

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Elektronikas un telekomunikāciju fakultāte
Transporta elektronikas un telemātikas katedra

Ingus MITROFANOVS

Doktora studiju programmas „Transporta datorvadības informācijas un elektroniskās sistēmas” doktorants

SATELĪTU NAVIGĀCIJAS SISTĒMU VEIKTSPĒJAS PĒTĪJUMI AR FĀŽU MĒRĪJUMIEM

Promocijas darbs

Zinātniskais vadītājs
Profesors, *Dr. sc. ing.*,
A. KLŪGA

Rīga 2016

ANOTĀCIJA

Promocijas darba mērķis bija iegūt zinātnisku pētījumu rezultātus par GNSS atbalsta sistēmu veiktspēju statiskos un dinamiskos mērījumu apstākļos, izpētīt sakaru kanālu noslodzi, izstrādāt risinājumu *EUPOS®-RIGA* atbalsta sistēmas darbības zonas paplašināšanai un uzturēšanas izdevumu samazināšanai un pamatot to ar teorētiskiem un praktiskiem pētījumu rezultātiem.

Promocijas darba galvenie uzdevumi bija: GNSS mērījumos teorētiski maksimālās precizitātes izpēte un tās sasniegšanas nosacījumu izpēte; izstrādāt mērījumu veikšanas un apstrādes metodi dinamiskiem mērījumu apstākļiem, kas nodrošinātu uzticamu rezultātu ieguvī; veikt precizitātes pētījumus statiskos un dinamiskos mērījumu apstākļos; izstrādāt risinājumu *EUPOS®-RIGA* atbalsta sistēmas uzlabošanai; izpētīt lietotājam un bāzes staciju savienojumam ar serveri nepieciešamo sakaru kanālu kapacitāti.

Promocijas darba tēmas aktualitāti raksturo arvien pieaugošā GNSS atbalsta sistēmu izmantošana un pielietojuma specifikas daudzveidība. GNSS atbalsta sistēmas mūsdienās tiek arvien plašāk un daudzveidīgāk izmantotas un precīzā ģeodēziskā mērniecība vairs nav vienīgais pielietojums tautsaimniecībā. Šāda veida atbalsta sistēmas tiek arvien plašāk pielietotas, piemēram, automatizētā ceļu būves tehnikas vai lauksaimniecības tehnikas vadībā [56]. Tehnikas vadība nozīmē mērījumus dinamiskos apstākļos, kuriem uzticami precizitātes pētījumi līdz šim nav veikti, tiem autors veltījis darba ceturto nodaļu.

Pirmajās divās nodaļās autors ir veicis GNSS standarta precizitātes izpēti gadījumos, kad netiek lietotas atbalsta sistēmas un arī izpētījis, ko šādas sistēmas spēj sniegt mērījumu precizitātes uzlabošanas jomā, kā arī izpētīts kā tiek nodrošināta šādas paaugstinātas precizitātes sasniegšana, izmantojot satelītu pārraidīto signālu nesošo frekvenču fāžu mērījumus.

Trešajā nodaļā autors aprakstījis statiskos mērījumos iegūtos rezultātus. Autors precizitātes novērtēšanu veicis vairākās mērījumu sesijās, kuras ir veiktas ilgā laika posmā (2007.–2014. g.) un aprēķinus veicis nepiesaistot tos klasiskajiem ģeodēziskajiem punktiem tādā veidā iegūstot rezultātus, kuri parāda rezultātu savstarpējo atkārtojamības uzticamību.

Ceturtajā nodaļā, autors apraksta oriģinālu mērījumu veikšanas un apstrādes metodi dinamiskiem mērījumu apstākļiem. Nodaļas sākumā ir atspoguļoti rezultāti, kādus iespējams iegūt veicot vienkāršus mērījumus. Ceturtās nodaļas turpinājumā tiek aprakstīta inovatīva mērījumu apstrādes metode, kas ļauj iegūt ievērojami labāku precizitātes novērtējumu nekā līdz

šim. Mērījumu apstrāde izceļas ar to, ka uztvērējam ir pieejams atskaites lielums, pret kuru iespējams novērtēt tā sasniegtos rezultātus pozīcijas noteikšanā.

Piektā nodaļa veltīta sakaru kanālu noslodzes izpētei. Autors, vadoties pēc standartiem, ir aprēķinājis teorētisko datu plūsmu starp atbalsta sistēmas serveri un lietotāju, un salīdzinājis to ar praktiski fiksētu plūsmu, tādā veidā iegūstot rezultātus, vadoties pēc kuriem, lietotājs var izvēlēties sev atbilstošu sakaru kanāla kapacitāti un nepieciešamo datu apjoma abonementu. Ja datu apjoms starp atbalsta sistēmu un lietotāju tiek reglamentēts atbilstoši RTCM standartam, tad starp sistēmas bāzes stacijām un serveri šāds standarts nepastāv un galvenokārt ir atkarīgs no novēroto satelītu skaita un tehniskā aprīkojuma ražotāja iekšējiem standartiem. Veicot šo sakaru kanālu noslodzes izpēti autors ieguva ikmēneša datu pārraides apjomus un tādā veidā piedāvā sistēmas uzturētājiem ievērojamu izdevumu samazināšanas variantu.

Aizstāvēšanai izvirzītās tēzes ir:

1. Teorētiskos un praktiskos pētījumos pierādīta iespēja, izmantojot *EUPOS®-RIGA* retranslācijas sistēmu, ar fāžu mērījumiem noteikt statisko un kustīgo objektu atrašanās vietu ar precizitāti 10 mm.
2. Izveidota oriģināla mērījumu veikšanas metode dinamiskiem apstākļiem un to apstrādes procedūra, kas ļauj novērtēt kustībā iegūto mērījumu precizitāti ar uzticamību, kas līdzvērtīga statiskos apstākļos veiktiem mērījumiem.
3. Izmantojot *EUPOS®-RIGA* retranslācijas sistēmu un pēcapstrādes metodi konstatētas Zemes virsmas ģeodinamiskas kustības Rīgas reģionā ar izteiktu tendenci plaknes koordinātām.

ANNOTATION

The objective of the doctoral thesis was to acquire scientific research results on GNSS reference system performance in static and dynamic measurements, the communication channel load, develop solution to expand the area of coverage of *EUPOS®-RIGA* and reduce maintenance costs and to substantiate it with results from theoretical and practical research.

Main tasks of the thesis: theoretical research of maximum accuracy of GNSS measurements and necessary conditions; develop the method for taking and processing the measurements for dynamic mode, which would provide reliable results; carry out accuracy studies in static and dynamic modes of measurements; develop the solution to improve the *EUPOS®-RIGA* reference system; study the necessary capacity of the communication channels between user and reference system server and between the base stations and server of the reference system.

Topicality of the thesis is represented by still growing use of GNSS reference systems in specific branches. Nowadays GNSS reference systems are used more widely and precise geodetic surveying is not the only economic sector where they are used. GNSS reference systems are used, e.g. in control of automatic road construction machines or agricultural machinery [56]. To control machines, the measurements have to be done in dynamic mode and such measurements do not have reliable research history till now. Chapter four is dedicated to the measurements in dynamic mode.

Chapter one and chapter two are dedicated to research of standard GNSS accuracy in absence of the reference systems, as well as benefits from reference system use and how studies and descriptions of the advanced accuracy is achieved by using the carrier phase of the GNSS signals.

Chapter three depicts the results of measurements in static mode. To correctly estimate the accuracy in static mode, several sessions of measurements was long term research activity (2007–2014). Calculations were made without measurement attraction to the classic geodetic networks. In such a way obtained results demonstrate the repeatability and mutual trust.

In chapter four the author of this paper proposed and described original method how to take and process the measurements in dynamic mode. Beginning of the chapter contains information on the results of simple measurements. In further text the author of this paper describes the innovative method to process the measurements. It allows to rate the accuracy of the measurements more precise than before. General idea of the method is to provide the

reference value which is used to estimate the accuracy of measurements of position determination.

Final chapter is dedicated to research of the load of communication channels. Author have calculated theoretical data stream between the server of reference system and user basing on RTCM standards. These results are compared with actual data streams logged onto server. The results can be used by the users to choose an appropriate capacity of data channel and mobile data license fee. Data flow between user and server is defined by a RTCM standard but there is no such a standard for data flow between base station and server and amount of transferred data depends mainly on number of satellites in view and standards of the hardware producer. As a result of these studies author of this paper can offer opportunity to reduce costs from system maintenance by choosing an appropriate data channel subscription.

Promoted thesis:

- 1) Theoretical and practical research proved that using *EUPOS®-RIGA* reference system in combination with carrier phase measurements, can determine location of objects in static and dynamic modes with accuracy of 10 mm.
- 2) Original method has been developed for taking and processing measurements in dynamic mode, which allows to estimate accuracy with reliability equivalent to measurements in static mode.
- 3) Usage of *EUPOS®-RIGA* reference system and postprocessing method determined that Earth surface in Riga region has geodynamical movements with explicit trend for plane coordinates.

SATURS

ANOTĀCIJA	2
ANNOTATION	4
SATURS	6
IEVADS.....	8
1. GLOBĀLĀS NAVIGĀCIJAS SATELĪTU SISTĒMAS.....	13
1.1. GNSS mērījumu precizitāti ietekmējošie faktori	14
1.2. Mērījumu sistēmas GNSS	25
1.3. GNSS mērījumu precizitātes paaugstināšanas metodes	31
1.3.1. Papildinformācijas nodrošināšanas sistēmas	31
1.3.2. Diferenciālā pozicionēšanās	32
1.3.3. Relatīvā pozicionēšanās	35
1.3.4. Fāžu starpību vienādojumi	37
1.3.4.1. Vienkāršās fāžu starpības vienādojumi	37
1.3.4.2. Divkāršās fāžu starpības vienādojumi.....	38
1.3.4.3. Trīskāršās fāžu starpības vienādojumi	40
1.3.5. Statiskā relatīvā pozicionēšanās	42
1.3.6. Kinemātiskā relatīvā pozicionēšanās.....	44
2. FĀŽU CIKLU NENOTEIKTĪBA UN NOBĪDES GNSS MĒRĪJUMOS.....	47
2.1. Fāžu ciklu nenoteiktību noteikšana GNSS mērījumos	49
2.1.1. Fāžu ciklu nenoteiktības noteikšana ar vienas frekvences fāžu mērījumiem.....	49
2.1.2. Fāžu ciklu nenoteiktības noteikšana ar divu frekvenču fāžu mērījumiem	50
2.1.3. Fāžu ciklu nenoteiktības noteikšana ar divu frekvenču fāžu un kodu mērījumiem.....	51
2.1.4. Fāžu ciklu nenoteiktības noteikšana ar daudzfrekvenču fāžu un kodu mērījumiem.....	53
2.1.5. Fāžu ciklu nenoteiktības noteikšana, izmantojot nenoteiktības funkciju	54
2.2. Fāžu ciklu nobīdes GNSS mērījumos	58
2.2.1. Fāžu ciklu nobīdes atklāšana un izlabošana	60
3. AUGSTAS PRECIZITĀTES LOKĀLĀS DIFERENCIĀLĀS GNSS ATBALSTA SISTĒMAS IZVEIDE, PĀRBAUDE UN ATTĪSTĪBA	63
3.1. Tīkla precizitātes novērtēšanas tehniskais risinājums	65

3.2. Tīkla precizitātes pirmreizējā novērtēšana	67
3.3. <i>EUPOS®-RIGA</i> atbalsta sistēmas izmantošana specifisku uzdevumu veikšanai	72
3.4. <i>EUPOS®-RIGA</i> precizitātes pārbaude pēc tīkla pārbūves	74
3.5. <i>EUPOS®-RIGA</i> bāzes staciju stabilitāte laika gaitā	84
3.6. <i>EUPOS®-RIGA</i> darbības zonas paplašināšanas iespējas	88
4. <i>EUPOS®-RIGA</i> NODROŠINĀTĀS MĒRĪJUMU PRECIZITĀTES IZPĒTE REĀLĀ LAIKĀ DINAMISKOS MĒRĪJUMU APSTĀKĻOS	91
4.1. GNSS RTK mērījumi dinamiskos apstākļos, izmantojot automātisko mērījumu veikšanu	97
4.2. GNSS RTK mērījumu dinamiskos apstākļos precizitātes tuvināta novērtēšana vizuāli	100
4.3. GNSS RTK mērījumi dinamiskos apstākļos izmantojot divus instrumentus.....	104
4.3.1. GNSS RTK mērījumi pārvietojoties kājām.....	105
4.3.2. GNSS RTK mērījumi pārvietojoties ar auto	110
4.3.2.1. Mērījumu veikšana ik pēc 10 m veiktā attāluma.....	111
4.3.2.2. Mērījumu veikšana ik pēc 1 s.....	116
4.4. Dinamiskos apstākļos veikto mērījumu kopsavilkums	119
5. GNSS ATBALSTA SISTĒMAS DARBĪBAS NODROŠINĀŠANAI UN LIETOTĀJAM NEPIECIEŠAMĀ SAKARU KANĀLA KAPACITĀTE	122
5.1. <i>EUPOS®-RIGA</i> atbalsta sistēmā izmantotie ziņojumi korekciju nodrošināšanai	122
5.2. Lietotājam nepieciešamā sakaru kanāla kapacitāte	135
5.3. GNSS atbalsta sistēmas darbībai nepieciešamā sakaru kanālu kapacitāte	139
SECINĀJUMI.....	142
LITERATŪRA	144

IEVADS

Jau kopš izseniem laikiem cilvēkus ir interesējuši tādi jautājumi kā: Kur es atrodos? Kurā virzienā man jādodas? Un tamlīdzīgi. Šie jautājumi mūsdienās nav kļuvuši mazāk aktuāli, laika gaitā ir mainījušās vien metodes, ar kurām atbildēt uz šiem jautājumiem. Mūsdienās populārākā metode, kura tiek lietota ir globālā pozicionēšanās sistēma. Šobrīd lietotāja aparatūra ir attīstījusies tik tālu, ka tā ir spējīga apstrādāt un izmantot vairāk nekā vienas satelītu sistēmas raidītos signālus, tāpēc, mūsdienās, runājot par satelītu navigācijas sistēmām tiek lietots saīsinājums GNSS (Globālās Navigācijas Satelītu Sistēmas).

Promocijas darba mērķis:

1. Izpētīt GNSS uztvērēju, kuri veic signāla nesošo frekvenču fāžu mērīšanu veikspēju:
 - a. statiskos mērījumu apstākļos,
 - b. dinamiskos mērījumu apstākļos.
2. Sniegt ieteikumus:
 - a. atbalsta sistēmas *EUPOS®-RIGA* darbības zonas paplašināšanai,
 - b. atbalsta sistēmas *EUPOS®-RIGA* uzturēšanas izdevumu samazināšanai.

Promocijas darba mērķa sasniegšanai tika definēti sekojoši uzdevumi:

1. Izpētīt teorētisko iespējamo precizitātes līmeni GNSS instrumentiem, kuri izmanto signālu korekciju implementēšanu reālā laika mērījumos;
2. Veikt mērījumus statiskos apstākļos vadoties pēc rekomendācijām maksimālā mērījumu precizitātes līmeņa sasniegšanai. Atkārtot šādus mērījumus ar izkliedi laikā;
3. Izstrādāt dinamiskiem apstākļiem atbilstošu mērījumu veikšanas un apstrādes metodi, kura nodrošina rezultātu uzticamību un iespēju adekvāti novērtēt dinamiskos apstākļos veikto mērījumu precizitāti;
4. Veikt mērījumus dinamiskos apstākļos un novērtēt to precizitāti;
5. Pamatojoties uz pieejamo informāciju novērtēt *EUPOS®-RIGA* tīkla pārbūves ietekmi uz nodrošināto precizitāti un piedāvāt risinājumu tīkla optimizācijai;
6. Novērtēt noslodzi sakaru kanāliem starp serveri un bāzes stacijām, izvērtēt un piedāvāt iespēju optimizēt izdevumus par sakaru kanālu abonēšanu.

