и аутоматска корекција мјерења усљед различитих утицаја,
- интегрисана обрада мјерења са аутоматском конверзијом у жељене јединице и постојање интерне меморије за складиштење података који се могу надокнадити у случају проблема са системима умрежавања или комуникацијом са централним системом за преузимање података и
- могућност умрежавања различитим комуникационим системима и протоколима, при чему се трошкови уградње комуникационих уређаја и инсталација смањују захваљујући стандардизацији у области протокола и формата.

Недостаци активних мрежа и потенцијални ризици употребе сензорске технологије у области осматрања помјерања објеката су:

- још увијек не постоје јединствени и стандардизовани комуникациони протоколи за размјену података, већ сваки произвођач има свој јединствени систем, који често није могуће модификовати од стране корисника. Из тог разлога су корисници приморани да користе готове компоненте и системе једног произвођача. Један од начин да се овај проблем превазиђе је развој додатних софтверских алата за конкретне мјерне системе, у оквиру сегмената за обраду података, што захтијева додатне трошкове успостављања система,
- цијене паметних сензора још увијек су прилично високе, па је успостављање активних система за осматрање објеката у поређењу са цијенама конвенционалних начина осматрања прилично скупо. Међутим, може се рећи да су само почетни трошкови успостављања ових система високи, али могућности које такви системи нуде су неупоредиве са конвенционалним начинима осматрања. Такође, треба имати на уму да ће цијене сензора и система у будућности бити све ниже, што значи да ће у будућности ова област бити заснована на новим приступачнијим технологијама,
- паметни сензори су сложенији и имају више интегрисане електронике у поређењу са инструментима који се традиционално користе за осматрање, што значи да ће за управљање оваквим системима бити потребна напредна знања, а за одржавање експертски приступи и поступци.

У практичном дијелу истраживања испитане су могућности расположивих геодетских мјерних система за регистровање дискретних и континуираних помјерања. Примиијењени су инструменти који имају могућност мјерења и позиционирања аутоматским поступком, без утицаја опажача и чијим радом се управља даљинским путем припадајућим контролерима или рачунаром. На овај начин симулиран је савремени систем за перманентно осматрање и испитана могућност контроле и управљања радом оваквим системима. У експериментима су коришћени: роботизована тотална станица, дигитални прецизни нивелир и ГНСС пријемник. Дискретна и континуирана помјерања, карактеристична за већину инжењерских објеката, симулирана су у теренским условима и у различитим периодима дана. За симулације помјерања коришћени су намјенски развијени прецизни симулатори, на којима се могу изводити помјерања карактеристична за већину инжењерских објеката. Тако су сагледане могућности регистровања спорих и дуготрајних помјерања, као и брзих и краткотрајних помјерања. Утврђена је статистичка веза сигурно регистрованих величина помјерања и стандардног одступања позиционирања методама у реалном времену. Опште посматрано, може се рећи да су РТС, ДПН и ГНСС пријемник погодни за примјену у пројектима регистровања дискретних и континуираних помјерања објеката.

У експериментима регистровања дискретних помјерања испитана је могућност коришћених мјерних система за регистровање спорих просторних, хоризонталних и вертикалних помјерања различитих величина. На основу резултата добијених у експериментима изводи се закључак да су роботизоване тоталне станице погодне за аутоматско регистровање просторних, хоризонталних и вертикалних помјерања, у свим периодима дана и на средње дугим растојањима. Такође, може се рећи да су РТС оптимални мјерни системи за дугопериодично осматрање релативно малих помјерања, јер се могу примиијенити у готово свим теренским условима. Величине дискретних помјерања које су сигурно регистроване РТС у било којем периоду дана су величине веће од $5 \cdot \sigma_{POZ}$, а у периодима дана најповољнијим за позиционирање РТС регистрована су помјерања величина већих од $3 \cdot \sigma_{POZ}$. Кроз проведене експерименте доказано је да тачност мјерења хоризонталних углова РТС утичу на тачност хоризонталног положаја тачке управно на правац вектора опажања. То значи да се хоризонтална помјерања по овом правцу могу тачније одредити, а самим тим се сигурно могу регистровати мање величине помјерања. Тачност мјерења дужина РТС утиче на тачност хоризонталног положаја тачке по правцу вектора опажања, па се по овом правцу могу регистровати помјерања са мањом тачношћу. Тачност вертикалног позиционирања РТС зависи првенствено од тачности мјерења вертикалних углова и утицаја вертикалне рефракције. Основни недостатак РТС одређивања помјерања је што мора постојати несметано оптичко догледање између инструмента и рефлектора.

На основу резултата практичних истраживања може се закључити да се дигиталним прецизним нивелирима у спољашњим теренским условима могу, аутоматским поступком управљаним рачунаром, врло прецизно регистровати дискретна вертикална помјерања малих интензитета. У периодима дана повољним за вертикално позиционирање по методи прецизног геометријског нивелмана регистроване су величине вертикалних помјерања веће од $5 \cdot \sigma_{POZ}$. Међутим, у периодима дана неповољним за позиционирање наведеном методом могу се

очекивати двоструко лошији резултати. Важно је напоменути да су закључци изведени на основу експеримента проведених при врло високим температурама, односно у најтоплијем дијелу године. Основни недостатак у примјени ДПН за перманентно регистровање помјерања је што удаљеност инструмента од летве и објекта који се осматра може бити само неколико десетина метара.

ГНСС технологијом, РТК методом, у односу на кориснички успостављен базни пријемник, успјешно су регистроване величине просторних, хоризонталних и вертикалних дискретних помјерања веће од $3 \cdot \sigma_{POZ}$ у свим периодима дана, уз испуњење основних услова за геодетско позиционирање ГНСС технологијом. На основу проведених експеримената изводи се закључак да за регистровање помјерања РТК методом геометријски распоред сателита и доба дана нису статистички значајно утицали на тачност позиционирања и могућност регистровања помјерања. За регистрована вертикална помјерања добијени су резултати бољи од планираних.

РТК методом ГНСС позиционирања у оквиру мреже перманентних станица сигурно су регистроване величине помјерања као и у случају регистровања помјерања у односу на кориснички успостављен базни пријемник. Најбољи резултати регистровања помјерања добијени су примјеном МАХ модела за генерисање корекција. Нешто лошији резултати добијени су за регистровање вертикалних помјерања. Такође, ни у овим експериментима регистровања помјерања нису утврђене статистички значајне разлике минималних вриједности сигурно регистрованих помјерања у случајним и повољним условима. Резултати проведених истраживања потврђују претпоставку о могућности коришћења ГНСС технологије и мрежа перманентних станица за успјешно перманентно регистровање помјерања објеката.

У експериментима регистровања континуираних помјерања симулирана су понашања инжењерских објеката на динамичка оптерећења. Испитана је могућност коришћених геодетских мјерних система за регистровање положаја тачке која је у сталном покрету. На основу резултата експеримената може се закључити да су остварени добри резултати за ДПН и ГНСС пријемник, док су за РТС добијени лошији резултати и уочени су одређени проблеми.

При регистровању континуираних помјерања РТС, у проведеним експериментима, појавиле су се значајне разлике између изведених и регистрованих инкремената помјерања и одступања између изведених и регистрованих путања. Општи закључак је да су се веће разлике и одступања појавиле на већим брзинама кретања рефлектора. Проблеми регистровања континуираних помјерања РТС посљедица су несавршености система за праћење рефлектора у покрету, посебно кад се креће брзинама блиским брзини регистровања помјерања. Ово се негативно одражава на могућност регистровања малих помјерања, али и на могућност утврђивања фреквенције њихових дешавања. Појава великих одступања у регистровању континуираних помјерања у проведеним експериментима посљедица је још једног извора грешака. Наиме, иако су 360° пасивни призматични рефлектори предложени као рјешење за проблем оријентације стандардног рефлектора, изводи се закључак да ни они нису савршени и да се мора водити рачуна о њиховој оријентацији при регистровању брзих континуираних помјерања.

Дигиталним прецизним нивелиром у периодима дана повољним за прецизни геометријски нивелман регистрована су континуирана вертикална помјерања већа од $5 \cdot \sigma_{POZ}$. На основу проведених експеримента изводи се закључак да се при пројектовању перманентног геодетског осматрања вертикалних помјерања морају размотрити и узети у обзир евентуалне промјене хоризонталног положаја летве. Ове промјене могу се негативно одразити на тачност регистровања континуираних вертикалних помјерања.

Односи разлика добијених између изведених и регистрованих инкремената помјерања, ГНСС позиционирањем у односу на кориснички успостављен базни пријемник, били су мањи или једнаки 20 % за све изведене инкременате помјерања у случајевима када је брзина њиховог извођена била бар три пута мања од брзине њиховог регистровања. При овим брзинама кретања ГНСС пријемника, разлике изведених и регистрованих путања су у интервалу $\pm 1 \cdot \sigma_{POZ}$, док су те разлике у свим изведеним експерименталним случајевима у интервалу $\pm 3 \cdot \sigma_{POZ}$.

При регистровању континуираних помјерања ГНСС позиционирањем у оквиру мреже перманентних ГНСС станица, добијени су готово исти резултати као у претходно поменутих експериментима. На овај начин још једном су потврђене почетне претпоставке у вези ГНСС регистровања помјерања, са закључком да је ова технологија погодна и за регистровање континуираних помјерања различитих величина и фреквенција. У овим експериментима добијени су резултати бољи него при РТС регистровању континуираних помјерања скоро истих инкремената.

Вриједности σ_{POZ} се при пројектовању система за перманентно осматрање могу одредити примјеном закона о преносу грешака на функционални модел конкретне методе позиционирања, при чему се за стандардна одступања мјерених величина или одређених позиција, могу користити вриједности одређене испитивањем инструмента према ISO стандардима. Из анализе добијених резултата може се закључити да могућност прецизног регистровања континуираних помјерања зависи од брзине кретања геодетских сензора и да тачност регистрованих помјерања опада са повећањем брзине њиховог кретања. Такође, треба имати у виду да при регистровању брзих помјерања, уз тачност регистровања помјерања важну улогу игра и фреквенција мјерења, јер се успјешно регистрованим помјерањем сматра оно за које је регистрована и величина промјене и брзина њеног дешавања. На основу резултата добијених у проведеним експериментима и приказаних у претходним истраживањима, а познајући законитости *Најквистове теореме*, изводи се закључак да се геодетским мјерним системима сигурно може регистровати (и додатним анализама одредити) фреквенција одређеног помјерања вриједности бар два пута мање од вриједности фреквенције регистровања појединим геодетским инструментима. Осим о прецизности и фреквенцији при регистровању помјерања мора се водити рачуна и о поузданости рада система за перманентно геодетско осматрање. Наиме, због различитих утицаја који дјелују на објекте приликом експлоатације и сталних динамичких промјена, при бржим континуираним помјерањима не постоји могућност вишеструког мјерења истих величина. То значи да не постоји контрола мјерења, тј. поузданост мјерених величина је врло ниска, а самим тим и одређених позиција из којих се рачунају помјерања.

7.2. МОГУЋИ ПРАВЦИ ДАЉИХ ИСТРАЖИВАЊА

У будућности се очекује побољшање карактеристика мјерних система и побољшање могућности регистровања дискретних и континуираних помјерања. Свакако, сва технолошка и друга побољшања и иновације могу бити предмет будућих истраживања и провјера. Методологија и поступци коришћени у оквиру овог истраживања могу бити својеврсни стандардни тестови за провјеру могућности нових мјерних система и постојећих мјерних система у конкретним пројектним условима.

При регистровању брзих континуираних помјерања РТС појављују се велика и статистички значајна одступања, као последица грешака оријентације рефлектора, уколико се она мијења у односу на правац визирања инструментом. Кроз даља истраживања требала би се испитати могућност елиминације или моделовања утицаја оријентације рефлектора на тачност позиционирања и могућност прецизног регистровања рефлектора у покрету.

Фреквенције мјерења савремених РТС крећу се у интервалу од 1 Hz до 10 Hz. Најчешће апликације које се користе уз мјерне инструменте не омогућавају брже регистровање положаја. Брзина мјерења и позиционирања РТС зависи првенствено од брзине читавања дужине. Кроз будућа истраживања би се могли истражити начини повећања фреквенције позиционирања РТС на два начина. Први начин би био припремом намјенских апликација којима би се максимално убрзало позиционирање РТС, слањем наредби са рачунара. Други начин би могао бити да се регистровање помјерања врши са двије РТС увезане у јединствен систем и са синхронизованим мјерењем угла, јер се правци брже читавају него дужине. Теоријски посматрано овако би се избјегли проблеми синхронизације сензора за мјерење угла и дужина. Међутим, тада се појављује питање прецизне синхронизације времена, што је већ предложено као правац будућих истраживања. Наведена истраживања би унаприједила могућност регистровања већих фреквенција помјерања објеката, а да постојећа тачност регистровања величина не буде нарушена.

Фреквенције регистровања положаја већине савремених ГНСС пријемника је у интервалу од 5 Hz до 20 Hz. Посљедњих година су се на тржишту појавили пријемници са фреквенцијом мјерења чак и до 100 Hz. Имајући у виду резултате спроведених истраживања, претпоставка је да због оствариве тачности РТК позиционирања, предности веће фреквенције мјерења не би дошле до изражаја. Ова претпоставка темељи се и на спознаји досадашњих истраживања и теоријских поставки да веће фреквенције помјерања објеката прате мање величине помјерања, и обрнуто.

При регистровању континуираних помјерања ГНСС технологијом и позиционирањем у односу на мрежу перманентних ГНСС станица у проведеним експериментима коришћен је *NEAREST* модел за генерисање корекција. Један од правца даљих истраживања може бити испитивање погодности преосталих модела корекција у оквиру исте мреже за регистровање континуираних помјерања. Ово се првенствено односи *MAX* модел којим су добијени најбољи резултати у експериментима регистровања континуираних помјерања. Таква истраживања била би првенствено корисна за образовање шире слике о могућностима конкретне мреже (СРПОС) за регистровање помјерања на територији коју она покрива,

имајући у виду да представља савремену регионалну инфраструктуру за прецизно и поуздано позиционирање.

Како је у теоријском дијелу већ наглашено, савремени геодетски мјерни системи за перманентно осматрање примјењују се као дио интегралних система за осматрање стања објеката. У том случају геодетски мјерни системи независном методом обезбјеђују додатне податке о динамичком понашању објеката одређене прије свега геотехничким сензорима. На тај начин може се повећати поузданост рада система за перманентно осматрање и контрола помјерања регистрованих различитим технологијама и методама. Имајући то у виду, кроз будућа истраживања могу се испитати могућности овакве међусобне контроле поређењем резултата добијених појединим геодетским и геотехничким мјерним системима и одређивањем њихове корелације.

8. ЛИТЕРАТУРА

- [1] D. Balageas, "Introduction to structural health monitoring," in *Structural health monitoring*, D. Balageas, C.-P. Fritzen, and A. Güemes, Eds. ISTE, 2006, pp. 13–43.
- [2] M. Marković, "Metoda određivanja deformacija građevinskih struktura primenom fiber optičkih senzora," doktorska disertacija; Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, 2018.
- [3] Б. Миловановић, "Линеарно и нелинеарно моделирање геодетски регистрованих деформационих процеса конструкција," докторска дисертација, Универзитет у Београду, Грађевински факултет, 2012.
- [4] A. Marendić, "Primjena geodetskih mjernih sustava u nadgledanju građevina s naglaskom na praćenje dinamičkih pomaka," doktorska disertacija; Sveučilište u Zagrebu, Geodetski fakultet, 2011.
- [5] A. Begović, *Inženjerska geodezija 1*, Treće izda. Beograd: Građevinski fakultet u Beogradu i IDP "Naučna knjiga", Beograd, 1990.
- [6] Č. Cvetković, *Primena geodezije u inženjerstvu*. Beograd: Beogradski grafički zavod, 1970.
- [7] S. Erol, B. Erol, and T. Ayan, "A general review of the deformation monitoring techniques and a case study: analysing deformations using GPS/levelling," in *XXth ISPRS congress*, 2004, vol. 7, no. 5, pp. 1–12.
- [8] A. Chrzanowski and A. Szostak-Chrzanowski, "Deformation monitoring surveys-old problems and new solutions," *Reports Geod.*, vol. 87, no. 2, pp. 85–103, 2009.
- [9] J. M. Rüeger, "Overview of geodetic deformation measurements of dams," 2006, [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/237658694_OVERVIEW_OF_GEODETIK_DEFORMATI_ON_MEASUREMENTS_OF_DAMS.
- [10] R. Hollmann and W. M. Welsch, "A high precision dam monitoring network observed with GPS or can GPS replace terrestrial measurements for high precision engineering networks?," in *Geodetic Symposium On Satellite Positioning, Columbus, Ohio*, 1992, pp. 17–20.
- [11] J. W. Lovse, W. F. Teskey, G. Lachapelle, and M. E. Cannon, "Dynamic deformation monitoring of tall structure using GPS technology," *J. Surv. Eng.*, vol. 121, no. 1, pp. 35–40, 1995.
- [12] G. Greulich, "Discussion: Dynamic Deformation Monitoring of Tall Structure Using GPS Technology," *J. Surv. Eng.*, vol. 123, no. 1, pp. 49–50, 1997.
- [13] M. Çelebi, "GPS in dynamic monitoring of long-period structures," *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 20, no. 5, pp. 477–483, 2000, doi: [https://doi.org/10.1016/S0267-7261\(00\)00094-4](https://doi.org/10.1016/S0267-7261(00)00094-4).
- [14] K. Duff and M. Hyzak, "Structural monitoring with GPS," *Public Roads*, vol. 60, no. 4, 1997.
- [15] V. Ashkenazi and G. W. Roberts, "Experimental monitoring of the Humber Bridge using GPS," in *Proceedings of the institution of civil engineers-civil engineering*, 1997, vol. 120, no. 4, pp. 177–182.
- [16] C. S. Watson and R. Coleman, "The Batman Bridge: structural monitoring using GPS," in *Advances in GPS Deformation Monitoring*, 1998, p. 8, [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/102.100.100/521954>.
- [17] G. W. Roberts, A. H. Dodson, and V. Ashkenazi, "Twist and deflect: monitoring motion of the Humber Bridge," *GPS World*, vol. 10, no. 10, 1999.
- [18] C. J. Brown, R. Karuma, V. Ashkenazi, G. W. Roberts, and R. A. Evans, "Monitoring of structures using the global positioning system," *Proc. Inst. Civ. Eng. Build.*, vol. 134, no. 1, pp. 97–105, 1999.
- [19] S. Nakamura, "GPS measurement of wind-induced suspension bridge girder displacements," *J. Struct. Eng.*, vol. 126, no. 12, pp. 1413–1419, 2000.
- [20] Y. Fujino, M. Murata, S. Okano, and M. Takeguchi, "Monitoring system of the Akashi Kaikyo Bridge and displacement measurement using GPS," in *Nondestructive Evaluation of Highways, Utilities, and Pipelines IV*, 2000, vol. 3995, pp. 229–236.