Promocijas darba aktualitāte un praktiskā vērtība

Jau sen ir pagājuši laiki, kad GNSS tika izmantota tikai navigācijai. Mūsdienās GNSS izmanto tādās nozarēs kā būvniecība, lauksaimniecība, kartogrāfija, ģeodēzija, tūrisms un daudzās citās. GNSS iespējams rast pielietojumu jebkur, kur ir nepieciešams zināt savu atrašanās vietu, pārvietošanās virzienu vai ātrumu, vai noteikt kāda objekta atrašanās vietu ar augstāku vai mazāk augstu precizitāti. Izejot no tā kādu precizitāti nepieciešams sasniegt, lietojot GNSS mainās arī nepieciešamās aparatūras cenas, sarežģītības un tehnoloģisko risinājumu pakāpe. Vienkāršāko navigācijas uzdevumu izpildei ir pilnībā pietiekami ar dažus desmitus EUR vērtu aparatūru vai pat vēl lētāku, ja tiek runāts par iebūvētām mikroshēmām, teiksim mobilajos tālruņos. Savukārt, ja mēs vēlamies ar GNSS palīdzību veidot kartogrāfiskus materiālus, veikt būvju stāvokļa monitoringu vai, piemēram, automatizēti vadīt lauksaimniecības vai ceļu būves tehniku, tad mums jārunā par dažus tūkstošus līdz pat vairākus desmitus tūkstošus vērtu GNSS aparatūru un vairākus simtus tūkstošus vērtu GNSS precizitāti uzlabojošu infrastruktūru tādu kā GNSS atbalsta tīkli. Izmantojot attiecīgus instrumentus un GNSS atbalsta tīklu iespējams sasniegt pat dažus milimetrus augstu precizitāti, kas, protams, ir nesalīdzināmi augstāka par ar standarta aparatūru sasniedzamo precizitāti, kura parasti nav augstāka par 1-3m. Šādu atbalsta tīklu galvenais lietotāju segments Latvijā meklējams ģeodēzijā un kartogrāfijā, kur ir nepieciešama precizitāte, kas pielīdzināma klasiskajām ģeodēzijas uzmērīšanas metodēm. Ņemot vērā, ka šajā situācijā ir nepieciešams, lai mērījumu rezultāts būtu koordinēts lokālajā koordinātu sistēmā, tad līdz šim GNSS precizitātes novērtējums ir veikts attiecībā pret dabā fiksētiem, nekustīgiem ģeodēziskajiem punktiem, kuri ir ierīkoti ar atšķirīgu precizitāti, atkarībā no to piederības kādai no ģeodēzisko punktu klases.

Situācijās, kurās mērījumi nav jāsavieto ar citiem mērījumiem, kā tas ir, piemēram, topogrāfiskajos uzmērījumos, kuros viena zemesgabala robežām ir precīzi jāsakrīt ar tam blakusesošo zemesgabalu robežām, lai neveidotos strīdi starp nekustamo īpašumu īpašniekiem. Vēl svarīgāk ir, lai inženierkomunikācijas, kuras šķērso vairākus zemesgabalus tiktu koordinētas vienā koordinātu sistēmā, respektīvi, attiecībā pret klasiskajiem ģeodēziskajiem tīkliem, jo visi šāda veida uzmērījumi netiek veikti izmantojot GNSS instrumentus un ļoti blīvas apbūves apstākļos šādi GNSS mērījumi nemaz nav iespējami. Taču situācijās, kurās nav svarīgi, lai viena mērījumu sesija būtu savietojama ar citu neatkarīgu mērījumu sesiju nav nepieciešama mērījumu precīza sasaiste ar tādiem atskaites punktiem kā ģeodēziskie punkti. Piemēram, ja tiek novērots ūdens dambis vai kāds cits infrastruktūras objekts, kurš pakļaujas deformācijām vai cita veida ietekmēm, kuras nav pieļaujamas, vairāku mobilo objektu atrašanās vietas

izmaiņas attiecībā vienam pret otru, tad krietni svarīgāk ir tieši ar kādu precizitāti tiek noteiktas minētās izmaiņas, nevis tas, ar kādu precizitāti šie objekti tiek savietoti jeb piesaistīti kādam attālinātam dabā fiksētam punktam. Piemēram, satelītu signālu retranslācijas sistēmai, kura promocijas darba izstrādes gaitā tika izveidota un noteiktas precīzas tās koordinātas (smalkāk par to rakstīts 3.3 nodaļā) nozīmīgāk ir zināt ar kādu precizitāti tika noteiktas uztverošās antenas koordinātas nevis piesaistīt to pie klasiskā ģeodēziskā tīkla. Pamatojums tam ir, ka turpmākajos laboratorijas darbos citi instrumenti mērīs uz ēkas jumta uzstādītas antenas koordinātas, kuras tiek retranslētas telpās, līdz ar to, jo precīzāk tiek noteikta antenas atrašanās vieta, jo mazāka kļūda tiek ieviesta turpmākos mērījumos.

Iegūstot apliecinājumu tam, ka GNSS *RTK* instrumenti, kuri izmanto atbalsta sistēmu nodrošinātās korekcijas spēj veikt atkārtotus mērījumus ar nemainīgu precizitāti vienā un tajā pašā vietā no laika uz laiku tiek gūts apliecinājums, ka šiem mērījumiem un arī pašai atbalsta sistēmai ir ļoti augsts uzticamības līmenis un līdz ar to plaša pielietojamība. Atbalsta sistēmas ir dārga infrastruktūra un ar šauru lietotāju loku tik mazā valstī kā Latvija, jo īpaši pie ierobežotas darbības zonas, ir neiespējami segt kaut vai tās uzturēšanas izmaksas, tāpēc ir svarīgi, lai šāda sistēma būtu izmatojam pēc iespējas plašāk, arī dinamiskos mērījumu apstākļos.

Vadoties no iegūtajiem rezultātiem pirms un pēc *EUPOS®-RIGA* tīkla pārbūves tika izstrādāts iespējamais tīkla darbības zonas paplašināšanas variants, kas tā nodrošināto precizitāti saglabātu esošajā līmenī.

Mūsdienās arvien lielāka daļa no lauksaimniecības, ceļu būves, ceļu uzturēšanas un cita veida tehnikas vienībām tiek aprīkotas ar GNSS uztvērējiem tādā veidā veidojot precīzu automatizētu mašīnvadības kompleksu, kas ļauj vadīt tehniku pēc iepriekš ieprogrammēta scenārija. Arī šāda veida tehnikai ir nepieciešama pēc iespējas augstākas precizitātes līmeņa navigācijas sistēma, lai nodrošinātu kvalitatīvu darbu izpildi, piemēram, lai izbūvētā ceļa šķērsprofils precīzi atbilstu projektā paredzētajam un lietūs rezultātā neveidotos milzīgas peļņas. Dinamiskos mērījumu apstākļos augstas precizitātes rezultātus nodrošināt kļūst sarežģītāk, jo vienā atrašanās vietā ir pieejams tikai viens mērījums un līdz ar to nav iespējama fāžu ciklisko nenoteiktību atrisināšana balstoties uz vairākiem mērījumiem [25], [32]. Atšķirībā no mērījumiem statiskos apstākļos, šajā gadījumā nav iespējama arī mērījumu precizitātes kontrole, jo nav fizisku punktu attiecībā pret kuriem to veikt. Tādā veidā jāpaļaujas vien uz pieņēmumu, ka dinamiskos apstākļos sasniedzamā precizitāte, ja tiek nodrošināts fāžu cikliskās nenoteiktības nepārtraukts atrisinājums, saglabāsies tādā pat līmenī kā statiskos mērījumos. Lai atrisinātu šo problēmu promocijas darba izstrādes gaitā tika izveidota mērījumu veikšanas un

apstrādes metode, kas ļauj novērtēt mērījumos sasniedzamo precizitāti ar augstu uzticamības līmeni.

Piektajā nodaļā autors veica datu apjoma izpēti, kas tiek pārraidīts pa sakaru kanāliem starp bāzes stacijām un serveri. No reāliem, sistēmas datu bāzē reģistrētiem, datiem tika iegūts maksimālais datu pārraides apjoms un piedāvāts risinājums kā, ar telekomunikāciju tirgū pieejamiem standarta pakalpojumiem ievērojami samazināt tīkla uzturēšanas izmaksas.

Promocijas darba zinātniskā novitāte

Iegūts, ka GNSS atbalsta sistēmas nodrošina augstāku precizitāti, ja tiek lietotas brīvā koordinātu telpā līdz ar to, piemēram, monitoringa veikšana iespējama ar augstāku precizitāti nekā mērījumu veikšana, kura tiek piesaistīta lokālajai koordinātu sistēmai.

Apstrādājot atbalsta sistēmas uzkrātos datus ar pēcāpstrādes metodi iegūts, ka notiek Zemes virsmas ģeodinamiskas kustības un to novērošanai iespējams izmantot GNSS.

Izstrādāta oriģināla dinamiskos apstākļos veiktu mērījumu veikšanas un apstrādes metode, kas nodrošina augstas uzticamības rezultātus un pierāda GNSS *RTK* izmantošanas iespēju dinamiskos apstākļos ar augstu precizitāti.

Promocijas darba rezultātā:

1. Izpētīta GNSS instrumentu veikspēja statiskos mērījumu apstākļos un secināts, ka atbalsta sistēma nodrošina augstāku precizitāti, ja tiek lietota nepiesaistot to fiziskajiem ģeodēziskajiem punktiem līdz ar to, izmantojot to nosacīti brīvā koordinātu telpā vidējā kvadrātiskā kļūda nepārsniedz 10 mm;
2. Izstrādāts *EUPOS®-RIGA* atbalsta sistēmas darbības zonas paplašināšanas plāns, kurš ļauj palielināt tās darbības zonu par 20 % neietekmējot nodrošināto mērījumu precizitāti;
3. Iekoordinēta un pārbaudīta RTU TET katedras satelītu signālu retranslācijas sistēmas uztverošās antenas darbība, nodrošinot precīza kompleksa izveidi laboratorijas darbu un zinātnisko pētījumu veikšanai;
4. Apstrādājot *EUPOS®-RIGA* atbalsta sistēmas uzkrātos datus konstatēta konstanta Zemes virsmas ģeodinamiska kustība ziemeļrietumu virzienā, ar ātrumu 1-3 mm gadā;

5. Izstrādāta uzticama, dinamiskos apstākļos veiktu mērījumu, metode to precizitātes novērtēšanai;
6. Mērījumu apstrādes rezultātā pierādīts, ka GNSS *RTK* instrumenti spēj darboties dinamiskos mērījumu apstākļos un pie ātruma līdz 30 km/h 80 % gadījumu nodrošināt mērījumus ar vidējo kvadrātisko kļūdu līdz 10 mm, ja tiek saglabāta atrisināta fāžu cikliskā nenoteiktība;
7. Izanalizējot *EUPOS®-RIGA* atbalsta sistēmas sakaru kanālu noslodzi noteikts, ka maksimālais pārsūtīto datu apjoms mēnesī no bāzes stacijas uz serveri nepārsniedz 1,2 GB. Vadoties no šiem rezultātiem piedāvāts risinājums kā samazināt uzturēšanas izmaksas ~15 reizes.

Aizstāvēšanai izvirzītās tēzes:

1. Teorētiskos un praktiskos pētījumos pierādīta iespēja, izmantojot *EUPOS®-RIGA* retranslācijas sistēmu, ar fāžu mērījumiem noteikt statisko un kustīgo objektu atrašanās vietu ar precizitāti 10 mm.
2. Izveidota oriģināla mērījumu veikšanas metode dinamiskiem apstākļiem un to apstrādes procedūra, kas ļauj novērtēt kustībā iegūto mērījumu precizitāti ar uzticamību, kas līdzvērtīga statiskos apstākļos veiktiem mērījumiem.
3. Izmantojot *EUPOS®-RIGA* retranslācijas sistēmu un pēcapstrādes metodi konstatētas Zemes virsmas ģeodinamiskas kustības Rīgas reģionā ar izteiktu tendenci plaknes koordinātām.

1. GLOBĀLĀS NAVIGĀCIJAS SATELĪTU SISTĒMAS

Globālās navigācijas satelītu sistēma (GNSS) ir satelītu tīkls, kas raida augstas frekvences radio signālus, kuri satur informāciju par precīzu laiku un distanci un tā var tikt uztverta ar uztvērēju, kas ļauj lietotājam ar augstu precizitāti noteikt tā atrašanās vietu jebkurā zemeslodes punktā, kur vienlaicīgi iespējams uztvert signālus no vismaz četriem satelītiem [20], [24], [50].

Mūsdienās runājot par GNSS tiek domāti vairāki šādi tīkli, jo globālā mērogā pozīcijas noteikšanu spēj nodrošināt gan ASV sistēma GPS (*Global Positioning System*), gan Krievijas Federācijas sistēma GLONASS (*GLObal NAvigation Satellite System*) [42], [67], [76], [80]. Šobrīd izstrādes stadijā atrodas arī Eiropas Savienības veidota sistēma GALILEO [14], kura finansējuma trūkuma dēļ joprojām nav pilnībā funkcionāla [40]. Arī Ķīna turpina darbu pie GNSS sistēmas BEIDOU izveides [55].

Bez globālām GNSS, kuru raidītie signāli pārklāj visu Zemi pastāv arī reģionālas navigācijas sistēmas, kuras izmanto satelītus tā, lai nodrošinātu pozīcijas noteikšanu tikai kādā ierobežotā reģionā, piemēram, sistēma IRNSS [55].

Lai arī GNSS veidotāji ir dažādi, pašu sistēmu galvenie darbības koncepti ir ļoti līdzīgi. Sistēmas sastāv no satelītu zvaigznājiem, respektīvi, vairākiem satelītiem, kuri izvietoti orbitālajās plaknēs tā, lai vienlaicīgi 24 stundas diennaktī būtu novērojami vismaz četri dažādi satelīti. GPS, GLONASS un GALILEO viena no otras atšķiras vien ar to kā šie satelīti izvietojas orbitālajās plaknēs, kāds ir plakņu skaits un līdz ar to kāds ir satelītu skaits vienā orbitālajā plaknē [15], [18], [19], [38].

Līdzīgā veidā tiek veidoti arī šo trīs sistēmu pārraidītie signāli, galvenā atšķirība GLONASS sistēmā ir tā, ka tajā tiek izmantota daudzpiekļuves metode ar frekvences dalīšanu. Minētās sistēmas nodrošina gan standarta gan arī precīzās navigācijas signāla pārraidi. Ir pieejami ļoti daudzi informācijas avoti, kur GNSS signālu uzbūve tiek aprakstīta sīkāk [16], [17], [66], [77], [79].

GNSS raidītie signāli nodrošina divus galvenos pozīcijas noteikšanas paņēmienus: izmantojot uztvertā koda salīdzināšanu ar uztvērēja ģenerētu repliku un izmantojot nesošās frekvences fāzes salīdzināšanu ar uztvērēja ģenerētu repliku. Otrā metode ir ievērojami precīzāka un teorētiski, ideālos apstākļos, spēj nodrošināt pozīcijas noteikšanu ar dažu milimetru precizitāti [71]. Taču realitātē pastāv vairāki kļūdu avoti, kas ietekmē tik augstas precizitātes sasniegšanu [25], [26], [45].

1.1. GNSS mērījumu precizitāti ietekmējošie faktori

Tieši tāpat kā jebkuri citi mērījumi arī attālumu, ātruma un pulksteņu korekcijas mērījumi, kuri ir tik būtiski satelītu navigācijas sistēmās saistās ar precizitāti. Jo augstāka ir dažādu faktoru ietekme uz mērījumiem, jo zemāka ir mērījumu gala precizitāte. Galvenie GNSS mērījumu precizitāti ietekmējošie kļūdu avoti ir sekojoši:

- kļūdas satelītu aparātūras darbībā un izmaiņas satelītu orbītās;
- radiosignāla izplatīšanās kļūdas (atmosfēras ietekme un daudzkanālu (*Multipath*) izplatīšanās);
- kļūdas lietotāja aparātūras darbībā;
- satelītu stāvokļa izraisītās kļūdas (ģeometriskais faktors).