- [21] K. Y. Wong and Y. Q. Ni, "Structural health monitoring of cable-supported bridges in Hong Kong," in *Structural health monitoring of civil infrastructure systems*, Elsevier, 2009, pp. 371–411.
- [22] L. Xu, J. J. Guo, and J. J. Jiang, "Time-frequency analysis of a suspension bridge based on GPS," *J. Sound Vib.*, vol. 254, no. 1, pp. 105–116, 2002.
- [23] C. Ogaja, C. Rizos, and S. Han, "Is GPS good enough for monitoring the dynamics of high-rise buildings," 2000.
- [24] T. Kijewski and A. Kareem, "Full-scale study of the behavior of tall buildings under winds," in *Health Monitoring and Management of Civil Infrastructure Systems*, 2001, vol. 4337, pp. 441–450.
- [25] M. Celebi and A. Sanli, "GPS in pioneering dynamic monitoring of long-period structures," *Earthq. Spectra*, vol. 18, no. 1, pp. 47–61, 2002.
- [26] J. M. W. Brownjohn, C. Rizos, G. H. Tan, and T. C. Pan, "Real-time long-term monitoring and static and dynamic displacements of an office tower, combining RTK GPS and accelerometer data," in *Symp. on Engineering Surveys for Construction Works & Structural Eng., Nottingham, UK, 2004*, vol. 28.
- [27] J. Brownjohn, P. Moyo, C. Rizos, and S. C. Tjin, "Practical issues in using novel sensors in SHM of civil infrastructure: problems and solutions in implementation of GPS and fibre optic sensors," 2003.
- [28] W. A. Wan Aziz, M. A. Zulkarnaini, and K. K. Shu, "The deformation study of high building using RTK-GPS: A first experience in Malaysia," 2005.
- [29] R. E. Bashor, T. L. Kijewski-Correa, M. Kochly, and A. Kareem, "Full-scale monitoring of wind-induced response of tall buildings," 2006.
- [30] C. Ogaja, X. Li, and C. Rizos, "Advances in structural monitoring with global positioning system technology: 1997-2006," *J. Appl. Geod. jag*, vol. 1, no. 3, pp. 171–179, 2007.
- [31] G. W. Roberts, E. Cosser, X. Meng, and A. Dodson, "High frequency deflection monitoring of bridges by GPS," *J. Glob. Position. Syst.*, vol. 3, no. 1–2, pp. 226–231, 2004.
- [32] X. Meng, A. H. Dodson, and G. W. Roberts, "Detecting bridge dynamics with GPS and triaxial accelerometers," *Eng. Struct.*, vol. 29, no. 11, pp. 3178–3184, 2007.
- [33] J. Barnes *et al.*, "The integration of GPS and pseudolites for bridge monitoring," in *A Window on the Future of Geodesy*, Springer, 2005, pp. 83–88.
- [34] J. BARNES *et al.*, "Structural Deformation Monitoring Using Locata," in *1st FIG International Symposium on Engineering Surveys for Construction Works and Structural Engineering*, 2004, pp. 1–16.
- [35] J. Barnes *et al.*, "The monitoring of bridge movements using GPS and pseudolites," in *11th FIG Symposium on Deformation Measurements*, 2003, pp. 1–9, [Online]. Available: <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=672ebab8a0c069d91af9d8007f8067e2ad52f42e>.
- [36] J. Barnes, J. van Cranenbroeck, C. Rizos, A. Pahwa, and A. Politi, "Long term performance analysis of a new ground-transceiver positioning network (LocataNet) for structural deformation monitoring applications," 2007.
- [37] D. J. Bond, "Bringing GPS into harsh environments for deformation monitoring," Ph.D. dissertation; University of New Brunswick, 2007.
- [38] X. Meng, "Real-time deformation monitoring of bridges using GPS/accelerometers," Ph.D. dissertation; University of Nottingham Nottingham, UK, 2002.
- [39] E. Cosser, G. W. Roberts, X. Meng, and A. H. Dodson, "Measuring the dynamic deformation of bridges using a total station," in *Proceedings of the 11th FIG Symposium on Deformation Measurements, Santorini, Greece*, 2003, vol. 25.
- [40] V. Lekidis, M. Tsakiri, K. Makra, C. Karakostas, N. Klimis, and I. Sous, "Evaluation of dynamic response and local soil effects of the Evripos cable-stayed bridge using multi-sensor monitoring systems," *Eng. Geol.*, vol. 79, no. 1–2, pp. 43–59, 2005.
- [41] W. Stempfhuber, "Verification of the Trimble universal total station (UTS) performance for kinematic

- applications," *Opt. 3-D Meas. Tech. Appl. GIS, Mob. mapping, Manuf. Qual. Control. Robot. Navig. Cult. heritage, Nat. manmade hazards Monit. Med. imaging, VR Gener. Animat. Pap. pr*, pp. I-211, 2009.
- [42] A. Kopacik, P. Kyrinovic, and V. Kadlecikova, "Laboratory tests of robot stations," in *Proceedings of the FIG working week*, 2005, pp. 16-21.
- [43] R. S. Radovanovic and W. F. Teskey, "Dynamic monitoring of deforming structures: GPS versus robotic tacheometry systems," in *The 10th FIG International Symposium on Deformation Measurements*, 2001, pp. 61-70.
- [44] D. Garget, "Testing of robotic total station for dynamic tracking. University of Southern Queensland," Dissertation, University of Southern Queensland, 2005.
- [45] I. Ceryova, P. Kubanka, A. Kopačik, and P. Kyrinović, "Dynamic Tests of Robot Stations," in *Proceedings of the International Congress of Deformations Measurement, FIG, Washington, DC, USA*, 2002, pp. 19-26.
- [46] A. Nickitopoulou, K. Protopsalti, and S. Stiros, "Monitoring dynamic and quasi-static deformations of large flexible engineering structures with GPS: Accuracy, limitations and promises," *Eng. Struct.*, vol. 28, no. 10, pp. 1471-1482, 2006.
- [47] P. Psimoulis and S. Stiros, "Monitoring of rigid structures using GPS and RTS--experimental and field evidence," 2008.
- [48] C. D. Hill and K. D. Sippel, "Modern deformation monitoring: a multi sensor approach," 2002.
- [49] R. Jäger and F. González, "GNSS/LPS Based Online Control and Alarm System (GOCA) - Mathematical Models and Technical Realization of a System for Natural and Geotechnical Deformation Monitoring and Hazard Prevention," in *Geodetic Deformation Monitoring: From Geophysical to Engineering Roles*, 2006, pp. 293-303.
- [50] J. V. Andersson, "A complete model for displacement monitoring based on undifferenced GPS observations," Ph.D. dissertation; KTH, 2008.
- [51] K. Honda, A. Shrestha, A. Witayangkurn, R. Chinnachodteeranun, and H. Shimamura, "Fieldservers and sensor service grid as real-time monitoring infrastructure for ubiquitous sensor networks," *Sensors*, vol. 9, no. 4, pp. 2363-2370, 2009.
- [52] F. Casciati and C. Fuggini, "Engineering vibration monitoring by GPS: long duration records," *Earthq. Eng. Eng. Vib.*, vol. 8, no. 3, pp. 459-467, 2009.
- [53] L.-J. Wu, F. Casciati, and S. Casciati, "Dynamic testing of a laboratory model via vision-based sensing," *Eng. Struct.*, vol. 60, pp. 113-125, 2014.
- [54] L. Wu and F. Casciati, "Local positioning systems versus structural monitoring: a review," *Struct. Control Heal. Monit.*, vol. 21, no. 9, pp. 1209-1221, 2014.
- [55] F. Casciati and C. Fuggini, "Monitoring a steel building using GPS sensors," *Smart Struct. Syst.*, vol. 7, no. 5, pp. 349-363, 2011.
- [56] M. Pejić, "Design and optimisation of laser scanning for tunnels geometry inspection," *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, vol. 37, pp. 199-206, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2013.04.004>.
- [57] B.-W. Jo, Y.-S. Lee, J. H. Jo, and R. M. A. Khan, "Computer vision-based bridge displacement measurements using rotation-invariant image processing technique," *Sustainability*, vol. 10, no. 6, p. 1785, 2018.
- [58] W. Mukupa, G. W. Roberts, C. M. Hancock, and K. Al-Manasir, "A review of the use of terrestrial laser scanning application for change detection and deformation monitoring of structures," *Surv. Rev.*, vol. 49, no. 353, pp. 99-116, 2017.
- [59] M. R. Kaloop, E. Elbeltagi, J. W. Hu, and A. Elrefai, "Recent advances of structures monitoring and evaluation using GPS-time series monitoring systems: A review," *ISPRS Int. J. Geo-Information*, vol. 6, no. 12, p. 382, 2017.
- [60] C. Ogaja, "A FRAMEWORK IN SUPPORT OF STRUCTURAL MONITORING BY REAL TIME KINEMATIC GPS AND MULTISENSOR DATA," 2002.

- [61] J. Zhou, H. Xiao, W. Jiang, W. Bai, and G. Liu, "Automatic subway tunnel displacement monitoring using robotic total station," *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 151, p. 107251, 2020, doi: 10.1016/j.measurement.2019.107251.
- [62] J. Yu, P. Zhu, B. Xu, and X. Meng, "Experimental assessment of high sampling-rate robotic total station for monitoring bridge dynamic responses," *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 104, pp. 60–69, 2017, doi: 10.1016/j.measurement.2017.03.014.
- [63] J. Yu, X. Meng, B. Yan, B. Xu, Q. Fan, and Y. Xie, "Global Navigation Satellite System-based positioning technology for structural health monitoring: a review," *Struct. Control Heal. Monit.*, vol. 27, no. 1, p. e2467, 2020.
- [64] A. Pellegrinelli, A. Furini, M. Bonfè, and P. Russo, "Motorised digital levels: development and applications," *Surv. Rev.*, vol. 45, no. 330, pp. 174–189, 2013.
- [65] Z. Yi, C. Kuang, Y. Wang, W. Yu, C. Cai, and W. Dai, "Combination of high-and low-rate GPS receivers for monitoring wind-induced response of tall buildings," *Sensors*, vol. 18, no. 12, p. 4100, 2018.
- [66] D. Notti *et al.*, "Low-cost GNSS solution for continuous monitoring of slope instabilities applied to Madonna Del Sasso Sanctuary (NW Italy)," *Sensors*, vol. 20, no. 1, p. 289, 2020.
- [67] C. D. Ghilani, "COORDINATE TRANSFORMATIONS," in *Adjustment Computations*, John Wiley & Sons, Ltd, 2017, pp. 389–418.
- [68] G. M. T. Radulescu and A. T. G. Radulescu, "The contribution of optical methods and geodetic instruments in structural monitoring: a brief historical survey," in *Optical System Alignment, Tolerancing, and Verification VII*, 2013, vol. 8844, pp. 131–144.
- [69] S. Delčev, *Geodetska metrologija*. Beograd: Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu; Akademska misao, Beograd, 2016.
- [70] Г. Перовић, *Прецизна геодетска мјерења*, 1. издање. Beograd: Грађевински факултет, Универзитет у Београду, 2007.
- [71] K. M. Vračarić and I. R. Aleksić, *Praktična geodezija*. Geokarta, 2007.
- [72] D. Kogoj, *Mjerenje dužina elektronskim daljinomjerima*. Sarajevo: Građevinski fakultet u Sarajevu, 2006.
- [73] M. Valh, A. Marjetič, J. Vesna, and K. Dušan, "Avtomatski elektronski tahimetri ali kam vodi razvoj TPS sistemov : Automatical Total Stations or where the Development of TPS Systems goes," *Geod. Vestn.*, vol. 52, 2008.
- [74] S. Stiros, P. Psimoulis, and E. Kokkinou, "Errors introduced by fluctuations in the sampling rate of automatically recording instruments: experimental and theoretical approach," *J. Surv. Eng.*, vol. 134, no. 3, pp. 89–93, 2008.
- [75] P. A. Psimoulis and S. C. Stiros, "Measuring deflections of a short-span railway bridge using a robotic total station," *J. Bridg. Eng.*, vol. 18, no. 2, pp. 182–185, 2013.
- [76] H. Kirschner and W. Stempfhuber, "The kinematic potential of modern tracking total stations-a state of the art report on the Leica TPS1200+," in *Proceedings of the 1st International Conference on Machine Control & Guidance, June*, 2008, vol. 24, no. 26, pp. 51–60.
- [77] R. Ivanov, *Engineering surveying and deformation surveys*. 2020.
- [78] P. A. Psimoulis and S. C. Stiros, "Measurement of deflections and of oscillation frequencies of engineering structures using Robotic Theodolites (RTS)," *Eng. Struct.*, vol. 29, no. 12, pp. 3312–3324, 2007.
- [79] A. A. E.-W. Beshr and others, "Structural deformation monitoring and analysis of highway bridge using accurate geodetic techniques," *Engineering*, vol. 7, no. 08, p. 488, 2015.
- [80] F. Moschas and S. C. Stiros, "Three-dimensional dynamic deflections and natural frequencies of a stiff footbridge based on measurements of collocated sensors," *Struct. Control Heal. Monit.*, vol. 21, no. 1, pp. 23–42, 2014.

- [81] A. Kopáček, P. Kyrinovič, I. Lipták, and J. Erdély, "Automated monitoring of the Danube bridge Apollo in Bratislava," in *Proceedings of the FIG Working Week*, 2011, pp. 1–11.
- [82] L. Danisch, A. Chrzanowski, J. Bond, and M. Bazanowski, "Fusion of geodetic and MEMS sensors for integrated monitoring and analysis of deformations," in *13th FIG International Symposium on Deformation Measurements and Analysis, Lisbon, Portugal, May, 2008*, pp. 12–15.
- [83] C. I. Vintila, A. C. Radulescu, and P. I. Dragomi, "Monitoring vertical displacements by means of geometric levelling for sky tower building from Floreasca City Center, Bucharest," 2014.
- [84] C. I. Vintilă, A. C. Rădulescu, and P. I. Dragomir, "Modern Techniques of Lands and Constructions Deformation Monitoring," *RevCAD J. Geod. Cadastru*, vol. 17, pp. 177–184, 2014.
- [85] GPS.gov, "The Global Positioning System," *www.Gps.Gov*, 2021. <https://www.gps.gov/> (accessed Oct. 14, 2021).
- [86] J. W. Betz, "The Navstar Global Positioning System," in *Position, Navigation, and Timing Technologies in the 21st Century*, John Wiley & Sons, Ltd, 2020, pp. 65–85.
- [87] GPS.gov, "National Executive Committee for Space-Based Positioning, Navigation, and Timing," *Web Page*, 2021. <https://www.gps.gov/governance/excom/> (accessed Nov. 20, 2021).
- [88] C. J. Hegarty, "The Global Positioning System (GPS)," in *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems*, P. J. G. Teunissen and O. Montenbruck, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2017, pp. 197–218.
- [89] GPS.gov, "Space Segment," *Web Page*, 2021. <https://www.gps.gov/systems/gps/space/#orbits> (accessed Jul. 02, 2021).
- [90] GPS.gov, "Performance Standards & Specifications," *www.Gps.Gov*, 2021. <https://www.gps.gov/technical/ps/> (accessed Oct. 14, 2021).
- [91] Department of Defense USA, "Global Positioning System Standard Positioning Service Performance Standard," 2020. [Online]. Available: <https://www.gps.gov/technical/ps/>.
- [92] Department of Defense USA, "Global Positioning System Precise Positioning Service Performance Standard," 2007. [Online]. Available: <https://www.gps.gov/technical/ps/2007-PPS-performance-standard.pdf>.
- [93] B. A. Renfro, M. Stein, E. B. Reed, J. Morales, and E. J. Villalba, "An Analysis of Global Positioning System (GPS) Standard Positioning Service Performance for 2019," Austin, 2020. [Online]. Available: <https://www.gps.gov/systems/gps/performance/2019-GPS-SPS-performance-analysis.pdf>.
- [94] GPS.gov, "New Civil Signals," *www.Gps.Gov*, 2021. <https://www.gps.gov/systems/gps/modernization/civilsignals/> (accessed Oct. 16, 2021).
- [95] A. Kumar, S. Kumar, P. Lal, P. Saikia, P. K. Srivastava, and G. P. Petropoulos, "Chapter 1 - Introduction to GPS/GNSS technology," in *GPS and GNSS Technology in Geosciences*, G. p. Petropoulos and P. K. Srivastava, Eds. Elsevier, 2021, pp. 3–20.
- [96] GPS.gov, "Civil Navigation (CNAV) Message," *www.Gps.Gov*, 2021. <https://www.gps.gov/systems/gps/modernization/cnav/> (accessed Oct. 16, 2021).
- [97] S. Karutin, N. Testoedov, A. Tyulin, and A. Bolkunov, "GLONASS," in *Position, Navigation, and Timing Technologies in the 21st Century*, John Wiley & Sons, Ltd, 2020, pp. 87–103.
- [98] ROSCOSMOS, "State space corporation ROSCOSMOS," *Web Page*, 2021. <http://en.roscosmos.ru/> (accessed Oct. 17, 2021).
- [99] Applied Consumer Center of Roscosmos, "About GLONASS," *Web Page*, 2021. https://www.glonass-iac.ru/en/about_glonass/ (accessed Oct. 17, 2021).
- [100] S. Revniviykh, A. Bolkunov, A. Serdyukov, and O. Montenbruck, "GLONASS," in *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems*, P. J. G. Teunissen and O. Montenbruck, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2017, pp. 219–245.
- [101] J. Subirana, J. M. J. Zornoza, and M. Hernández Pajares, *GNSS Data Processing Volume I: Fundamentals*

- and Algorithms (ESA TM-23/1; May 2013)*, vol. I. European Space Agency, 2013.
- [102] Russian Institute of Space Device Engineering, "GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEM GLONASS INTERFACE CONTROL DOCUMENT Navigational radiosignal In bands L1, L2 (Edition 5.1)," 2008. Accessed: Oct. 20, 2021. [Online]. Available: https://russianspacesystems.ru/wp-content/uploads/2016/08/ICD_GLONASS_eng_v5.1.pdf.
- [103] Applied Consumer Center of Roscosmos, "Open Service Performance Standard (OS PS)," Korolev, 2020. [Online]. Available: https://www.glonass-iac.ru/upload/docs/stehos/stehos_en.pdf.
- [104] Applied Consumer Center of Roscosmos, "Open Service Performance Standard (OS PS)-appC," Korolev, 2020. [Online]. Available: https://www.glonass-iac.ru/upload/docs/stehos/stehos_en_app_C.pdf.
- [105] Russian Space Systems, "GLONASS Interface Control Document, General Description of Code Division Multiple Access Signal System," 2016. [Online]. Available: <http://russianspacesystems.ru/wp-content/uploads/2016/08/ICD-GLONASS-CDMA-General-Edition-1.0-2016.pdf>.
- [106] S. Zaminpardaz, P. J. G. Teunissen, and N. Nadarajah, "GLONASS CDMA L3 ambiguity resolution and positioning," *GPS Solut.*, vol. 21, no. 2, pp. 535–549, 2017, doi: 10.1007/s10291-016-0544-y.
- [107] D. Sinclair and P. Eng, "Interface Control Document: ICD GLONASS CDMA L1," 2016. [Online]. Available: <https://russianspacesystems.ru/wp-content/uploads/2016/08/ICD-GLONASS-CDMA-L1-Edition-1.0-2016.pdf>.
- [108] D. Sinclair and P. Eng, "Interface Control Document: ICD GLONASS CDMA L2," 2016. [Online]. Available: <https://russianspacesystems.ru/wp-content/uploads/2016/08/ICD-GLONASS-CDMA-L2-Edition-1.0-2016.pdf>.
- [109] D. Sinclair and P. Eng, "Interface Control Document: ICD GLONASS CDMA L3," 2016. [Online]. Available: <https://russianspacesystems.ru/wp-content/uploads/2016/08/ICD-GLONASS-CDMA-L3-Edition-1.0-2016.pdf>.
- [110] European Union Agency for the Space Programme, "About EUSPA," *Web Page*, 2021. <https://www.euspa.europa.eu/govsatcom> (accessed Jun. 23, 2021).
- [111] M. Falcone, J. Hahn, and T. Burger, "Galileo," in *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems*, P. J. G. Teunissen and O. Montenbruck, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2017, pp. 247–272.
- [112] J. Á. Rodríguez, J. Hahn, M. M. Bautista, and E. Chatre, "GALILEO," in *Position, Navigation, and Timing Technologies in the 21st Century*, John Wiley & Sons, Ltd, 2020, pp. 105–142.
- [113] M. Zrinjski, Đ. Barković, and K. Matika, "Razvoj i modernizacija GNSS-a," *Geod. List*, vol. 73, no. 1, pp. 45–65, 2019, [Online]. Available: <https://hrcak.srce.hr/218855>.
- [114] European GNSS Service Centre, "Galileo OS Signal-in-Space Interface Control Document," 2021. [Online]. Available: https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Galileo_OS_SIS_ICD_v2.0.pdf.
- [115] European Commission, "Galileo Open Service - SDD," 2019. [Online]. Available: https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Galileo-OS-SDD_v1.1.pdf.
- [116] European GNSS Service Centre, "Public Regulated Service," *Web Page*, 2021. <https://www.gsc-europa.eu/galileo/services/public-regulated-service> (accessed Nov. 26, 2021).
- [117] European GNSS Agency, "Galileo High Accuracy Service - Info Note," 2020. doi: 10.2878/581340.
- [118] European Commission, "Galileo E6-B/C Codes - Technical Note," 2019. [Online]. Available: https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/E6BC_SIS_Technical_Note.pdf.
- [119] European Commission, "Galileo SaR - SDD," 2020. [Online]. Available: <https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Galileo-SAR-SDD.pdf>.
- [120] European GNSS Agency, "EGNOS Safety of Life (SoL) - SDD," 2021. doi: 10.2878/762657.