Ģeometriskais redzamo satelītu izvietojums ir svarīgs faktors augstvērtīgu mērījumu sasniegšanai. Satelītu ģeometriskā izvietojuma mērs ir ģeometriskais faktors jeb tā saucamā ģeometriskās precizitātes izkļiede GDOP (*Geometrical Dilution Of Precision*) [33], [59]. GDOP nav vienīgais precizitātes izkļiedes mērs, kurš tiek lietots GNSS. Turpmākajās izteiksmēs ir izteikti visi precizitātes izkļiedes mēri:

$$GDOP = \frac{1}{\sigma} \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_h^2 + \sigma_t^2} \quad (1.1)$$

$$PDOP = \frac{1}{\sigma} \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2} \quad (1.2)$$

$$HDOP = \frac{1}{\sigma} \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} \quad (1.3)$$

$$VDOP = \frac{\sigma_z}{\sigma} \quad (1.4)$$

$$TDOP = \frac{\sigma_t}{\sigma} \quad (1.5)$$

kur:

GDOP – ģeometriskā precizitātes izkļiede (*Geometrical Dilution Of Precision*);

PDOP – pozīcijas precizitātes izkļiede (*Position Dilution Of Precision*);

HDOP – horizontālās precizitātes izkļiede (*Horizontal Dilution Of Precision*);

VDOP – vertikālā precizitātes izkļiede (*Vertical Dilution Of Precision*);

TDOP – laika precizitātes izkļiede (*Time Dilution Of Precision*);

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ – vidējās kvadrātiskās kļūdas (RMS) lietotāja pozīcijas noteiktajās koordinātās

x, y, z ;

σ – mērījumu vidējā kvadrātiskā kļūda;

σ_t – lietotāja pulksteņa nobīdes RMS [21].

Starp izteiksmēm (1.1) – (1.5) pastāv sakarība, kuru var izteikt sekojoši: [3]

$$GDOP^2 = PDOP^2 + TDOP^2 = HDOP^2 + VDOP^2 + TDOP^2 \quad (1.6)$$

Pēc būtības precizitātes izkliede (DOP – *Dilution Of Precision*) ir sakarība starp lietotāja pseidoattālumu mērījumu precizitāti un lietotāja pozīcijas noteikšanas precizitāti. GDOP aprēķinos pieņem, ka mērīto pseidoattālumu kļūdas ir atkarīgas no satelītu stāvokļa un visām mērījumu kļūdām ir viena un tā pati RMS (σ) [64]. Tā kā pastāv sakarība starp DOP un pozicionēšanās precizitāti, tad apzīmējot mērījumu precizitāti ar σ_0 (standartdeviācija), tad pozicionēšanās precizitāte σ izriet no sekojošas izteiksmes: [32]

$$\sigma = DOP\sigma_0 \quad (1.7)$$

Skaidrības labad jāatzīmē, ka PDOP ne vienmēr parāda situāciju pilnībā, ja tiek apskatīta atsevišķi tāpēc, ka pseidoattālumu RMS nav vienādās visiem satelītiem, piemēram, dažas mērījumu kļūdas ir pacēluma leņķa funkcija [21], [64]. Tomēr dažādas DOP sniedz noderīgu veiktspējas mēru, kas ir atkarīgs no satelītu relatīvā novietojuma attiecībā pret lietotāju. Piemēram, GDOP robežas tiek aprēķinātas situācijai, kurā mērījumu kļūdas satur gan neatkarīgo, gan korelēto komponenti, kas palielinās ar pacēluma leņķa samazināšanos. Šī korelēta komponente kaut kādā mērā imitē atmosfēras ietekmi [21].

ASV valdība ir deklarējusi, ka tā, civilajiem lietotājiem nodrošinās iespēju izmantot GPS signālus ar precizitāti, kura nebūs zemāka par tās definēto. Piemēram, sliktākā scenārija gadījumā, pseidoattālumu precizitāte tiks nodrošināta ne sliktāka par 7,8 m ar 95 % uzticamības līmeni. Jāatzīmē gan, ka pseidoattāluma precizitāte nav tas pats, kas lietotāja precizitāte. Faktiskā precizitāte, kuru lietotājs spēj sasniegt ir atkarīga no augstākminētajiem faktoriem. Dati, kurus ieguvusi ASV federālā aviācijas administrācija (*FAA – Federal Aviation Administration*) parāda, ka augstas kvalitātes standarta pozicionēšanās servisa (SPS) uztvērēji horizontālajā plaknē spēj nodrošināt precizitāti augstāku par 3,5 m [52]. Kombinējot GPS ar precizitāti paaugstinošām sistēmām iespējams panākt ievērojamu mērījumu precizitātes līmeņa paaugstināšanos [50]. Pirms apskatīt precizitāti paaugstinošās sistēmas, apskatīsim kādi ir ASV valdības deklarētie SPS un PPS (Precīzās Pozicionēšanās Serviss) precizitātes līmeņi [27], [51], [52]. Deklarētie precizitātes līmeņi attiecas uz signālu telpu SIS (*Signal In Space*). Katram no servisiem pastāv četri galvenie precizitātes aspekti. SPS SIS tie ir šādi:

- pseidoattālumu datu kopas precizitāte jeb lietotāja attāluma kļūda (*URE – User Range Error*);
- URE atvasinājums pēc laika jeb lietotāja attāluma kļūdu intensitāte (*URRE – User Range Rate Error*);
- URE otrās pakāpes atvasinājums pēc laika jeb lietotāja paātrinājuma kļūda (*URAE – User Range Acceleration Error*);
- UTC laika nobīdes kļūda (*UTC OE – UTC Offset Error*).

PPS SIS precizitātes aspekti:

- pseidoattāluma precizitāte jeb lietotāja attāluma kļūda (*URE*);
- URE atvasinājums pēc laika jeb lietotāja attāluma kļūdu intensitāte (*URRE*);
- URE otrās pakāpes atvasinājums pēc laika, jeb lietotāja attāluma kļūdas intensitātes kļūdu intensitāte (*URRRE – User Range Rate Rate Error*);
- UTC laika nobīdes kļūda (*UTC OE*).

SPS SIS precizitātes standarti attēloti 1.1. tab., bet PPS SIS – 1.2. tab.

1.1. tabula

SPS SIS precizitātes standarti

SPS SIS precizitātes standarts	Nosacījumi un ierobežojumi
URE vienai frekvencei C/A kodam: • $\leq 7,8$ m 95% globālā vidējā URE pie normāliem apstākļiem visiem datu ilgumiem (<i>AOD – Age Of Data</i>); • $\leq 6,0$ m 95% globālā vidējā URE pie normāliem apstākļiem nulles AOD; • $\leq 12,8$ m 95 % globālā vidējā URE pie normāliem apstākļiem pie jebkāda AOD;	• Jebkuram „veselīgam” SPS SIS; • Neievērojot vienas frekvences jonosfēras aiztures modeļa kļūdas; • Iekļaujot grupas aiztures laika korekcijas kļūdas L1 frekvencei; • Iekļaujot starp-signālu (P(Y)-koda uz C/A-kodu) ietekmes kļūdas uz L1 frekvences;
URE vienai frekvencei C/A kodam: • ≤ 30 m 99.94 % globālā vidējā URE pie normāliem apstākļiem;	• Jebkuram „veselīgam” SPS SIS; • Neievērojot vienas frekvences jonosfēras aiztures modeļa kļūdas;

• ≤ 30 m 99.79 % sliktākā gadījuma viena punkta vidējais URE pie normāliem apstākļiem;	• Iekļaujot grupas aiztures laika korekcijas kļūdas L1 frekvencei; • Iekļaujot starp-signālu (P(Y)-koda uz C/A-kodu) ietekmes kļūdas uz L1 frekvences; • Standarts balstīts uz viena gada mērījumu intervālu. Vidējā diennakts vērtība pakalpojuma robežās; • Standarts balstīts uz 3 servisa atteikumiem gada laikā, katrs no kuriem nav ilgāks par 6 h.
URE vienai frekvencei C/A kodam: • ≤ 388 m 95 % globālā vidējā URE paplašinātas darbības laikā pēc 14 dienām bez augšupielādes;	• Jebkuram „veselīgam” SPS SIS;
URRE vienai frekvencei C/A kodam: • $\leq 0,006$ m/s 95 % globālā vidējā URRE jebkuram 3 sekunžu intervālam pie normāliem darbības apstākļiem jebkādam AOD;	• Jebkuram „veselīgam” SPS SIS; • Neievērojot saņemtās pseidoattālumu intensitātes kļūdas, kuras izskaidrojamas ar pseidoattāluma soļa izmaiņām, ko izsauc NAV ziņojuma datu pārslēgšanās; • Neievērojot vienas frekvences jonosfēras aiztures modeļa kļūdas;
URAE vienai frekvencei C/A kodam: • $\leq 0,002$ m/s/s 95 % globālā vidējā URAE jebkuram 3 sekunžu intervālam pie normāliem darbības apstākļiem jebkādam AOD;	• Jebkuram „veselīgam” SPS SIS; • Neievērojot saņemtās pseidoattālumu paātrinājuma kļūdas, kuras izskaidrojamas ar pseidoattāluma soļa izmaiņām, ko izsauc NAV ziņojuma datu pārslēgšanās;

	• Neievērojot vienas frekvences jonosfēras aiztures modeļa kļūdas;
UTCOE vienai frekvencei C/A kodam: • ≤ 40 ns 95 % globālā vidējā UTCOE pie normāliem darbības apstākļiem jebkādam AOD;	• Jebkuram „veselīgam” SPS SIS;

1.2. tabula

PPS SIS precizitātes standarti

PPS SIS precizitātes standarts	Nosacījumi un ierobežojumi
URE divām frekvencēm P(Y) kodam: • $\leq 5,9$ m 95% globālā vidējā URE pie normāliem apstākļiem visiem AOD; • $\leq 2,6$ m 95% globālā vidējā URE pie normāliem apstākļiem nulles AOD; • $\leq 11,8$ m 95% globālā vidējā URE pie normāliem apstākļiem pie jebkāda AOD;	• Jebkuram satelītam, kurš NAV ziņojumā ir atzīmēts kā „veselīgs”;
URE vienai frekvencei P(Y) kodam: • $\leq 6,3$ m 95% globālā vidējā URE pie normāliem apstākļiem visiem AOD; • $\leq 5,4$ m 95% globālā vidējā URE pie normāliem apstākļiem nulles AOD; • $\leq 12,6$ m 95% globālā vidējā URE pie normāliem apstākļiem pie jebkāda AOD;	• Jebkuram satelītam, kurš NAV ziņojumā atzīmēts kā „veselīgs”; • Neievērojot vienas frekvences jonosfēras aiztures modeļa kļūdas; • Iekļaujot grupas aiztures laika korekcijas kļūdas uz L1 frekvences;

URE divām frekvencēm P(Y) kodam ar plaša pārklājuma GPS uzlabojumiem (WAGE – <i>Wide Area Gps Enhancement</i>): • $\leq 4,4$ m 95% globālā vidējā URE pie normāliem apstākļiem visiem WAGE AOD;	• Jebkuram satelītam, kurš NAV ziņojumā ir atzīmēts kā „veselīgs”;
URE vienai frekvencei P(Y) kodam ar WAGE: • $\leq 6,2$ m 95% globālā vidējā URE pie normāliem apstākļiem visiem WAGE AOD;	• Jebkuram satelīta, kurš NAV ziņojumā ir atzīmēts kā „veselīgs”; • Neievērojot vienas frekvences jonosfēras aiztures modeļa kļūdas; • Iekļaujot grupas aiztures laika korekcijas kļūdas uz L1 frekvences;
URE vienai vai divām frekvencēm P(Y) kodam neņemot vērā WAGE: • ≤ 388 m 95% globālā vidējā URE paplašinātas darbības laikā pēc 14 dienām bez augšupielādes;	• Jebkuram satelītam, kurš NAV ziņojumā ir atzīmēts kā „veselīgs”;
URRE vienai vai divām frekvencēm P(Y) kodam: • $\leq 0,006$ m/s 95% globālā vidējā URRE jebkuram 3 sekunžu intervālam pie normāliem darbības apstākļiem jebkādam AOD;	• Jebkuram satelītam, kurš NAV ziņojumā ir atzīmēts kā „veselīgs”; • Neievērojot saņemtās pseidoattālumu intensitātes kļūdas, kuras izskaidrojamas ar pseidoattāluma soļa izmaiņām, ko izsauc NAV ziņojuma datu pārslēgšanās (ieskaitot NAV ziņojuma labojumu tabulas (NMCT – <i>Nav Message Correction Table</i>) pārslēgšanos); • Izslēdzot jebkādas vienas frekvences jonosfēras aiztures modeļa kļūdas;
URRRE vienai vai divām frekvencēm P(Y) kodam:	• Jebkuram satelītam, kurš NAV ziņojumā ir atzīmēts kā „veselīgs”;

• $\leq 0,002$ m/s/s 95% globālā vidējā URRRE jebkuram 3 sekunžu intervālam pie normāliem apstākļiem jebkādam AOD;	• Izslēdzot visas saņemtās pseidoattālumu paātrinājuma kļūdas, kuras izskaidrojamas ar pseidoattāluma soļa izmaiņām, ko izsauc NAV ziņojuma datu pārslēgšanās (ieskaitot NMCT pārslēgšanos); • Izslēdzot jebkādas vienas frekvences jonosfēras aiztures modeļa kļūdas;
UTC OE vienai vai divām frekvencēm P(Y) kodam: • ≤ 40 ns 95% globālā vidējā UTC OE pie normāliem apstākļiem jebkādam AOD;	• Jebkuram satelītam, kurš NAV ziņojumā ir atzīmēts kā „veselīgs”;

Kā jau iepriekš tika minēts, tad SIS precizitāte nav tas pats, kas lietotāja pozīcijas noteikšanas precizitāte. SPS lietotāja pozīcijas un laika precizitātes standarts parādīts 1.3. tabulā.

1.3. tabula

SPS lietotāja pozīcijas un laika precizitātes standarti

Pozīcijas/Laika precizitātes standarts	Nosacījumi un ierobežojumi
Globālā vidējā pozīcijas apgabala precizitāte: • ≤ 9 m 95% Horizontālā kļūda; • ≤ 15 m 95% Vertikālā kļūda;	• Definēts pozīcijas/laika rezultātam atbilstošiem lietotāja apstākļiem; • Standarts balstīts uz visu punktu vidējiem mērījumiem servisa pārklājumā ar 24 stundu intervālu;
Sliktākā stāvokļa pozīcijas apgabala precizitāte: • ≤ 17 m 95% Horizontālā kļūda; • ≤ 37 m 95% Vertikālā kļūda;	• Definēts pozīcijas/laika rezultātam atbilstošiem lietotāja apstākļiem; • Standarts balstīts uz 24 h mērījumu intervālu jebkuram punktam servisa pārklājumā;

Laika pārraides apgabala precizitāte: • ≤ 40 ns laika pārraides kļūda 95% laika (tikai SIS);	• Definēts laika pārraides rezultātam atbilstošiem lietotāja apstākļiem; • Standarts balstīts uz visu punktu vidējiem mērījumiem servisa pārklājumā ar 24 stundu intervālu;
---	--

Svarīgi atzīmēt, ka 1.3. tabulā definētie precizitātes standarti paredz noteiktus apstākļus lietotājam, ja šie apstākļi neizpildās, tad garantijas minētajiem precizitātes lielumiem arī nav spēkā. SPS lietotāja pozīcijas precizitātes standarts paredz, ka nosakot pozīciju netiek ņemti vērā kļūdu avoti, kuri nav tiešā kosmosa segmenta vai kontroles segmenta kontrolē. Veidojot SPS pozīcijas standartu netika ņemtas vērā sekojošas kļūdas:

- signāla kropļojumi jonosfēras un/vai troposfēras ietekmē;
- uztvērēja jonosfēras aiztures korekcijas kļūdas;
- uztvērēja troposfēras aiztures korekcijas kļūdas;
- uztvērēja troksnis (ieskaitot uztvertā signāla jaudu un interferences jaudu) un izšķirtspēja;
- uztvērēja aparatūras un programmatūras bojājumus;
- daudzkanālu izplatīšanos un uztvērēja daudzkanālu izplatīšanās novēršanu;
- lietotāja antenas ietekmi;
- lietotāja kļūdas.

Jāatzīmē arī tas, ka pozīcijas un laika standartos tiek pieņemti noteikti nosacījumi, ne tikai lietotāja pozīcijai, bet arī pašam uztvērējam. Uztvērējam jāatbilst sekojošām prasībām:

- uztvērējs ir ražots atbilstošo IS-GPS-200;
- uztvērējs spēj uztvert SPS SIS no visiem satelītiem, kuri atrodas augstāk par 5° leņķa masku attiecībā pret lokālo horizontu (tiek uzskatīts, ka lokālo traucēkļu nav). Tiek pieņemts, ka uztvērējs darbojas nominālu trokšņu vidē, kuri nepārtrauc uztvērēja vietas noteikšanas un izsekošanas spējas;
- uztvērējs satelīta vietas un ģeometrisko attālumu aprēķinus veic pēdējā pieejamajā fiksētajā ģeocentriskajā (ECEF – *Earth-Centered, Earth-Fixed*) koordinātu sistēmas WGS-84 realizācijā;
- uztvērējs veic pozīcijas un laika aprēķinus, izmantojot datus no visiem redzamībā esošajiem satelītiem;

- uztvērējs kompensē dinamiskās Doplera nobīdes ietekmi uz SPS attālummērīšanas nesošās frekvences un C/A koda mērījumiem;
- uztvērējs apstrādā ar satelītu „veselības” stāvokli saistīto informāciju un izslēdz no aprēķiniem bojātu vai neatbilstošu satelītu signālus;
- uztvērējs nodrošina jaunāko un iekšēji saderīgu efemerīdas informācijas un pulksteņa datu izmantošanu no visiem satelītiem, kurus tas izmanto savas pozīcijas aprēķināšanai;
- uztvērējs atslēdz satelītu, ja tā signāls vairs nav izsekojams;
- uztvērējs darbojas zināmā atrašanās vietā (laika pārraides uztvērējiem).

Liels lēciens GNSS mērījumu precizitātes palielināšanā notika 2000. gadā, kad ASV valdība atslēdza selektīvo piekļuvi (SA – *Selective Availability*). SA gadījumā mākslīgi tika izkropļots laika signāls tādējādi ieviešot kļūdu mērījumus, kas varēja sasniegt pat 70 m [5]. 1.4. tabulā apkopotas horizontālo mērījumu GNSS GPS pozicionēšanās kļūdas. Lai arī SA vairs nav aktuāla kļūdu komponente tā uzrādīta, lai ilustrētu precizitātes līmeņa paaugstināšanos pēc selektīvās piekļuves atslēgšanas. No tabulas datiem arī redzams, ka pēc SA atslēgšanas galvenais kļūdu avots GNSS mērījumos ir jonosfēras izraisītā signāla aizture. Ja lietotājam ir uztvērējs, kurš spēj izmantot signālus uz vairākām frekvencēm, tad jonosfēras ietekme uz precizitāti var tikt tik pat kā izslēgta.

1.4. tabula

GPS kļūda horizontālajos mērījumos 95 % SPS (C/A kods)

Kļūdu avots	Kļūda ar SA, m	Kļūda bez SA, m
SA	24	0
Troposfēra	0,2	0,2
Jonosfēra	7,0	7,0
Efemerīdas un pulkstenis	2,3	2,3
Uztvērēja troksnis	0,6	0,6
Daudzkanālu uztveršana	1,5	1,5
Kopējā UERE*	25,0	7,5
HDOP (tipiski)	1,5	1,5
Kopējā horizontālā precizitāte	75,0	22,5

**UERE – User Equivalent Range Error – lietotāja kļūdai līdzvērtīga attāluma kļūda. Tiek uzskatīts, ka kļūdu avoti var tikt attiecināti uz individuālu satelītu pseidoattālumiem un apskatīti kā lietotāja kļūdai ekvivalentas kļūdas [5]*

Kā iepriekš tika minēts, tad divu frekvenču izmantošana aprēķinos ievērojami palielina rezultāta precizitāti. Tā kā modernākajos satelītos arī uz L2 frekvences tiek raidīts C/A kods, tad lietotājiem ir pieejami vismaz divi signāli uz dažādām frekvencēm. Divu signālu izmantošanas devums precizitātes palielināšanā parādīts 1.5. tabulā. Ieviešot papildus frekvences sistēmā tiks panākta arī precizitātes uzlabošanās. Tā kā jaunākie GPS satelīti raida signālu arī L5 frekvencē, tad kā galvenais kļūdu avots atzīmējama pulksteņa un efemerīdu neprecizitāte. 1996. gadā ASV aizsardzības ministrijas ieviestā tehnoloģija ir ļāvusi samazināt arī šo kļūdu par 50 % [5]. Tehnoloģija paredz papildu novērojošo staciju datu izmantošanu. Tādā veidā iegūstamā precizitāte parādīta 1.6. tabulā. GPS precizitātes paaugstināšana ir cieši saistīta ar novērojošo staciju skaitu, tātad ar attālumu starp lietotāju un novērojošo staciju. Patiesībā novērojošo staciju izmantošana ļauj izslēgt kļūdas komponenti, kurai ir saistība starp lietotāju un staciju. Šādu staciju izmantošanas devumu mērījumu precizitātē tiks apskatīta turpmāk.

1.5. tabula

GPS kļūda horizontālajos mērījumos 95 % SPS izmantojot divus signālus (C/A kods uz L1 un L2 frekvences)

Kļūdu avots	Kļūda, m
SA	0
Troposfēra	0,2
Jonosfēra	0,1
Efemerīdas un pulkstenis	2,3
Uztvērēja troksnis	0,6
Daudzkanālu uztveršana	1,5
Kopējā UERE	2,8
HDOP (tipiski)	1,5
Kopējā horizontālā precizitāte	8,5

1.6. tabula

GPS kļūda horizontālajos mērījumos 95 % SPS izmantojot papildus novērojošās stacijas

Kļūdu avots	Kļūda, m
SA	0
Troposfēra	0,2
Jonosfēra	0,1
Efemerīdas un pulkstenis	1,25
Uztvērēja troksnis	0,6
Daudzkanālu uztveršana	1,5
Kopējā UERE	2,0
HDOP (tipiski)	1,5
Kopējā horizontālā precizitāte	6,0

1.2.Mērījumu sistēmas GNSS

GNSS sistēmās galvenokārt tiek izmantotas divas mērījumu metodes:

- koda pseidoattālumu mērījumi;
- nesošās frekvences fāzes mērījumi.

Pseidoattālums ir distances starp satelītu un uztvērēju mērījums [33]. Attālums tiek noteikts mērot laiku, kāds ir bijis nepieciešams signāla pārraidei no satelīta līdz uztvērējam. Šis attālums ir attālums starp satelītu signāla pārraides laikā un uztvērēju signāla uztveršanas brīdī. Izmērītais pseidoattālums ir atšķirīgs no ģeometriskā attāluma starp satelītu un uztvērēju. Atšķirības izraisa iepriekš minētie kļūdu avoti GNSS mērījumos. Ja pieņem, ka signāls izplatās vakuumā un no kļūdu avotiem brīvā vidē, tad izmērītais pseidoattālums ir vienāds ar ģeometrisko attālumu un to var izteikt sekojoši:

$$R_r^s(t_r, t_e) = (t_r - t_e)c, \quad (1.8)$$

kur:

t_e – signāla emisijas laiks no satelīta;

t_r – signāla uztveršanas laiks uztvērējā;

c – gaismas ātrums;

Apakšraksts r – apzīmē uztvērēju;

Augšraksts s – apzīmē satelītu;

Kreisajā pusē t_r apzīmē epohu, kurā tika veikta pseidoattāluma mērīšana.

Ņemot vērā gan satelīta, gan uztvērēja pulksteņu kļūdas, izteiksmi (1.8) var pierakstīt sekojoši:

$$R_r^s(t_r, t_e) = (t_r - t_e)c - (\delta t_r - \delta t_s)c, \quad (1.9)$$

kur:

δt_r – uztvērēja pulksteņa kļūda;

δt_s – satelīta pulksteņa kļūda.

Satelīta pulksteņa kļūdas nosacījumi tiek uzzināti nosakot satelītu orbītas. Pulksteņa kļūdas parasti tiek modelētas kā laika polinoms [33]. Šādā gadījumā konstantais loceklis apzīmē

nobīdi, bet mainīgais – pulksteņu dreifu. Šie koeficienti ar navigācijas ziņojuma starpniecību tiek pārraidīti lietotājiem [30], [49].

Izteiksmē (1.9) ($t_r - t_e$) ģeometrisko attālumu var izteikt sekojoši:

$$\rho_r^s(t_r, t_e) = \sqrt{(x_s - x_r)^2 + (y_s - y_r)^2 + (z_s - z_r)^2}, \quad (1.10)$$

kur:

(x_s, y_s, z_s) – satelīta koordinātu vektors kā laika t_e funkcijas vektors;

(x_r, y_r, z_r) – uztvērēja koordinātas kā funkcija no laika t_r .

Tādā veidā var secināt, ka ģeometriskais attālums ir funkcija ar diviem laika mainīgajiem. Turklāt praksē t_e nav zināms, apzīmējot pārraides laiku kā Δt iegūstam:

$$\Delta t = t_r - t_e \quad (1.11)$$

Lai ilustrētu pārraides laika aprēķinus ģeometrisko attālumu varam pierakstīt sekojoši:

$$\rho_r^s(t_r, t_e) = \rho_r^s(t_r, t_r - \Delta t) \quad (1.12)$$

Signāla pārraides laiks no satelīta līdz uztvērējam sastāda aptuveni 0,07 s. Ģeometriskā attāluma funkcija izteiksmes (1.12) labajā pusē var tik izvērsta Teilora rindā uztveršanas laikā t_r attiecībā pret pārraides laiku sekojošā izteiksmē:

$$\rho_r^s(t_r, t_e) = \rho_r^s(t_r) + \left[\frac{d\rho_r^s(t_r)}{dt} \right] \Delta t, \quad (1.13)$$

kur:

$\frac{d\rho_r^s(t_r)}{dt}$ – radiālā attāluma starp satelītu un uztvērēju laika atvasinājums.

Izteiksmes (1.13) labās puses otrais loceklis tiek saukts par pārraides laika korekciju [33]. Jāatzīmē, ka GPS antenu koordinātas parasti tiek dotas fiksētajās ģeocentriskajās koordinātās. Pārraides laikā uztvērējs rotē kopā ar Zemi, tādā veidā aprēķinot attālumu pēc izteiksmes (1.10) ir jāņem vērā arī Zemes rotācijas korekcija.

Ievērojot jonosfēras un troposfēras ietekmi, Zemes plūdmaiņas, paisuma, bēguma, daudzkanālu izplatīšanos, relatīvās ietekmes, kā arī citas kļūdas pseidoattālums (1.9) var tikt izteikts sekojoši:

$$R_r^s(t_r, t_e) = \rho_r^s(t_r, t_e) - (\delta t_r - \delta t_s)c + \delta_{jon} + \delta_{tro} + \delta_{pl} + \delta_{dk} + \delta_{rel} + \varepsilon, \quad (1.14)$$

kur:

δ_{jon} – jonosfēras ietekme uz r staciju;

δ_{tro} – troposfēras ietekme uz r staciju;

δ_{pl} – Zemes un okeānu plūdmaiņas;

δ_{dk} – daudzkanālu izplatīšanās ietekme;

δ_{rel} – relatīvā ietekme;

ε – citas kļūdas.

Fiziski izmērītais pseidoattālus (izteiksmes (1.14) kreisajā pusē) ir vienāds ar ģeometrisko attālumu starp satelītu signāla pārraides laikā un uztvērēju uztveršanas brīdī plus vai mīnus dažādas korekcijas [33].

GPS satelītu orbītu augstums ir aptuveni 20200 km, tādējādi signāla pārraides laiks ir aptuveni 0,07 s. Zemes rotācijas leņķiskais ātrums ir aptuveni 15 arcsec sec⁻¹. Zemes rotācijas korekcija ir aptuveni 1 arcsec. Korekcijas efekts ir atkarīgs no stacijas ģeogrāfiskā platuma. Uz ekvatora 1 arcsec rotācijā ir ekvivalenta 31 m pozīcijas nobīdē.

Aprakstītais pseidoattāluma modelis parasti ir spēkā gan C/A, gan P kodam. Pseidoattālumu mērījumu precizitāte ir atkarīga no elektronikas spējām. Mūsdienās elektronika viegli spēj darboties ar 1 % precizitāti no koda čipa garuma [33]. Praksē, protams, pozīcijas, kuras iegūstamas, izmantojot minētos kodus ir ar zemāku precizitāti. P koda čipi tiek ģenerēti ik pēc 0,0978 mikrosekundēm. Tādējādi, mērījumiem izmantojot P kodu maksimālā precizitāte, kuru iespējams sasniegt ir aptuveni 1 ns. Izejot no augstākminētā iegūstam šādu maksimāli iespējamo precizitāti C/A un P kodiem:

- C/A koda mērījumiem – 3 m precizitāte, jo šī koda precizitāte ir aptuveni 300 m;
- P koda mērījumiem – 0,3 m precizitāte, jo P koda precizitāte ir aptuveni 30 m.

Izmantojot mērījumos C/A kodu, maksimālā sasniedzamā precizitātei ir desmit reizes zemāka, jo C/A kods tiek ģenerēts ar 10 reizes zemāku ātrumu [25], [33].

Nesošās frekvences fāzes mērījumos tiek salīdzināta no satelīta uztvertā signāla fāze attiecībā pret uztvērējā ģenerēto signāla fāzi uztveršanas brīdī. Mērījumu gaitā tiek veikta uztvērējā ģenerētās fāzes nobīde, lai varētu sekot uztvertajai fāzei. Pilnu nesošo viļņu skaitu starp satelītu un uztvērēju nav iespējams noteikt sākotnējā signāla uztveršanas brīdī. Nesošās frekvences fāzes mērīšanas būtība ir sīki mērīt fāzi un sekot izmaiņām ciklos. Cikls ir pilns nesošais vilnis [33].

Izmantojot vienkāršu formulu iespējams iegūt kāds ir signāla viļņa garums:

$$\lambda = \frac{c_a}{f}, \quad (1.15)$$

kur:

λ – vesela viļņa garums metros;

c_a – gaismas ātrums, koriģēts atbilstoši atmosfēras ietekmei;

f – frekvence hercos.

Pieņemot, ka gaismas ātrums zemes atmosfērā ir tāds pats kā vakuuma, mēs iegūstam sekojošus viļņa garumus GPS sistēmā:

$$\lambda_{L_1} = 0,19 \text{ m};$$

$$\lambda_{L_2} = 0,24 \text{ m}.$$

Tā kā mūsdienās elektronika spēj mērīt fāzi ar precizitāti, kas ir augstāka par 1 % no nesošā viļņa garuma, iegūstam, ka, izmantojot fāžu mērījumus iespējams sasniegt milimetru precizitāti.

Nenoteiktu veselu skaitu ciklu fāžu mērījumos sauc par nenoteiktību. Sākuma mērījumiem ir korekts fāzes stāvoklis un brīvi izvēlēts vesela skaitļa skaitītāja stāvoklis starta epohā. Šāds brīvi izvēlēts sākuma stāvoklis tiek noregulēts uz korektu stāvokli izmantojot nenoteiktību parametru modelēšanu.

Gadījumam, kad signāls izplatās vakuumā un apstākļos bez kļūdām izmērīto fāzi var uzrakstīt sekojoši:

$$\Phi_r^s(t_r) = \Phi_r(t_r) - \Phi^s(t_r) + N_r^s, \quad (1.16)$$

kur:

t_r – signāla uztveršanas laiks uztvērējā;

Φ_r – uztvērēja ģeneratora fāze;

Φ^s – no satelīta uztvertā signāla fāze;

N_r^s – nenoteiktība, kas attiecas uz satelītu s un uztvērēju r .

Pastāv savdabīga signāla fāzes pārraidīšanas īpatnība – uztvertā satelīta signāla fāze uztveršanas brīdī ir tieši tāda pati kā signāla pārraides laikā [33]:

$$\Phi^s(t_r) = \Phi_e^s(t_r - \Delta t), \quad (1.17)$$

kur:

Φ_e^s – satelīta pārraidītā signāla fāze;

Δt – signāla pārraides laiks;

$$\Delta t = \frac{\rho_r^s(t_r, t_e)}{c}, \quad (1.18)$$

kur:

$\rho_r^s(t_r, t_e)$ – ģeometriskais attālums starp satelītu signāla pārraides laikā t_e un uztvērēju uztveršanas brīdī t_r ;

c – gaismas ātrums.