- [121] European Commission, "GALILEO OPEN SERVICE NAVIGATION MESSAGE AUTHENTICATION (OSNMA) - USER ICD FOR THE TEST PHASE," 2021. [Online]. Available: https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Galileo_OSNMA_User_ICD_for_Test_Phase_v1.0.pdf.
- [122] European Space Agency, "Galileo and EGNOS," *Web Page*, 2021. https://www.esa.int/Applications/Navigation/Galileo_and_EGNOS (accessed Jul. 01, 2021).
- [123] European GNSS Agency, "EGNOS OS System Definition Document," 2017. [Online]. Available: https://egnos-user-support.essp-sas.eu/new_egnos_ops/sites/default/files/documents/egnos_os_sdd_in_force.pdf.
- [124] European GNSS Agency, "EGNOS Data Access Service - SDD," 2019. doi: 10.2878/729922.
- [125] G. W. Hein *et al.*, "A candidate for the Galileo L1 OS optimized signal," in *proceedings of the 18th international technical meeting of the satellite division of the institute of navigation (ION GNSS 2005)*, 2005, pp. 833–845.
- [126] European GNSS Service Centre, "Performance Reports," *Web Page*, 2021. <https://www.gsc-europa.eu/electronic-library/galileo-service-performance-reports> (accessed Nov. 07, 2021).
- [127] European Commission, "Ionospheric Correction Algorithm for Galileo Single Frequency Users," 2016. [Online]. Available: https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Galileo_Ionospheric_Model.pdf.
- [128] China Satellite Navigation Office, "Development of the BeiDou Navigation Satellite System," 2019. Accessed: Jun. 17, 2021. [Online]. Available: <http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/Officialdocument/202001/P020200116329195978690.pdf>.
- [129] China Satellite Navigation Office, "BeiDou Navigation Satellite System," *Web Page*, 2021. <http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/System/> (accessed Jun. 18, 2021).
- [130] Y. Yang, J. Tang, and O. Montenbruck, "Chinese Navigation Satellite Systems," in *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems*, P. J. G. Teunissen and O. Montenbruck, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2017, pp. 273–304.
- [131] D. Blagojević, *Uvod u Satelitsku geodeziju*. Beograd: Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 2014.
- [132] M. Lu and Z. Yao, "BeiDou Navigation Satellite System," in *Position, Navigation, and Timing Technologies in the 21st Century*, John Wiley & Sons, Ltd, 2020, pp. 143–170.
- [133] China Satellite Navigation Office, "Completion and Commissioning of the BeiDou Navigation Satellite System (BDS-3)," *Web Page*, 2021. http://en.beidou.gov.cn/WHATSNEWS/202008/t20200803_21013.html (accessed Nov. 14, 2021).
- [134] China Satellite Navigation Office, "BeiDou Navigation Satellite System Open Service Performance Standard (Version 3.0)," 2021. [Online]. Available: <http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/Officialdocument/>.
- [135] Test and Assessment Research Center of China Satellite Navigation Office, "System Introduction," *Web Page*, 2021. <http://www.csno-tarc.cn/en/system/introduction> (accessed Nov. 18, 2021).
- [136] China Satellite Navigation Office, "BeiDou Navigation Satellite System Signal In Space Interface Control Document Open Service Signal B1C," 2017. [Online]. Available: <http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/Officialdocument/201806/P020180608525871869457.pdf>.
- [137] China Satellite Navigation Office, "BeiDou Navigation Satellite System Signal In Space Interface Control Document Open Service Signal B2a," 2017. [Online]. Available: <http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/Officialdocument/201806/P020180608525870555377.pdf>.
- [138] China Satellite Navigation Office, "BeiDou Navigation Satellite System Signal In Space Interface Control Document Open Service Signal B2b," 2020. [Online]. Available: <http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/Officialdocument/202008/P020200803544811195696.pdf>.
- [139] China Satellite Navigation Office, "BeiDou Navigation Satellite System Signal In Space Interface Control Document Open Service Signal B1I," 2019. [Online]. Available:

- <http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/Officialdocument/201902/P020190227601370045731.pdf>.
- [140] China Satellite Navigation Office, "BeiDou Navigation Satellite System Signal In Space Interface Control Document Open Service Signal B3I," 2018. [Online]. Available: <http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/Officialdocument/201806/P020180608525869304359.pdf>.
- [141] G. Seeber, *Satellite Geodesy*. De Gruyter, 2008.
- [142] A. El-Rabbany, *Introduction to GPS: the global positioning system*. Artech house, 2006.
- [143] B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, and E. Wasle, Eds., "Observables BT - GNSS – Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more," in *GNSS – Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more*, Vienna: Springer Vienna, 2008, pp. 105–160.
- [144] A. Leick, L. Rapoport, and D. Tatarnikov, "GNSS Positioning Approaches," in *GPS Satellite Surveying*, John Wiley & Sons, Ltd, 2015, pp. 257–399.
- [145] R. B. Langley, P. J. G. Teunissen, and O. Montenbruck, "Introduction to GNSS," in *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems*, P. J. G. Teunissen and O. Montenbruck, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2017, pp. 3–23.
- [146] E. D. Kaplan and C. Hegarty, *Understanding GPS/GNSS: principles and applications*. Artech house, 2017.
- [147] M. S. Grewal, A. P. Andrews, and C. G. Bartone, *Global navigation satellite systems, inertial navigation, and integration*. John Wiley & Sons, 2020.
- [148] J. W. Betz, "Fundamentals of Satellite-Based Navigation and Timing," in *Position, Navigation, and Timing Technologies in the 21st Century: Integrated Satellite Navigation, Sensor Systems, and Civil Applications*, 2021, pp. 43–64.
- [149] B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, and E. Wasle, Eds., "Introduction BT - GNSS – Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more," Vienna: Springer Vienna, 2008, pp. 1–12.
- [150] D. Blagojević, "Mogućnosti globalnog pozicionog sistema za uspostavljanje geodetske referentne osnove u gradovima," *Doktorska disertacija*, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, 2003.
- [151] S. Kumar, A. K. Singh, and R. P. Singh, "Chapter 6 - Probing the tropospheric water vapor using GPS," in *GPS and GNSS Technology in Geosciences*, G. p. Petropoulos and P. K. Srivastava, Eds. Elsevier, 2021, pp. 119–134.
- [152] D. Anđić, "Određivanje komponenti disperzija vremenski varijabilnih grešaka u GPS određivanju koordinata," *Doktorska disertacija*, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, 2019.
- [153] O. Montenbruck and P. Steigenberger, "GNSS Orbit Determination and Time Synchronization," in *Position, Navigation, and Timing Technologies in the 21st Century*, John Wiley & Sons, Ltd, 2020, pp. 233–258.
- [154] Y. Lu, "Dual Mode Observation Extraction and Error Analysis," in *BDS/GPS Dual-Mode Software Receiver: Principles and Implementation Technology*, Singapore: Springer Singapore, 2021, pp. 267–318.
- [155] J. Awange, "The Global Positioning System," in *GNSS Environmental Sensing: Revolutionizing Environmental Monitoring*, Cham: Springer International Publishing, 2018, pp. 25–42.
- [156] IGS, "Products - International GNSS Service," *Web Page*, 2021. <https://igs.org/products/#about> (accessed Dec. 14, 2021).
- [157] X. Luo, "Mathematical Models for GPS Positioning," in *GPS Stochastic Modelling: Signal Quality Measures and ARMA Processes*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, pp. 55–116.
- [158] G. Xu and Y. Xu, "Physical Influences of GPS Surveying," in *GPS: Theory, Algorithms and Applications*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016, pp. 63–132.
- [159] J. P. Weiss, P. Steigenberger, and T. Springer, "Orbit and Clock Product Generation," in *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems*, P. J. G. Teunissen and O. Montenbruck, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2017, pp. 983–1010.
- [160] A. Hauschild, "Basic Observation Equations," in *Springer Handbook of Global Navigation Satellite*

- Systems*, P. J. G. Teunissen and O. Montenbruck, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2017, pp. 561–582.
- [161] J. Van Sickle, “Biases and Solutions,” in *GPS for Land Surveyors*, CRC Press, 2015, pp. 58–93.
- [162] P. Steigenberger, M. Rothacher, R. Dietrich, M. Fritsche, A. Rülke, and S. Vey, “Reprocessing of a global GPS network,” *J. Geophys. Res. Solid Earth*, vol. 111, no. B5, 2009, doi: <https://doi.org/10.1029/2005JB003747>.
- [163] A. Leick, L. Rapoport, and D. Tatarnikov, “GNSS Receiver Antennas,” in *GPS Satellite Surveying*, John Wiley & Sons, Ltd, 2015, pp. 513–651.
- [164] P. Zeimet and H. Kuhlmann, “Systematic effects in absolute chamber calibration of GPS antennas,” *Geomatica*, vol. 60, pp. 267–274, 2006.
- [165] L. Lau, “Chapter 4 - GNSS multipath errors and mitigation techniques,” in *GPS and GNSS Technology in Geosciences*, G. p. Petropoulos and P. K. Srivastava, Eds. Elsevier, 2021, pp. 77–98.
- [166] M. S. Braasch, “Multipath,” in *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems*, P. J. G. Teunissen and O. Montenbruck, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2017, pp. 443–468.
- [167] G. Wübbena, M. Schmitz, and G. Boettcher, “Near-field Effects on GNSS Sites: Analysis using Absolute Robot Calibrations and Procedures to Determine Corrections,” 2006.
- [168] A. Leick, L. Rapoport, and D. Tatarnikov, “Geodesy,” in *GPS Satellite Surveying*, John Wiley & Sons, Ltd, 2015, pp. 129–206.
- [169] S. A. Melachroinos *et al.*, “Ocean tide loading (OTL) displacements from global and local grids: comparisons to GPS estimates over the shelf of Brittany, France,” *J. Geod.*, vol. 82, no. 6, pp. 357–371, 2008, doi: 10.1007/s00190-007-0185-6.
- [170] D. Zhao, X. Xu, J. Li, J. Duan, and L. Yu, “Ocean Tidal Loading Effects to Displacements at GNSS Sites,” in *China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2013 Proceedings*, 2013, pp. 21–29.
- [171] E. P. Rodrigues, “Estimation of crustal vertical movements due to atmospheric loading effects by GPS observations,” *Rev. Bras. Geofísica*, vol. 25, pp. 45–50, 2007.
- [172] C. Rizos, “Surveying,” in *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems*, P. J. G. Teunissen and O. Montenbruck, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2017, pp. 1011–1037.
- [173] S. Bisnath, “Relative Positioning and Real-Time Kinematic (RTK),” in *Position, Navigation, and Timing Technologies in the 21st Century*, John Wiley & Sons, Ltd, 2020, pp. 481–502.
- [174] C. C. Goad, “Short Distance GPS Models,” in *GPS for Geodesy*, P. J. G. Teunissen and A. Kleusberg, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1998, pp. 457–481.
- [175] Y. Bock, “Medium Distance GPS Measurements,” in *GPS for Geodesy*, P. J. G. Teunissen and A. Kleusberg, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1998, pp. 483–536.
- [176] O. L. Colombo, “Long-Distance Kinematic GPS,” in *GPS for Geodesy*, P. J. G. Teunissen and A. Kleusberg, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1998, pp. 537–567.
- [177] H. Z. Abidin, “On the construction of the ambiguity searching space for on-the-fly ambiguity resolution,” *Navigation*, vol. 40, no. 3, pp. 321–338, 1993.
- [178] RTKLIB, “An Open Source Program Package for GNSS Positioning,” *Web Page*, 2022. <http://www.rtklib.com/> (accessed Jan. 26, 2022).
- [179] T. Takasu and A. Yasuda, “Development of the low-cost RTK-GPS receiver with an open source program package RTKLIB,” in *International symposium on GPS/GNSS*, 2009, vol. 1.
- [180] D. Skorup and S. Vasiljević, “CORS Networks, Aspects of Business Models in Europe and the Region,” *AGG+ J. Archit. Civ. Eng. Geod. Relat. Sci. Fields*, vol. 10, no. 01, pp. 108–127, 2022, doi: <https://doi.org/10.7251/AGGPLUS/2210108S>.
- [181] A. Narbudowicz, “Chapter 5 - Antenna technology for GNSS,” in *GPS and GNSS Technology in Geosciences*, G. p. Petropoulos and P. K. Srivastava, Eds. Elsevier, 2021, pp. 99–117.