Tagad izteiksmi (1.16) var pierakstīt sekojoši:

$$\Phi_r^s(t_r) = \Phi_r(t_r) - \Phi_e^s(t_r - \Delta t) + N_r^s \quad (1.19)$$

Pieņemot, ka sākotnējais laiks ir nulle un, ka uztvertā satelīta signālam un atbilstošam uztvērēja atbalsta signālam ir frekvence f , tad:

$$\Phi_r(t_r) = f t_r \quad (1.20)$$

$$\Phi_e^s(t_r - \Delta t) = f(t_r - \Delta t) \quad (1.21)$$

Ievietojot izteiksmes (1.18), (1.20) un (1.21) izteiksmē (1.19) iegūstam:

$$\Phi_r^s(t_r) = \frac{\rho_r^s(t_r, t_e)f}{c} + N_r^s \quad (1.22)$$

Ja mērijumos tiek ņemtas vērā satelīta un uztvērēja pulksteņa kļūdas, tad nesošā signāla fāze var tikt izteikta sekojoši:

$$\Phi_r^s(t_r) = \frac{\rho_r^s(t_r, t_e)f}{c} - f(\delta t_r - \delta t_s) + N_r^s, \quad (1.23)$$

kur:

δt_r – uztvērēja pulksteņa kļūda;

δt_s – satelīta pulksteņa kļūda.

Starp signāla frekvenci un signāla viļņa garumu pastāv sekojoša sakarība:

$$c = f\lambda \quad (1.24)$$

Ja tiek ņemtas vērā jonosfēras, troposfēras, Zemes un okeānu plūdmaiņu, daudzkanālu izplatīšanās un relatīvās ietekmes, kā arī citas kļūdas, tad izteiksmi (1.23) var pierakstīt sekojoši:

$$\Phi_r^s(t_r) = \frac{\rho_r^s(t_r, t_e)}{\lambda} - f(\delta t_r - \delta t_s) + N_r^s - \frac{\delta_{jon}}{\lambda} + \frac{\delta_{tro}}{\lambda} + \frac{\delta_{pl}}{\lambda} + \frac{\delta_{dk}}{\lambda} + \frac{\delta_{rel}}{\lambda} + \frac{\varepsilon}{\lambda} \quad (1.25)$$

Vai arī šādi:

$$\lambda \Phi_r^s(t_r) = \rho_r^s(t_r, t_e) - (\delta t_r - \delta t_s)c + \lambda N_r^s - \delta_{jon} + \delta_{tro} + \delta_{pl} + \delta_{dk} + \delta_{rel} + \varepsilon, \quad (1.26)$$

Izteiksmē (1.26) mērītā fāze ar faktoru λ ir vienāda ar ģeometrisku attālumu starp satelītu pārraides laikā un uztvērēju uztveršanas brīdī pieskaitot vai atņemot vairākas korekcijas. Pulksteņa kļūdu korekcijas tiek mērogotas ar gaismas ātrumu c .

Satelītu signālu izsekošanas gaitā, fāze un veselo ciklu skaits tiek pastāvīgi modelēts un bieži mērīts. Tādā veidā tiek uzskaitītas izmaiņas uztvērēja ģenerators ģenerētajā frekvencē. Ikreiz, kad tiek mērīta fāze, tiek koriģēti arī koeficienti sekojošās sistēmas modelī, lai nodrošinātu atbilstošu mērījumu precizitāti [33].

1.3.GNSS mērījumu precizitātes paaugstināšanas metodes

Kā tika minēts 1.2 nodaļā, tad ar GPS sasniedzamā precizitāte pēc precizitātes standartiem ir 22 m robežās vai pat sliktāk, ja ir ieslēgta SA. Ir jomas, kurās šāda precizitāte ir gana apmierinoša, bet, ja runa iet par tādām jomām, kā ģeodēziskie mērījumi, automatizētā ceļu būves vai kāda cita tehnika, vai aviācija, tad, protams, šāda precizitāte neiztur nekādu kritiku. Pastāv divas metodes, ar kurām iespējams ievērojami paaugstināt sasniedzamo pozicionēšanās precizitāti. Lai izvairītos no precizitātes mākslīgās pazemināšanas, kuru ieviesa SA tikai izstrādāta diferenciālās pozicionēšanās metode jeb DGPS (*Differential Global Positioning System*) [22]. Kā tiks apskatīts vēlāk, tad DGPS metode var tikt attiecināta ne tikai uz koda pseidoattālumu mērījumiem, bet arī uz nesošās frekvences fāzes mērījumiem, tikai otrajā gadījumā pieņemts DGPS saukt par relatīvo pozicionēšanos.

1.3.1. Papildinformācijas nodrošināšanas sistēmas

Lai būtu iespējama DGPS un relatīvā pozicionēšanās ir nepieciešama atbalsta stacija, kura spēj nodrošināt lietotāju ar šīm metodēm nepieciešamo papildinformāciju. Šādu papildinformāciju nodrošinošo sistēmu pamatā ir atbalsta stacijas, kuras vidēji tiek izvietotas 50-70 km attālumā viena no otras [22]. Ierasti šādas atbalsta stacijas nodrošina nepieciešamo informāciju gan DGPS, gan arī relatīvās pozicionēšanās lietotājiem. Izmantojot DGPS un relatīvo pozicionēšanās metodi attiecībā pret vienu staciju jāņem vērā tas, ka palielinoties attālumam starp atbalsta staciju un roveri samazinās sasniedzamās precizitātes līmenis, kuru nodrošina minētās metodes.

Atbalsta staciju tīkla risinājums jeb plaša pārklājuma precizitātes paaugstināšanas sistēmas ietver sevī vairākas atbalsta stacijas, kuras saslēgtas vienotā tīklā. Šajā gadījumā tiek nodrošināts augsts korekciju un citu datu viendabīgums tīkla pārklājuma zonā un rovera attālums līdz kādai konkrētai atbalsta stacijai vairs nav būtisks nosacījums [22].

Lai nodrošinātu šādu risinājumu pieejamību pēc iespējas plašākam lietotāju lokam tika izveidotas uz satelītu signāliem balstītas papildinformācijas nodrošināšanas sistēmas jeb SBAS (*Satellite Based Augmentation System*). SBAS sistēmās atbalsta staciju apkopotā informācija par nobīdēm tiek pārraidīta, izmantojot ģeostacionāros satelītus. Pasaulē ir izveidotas vairākas SBAS:

- EGNOS – *European Geostationary Navigation Overlay Service* (Eiropa);
- WAAS – *Wide Area Augmentation System* (ASV);

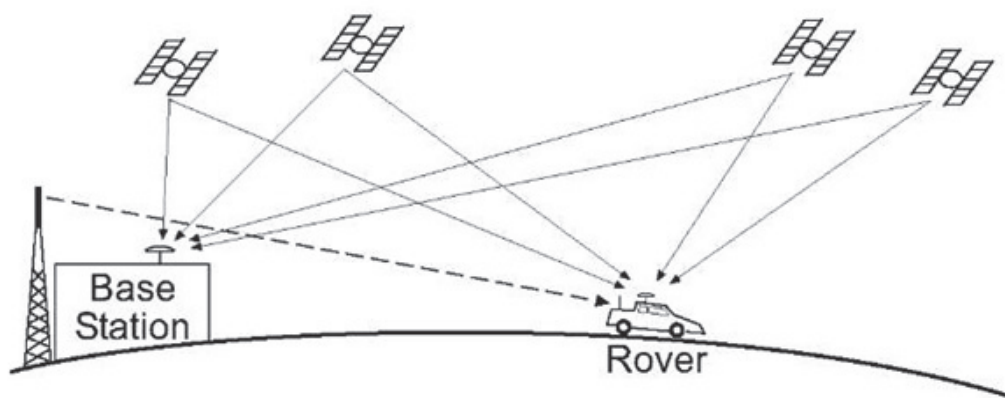
- SDCM – *System for Differential Corrections and Monitoring* (Krievija);
- MSAS – *MTSAT (Multifunkcionālie transporta satelīti) Satellite Augmentation System* (Japāna);
- SNAS – *Satellite Navigation Augmentation System* (Ķīna);
- GAGAN – *GPS Aided Geo Augmented Navigation system* (Indija);
- StarFire – plašas darbības zonas DGPS, kuru izstrādājušas *John Deere's NavCom* un precīzās lauksaimniecības grupas.

Ņemot vērā, ka gan DGPS, gan relatīvā pozicionēšanās ir saistīta ar korekcijas datu pārraidīšanu no atbalsta stacijas roverim, tad ir nepieciešami risinājumi kā to izdarīt. Korekciju pārraidīšana ir iespējama izmantojot sekojošas metodes:

- speciālu radiokanālu izmantošana;
- bezvadu interneta modemu izmantošana.

1.3.2. Diferenciālā pozicionēšanās

DGPS metodes pielietošana ļauj izslēgt savstarpēji saistītas kļūdas starp diviem vai vairākiem uztvērējiem, kuru redzamībā ir vieni un tie paši satelīti. Metodes idejas pamatā ir tas, ka vismaz viens no uztvērējiem atrodas fiksētā pozīcijā ar labi zināmām koordinātām [5]. Šāds uztvērējs, kura koordinātas ir labi zināmas parasti tiek saukts par atbalsta staciju (RS – *Reference Station*). Citi uztvērēji, kuri nosaka savu pozīciju tiek saukti par roveriem. Zinot fiksētā uztvērēja pozīcijas nobīdes no pieņemtajām koordinātām un pārraidot tās roveriem iespējams panākt ievērojamu pozicionēšanās precizitātes uzlabošanos [70]. Tipisks DGPS risinājums ir attēlots 1.1 att.



1.1 att. Tipisks DGPS risinājums

DGPS metode reālā laikā var tikt realizēta divos atšķirīgos variantos. Vienā variantā atbalsta stacija aprēķina savu pozīciju izmantojot tādu pašu satelītu zvaigznāju kā roveris. Atšķirības starp atbalsta stacijas zināmo pozīciju un aprēķināto dod pozīcijas korekcijas. Roveris izmanto korekcijas, lai uzlabotu savas pozīcijas noteikšanas precizitāti. Šo variantu ir viegli realizēt, taču tā realizācijai ir nepieciešama sarežģītāka satelītu izvēle. Otrs DGPS variants balstās uz pseidoattālumu korekcijām, kuras tiek iegūtas no starpības starp aprēķinātajiem attālumiem un novērotajiem koda pseidoattālumiem atbalsta stacijā visiem satelītiem. Izmantojot šo risinājumu, novērotie koda attālumi rovera pozīcijā var tik koriģēti, izmantojot atbalsta stacijas korekcijas. Otrais DGPS metodes realizācijas variants ir elastīgāks un sniedz augstāku precizitāti, taču tās trūkums ir tajā, ka ir nepieciešamāk lielāka aparatūras skaitļošanas jauda korekcijas algoritmu realizācijai [22], [32]. Otrās metodes realizācijas gadījumā korekcijas tiek formētas kā pseidoattālumu korekcijas visiem atbalsta stacijas redzeslokā esošajiem satelītiem. Vadoties pēc [22] pseidoattālumu atbalsta stacijā (rs) laika momentam t_0 varam izteikt sekojoši:

$$R_j^{rs}(t_0) = \rho_j^{rs}(t_0) + \Delta R_j^{rs}(t_0) + \Delta R_j^s(t_0) + \Delta R^{rs}(t_0), \quad (1.27)$$

kur:

$\Delta R_j^{rs}(t_0)$ – izplatīšanās vides radītās (netiek ievērotas) sistemātiskās pseidoattālumu korekcijas;

$\Delta R_j^s(t_0)$ – satelīta pozīcijas un satelīta pulksteņa sistemātisko kļūdu izraisītās pseidoattāluma korekcijas;

$\Delta R^{rs}(t_0) = -c\delta_r^{rs}(t_0)$ – atbalsta stacijas pulksteņa korekcijas $\delta_r^{rs}(t_0)$ izraisītā pseidoattāluma korekcija.

Pseidoattāluma korekciju satelītam ar indeksu j laika momentā t_0 varam pierakstīt sekojoši:

$$\Delta R_j(t_0) = \Delta R_j^{rs}(t_0) + \Delta R_j^s(t_0) + \Delta R^{rs}(t_0) \quad (1.28)$$

Lai būtu iespējams aprēķināt korekcijas vērtību arī citiem laika momentiem DGPS pozicionēšanā tiek izmantots arī pseidoattāluma korekcijas atvasinājums:

$$\Delta R_j(t) = \Delta R_j(t_0) + \dot{\Delta R}_j(t_0)(t - t_0) \quad (1.29)$$

Roverim (rv), kuram tiek pielietotas pseidoattālumu korekcijas varam uzrakstīt:

$$R_j^{rv}(t) - \Delta R_j(t) = \rho_j^{rv}(t) + [\Delta R_j^{rv}(t) - \Delta R_j^{rs}(t)] + \Delta R_j^{rvrs}(t), \quad (1.30)$$

kur:

$$\Delta R_j^{rvrs}(t) = \Delta R_j^{rv}(t) - \Delta R_j^{rs}(t) = c[\delta_r^{rs}(t) - \delta_r^{rv}(t)].$$

Ja attālums starp roveri un atbalsta staciju ir pietiekoši neliels, tad var uzskatīt, ka izplatīšanās vides vērā neņemto sistematisko kļūdu ietekme ir aptuveni vienāda gan atbalsta stacijas, gan rovera atrašanās vietās:

$$\Delta R_j^{rv}(t) - \Delta R_j^{rs}(t) \approx 0 \quad (1.31)$$

Izejot no minētā izteiksmi (1.30) var izmantot kā pozicionēšanās vienādojumu:

$$R_j^{rv}(t) - \Delta R_j(t) = \rho_j^{rv} + \Delta R_j^{rvrs}(t) \quad (1.32)$$

Reālā laika risinājumos šīs nobīdes (korekcijas) tiek pārraidītas visiem lietotājiem, kuri atrodas pārklājuma teritorijā. Lietotāji izmanto šīs korekcijas, lai uzlabotu pozīcijas noteikšanas precizitāti. Piemēram, kļūdas apmēru, kura rodas dēļ satelīta pulksteņa nestabilitātes, šādā veidā, pateicoties rovera un atbalsta stacijas tuvumam, lietotāja uztvērējs spēj samazināt vairāk nekā divas reizes [5].

Citas pseidoattālumu kļūdas, tādas kā efemerīdu kļūdas, satelītu perturbācijas un atmosfēras efekti, palielinās palielinoties attālumam starp roveri un atbalsta staciju. Šajā gadījumā jo tuvāk roveris atrodas atbalsta stacijai, jo lielāks DGPS devums precizitātes uzlabošanā.

DGPS risinājumi nespēj mazināt visas ietekmes uz precizitāti. Ietekmes, kuras ir atšķirīgas roverim un atbalsta stacijai ar DGPS tehniku nav iespējams mazināt, šīs ietekmes ir tādas kā:

- daudzkanālu izplatīšanās;
- traucējumi;
- uztvērēja troksnis.

Tas ir tāpēc, ka tās nav savstarpēji saistītas. Signālu uztveršanas, elektromagnētiskā fona un apbūves apstākļi var krasi atšķirties atbalsta stacijas un rovera atrašanās vietās.

1.3.3. Relatīvā pozicionēšanās

Kā tika minēts iepriekš, tad relatīvajā pozicionēšanā tiek izmantoti nesošās frekvences fāzes mērījumi atbalsta stacijā un roverī. Ģeodēziskajiem mērījumiem nepieciešamā precizitāte ir sasniedzama tikai ar relatīvās pozicionēšanās metodi. Tā kā relatīvajā pozicionēšanās metodē ir nepieciešami vienlaicīgi fāžu mērījumi gan atbalsta stacijā, gan roverī, tad sākotnēji tā bija iespējama tikai veicot datu pēcapstrādi, jo nebija pieejami datu pārraides risinājumi reālā laikā, mūsdienās tā vairs nav problēma [32].

Relatīvā pozicionēšanās iedalās sekojoši:

- statiskā relatīvā pozicionēšanās (*Static*);
- kinemātiskā relatīvā pozicionēšanās (*Kinematic*);
- pseidokinemātiskā relatīvā pozicionēšanās (*Pseudokinematic*).

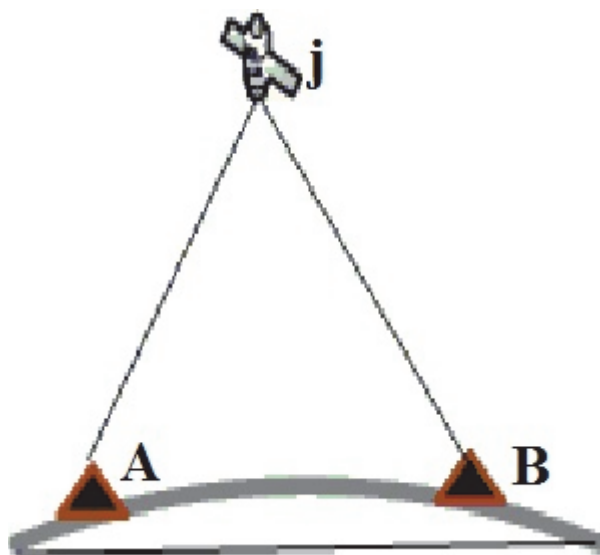
Statiskās relatīvās pozicionēšanās īstenošanai pozicionēšanās punktos ir nepieciešams tikai relatīvi brīvs skats uz debesjumu. Parasti statiskajā relatīvajā pozicionēšanā ir nepieciešami 10-120 min ilgi novērojumi, kuru garums ir atkarīgs no bāzes līnijas (attālums starp atbalsta staciju un roveri) garuma, redzamo satelītu skaita, ģeometriskā izvietojuma un izmantotās metodes, lai pie 1 km garas bāzes līnijas varētu panākt 1 mm precizitāti.

Kinemātiskā relatīvā pozicionēšanās ir produktīvāka, jo iespējams, ar augstu precizitāti, noteikt vairāk punktus īsākā laika posmā. Kinemātiskajā relatīvajā pozicionēšanā ir nepieciešama rūpīgāka mērījumu vietas veikšanas izpēte, jo brīvs debesjums ir nepieciešams visā mērījumu maršrutā ne tikai konkrētos mērījumu veikšanas punktos. Šo metodi var izmanto, piemēram, kartes veidošanai ar automašīnu, jo iespējams sasniegt precizitāti, kura ir dažu centimetru robežās [32].

Pseidokinemātiskā relatīvā pozicionēšanās ir ļoti līdzīga statiskajai. Šajā risinājumā ir nepieciešams mazāks laiks, lai sasniegtu augstu precizitāti, taču klasiski nepieciešams uzmērīt pozīciju pāri divas reizes. Tipisks mērījumu scenārijs būtu sekojošs: pozīciju pāri tiek veikti piecu minūšu ilgi novērojumi, tad roveri tiek pārvietoti uz citu pozīciju pāri un atkal tiek veikti piecu minūšu ilgi novērojumi. Pēc tam, aptuveni pēc stundas, notiek atgriešanās pirmajā pozīciju pāri un atkal tiek veikti piecu minūšu ilgi novērojumi. Ja salīdzina, šādu 10 minūšu novērojumu sesijas ilgumu ar, piemēram, 60 minūšu ilgu novērojumu, izmantojot statisko metodi, tad pseidokinemātiskās pozicionēšanās ieguvumi savā veidā kompensējas ar zaudēto

laiku, kas nepieciešams, lai pārvietotos no viena pozīciju pāra uz otru un atpakaļ. Vislabākie pseidokinemātiskās pozicionēšanās pielietošanas apstākļi ir gadījumos, kad pozīcijas atrodas viegli sasniedzamās vietās. Izmantojot pseidokinemātisko pozicionēšanos, iespējams sasniegt subcentimetra precizitāti, ko veicina dažādā satelītu konstelācija starp novērojumu sesijām. Galvenais pseidokinemātiskās pozicionēšanās pluss, salīdzinājumā ar statisko pozicionēšanos, ir tajā, ka dotajā laika posmā iespējams veikt vairāk pozīciju novērojumus. Salīdzinot ar kinemātisko pozicionēšanos, pseidokinemātiskajā pozicionēšanā ir pieļaujama satelītu signāla fiksācijas pazaudēšana un satelītu skaitam nav tik būtiskas nozīmes. Galvenais metodes trūkums ir nepieciešamība atkārtoti atgriezties novērojamajā pozīcijā [32].

C/A koda pseidoattāluma mērījumi balstās uz laika nobīdi starp satelīta pārraidīto kodu un uztvērējā ģenerēto C/A koda repliku. Salīdzinājumā ar C/A koda mērījumiem nesošās frekvences fāzes mērījumi satur nenoteiktību, jo tie ir sinusoidālas formas viļņi ar 19 cm garumu uz L1 un 24 cm garumu uz L2 frekvences. Viļņu skaits starp satelītu un uztvērēju signāla uztveršanas mirklī nav zināms. Tā kā nezināmo viļņu (ciklu) skaits ir vesels skaitlis, tad šī nezināmā skaita atrašanu sauc par cikliskās nenoteiktības atrisināšanu (*Integer Ambiguity*) [1], [39]. Fāzes uz L1 un L2 frekvencēm var tikt kombinētas lineārās kombinācijās, tādā veidā, formējot platjoslas signālu ar viļņa garumu 86,2 cm un šaurjoslas signālu ar viļņa garumu 10,7 cm. Platjoslas signāla gadījumā nenoteiktības ir vieglāk atrisināt nekā pie viļņa garumiem 19 cm vai 24 cm [32].



1.2. att. Vienkāršā fāžu starpība

1.3.4. Fāžu starpību vienādojumi

Relatīvā pozicionēšanās visefektīvāko rezultātu dod, tad, ja atbalsta stacija un roveris mērījumus veic vienlaicīgi. Vienlaicīgi nozīmē, ka novērojumu laika tagi ir vienādi gan atbalsta stacijā gan roverī. Pieņemot, ka šādi vienlaicīgi mērījumi notiek punktos A un B un tiek veikti līdz satelītiem j un k lineārās kombinācijas var veidot vienkāršo, divkāršo vai trīskāršo fāžu starpību vienādojumus [32].

1.3.4.1. Vienkāršās fāžu starpības vienādojumi

Šajā gadījumā mērījumi notiek divos punktos, izmantojot vienu satelītu (skat. 1.2. att.). Apzīmējot mērījumu vietas ar A un B un satelītu ar j , vadosies pēc [32] fāžu novērojumus šajos punktos varam pierakstīt sekojoši:

$$\begin{aligned}\Phi_A^j(t) - f^j \delta^j &= \frac{1}{\lambda} \rho_A^j(t) + N_A^j - f^j \delta_A(t) \\ \Phi_B^j(t) - f^j \delta^j &= \frac{1}{\lambda} \rho_B^j(t) + N_B^j - f^j \delta_B(t)\end{aligned}\quad (1.33)$$

Izteiksmju (1.33) starpība izsakās sekojoši:

$$\Phi_B^j(t) - \Phi_A^j(t) = \frac{1}{\lambda} [\rho_B^j(t) - \rho_A^j(t)] + N_B^j - N_A^j - f^j [\delta_B(t) - \delta_A(t)] \quad (1.34)$$

Iegūtā izteiksme (1.34) tiek saukta par vienkāršo fāžu starpības vienādojumu, tomēr šis vienādojums atklāj problēmu. Šādu vienādojumu sistēma, kā to atklāj nenoteiktību koeficienti un uztvērēju pulksteņu nobīdes, izraisītu nenoteiktību pat pie lielas redundances, jo absolūtās vērtības abiem punktiem ir vienādas. Lai no tā izvairītos tiek ieviesti sekojoši relatīvie apzīmējumi un saīsinājumi:

$$\begin{aligned}N_{AB}^j &= N_B^j - N_A^j \\ \delta_{AB}(t) &= \delta_B(t) - \delta_A(t) \\ \Phi_{AB}^j(t) &= \Phi_B^j(t) - \Phi_A^j(t) \\ \rho_{AB}^j(t) &= \rho_B^j(t) - \rho_A^j(t)\end{aligned}\quad (1.35)$$

Tagad, ievietojot (1.35) izteiksmē (1.34) iegūstam:

$$\Phi_{AB}^j(t) = \frac{1}{\lambda} \rho_{AB}^j(t) + N_{AB}^j - f^j \delta_{AB}(t) \quad (1.36)$$

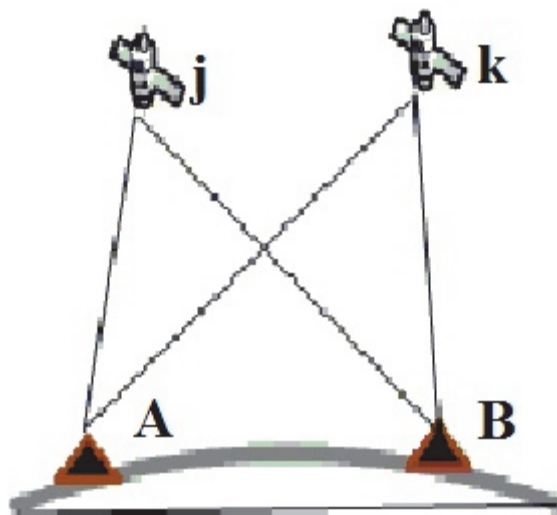
Izteiksme (1.36) ir galējais vienkāršās fāžu starpības vienādojums. Ja mēs to salīdzinām ar absolūto fāžu pozicionēšanās vienādojumu:

$$\Phi_i^j(t) - f^j \delta^j = \frac{1}{\lambda} \rho_i^j(t) + N_i^j - f^j \delta_i(t) ,$$

Redzams, ka satelīta pulksteņa nobīde ir izslēgta. Tāpat vienkāršās fāžu starpības nesatur jonosfēras korekcijas un ģeometriskā attāluma vietā tās satur ģeometrisko attālumu starpību, kā parādīts (1.35) [22].

1.3.4.2. Divkāršās fāžu starpības vienādojumi

Šajā gadījumā, kā parādīts 1.3. att., mērījumos, kuri, vienlaicīgi notiek punktos A un B tiek pielietoti divu satelītu (j un k) signāli. Citiem vārdiem sakot, starpība starp divām vienkāršajām fāžu starpībām vienām un tām pašām stacijām, bet dažādiem satelītiem tiek saukta par divkāršo fāžu starpību.



1.3. Att. Divkāršā fāžu starpība

Ņemot vērā, ka mērījumos tiek iesaistīti arī divi satelīti, ne tikai divas stacijas vadoties pēc [32] un ievērojot (1.36) varam pierakstīt divus vienkāršo fāžu starpību vienādojumus sekojoši:

$$\begin{aligned}\Phi_{AB}^j(t) &= \frac{1}{\lambda} \rho_{AB}^j(t) + N_{AB}^j - f^j \delta_{AB}(t) \\ \Phi_{AB}^k(t) &= \frac{1}{\lambda} \rho_{AB}^k(t) + N_{AB}^k - f^k \delta_{AB}(t)\end{aligned}\quad (1.37)$$

Lai iegūtu divkāršo fāžu starpību vienādojumu (1.37) vienkāršās fāžu starpības tiek atņemtas viena no otras. Ja pieņemam, ka $f^j = f^k$, respektīvi, satelītu signālu frekvences ir vienādas, tad vienkāršo fāžu starpību starpība ir izsakāma sekojoši:

$$\Phi_{AB}^k(t) - \Phi_{AB}^j(t) = \frac{1}{\lambda} [\rho_{AB}^k(t) - \rho_{AB}^j(t)] + N_{AB}^k - N_{AB}^j \quad (1.38)$$

Ieviešot analogus saīsinājumus (1.35):

$$\begin{aligned}N_{AB}^{jk} &= N_{AB}^k - N_{AB}^j \\ \rho_{AB}^{jk}(t) &= \rho_{AB}^k(t) - \rho_{AB}^j(t) \\ \Phi_{AB}^{jk}(t) &= \Phi_{AB}^k(t) - \Phi_{AB}^j(t)\end{aligned}\quad (1.39)$$

Ievietojot (1.39) izteiksmē (1.38) iegūstam divkāršās fāžu starpības vienādojumu sekojošā formā:

$$\Phi_{AB}^{jk}(t) = \frac{1}{\lambda} \rho_{AB}^{jk}(t) + N_{AB}^{jk} \quad (1.40)$$

Iemesls, kāpēc tiek lietotas divkāršās fāžu starpības ir tas, ka tās nesatur uztvērēja pulksteņa kļūdas. Tas izriet no vienlaicīgiem novērojumiem divās stacijās un pieņēmuma, ka satelītu signālu frekvences ir vienādas [32].

Ieviešot simbolisku izteiksmi:

$$*_{AB}^{jk} = *_{AB}^k - *_{AB}^j, \quad (1.41)$$

kur zvaigznīte var tikt aizvietota ar Φ , ρ vai N un ņemot vērā to, ka šie, lielumi, kuri satur divus indeksus augšrakstā un divus indeksus apakšrakstā faktiski sastāv no četriem locekļiem, kas simboliski var tikt izteikts sekojoši:

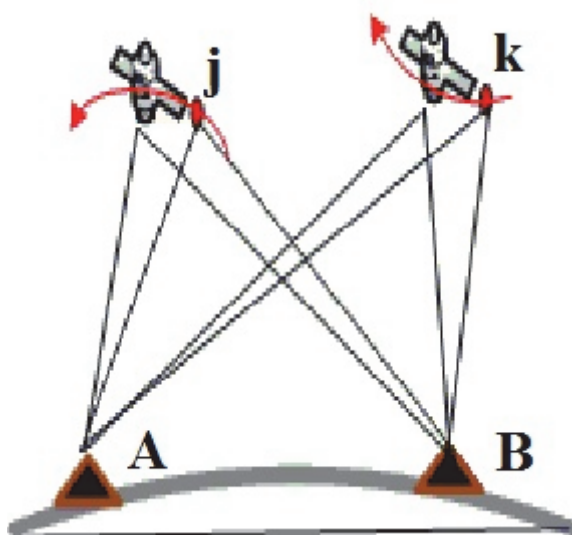
$$*_{AB}^{jk} = *_{B}^k - *_{B}^j - *_{A}^k + *_{A}^j \quad (1.42)$$

Ar izteiksmes (1.42) palīdzību iespējams detalizēti aprakstīt lielumus divkāršajās fāžu starpībās sekojoši:

$$\begin{aligned} \Phi_{AB}^{jk}(t) &= \Phi_B^k(t) - \Phi_B^j(t) - \Phi_A^k(t) + \Phi_A^j(t) \\ \rho_{AB}^{jk}(t) &= \rho_B^k(t) - \rho_B^j(t) - \rho_A^k(t) + \rho_A^j(t) \\ N_{AB}^{jk} &= N_B^k - N_B^j - N_A^k + N_A^j \end{aligned} \quad (1.43)$$

1.3.4.3. Trīskāršās fāžu starpības vienādojumi

Vienkāršās un divkāršās fāžu starpības vienādojumos tiek izskatīta tikai viena epoha t . Lai novērstu no laika neatkarīgas nenoteiktības jāveic divkāršo fāžu starpību atņemšana savā starpā starp divām epohām. Trīskāršās fāžu starpības ir starpības laikā starp divām divkāršajām fāžu starpībām, skat., 1.4. att.



1.4. Att. Trīskāršā fāžu starpība

Apzīmējot divas epohas ar t_1 un t_2 var pierakstīt divkāršo fāžu starpību vienādojumus sekojošā formā:

$$\begin{aligned}\Phi_{AB}^{jk}(t_1) &= \frac{1}{\lambda} \rho_{AB}^{jk}(t_1) + N_{AB}^{jk} \\ \Phi_{AB}^{jk}(t_2) &= \frac{1}{\lambda} \rho_{AB}^{jk}(t_2) + N_{AB}^{jk}\end{aligned}\quad (1.44)$$

Atņemot (1.44) izteiksmes vienu no otras iegūstam:

$$\Phi_{AB}^{jk}(t_2) - \Phi_{AB}^{jk}(t_1) = \frac{1}{\lambda} [\rho_{AB}^{jk}(t_2) - \rho_{AB}^{jk}(t_1)] \quad (1.45)$$

Vienkāršojot izteiksmi (1.45) varam pierakstīt sekojoši:

$$\Phi_{AB}^{jk}(t_{12}) = \frac{1}{\lambda} \rho_{AB}^{jk}(t_{12}) \quad (1.46)$$

Ja lielumiem Φ un ρ piemērojam simbolisko izteiksmi:

$$* (t_{12}) = * (t_2) - * (t_1) \quad (1.47)$$

Un ievērojam to, ka $\Phi_{AB}^{jk}(t_{12})$ un $\rho_{AB}^{jk}(t_{12})$ sastāv no astoņiem locekļiem katrs, tad izmantojot izteiksmi (1.42) vai (1.43) izteiksmes (1.45) locekļus var aprakstīt sekojoši:

$$\Phi_{AB}^{jk}(t_{12}) = \Phi_B^k(t_2) - \Phi_B^j(t_2) - \Phi_A^k(t_2) + \Phi_A^j(t_2) - \Phi_B^k(t_1) + \Phi_B^j(t_1) + \Phi_A^k(t_1) - \Phi_A^j(t_1) \quad (1.48)$$

$$\rho_{AB}^{jk}(t_{12}) = \rho_B^k(t_2) - \rho_B^j(t_2) - \rho_A^k(t_2) + \rho_A^j(t_2) - \rho_B^k(t_1) + \rho_B^j(t_1) + \rho_A^k(t_1) - \rho_A^j(t_1) \quad (1.49)$$

Divas galvenās trīskāršo fāžu starpību vienādojumu priekšrocības, kuras savā starpā ir saistītas ir tādas, ka trīskāršās fāžu starpības nesatur nenoteiktību ietekmi un tādejādi tās netiek ietekmētas ar izmaiņām nenoteiktībā. Izmaiņas nenoteiktībā tiek sauktas par ciklisko nenoteiktību [32].