- [182] S. Gunawardena and Y. T. J. Morton, "Fundamentals and Overview of GNSS Receivers," in *Position, Navigation, and Timing Technologies in the 21st Century*, John Wiley & Sons, Ltd, 2020, pp. 307–338.
- [183] Y. T. J. Morton, R. Yang, and B. Breitsch, "GNSS Receiver Signal Tracking," in *Position, Navigation, and Timing Technologies in the 21st Century*, John Wiley & Sons, Ltd, 2020, pp. 339–375.
- [184] Y. Lu, "RF Front-End," in *BDS/GPS Dual-Mode Software Receiver: Principles and Implementation Technology*, Singapore: Springer Singapore, 2021, pp. 431–461.
- [185] Y. Lu, "Capture and Tracking of the Signal," in *BDS/GPS Dual-Mode Software Receiver: Principles and Implementation Technology*, Singapore: Springer Singapore, 2021, pp. 135–266.
- [186] J.-H. Won and T. Pany, "Signal Processing," in *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems*, P. J. G. Teunissen and O. Montenbruck, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2017, pp. 401–442.
- [187] M. S. Grewal, A. P. Andrews, and C. G. Bartone, "GNSS Antenna Design and Analysis," in *Global Navigation Satellite Systems, Inertial Navigation, and Integration*, John Wiley & Sons, Ltd, 2020, pp. 145–187.
- [188] M. S. Grewal, A. P. Andrews, and C. G. Bartone, "GNSS Receiver Design and Analysis," in *Global Navigation Satellite Systems, Inertial Navigation, and Integration*, John Wiley & Sons, Ltd, 2020, pp. 189–247.
- [189] R. Wu, W. Wang, D. Lu, L. Wang, and Q. Jia, "Principles of Satellite Navigation System," in *Adaptive Interference Mitigation in GNSS*, Singapore: Springer Singapore, 2018, pp. 1–29.
- [190] R. Hohensinn, S. Häberling, and A. Geiger, "Dynamic displacements from high-rate GNSS: Error modeling and vibration detection," *Measurement*, vol. 157, p. 107655, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107655>.
- [191] NGS, "ANTCAL," *Web Page*, 2022. <https://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/FAQ.xhtml> (accessed Jan. 29, 2022).
- [192] Geo++, "Antenna Calibration," *Web Page*, 2022. <https://www.geopp.de/antenna-calibration/> (accessed Jan. 29, 2022).
- [193] B. Eissfeller and J.-H. Won, "Receiver Architecture," in *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems*, P. J. G. Teunissen and O. Montenbruck, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2017, pp. 365–400.
- [194] M. Maqsood, S. Gao, and O. Montenbruck, "Antennas," in *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems*, P. J. G. Teunissen and O. Montenbruck, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2017, pp. 505–534.
- [195] T. A. Stansell Jr., "GNSS Interoperability," in *Position, Navigation, and Timing Technologies in the 21st Century*, John Wiley & Sons, Ltd, 2020, pp. 205–214.
- [196] E. Ochin and Ł. Lemieszewski, "Security of GNSS," in *GPS and GNSS Technology in Geosciences*, G. p. Petropoulos and P. K. Srivastava, Eds. Elsevier, 2021, pp. 51–74.
- [197] B. W. Parkinson, Y. T. J. Morton, F. Diggelen, and J. J. Spilker, "Introduction, Early History, and Assuring PNT (PTA)," in *Position, Navigation, and Timing Technologies in the 21st Century: Integrated Satellite Navigation, Sensor Systems, and Civil Applications*, 2021, pp. 1–42.
- [198] L. Scott, "Interference: Origins, Effects, and Mitigation," 2020, pp. 619–653.
- [199] T. Humphreys, "Interference," in *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems*, P. J. G. Teunissen and O. Montenbruck, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2017, pp. 469–503.
- [200] M. Psiaki and T. Humphreys, "Civilian GNSS Spoofing, Detection, and Recovery," in *Position, Navigation, and Timing Technologies in the 21st Century: Integrated Satellite Navigation, Sensor Systems, and Civil Applications*, 2021, pp. 655–680.
- [201] R. Wu, W. Wang, D. Lu, L. Wang, and Q. Jia, "Spoofing Countermeasure Techniques," in *Adaptive Interference Mitigation in GNSS*, Singapore: Springer Singapore, 2018, pp. 167–199.

- [202] D. Borio, C. O'Driscoll, and J. Fortuny, "GNSS Jammers: Effects and countermeasures," in *2012 6th ESA Workshop on Satellite Navigation Technologies (Navitec 2012) European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing*, 2012, pp. 1–7, doi: 10.1109/NAVITEC.2012.6423048.
- [203] B. W. O'Hanlon, M. L. Psiaki, J. A. Bhatti, D. P. Shepard, and T. E. Humphreys, "Real-time GPS spoofing detection via correlation of encrypted signals," *Navig. J. Inst. Navig.*, vol. 60, no. 4, pp. 267–278, 2013.
- [204] R. Wu, W. Wang, D. Lu, L. Wang, and Q. Jia, "Jamming Suppression," in *Adaptive Interference Mitigation in GNSS*, Singapore: Springer Singapore, 2018, pp. 31–119.
- [205] S. Ašanin, *Inženjerska geodezija 1*. Ageo, 2003.
- [206] A. Begović and Z. Gospavić, *Inženjerska geodezija 1*, Prvo izdan. Beograd: Građevinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, 2016.
- [207] R. Paar, "Uspostava geodetske osnove za posebne namjene," *Master's Sci. Thesis. Zagreb Univ. Zagreb*, 2006.
- [208] B. Milovanović, "Designing the Control Networks for Hydrotechnical Objects for the Purpose of Geodetic Monitoring," 2016.
- [209] S. Vasiljević, "GEODETIC DETERMINATION OF VERTICAL DISPLACEMENT OF BUILDINGS DURING CONSTRUCTION," *САВРЕМЕНА ТЕОРИЈА И ПРАКСА У ГРАДИТЕЉСТВУ*, vol. 13, no. 1, 2018.
- [210] A.-S. A. R., A. J., Z.-N. F., and Z. S., "Basic Concepts of Optimization and Design of Geodetic Networks," *J. Surv. Eng.*, vol. 138, no. 4, pp. 172–183, Nov. 2012, doi: 10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000081.
- [211] B. Milovanović, Z. Gospavić, M. Pejović, and S. Vasiljević, "Projekat osnovne mreže/Project of the Core Network. u: Zbornik radova Nacionalnog naučnog skupa-GEO 2014," in *Proceedings of the National Scientific Conference GEO2014, Kopaonik*, 2014, pp. 3–11.
- [212] R. Paar, "Uspostava geodetske osnove za posebne namjene," *Master's of Science Thesis, University of Zagreb*, 2006.
- [213] G. Weiss, E. Weiss, R. Weiss, S. Labant, and K. Bartoš, "The Compatibility of Geodetic Control BT - Survey Control Points: Compatibility and Verification," G. Weiss, E. Weiss, R. Weiss, S. Labant, and K. Bartoš, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2016, pp. 3–4.
- [214] G. Weiss, E. Weiss, R. Weiss, S. Labant, and K. Bartoš, "Introduction BT - Survey Control Points: Compatibility and Verification," G. Weiss, E. Weiss, R. Weiss, S. Labant, and K. Bartoš, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2016, pp. 1–2.
- [215] A. A. Seemkooei, "Comparison of reliability and geometrical strength criteria in geodetic networks," *J. Geod.*, vol. 75, no. 4, pp. 227–233, 2001.
- [216] W. Schofield and M. Breach, *Engineering surveying*. CRC Press, 2007.
- [217] E. W. Grafarend and F. Sansò, *Optimization and design of geodetic networks*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [218] K. Mihailović and I. R. Aleksić, "Optimizacija geodetskih mreža," in *Koncepti mreža u geodetskom premeru*, Prvo., Beograd: Privredno društvo za kartografiju Geokarta, 2008, pp. 523–603.
- [219] С. Васиљевић, "Иновирани пројекат геодетског осматрања бране 'Бочац,'" *Универзитет у Београду*, 2015.
- [220] N. Lima, J. Casaca, and M. J. Henriques, "Accuracy of Displacement Monitoring at Large Dams with GPS BT - Geodetic Deformation Monitoring: From Geophysical to Engineering Roles," 2006, pp. 239–243.
- [221] M. A. Alizadeh-Khameneh, "Optimal Design in Geodetic GNSS-based Networks," 2018.
- [222] M. C. Santos, P. Vaniček, and R. B. Langley, "Effect of mathematical correlation on GPS network computation," *J. Surv. Eng.*, vol. 123, no. 3, pp. 101–112, 1997.