Tā kā pastāv savstarpējā korelācija starp trīskāršās fāžu starpības epohām (t_1, t_2), epohām (t_0, t_1) un epohām (t_1, t_2), tas padara trīskāršo fāžu starpību datu secīgu apstrādi par ļoti sarežģītu

procedūru. Ņemot vērā korelāciju starp bāzes līnijām precīza korelācijas lielumu noteikšana starp trīskāršajām fāžu starpībām GNSS tīklā kļūst par ļoti sarežģītu [33].

Jāatzīmē, ka trīskāršās fāžu starpības nav izmantojamas kinemātiskajā pozicionēšanā, jo tām ir nepieciešami mērījumi ar nekustīgām antenām divās epohās, bet statistiskajā pozicionēšanā šāda problēma nepastāv.

Fāžu starpību vienādojumiem, salīdzinājumā ar absolūtās pozicionēšanās vienādojumiem ir vairākas priekšrocības. Piemēram, fāžu starpību vienādojumi nesatur jonosfēras korekcijas un patieso attālumu no satelīta līdz uztvērēja antenai vietā tiek izmantotas šo attālumu starpības, kuras iespējams noteikt ar augstāku precizitāti nekā pašus attālumus [22].

1.3.5. Statiskā relatīvā pozicionēšanās

Veicot statiskās relatīvās pozicionēšanās vienas bāzes vektora mērījumus starp diviem punktiem šiem abiem punktiem jābūt nekustīgiem visā mērījumu gaitā.

Zemāk, vadoties pēc [22], [32], apskatīsim vienkāršo, divkāršo un trīskāršo fāžu starpību vienādojumus atbilstoši novērojumu vienādojumu un nezināmo skaitam matemātisko modeli. Modelī tiek pieņemts, ka uztvērēji punktos A un B ir spējīgi novērot vienus un tos pašus satelītus vienādās epohās. Satelītu signālu traucējumu problēma šeit netiek ņemta vērā.

Vienkāršo fāžu starpību iespējams izteikt katram satelītam un katrai epohai, tāpēc mērījumu skaits ir vienāds ar satelītu skaita un epohu skaita reizinājumu. Vienkāršās fāžu starpības (1.36) gadījumam, ja mērījumiem izmantojam n_s satelītus n_e epohās, tad vienādojumu skaits būs vienāds ar $n_s n_e$. Šajā gadījumā nezināmo skaits ir 3 uztvērēja koordinātas punktā B (X_B, Y_B, Z_B), n_s ciklisko nenoteiktību starpības N_{AB}^j , un n_e pulksteņu korekciju starpības $\delta_{AB}(t)$. Izejot no augstākminētā varam pierakstīt nosacījumu, kuram jāizpildās, lai būtu iespējams atrisināt vienkāršo fāžu starpību vienādojumu sistēmu:

$$n_s n_e \geq 3 + n_s + n_e \quad (1.50)$$

Izmantojot izteiksmi (1.50) pierakstīsim minimālo nepieciešamo epohu skaitu:

$$n_e \geq \frac{n_s + 3}{n_s - 1} \quad (1.51)$$

No izteiksmes (1.51) redzam, ka viena satelīta izmantošana nedos risinājumu jo izteiksmes (1.51) dalītājs tādā gadījumā būs vienāds ar 0. Mērījumos ar diviem satelītiem $n_e \geq 5$, bet mērījumiem ar četriem satelītiem – $n_e \geq 3$, jo epohu skaitam vienmēr ir jābūt veselam skaitlim. Šādā veidā varam noteikt, ka, izmantojot mērījumus ar desmit satelītiem, nepieciešams veikt mērījumus divās dažādās epohās jeb laika momentos [22].

Divkāršo fāžu starpību gadījumā, risinājuma iegūšanai nepieciešamo, mērījumu un nezināmo skaitu nosaka pēc tāda paša principa. Šajā gadījumā jāņem vērā, ka vienai divkāršajai fāžu starpībai ir nepieciešami divi satelīti [32]. Ievērojot minēto izriet, ka pie satelītu skaita n_s tiek iegūtas $n_s - 1$ divkāršās fāžu starpības katrai epohai tādā veidā kopējais divkāršo fāžu starpību skaits sistēmā ir $(n_s - 1)n_e$ un, lai šī vienādojumu sistēma būtu atrisināma ir jāizpildās sekojošam nosacījumam:

$$(n_s - 1)n_e \geq 3 + (n_s - 1) \quad (1.52)$$

Līdzīgi kā iepriekš, nepieciešamo epohu skaits šajā gadījumā:

$$n_e \geq \frac{n_s + 2}{n_s - 1} \quad (1.53)$$

Arī šajā gadījumā, redzams, ka satelītu skaits nevar būt mazāks par diviem. Minimālā nepieciešamā satelītu skaita gadījumā iegūstam, ka mērījumi ir jāveic vismaz četrās dažādās epohās $n_e \geq 4$, salīdzinājumā ar vienkāršo fāžu starpību vienādojumu sistēmu nepieciešamo epohu skaits ir samazinājies par vienu. Mērījumos, kuros tiek izmantoti 4 satelīti epohu skaitu iegūstam: $n_e \geq 2$.

Trīskāršo fāžu starpību gadījumā nezināmas ir tikai uztvērēja B koordinātas. Lai sastādītu vienkāršo trīskāršās fāžu starpības vienādojumu ir nepieciešamas divas epohas. Gadījumā, ja epohu skaits ir n_e , tad iespējamo lineāri neatkarīgo epohu kombināciju skaits ir $n_e - 1$. Ņemot vērā iepriekš minēto varam pierakstīt nosacījumu, kuram jāizpildās, lai vienādojumu sistēma būtu atrisināma:

$$(n_s - 1)(n_e - 1) \geq 3 \quad (1.54)$$

Trīskāršo fāžu starpību gadījumā, minimālais nepieciešamo epohu skaits nosakāms sekojoši:

$$n_e \geq \frac{n_s+2}{n_s-1} \quad (1.55)$$

Šajā gadījumā, pie minimālā satelītu skaita, kas ir 2 iegūstam, ka nepieciešamo mērījumu skaits ir $n_e \geq 4$. Izteiksme norāda, ka trīskāršo fāžu starpību gadījumā tāpat kā divkāršo fāžu starpību gadījumā minimālais epohu skaits, kad tiek izmantoti četri satelīti ir $n_e \geq 2$.

1.3.6. Kinemātiskā relatīvā pozicionēšanās

Statiskajā relatīvajā pozicionēšanā ir pieņemts, ka abi uztvērēji mērījumu laikā ir nekustīgi, taču kinemātiskajā pozicionēšanā uztvērējs A , kurš atrodas pozīcijā ar precīzi zināmām koordinātām (bāzes stacija) ir nekustīgs, bet uztvērējs B , kura koordinātas ir jānosaka (roveris) pārvietojas un tā pozīcija ir jānosaka patvaļīgām epohām. Tādā veidā vienkāršo, divkāršo un trīskāršo fāžu starpību vienādojumi satur kustību ģeometriskajā attālumā starp roveri un satelītu [32]. Pieņemot, ka mērījumi notiek punktā B , izmantojot satelītu j , tad, izmantojot izteiksmi (1.10) ģeometrisko attālumu starp punktu B un satelītu j statistiskiem mērījumiem varam pierakstīt sekojoši:

$$\rho_B^j(t) = \sqrt{(x^j(t) - x_B)^2 + (y^j(t) - y_B)^2 + (z^j(t) - z_B)^2} \quad (1.56)$$

Pārrakstot izteiksmi (1.56) kinemātiskiem mērījumiem iegūstam:

$$\rho_B^j(t) = \sqrt{(x^j(t) - x_B(t))^2 + (y^j(t) - y_B(t))^2 + (z^j(t) - z_B(t))^2} \quad (1.57)$$

Šajā matemātiskajā modelī rovera koordinātas ir nezināmi lielumi katrā no mērījumu epohām tādejādi kopējais nezināmo skaits roverim ir $3n_e$, n_e epohās. Izmantojot izteiksmes (1.50), (1.52), (1.54) varam iegūt sakarības starp novērojumu un nezināmo skaitu vienkāršo, divkāršo un trīskāršo fāžu novērojumu starpību gadījumiem.

$$n_s n_e \geq 3n_e + n_s + n_e \quad (1.58)$$

$$(n_s - 1)n_e \geq 3n_e + (n_s - 1) \quad (1.59)$$

$$(n_s - 1)(n_e - 1) \geq 3n_e \quad (1.60)$$

Izteiksmes (1.58 – 1.60) attiecīgi atbilsti vienkāršo, divkāršo un trīskāršo fāžu novērojumu starpību vienādojumu sistēmām. Rovera kustība mērījumu laikā uzstāda ierobežojumu, ka rovera pozīcija ir jānosaka vienas epohas laikā. Pārveidojot izteiksmes (1.58–1.60) attiecīgi varam iegūt:

$$n_s \geq \frac{4n_e}{n_e - 1} \quad (1.61)$$

$$n_s \geq \frac{4n_e - 1}{n_e - 1} \quad (1.62)$$

$$n_s \geq \frac{4n_e - 1}{n_e - 1} \quad (1.63)$$

Aplūkojot izteiksmes (1.61–1.63) redzams, ka neviena no tām nespēj nodrošināt vienas epohas ierobežojuma ievērošanu. Lai risinājums būtu iespējams, minētās izteiksmes tiek modificētas, izslēdzot no tām ciklisko nenoteiktību nezināmos. Vienkāršo un divkāršo fāžu starpību gadījumā tas ļauj panākt, ka minimālais mērījumos iekļaujamo satelītu skaits ir $n_s \geq 4$ jebkuram epohu skaitam. Savukārt trīskāršās fāžu starpības varētu izmantot, ja rovera koordinātas būtu zināmas kādā atskaites epohā, tādā gadījumā vienādojumu atrisināšanas nosacījums būtu sekojošs:

$$(n_s - 1)(n_e - 1) \geq 3(n_e - 1) \quad (1.64)$$

Izteiksme (1.64), savukārt noved pie tā, ka trīskāršo fāžu starpību gadījumam minimālais mērījumos iesaistāmo satelītu skaits ir $n_s \geq 4$.

Lai būtu iespējama nenoteiktību izslēgšana no vienkāršo un divkāršo fāžu starpību vienādojumu sistēmām tām ir jābūt zināmām [32]. Lai iegūtu izteiksmes, kas apmierina šādas prasības vienkāršo fāžu starpību vienādojums (1.36) un divkāršo fāžu starpību vienādojums (1.40) jāpārveido pārvietojot nenoteiktības aprakstošo lielumu no labās puses uz kreiso. Šādas manipulācijas rezultātā iegūstam sekojošu vienkāršās fāžu starpības vienādojuma formu:

$$\Phi_{AB}^j(t) - N_{AB}^j = \frac{1}{\lambda} \rho_{AB}^j(t) - f^j \delta_{AB}(t) \quad (1.65)$$

Un sekojošu divkāršo fāžu starpību vienādojuma formu:

$$\Phi_{AB}^{jk}(t) - N_{AB}^{jk} = \frac{1}{\lambda} \rho_{AB}^{jk}(t) \quad (1.66)$$

Trīskāršo fāžu starpību gadījumā nezināmo skaita samazināšana par vienu nozīmē, ka ir jābūt zināmai vienai pozīcijai. Tādejādi vienādojumus ir iespējams atrisināt, ja ir zināma viena rovera pozīcija, kuru, vēlams uzskatīt par rovera sākotnējo pozīciju. Bāzes līnijas vektors šai pozīcijai arī jāpieņem kā sākotnējais vektors. Zinot sākotnējo vektoru iespējams atrisināt nenoteiktības un zināt tās visām sekojošām rovera pozīcijām, ja vien nenotiek signāla pārtraukums un rovera redzamības lokā ir vismaz četri satelīti [32].

2. FĀŽU CIKLU NENOTEIKTĪBA UN NOBĪDES GNSS MĒRĪJUMOS

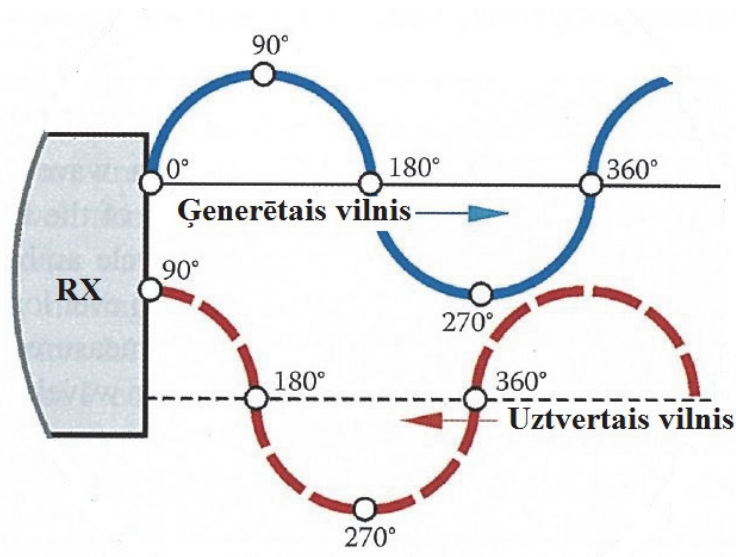
Kā tika minēts iepriekš, tad viena no galvenajām problēmām fāžu mērījumos ir ciklu nenoteiktības atrisināšana, jeb satelītu signāla pilnu viļņu skaita (pilnu viļņu skaits, kas bija starp satelītu un uztvērēju līdz mirklim, kad uztvērējs uzsāka signāla izsekošanu) aprēķināšana. Papildus šai problēmai ir arī tāda problēma, ka nezināms ir ne tikai pilnu viļņu skaits starp satelītu un uztvērēju, bet arī nepilnā viļņa daļas apjoms, šis skaits nav vesels, respektīvi, uztvertais signāls no satelīta un uztvērēja ģenerētais signāls nav vienādā fāzē. Citiem vārdiem sakot mirklī, kad uztvērējs uztver no satelīta pienākošo signālu tā fāze atšķiras no uztvērēja ģenerētā signāla fāzes jeb signāli ir nobīdīti fāzē. Šī fāzes nobīde raksturo nepilna viļņa daļas apjomu mērījumos [25].

Apskatīsim vienkāršotu, šāda nepilna viļņa daļas apjoma atrašanu mērījumos. Apskatot 2.1. att., redzams, ka punkti, kuri attēloti uz nesošā viļņa ir definēti ar leņķu vērtībām (0° , 90° , 180° , 270° un 360°). Ja divi viļņi sasniedz vienādu fāzes leņķa vērtību vienā laika momentā, tad var teikt, ka šādi viļņi atrodas fāzē, bet, ja viļņi sasniedz vienādu fāzes leņķi dažādos laika momentos, tad var teikt, ka šie viļņi ir nobīdīti fāzē. 2.1. att. redzams, ka uztvertais vilnis attiecībā pret ģenerēto vilni ir nobīdīts fāzē par 90° jeb par ceturto daļu no viļņa garuma. Salīdzinājumā ar iepriekšminēto pilno ciklu skaitu starp satelītu un uztvērēju šo lielumu ir iespējams noteikt tiešos mērījumos uztvērējā un tas nemainās mērījumu laikā. Tāpat uztvērējs var aprēķināt cik pilnus ciklus tas ir uztvēris no satelīta, kopš mērījumu sākšanas brīža līdz brīdim, kad mērījumi tiek pārtraukti, bet pilno ciklu skaits N starp satelītu un uztvērēju mirklī, kad mērījumi tika sākti ir nezināms lielums. Šis nezināmais skaits pilno ciklu mērījumu gaitā nemainās, ja vien nenotiek uztvērēja atslēgšanās no satelīta signāla [25]. Gadījumā, ja fāžu mērījumu procesā notiek signāla izsekošanas pārrāvums, kuru var izraisīt kādi vides objekti, tad fāzes mērījumi ir jāsāk no jauna. Šo parādību sauc par ciklu nobīdi (skat. 2.2. att.) tāpēc, ka pilno ciklu skaitam ir jauns sākuma lielums [33].