- [223] K. Ding, D. Liu, and C. Hu, "Impacts of Correlation between Baselines on the Adjustment of GPS Control Network," in *1st FIG International Symposium on Engineering Surveys for construction Works and Structural Engineering*. Nottingham, United Kingdom, 2004, vol. 28.
- [224] A. Fotiou, C. Pikridas, D. Rossikopoulos, and M. Chatzinikos, "The effect of independent and trivial GPS baselines on the adjustment of networks in everyday engineering practice," in *International Symposium on Modern Technologies, Education and Professional Practice in Geodesy and Related Fields*, 2009, pp. 201–212.
- [225] A. El-Rabbany and A. Kleusberg, "Effect of temporal physical correlation on accuracy estimation in GPS relative positioning," *J. Surv. Eng.*, vol. 129, no. 1, pp. 28–32, 2003.
- [226] K.-R. Koch, "Vector and Matrix Algebra," in *Parameter Estimation and Hypothesis Testing in Linear Models*, K.-R. Koch, Ed. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010, pp. 3–73.
- [227] B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, and E. Wasle, Eds., "Data processing," in *GNSS – Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more*, Vienna: Springer Vienna, 2008, pp. 193–276.
- [228] S. Vasiljević and B. Milovanović, "DESIGNING OF CONTINUOUS DAM MONITORING USING GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEMS," in *PROCEEDINGS of International conference on Contemporary Theory and Practice in Construction XV*, 2022, pp. 305–319, doi: <https://doi.org/10.7251/STP2215305>.
- [229] M. A. Alizadeh-Khameneh, L. E. Sjöberg, and A. B. O. Jensen, "Optimisation of GNSS networks – considering baseline correlations," *Surv. Rev.*, vol. 51, no. 364, pp. 35–42, 2019, doi: 10.1080/00396265.2017.1342896.
- [230] B. Glišić and D. Inaudi, "Introduction to Structural Health Monitoring," in *Fibre Optic Methods for Structural Health Monitoring*, John Wiley & Sons, Ltd, 2007, pp. 1–17.
- [231] Z. M. Malović, "RAZVOJ I ANALIZA SENZORSKOG SISTEMA ZA MERENJE VIBRACIJA GRAĐEVINSKIH OBJEKATA," Univerzitet u Beogradu, 2015.
- [232] C. Rizos and S. Han, "Reference station network based RTK systems-concepts and progress," *Wuhan Univ. J. Nat. Sci.*, vol. 8, no. 2, pp. 566–574, 2003, doi: 10.1007/BF02899820.
- [233] M. Todorović-Drakul, "Моделовање јоносфере за потребе одређивања утицаја на ГПС сигнале у мрежном РТК окружењу," *Универзитет у Београду*, 2016.
- [234] С. Б. Божић and С. Томић, "Технике мерења технологијом Глобалног система позиционирања," in *Технике геодетских мјерења 2*, 1st ed., Београд: Виша грађевинско-геодетска школа, 2007, pp. 121–179.
- [235] C. Rizos and others, "Network RTK research and implementation-a geodetic perspecti," *Positioning*, vol. 1, no. 02, 2009.
- [236] Y. Jiayong, Y. Banfu, M. Xiaolin, S. Xudong, and Y. Hao, "Measurement of Bridge Dynamic Responses Using Network-Based Real-Time Kinematic GNSS Technique," *J. Surv. Eng.*, vol. 142, no. 3, p. 4015013, Aug. 2016, doi: 10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000167.
- [237] X. Meng, N. Gogoi, A. H. Dodson, G. W. Roberts, and C. J. Brown, "Using multi-constellation GNSS and EGNOS for bridge deformation monitoring," in *Proceedings of the joint international symposium on deformation monitoring*. Hong Kong, China, 2011, pp. 2–4.
- [238] GOCA, "GOCA - GNSS/LPS/LS-based online Control and Alarm System," *Web Page*, 2022. http://goca.info/index_e.html (accessed Apr. 02, 2022).
- [239] DABAMOS, "Database-oriented Monitoring System (DABAMOS)," *Web Page*, 2022. <https://www.dabamos.de/> (accessed Apr. 28, 2022).
- [240] М. З. Марковић, Д. Васић, Т. Нинков, М. Петковић, and Н. Јанковић, "Примена савремених геодетских метода током изградње високих зграда," *Savrem. Dostig. u gradevinsarstvouarstvou*, 2016.
- [241] H.-P. Chen and Y.-Q. Ni, "Sensors and Sensing Technology for Structural Monitoring," in *Structural Health Monitoring of Large Civil Engineering Structures*, John Wiley & Sons, Ltd, 2018, pp. 15–49.

- [242] IERS, "IERS Conventions." <https://www.iers.org/IERS/EN/DataProducts/Conventions/conventions.html> (accessed Jun. 30, 2022).
- [243] ISO 19111:2019(en), "Geographic information – Referencing by coordinates." <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:19111:ed-3:v1:en> (accessed Jun. 23, 2022).
- [244] C. Jekeli, "Geometric Reference Systems in Geodesy," 2006.
- [245] W. Torge, "Reference Systems," in *Geodesy*, De Gruyter, 2011, pp. 18–44.
- [246] C. Jekeli and O. Montenbruck, "Time and Reference Systems BT - Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems," P. J. G. Teunissen and O. Montenbruck, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2017, pp. 25–58.
- [247] N. G. S. (U.S.) and N. O. S. United States Office of Charting and Geodetic Services, Eds., "Geodetic glossary." [Online]. Available: <https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/2827>.
- [248] R. H. Rapp, *Geometric geodesy part II*. Department of Geodetic Science and Surveying Ohio State University, USA, 1993.
- [249] H. Moritz and I. I. Mueller, *Earth rotation: theory and observation*. New York: Ungar, 1987.
- [250] "Coordinate reference systems." <https://inspire.ec.europa.eu/theme/rs> (accessed Jun. 23, 2022).
- [251] Navipedia, "Conventional Celestial Reference System." https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Conventional_Celestial_Reference_System (accessed Jul. 02, 2022).
- [252] Navipedia, "Conventional Terrestrial Reference System." https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Conventional_Terrestrial_Reference_System (accessed Jul. 01, 2022).
- [253] B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, and E. Wasle, Eds., "Reference systems BT - GNSS – Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more," Vienna: Springer Vienna, 2008, pp. 13–25.
- [254] "GPS, UTC, and TAI Clocks." <http://leapsecond.com/java/gpsclock.htm> (accessed Jul. 01, 2022).
- [255] M. Lapaine, D. Tutić, and M. Lapaine, "Numeričke vrijednosti geometrijskih konstanti elipsoida GRS 80," *Geod. List*, vol. 60, no. 4, pp. 259–269, 2006.
- [256] R. F. Wong, C. M. Rollins, and C. F. Minter, "Recent updates to the WGS 84 reference frame," in *Proceedings of the 25th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2012)*, 2012, pp. 1164–1172.
- [257] "World Geodetic System 1984 (WGS84) - Qinsy." [https://confluence.qps.nl/qinsy/latest/en/world-geodetic-system-1984-wgs84-182618391.html#id-.WorldGeodeticSystem1984\(WGS84\)v9.1-WGS84realizations](https://confluence.qps.nl/qinsy/latest/en/world-geodetic-system-1984-wgs84-182618391.html#id-.WorldGeodeticSystem1984(WGS84)v9.1-WGS84realizations) (accessed May 17, 2022).
- [258] "Reference Frames in GNSS - Navipedia." https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Reference_Frames_in_GNSS#GPS_reference_frame_WGS-84 (accessed May 17, 2022).
- [259] "NGA Geomatics - WGS 84." <https://earth-info.nga.mil/index.php?dir=wgs84&action=wgs84> (accessed May 17, 2022).
- [260] United Nations Office for Outer Space Affairs, "PZ-90," 2014. https://www.unoosa.org/pdf/icg/2014/wg/PZ-90.11_2014.pdf (accessed Oct. 20, 2021).
- [261] D. I. Pleshakov, "System of Geodetic Parameters ' Parametry Zemli 1990,'" no. November, pp. 1–13, 2014.
- [262] A. V Druzhin and V. Palchikov, "Current state and perspectives of UTC (SU) broadcast by GLONASS," *Proc. 9th Meet. Int. Comm. GNSS (ICG), Prague (UNOOSA, Vienna 2014) pp*, pp. 1–9, 2014.
- [263] Y. Yang, "Chinese geodetic coordinate system 2000," *Chinese Sci. Bull.*, vol. 54, no. 15, pp. 2714–2721, 2009, doi: 10.1007/s11434-009-0342-9.

- [264] S. Vasiljević, D. D. Vasić, O. Odalović, D. Blagojević, and B. Milovanović, "Horizontal coordinates transformation and residuals modelling on the territory of the Republic of Srpska," *Surv. Rev.*, vol. 53, no. 380, pp. 390–401, 2021, doi: 10.1080/00396265.2020.1781357.
- [265] V. Jovanović, *Matematička kartografija*. Vojnogeografski institut, 1983.
- [266] V. Lubarda, *Otpornost materijala - uvod u mehaniku deformabilnog tijela*, II. Podgorica (Titograd): NIO "Univerzitetska riječ", Titograd; Univerzitet "Veljko Vlahović" u Titogradu, 1989.
- [267] "Čvrstoća materijala." [https://www.ffri.hr/~mdundjer/Elementi strojeva I/02-CvrstocaMaterijala.pdf](https://www.ffri.hr/~mdundjer/Elementi_strojeva_I/02-CvrstocaMaterijala.pdf) (accessed Jun. 21, 2022).
- [268] G. W. Roberts, X. Meng, P. Psimoulis, and C. J. Brown, "Time Series Analysis of Rapid GNSS Measurements for Quasi-static and Dynamic Bridge Monitoring BT - Geodetic Time Series Analysis in Earth Sciences," in *Geodetic Time Series Analysis in Earth Sciences*, J.-P. Montillet and M. S. Bos, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 345–417.
- [269] C. D. Ghilani, "COMBINING GNSS AND TERRESTRIAL OBSERVATIONS," in *Adjustment Computations*, John Wiley & Sons, Ltd, 2017, pp. 545–563.
- [270] K. M. Врачарић, И. Р. Алексић, and J. П. Гучевић, *Геодетски премер*. Београд: Републички геодетски завод, 2011.
- [271] K. Mihailović and I. R. Aleksić, "Transformacije koordinata," in *Koncepti mreža u geodetskom premeru*, Beograd: Privredno društvo za kartografiju Geokarta, 2008, pp. 479–521.
- [272] I. R. Aleksić, J. P. Gučević, and J. M. Popović, *Geodetski premer - zbirka rešenih zadataka*. Beograd: Građevinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, 2009.
- [273] B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, and E. Wasle, Eds., "Mathematical models for positioning BT - GNSS - Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more," Vienna: Springer Vienna, 2008, pp. 161–191.
- [274] ISO 17 123 - 1, *Optics and optical instruments - Field procedures for testing geodetic and surveying instruments - Part 1: Theory (Second edition)*. 2010.
- [275] ISO 4463 - 1, *Measurement methods for building - Setting-out and measurement - Part 1: Planning and organization, measuring procedures, acceptance criteria*. 2023.
- [276] ISO 17 123 - 2, *Optics and optical instruments - Field procedures for testing geodetic and surveying instruments - Part 2: Levels (First edition)*. 2001.
- [277] ISO 17123 - 3, *Optics and optical instruments - Field procedures for testing geodetic and surveying instruments - Part 3: Theodolites (First edition)*. 2001.
- [278] ISO 17 123 - 4, *Optics and optical instruments - Field procedures for testing geodetic and surveying instruments - Part 4: Electro-optical distance meters (EDM measurements to reflectors) (Second edition)*. 2012.
- [279] ISO 17 123 - 5, *Optics and optical instruments - Field procedures for testing geodetic and surveying instruments - Part 5: Total stations (Second edition)*. 2012.
- [280] ISO 17 123 - 8, *Optics and optical instruments - Field procedures for testing geodetic and surveying instruments - Part 8: GNSS field measurement systems in realtime kinematic (RTK) (First edition)*. 2007.
- [281] ISO 17 025, *General requirements for the competence of testing and calibration laboratories*. 2017.
- [282] P. Teunissen and S. Verhagen, "The GNSS Ambiguity Ratio-test Revisited: a Better Way of Using it," *Surv. Rev.*, vol. 41, pp. 138–151, 2009, doi: 10.1179/003962609X390058.
- [283] C. C. Counselman and S. A. Gourevitch, "Miniature Interferometer Terminals for Earth Surveying: Ambiguity And Multipath with Global Positioning System," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. GE-19, no. 4, pp. 244–252, Oct. 1981, doi: 10.1109/TGRS.1981.350379.
- [284] R. Hatch, "Instantaneous ambiguity resolution," in *Kinematic systems in geodesy, surveying, and remote sensing*, Springer, 1991, pp. 299–308.
- [285] E. Frei, "Rapid static positioning based on the fast ambiguity resolution approach FARA': theory and

- first results," *Manuscripta Geod.*, vol. 15, pp. 325–356, 1990.
- [286] D. Chen and G. Lachapelle, "A Comparison of the FASF and Least-Squares Search Algorithms for on-the-Fly Ambiguity Resolution," *Navigation*, vol. 42, no. 2, pp. 371–390, 1995.
- [287] P. J. G. Teunissen, "Carrier Phase Integer Ambiguity Resolution," in *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems*, P. J. G. Teunissen and O. Montenbruck, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2017, pp. 661–685.
- [288] P. J. G. Teunissen, "GPS carrier phase ambiguity fixing concepts," in *GPS for Geodesy*, Springer, 1998, pp. 319–388.
- [289] X.-W. Chang, X. Yang, and T. Zhou, "MLAMBDA: A modified LAMBDA method for integer least-squares estimation," *J. Geod.*, vol. 79, no. 9, pp. 552–565, 2005.
- [290] P. De Jonge, C. Tiberius, and others, "The LAMBDA method for integer ambiguity estimation: implementation aspects," *Publ. Delft Comput. Centre, LGR-Series*, vol. 12, no. 12, pp. 1–47, 1996.
- [291] H. J. Euler, C. R. Keenan, and B. E. Zebhause, "Study of a simplified approach in utilizing information from permanent reference station arrays," in *Proceedings of the 14th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 2001)*, 2001, pp. 379–391.
- [292] U. Vollath, A. Buecherl, H. Landau, C. Pagels, and B. Wagner, "Multi-base RTK positioning using virtual reference stations," in *Proceedings of the 13th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 2000)*, 2000, pp. 123–131.
- [293] G. Fotopoulos and M. E. Cannon, "An overview of multi-reference station methods for cm-level positioning," *GPS Solut.*, vol. 4, no. 3, pp. 1–10, 2001.
- [294] W. Welsch and O. Heunecke, "Models and terminology for the analysis of geodetic monitoring observations," *Int. Fed. Surv.*, 2001.
- [295] W. Welsch and O. Heunecke, "Terminology and Classification of Deformation Models," in *9th International FIG-Symposium on Deformation Measurements*, 1999, pp. 27–30.
- [296] B. Božić, B. Milovanović, S. Tucikešić, and S. Vasiljević, "Ocena pomeranja inženjerskih struktura u programskom paketu PANDA," *Teh. – NAŠE GRAĐEVINARSTVO*, vol. 76, no. 3, pp. 295–302, 2022, doi: 10.5937/tehnika2203295B.
- [297] K. Mihailović and I. Aleksić, *Deformaciona analiza geodetskih mreža*. Institut za geodeziju, Građevinski fakultet, Univerzitet, 1994.
- [298] W. F. Caspary, W. Haen, and H. Borutta, "Deformation analysis by statistical methods," *Technometrics*, vol. 32, no. 1, pp. 49–57, 1990.
- [299] W. Welsch, "Description of homogeneous horizontal strains and some remarks to their analysis," 1982.
- [300] B. Heck, J. J. Kok, W. M. Welsch, R. Baumer, A. Chrzanowski, and Y. Q. Chen, "Report of the IG-working group on the analysis of deformation measurements," in *Deformation measurements. International symposium on deformation measurements by geodetic methods. 3*, 1983, pp. 373–415.
- [301] W. M. Welsch, "Finite element analysis of strain patterns from geodetic observations across a plate margin," in *Developments in Geotectonics*, vol. 20, Elsevier, 1983, pp. 57–71.
- [302] A. Chrzanowski, Y. Q. Chen, and J. M. Secord, "A generalized approach to the geometrical analysis of deformation surveys," in *Deformation measurements. International symposium on deformation measurements by geodetic methods. 3*, 1983, pp. 349–371.
- [303] A. Chrzanowski and Y. Q. Chen, "Report of the ad hoc Committee on the Analysis of Deformation Surveys," in *XVIIIth Intern. Congress FIG, Toronto*, 1986, pp. 1–11.
- [304] J. J. Kok, "Statistical analysis of deformation problems using Baarda's testing procedures," *Daar heb ik veertig jaar over nagedacht, Festschrift Willem Baarda, Part*, vol. 2, pp. 469–488, 1982.
- [305] Leica Geosystems, *Leica Viva TS15 - user manual*, Version 7. Heerbrugg: Leica Geosystems AG, 2019.
- [306] Leica Geosystems, *Leica DNA03/DNA10 - user manual*, Version 2. Heerbrugg: Leica Geosystems AG,

- 2006.
- [307] GeoMax, *GeoMax Zenith16/40 Series - user manual*, Version 1. Widnau, Switzerland: GeoMax AG, Widnau, Switzerland, 2019.
- [308] V. Gikas and S. DASKALAKIS, "COMPARATIVE TESTING AND ANALYSIS OF RTS VERSUS GPS FOR STRUCTURAL MONITORING USING CALIBRATION MEASUREMENTS UPON SINUSOIDAL EXCITATION," 2008.
- [309] Републички хидрометеоролошки завод Републике Српске, "Мјесечне синоптичке анализе," *Web Page*, 2023. <https://rhmzrs.com/meteorologija/mjesecne-sinopticke-analize/> (accessed Sep. 23, 2023).
- [310] testo, "Testo 435," *Web Page*, 2023. <https://static-int.testo.com/media/fc/5d/da17bef960b7/testo-435-Data-sheet.pdf> (accessed Sep. 23, 2023).
- [311] Trimble GNSS Planning, "GNSS Planning Online," *Web Page*, 2023. <https://www.gnssplanning.com/#/settings> (accessed Sep. 23, 2023).
- [312] "Engineering and Design: Structural Deformation Surveying." <https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA404047> (accessed Jul. 26, 2023).
- [313] S. Lackner and W. Lienhart, "Impact of prism type and prism orientation on the accuracy of automated total station measurements," 2016.
- [314] I. da Silva, W. Ibañez, and G. Poleszuk, "Experience of Using Total Station and GNSS Technologies for Tall Building Construction Monitoring BT - Facing the Challenges in Structural Engineering," 2018, pp. 471–486.
- [315] N. Linty, A. Farasin, A. Favenza, and F. Dovic, "Detection of GNSS Ionospheric Scintillations Based on Machine Learning Decision Tree," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 55, pp. 303–317, 2019.

БИОГРАФИЈА АУТОРА

Славко Васиљевић рођен је 19. фебруара 1989. године у Загребу, од мајке Стане и оца Стојана. Основну школу завршио је у Врбањцима (Котор-Варош) као одличан ученик. Средњу школу, смјер геодетски техничар, завршио је 2008. године у Бањој Луци, такође са одличним успјехом.

Основне студије студијског програма Геодезија, завршио је 2012. године на Архитектонско-грађевинско-геодетском факултету Универзитета у Бањој Луци, чиме је стекао академски назив и стручно звање дипломирани инжењер геодезије (240 ЕЦТС). Мастер студије студијског програма Геодезија и геоинформатика, завршио је 2015. године на Грађевинском факултету Универзитета у Београду и стекао академско звање мастер инжењер геодезије (300 ЕПСБ). Школу докторских академских студија студијског програма Геодезија и геоинформатика, на Грађевинском факултету Универзитета у Београду, уписао је 2015. године.

Од 2012. године запослен је на Архитектонско-грађевинско-геодетском факултету Универзитета у Бањој Луци, гдје је био ангажован као стручни сарадник у настави, асистент и виши асистент. Изводио је вјежбе из предмета у областима инжењерске геодезије и катастра и управљања непокретностима.

Као аутор и коаутор објавио је већи број научних и стручних радова из области геодезије, од којих су два на *SCI* листи. Такође, учествовао је на неколико међународних пројеката из области високог образовања, на националним научним пројектима и на значајном броју стручних пројеката из области инжењерске геодезије.

Изјава о ауторству

Име и презиме аутора: **Славко Васиљевић**

Број индекса: **918/15**

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

МОГУЋНОСТИ ГЛОБАЛНИХ НАВИГАЦИОНО-САТЕЛИТСКИХ И ТЕРЕСТРИЧКИХ МЈЕРНИХ СИСТЕМА ЗА ПЕРМАНЕНТНО ГЕОДЕТСКО ОСМАТРАЊЕ ПОМЈЕРАЊА ОБЈЕКТА

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да дисертација у целини ни у деловима није била предложена за стицање друге дипломе према студијским програмима других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

У Београду, октобар 2023. године

Потпис аутора

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора: **Славко Васиљевић**
Број индекса: **918/15**
Студијски програм: **Геодезија и геоинформатика**
Наслов рада: **МОГУЋНОСТИ ГЛОБАЛНИХ НАВИГАЦИОНО-САТЕЛИТСКИХ И
ТЕРЕСТРИЧКИХ МЈЕРНИХ СИСТЕМА ЗА ПЕРМАНЕНТНО ГЕОДЕТСКО
ОСМАТРАЊЕ ПОМЈЕРАЊА ОБЈЕКТА**
Ментор: **проф. др Загорка Госпавић**

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао ради похрањивања у **Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског назива доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

У Београду, октобра 2023. године

Потпис аутора

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

МОГУЋНОСТИ ГЛОБАЛНИХ НАВИГАЦИОНО-САТЕЛИТСКИХ И ТЕРЕСТРИЧКИХ МЈЕРНИХ СИСТЕМА ЗА ПЕРМАНЕНТНО ГЕОДЕТСКО ОСМАТРАЊЕ ПОМЈЕРАЊА ОБЈЕКТА

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду и доступну у отвореном приступу могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио.

1. Ауторство (CC BY)
2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)
3. Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци. Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве).

У Београду, октобра 2023. године

Потпис аутора

1. **Ауторство.** Дозвољава се умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.

2. **Ауторство - некомерцијално.** Дозвољава се умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.

3. **Ауторство - некомерцијално - без прерада.** Дозвољава се умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.

4. **Ауторство - некомерцијално - делити под истим условима.** Дозвољава се умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.

5. **Ауторство - без прерада.** Дозвољава се умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.

6. **Ауторство - делити под истим условима.** Дозвољава се умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.