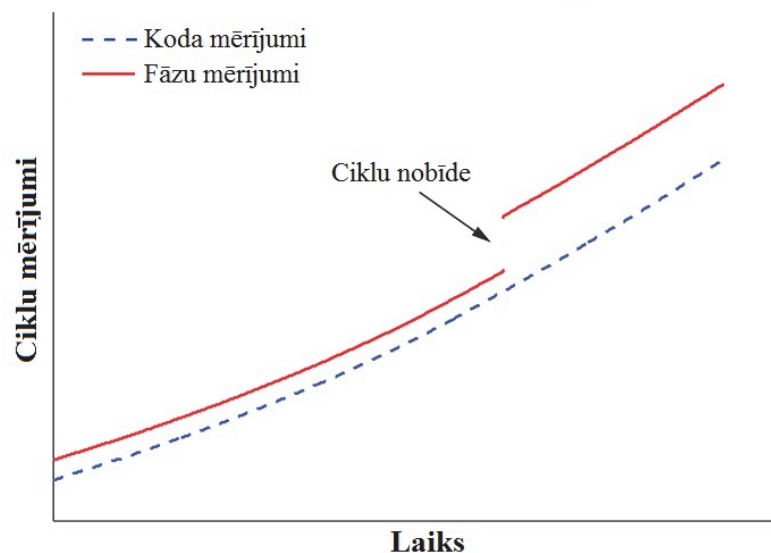
Kā redzams 2.2. att., tad ciklu nobīde ietekme tikai nesošās frekvences fāzes mērījumos, bet ne koda mērījums [7], [32], [35].

Ciklu nobīdei var būt trīs cēloņi [32]:

- šķēršļi satelīta signāla izplatībā (apbūve, koki, reljefs, u.c.);
- signāla/trokšņa attiecības līmenis (slikti jonosfēras apstākļi, daudzkanālu izplatīšanās, augsta uztvērēja dinamika vai zems satelīta pacēluma leņķis virs horizonta);
- kļūmes uztvērēja programmatūrā, kas izraisa nepareizu signāla apstrādi.



2.1. att. Ģenerētā un uztvertā viļņa nobīde fāzē



2.2. att. Ciklu nobīdes ilustrācija

Papildus minētajiem ciklu nobīdes cēloņiem jāpiemin arī kāds ļoti rets cēlonis, tas ir kļūdas satelītu oscilatoros.

Ja ir notikusi ciklu nobīde, tad ir divi rīcības scenāriji. Viens ir ciklu nobīdes novēršana, bet otrs ir veikt nezināmā nenoteiktības parametra fāžu mērījumos atkārtotu inicializāciju [35]. Ciklu nobīdes atklāšanai un novēršanai ir nepieciešams zināt nobīdes vietu un noteikt tās apjomu. Nobīdes atklāšanai tiek izmantoti pārbaudes lielumi. Ciklu nobīdes tiek labotas labojot visus turpmākos fāžu mērījumus konkrētajam satelītam un koriģējot tā nesējfrekvenci par fiksētu lielumu. Ciklu nobīdes apjoma noteikšana un fāzes korekcija parasti tiek saukta par ciklu nobīdes fiksāciju (*fixing*) [32].

2.1. Fāžu ciklu nenoteiktību noteikšana GNSS mērījumos

Runājot par nenoteiktību fāžu mērījumos jāatzīmē, ka tā ir atkarīga gan no satelīta, gan no uztvērēja. Fāzes ciklu nenoteiktības atrisināšana ir galvenā atslēga uz centimetru un milimetru precizitātes sasniegšanu. Konkrētu signāla cikla fāzi, izmantojot fāžu korelatorus, ir iespējams nomērīt ar ļoti augstu precizitāti, tomēr nav iespējams atšķirt dažādus ciklus savā starpā, ja netiek izmantota modulācija vai pseidoattālumu kodu mērījumi, jo signāls no satelīta tiek raidīts kā sinusoidāls vilnis. Tā kā reālā nenoteiktība sastāv no pilnu fāžu cikla skaita un fāzes aizturēm, kas rodas satelītā un uztvērējā, tad vienīgais veids, kā atrisināt ciklu nenoteiktību līdz veselam skaitlim ir izmantojot divkārsās fāžu mērījumu starpības, jo tajās tiek izslēgtas minētās fāžu aiztures satelīta un uztvērēja aparatūrās [68].

Pastāv vairāki paņēmieni kā noteikt nenoteiktības fāžu mērījumos, zemāk tiks apskatīti tikai daži izplatītākie no tiem.

2.1.1. Fāžu ciklu nenoteiktības noteikšana ar vienas frekvences fāžu mērījumiem

Gadījumā, kad ir pieejami mērījumi tikai ar vienu frekvenci, tad tie tiek modelēti izmantojot fāžu mērījumu vienādojumu (1.33) formā un tālāk apstrādāti izmantojot linearizētas izteiksmes. Atkarībā no tā kāds modelis tiek izmantots nezināmie lielumi (piem., koordinātas) tiek noteikti kopīgi ar fāžu ciklu nenoteiktību. Šādā gadījumā, nemodelētās kļūdas ietekmē visus nosakāmos lielumus, tas, savukārt izraisa nenoteiktības noteikšanu kā patiesu vērtību, nevis kā veselu skaitli. Starp kļūdu avotiem, kuri ietekmē nenoteiktību patieso vērtību tuvumu veselam skaitlim, minami tādi kā nepilnīgs fāžu mērījumu modelis, bāzes līnijas garums un orbītu neprecizitātes. Lai noteiktu nenoteiktības kā veselu skaitli, šajā gadījumā var tik izmantoti secīgās apstrādes algoritmi. Tādā gadījumā pēc sākotnējās apstrādes nenoteiktību lielums, kurš ir vistuvākais veselam skaitlim un kuram ir vismazākā standartnovirze tiek uzskatīts par visticamāko rezultātu. Tālākajā algoritma gaitā šī nobīde tiek uzskatīta par fiksētu un algoritms atkārtots samazinot nezināmo skaitu par vienu u.t.t. [32]. Taču jāatzīmē, ka šis paņemiens pie garākām bāzes līnijām var nenodrošināt korektu nenoteiktību noteikšanu, jo palielinoties bāzes līnijas garumam aktuāls kļūst jautājums par jonosfēras ietekmi uz mērījumu rezultātiem. Lielākos attālumos no bāzes stacijas roverim kļūst nepieciešami precīzāki jonosfēras modeļa parametri, kuru modelēšanas gaitā iespējamās neprecizitātes.

2.1.2. Fāžu ciklu nenoteiktības noteikšana ar divu frekvenču fāžu mērījumiem

Divu frekvenču fāžu mērījumu izmantošana būtiski uzlabo nenoteiktību noteikšanas procesu. Divu frekvenču izmantošana padara iespējamu frekvenču lineāro kombināciju izmantošanu aprēķinos un kā tas tika minēts iepriekš, tad, piemēram, formējot platās joslas signālu nenoteiktību noteikšana kļūst vienkāršāka, jo palielinās attālums starp nenoteiktībām, jo salīdzinājumā ar standarta viļņa garumiem platās joslas signāla viļņa garums, kā tika minēts iepriekš ir 86,2 cm.

Izmantojot (1.33) izteiksmi fāžu mērījumus iespējams pierakstīt sekojoši:

$$\Phi_1 = \frac{f_1}{c} \rho + f_1 \Delta \delta + N_1 - \frac{A}{cf_1} \quad (2.1)$$

$$\Phi_2 = \frac{f_2}{c} \rho + f_2 \Delta \delta + N_2 - \frac{A}{cf_2} \quad (2.2)$$

kur $\frac{A}{f^2} = \Delta^J(f)$ – jonosfēras refrakcija jeb radioviļņu izplatīšanās ātruma atšķirība izplatīšanās vidē un vakuumā.

Ņemot vērā, ka platās joslas signālam ir sekojoši raksturlielumi:

$$\Phi_{pj} = \Phi_1 - \Phi_2$$

$$f_{pj} = f_1 - f_2$$

$$N_{pj} = N_1 - N_2$$

Izteiksmes (2.1) un (2.2) starpība dod platās joslas signāla fāzi:

$$\Phi_{pj} = \frac{f_{pj}}{c} \rho + f_{pj} \Delta \delta + N_{pj} - \frac{A}{c} \left(\frac{1}{f_1} - \frac{1}{f_2} \right) \quad (2.3)$$

Lai no izteiksmes (2.3) aprēķinātu nenoteiktības mērāmajām fāzēm, tad sākumā nepieciešams izdalīt izteiksmi (2.1) ar f_1 vai (2.2) ar f_2 un no iegūtā rezultāta atņemt izteiksmes (2.3) dalījumu ar f_{pj} , kas dod sekojošu izteiksmi:

$$N_{1,2} = \Phi_{1,2} - (\Phi_{pj} - N_{pj}) \frac{f_{1,2}}{f_{pj}} + \frac{A}{cf_{1,2}} - \frac{A}{cf_{pj}} \left(1 - \frac{f_{1,2}}{f_{2,1}} \right) \quad (2.4)$$

Izteiksmē (2.4) esošo jonosfēras ietekmi var sagrupēt un izteikt sekojošā formā:

$$\frac{A}{c} \frac{f_2 + f_1}{f_1 f_2} \quad (2.5)$$

Tādā veidā, pārveidojot izteiksmi (2.4), fāžu nenoteiktību kādā no frekvencēm var noteikt, izmantojot platās joslas signālu sekojošā veidā:

$$N_{1,2} = \Phi_{1,2} - (\Phi_{pj} - N_{pj}) \frac{f_{1,2}}{f_{pj}} + \frac{A}{c} \frac{f_1 + f_2}{f_1 f_2} \quad (2.6)$$

Redzams, ka izteiksme (2.6) joprojām satur jonosfēras ietekmi, bet to, pie īsām bāzes līnijām pateicoties līdzīgajiem jonosfēras apstākļiem rovera un bāzes stacijas atrašanās vietās, iespējams izslēgt veicot fāžu starpību aprēķinus, kā tika aprakstīts iepriekš.

2.1.3. Fāžu ciklu nenoteiktības noteikšana ar divu frekvenču fāžu un kodu mērījumiem

Kā iepriekš jau tika pieminēts, tad par visneprognozējamāko lielumu var uzskatīt jonosfēras ietekmi uz mērījumiem, jo tās ietekme pieaug, pieaugot bāzes līnijas garumam starp roveri un bāzes staciju. Šo negatīvo ietekmi ir iespējams izslēgt kombinējot fāžu un kodu mērījumus [32]. Šādiem mērījumiem, pieņemot $k_j = \frac{A}{c}$ varam izveidot sekojošus fāžu un kodu mērījumu vienādojumus:

$$\Phi_1 = \frac{\rho}{c} f_1 - \frac{k_j}{f_1} + N_1 + f_1 \Delta\delta \quad (2.7)$$

$$\Phi_2 = \frac{\rho}{c} f_2 - \frac{k_j}{f_2} + N_2 + f_2 \Delta\delta \quad (2.8)$$

$$R_1 = \frac{\rho}{c} f_1 - \frac{k_j}{f_1} + f_1 \Delta\delta \quad (2.9)$$

$$R_2 = \frac{\rho}{c} f_2 - \frac{k_j}{f_2} + f_2 \Delta\delta \quad (2.10)$$

Izteiksmes (2.7 – 2.10) veido vienādojumu sistēmu, kura sastāv no četriem vienādojumiem un satur četrus nezināmos lielumus $((\frac{\rho}{c} + \Delta\delta), k, N_1 \text{ un } N_2)$ katrai epohai. Šos nezināmos lielumus iespējams izteikt tieši kā mērāmo lielumu funkciju invertējot vienādojumus (2.7–2.10) [32].

Pakāpeniskajā nenoteiktību aprēķinu algoritmā tiek izmantotas platās joslas nenoteiktības. Algoritma sākumā tiek formētas starpības starp atbilstošām frekvenču un kodu fāzēm:

$$\begin{aligned}\Phi_1 - R_1 \\ \Phi_2 - R_2\end{aligned}\tag{2.11}$$

Izteiksmes (2.11) ļauj izslēgt ģeometriskā attāluma un pulksteņu kļūdas. Nākošajā solī tiek formēta izteiksmju (2.11) starpība, kas dod sekojošu rezultātu:

$$\Phi_{pj} - R_1 + R_2 = 2k_j \frac{f_1 - f_2}{f_1 f_2} + N_{pj}\tag{2.12}$$

Nākošajā solī kļūst iespējams noteikt jonosfēras ietekmi raksturojošo locekli. Lai to izdarītu sākumā izteiksme (2.9) jāizdala ar f_1 un (2.10) ar f_2 . Tālāk iegūtās izteiksmes ir jāatņem viena no otras un jāizdala ar $f_1 + f_2$, kas dod sekojošu rezultātu:

$$\frac{f_2 R_1 - f_1 R_2}{f_1 + f_2} = -k_j \frac{f_1 - f_2}{f_1 f_2}\tag{2.13}$$

Tagad, lai izslēgtu jonosfēras ietekmi k , ievietojot izteiksmi (2.13) izteiksmē (2.12) iegūstam sekojošu izteiksmi:

$$\Phi_{pj} - R_1 + R_2 = -2 \frac{f_2 R_1 - f_1 R_2}{f_1 + f_2} + N_{pj}\tag{2.14}$$

Pārveidojot izteiksmi (2.14) iegūstam sekojošu rezultātu:

$$N_{pj} = \Phi_{pj} - \frac{f_1 - f_2}{f_1 + f_2} (R_1 + R_2)\tag{2.15}$$

Izmantojot izteiksmi (2.15) ir iespējams noteikti platās joslas nenoteiktību katrai epohai, katrā mērījumu veikšanas punktā, piedevām tā ir neatkarīga no bāzes līnijas garuma un jonosfēras ietekmes [32]. Jāatzīmē tas, ka, lai arī visas modelētās sistemātiskās ietekmes tiek izslēgtas daudzkanālu izplatīšanās ietekme saglabājas un tās ietekme uz fāzu un kodu mērījumiem ir atšķirīga. Daudzkanālu izplatīšanās var ietekmēt platās joslas nenoteiktības par vairākiem cikliem no epohas uz epohu, bet to iespējams novērst aprēķinot mērījumu vidējo vērtību ilgākam laika periodam [32].

Pēc platās joslas nenoteiktību noteikšanas izteiksmes (2.6) izmantošana noved pie fāžu pozicionēšanās vienādojumiem, kurus ietekmē jonosfēra. Lai iegūtu no jonosfēras neatkarīgus

vienādojumus, kuri ļauj noteikt standarta frekvenču joslas nenoteiktības jāveic sekojoša procedūra. Sākumā jā sareizina izteiksme (2.7) ar f_1 un izteiksme (2.8) ar f_2 . Iegūtās izteiksmes tad jāatņem savā starpā, kas, pielietojot frekvenču lineāro kombināciju $f_{pj} = f_1 - f_2$ ļauj iegūt sekojošu rezultātu, kurā ir izslēgta jonosfēras ietekme:

$$N_1 = \frac{f_1}{f_{pj}} \Phi_1 - \frac{f_2}{f_{pj}} (\Phi_2 + N_{pj}) - \left(\frac{\rho}{c} + \Delta\delta \right) (f_1 + f_2) \quad (2.16)$$

2.1.4. Fāžu ciklu nenoteiktības noteikšana ar daudzfrekvenču fāžu un kodu mērījumiem

Tā kā modernizētie satelīti raida signālus uz papildus frekvencēm, tad tas nodrošina iespēju mērījumos izmantot vēl vairākas frekvences, piemēram, trīs frekvenču pieejamības gadījumā izteiksmju (2.7 – 2.10) sistēma var tikt papildināta ar divām sekojošām papildus izteiksmēm:

$$\Phi_3 = \frac{\rho}{c} f_3 - \frac{k_j}{f_3} + N_3 + f_3 \Delta\delta \quad (2.17)$$

$$R_3 = \frac{\rho}{c} f_3 - \frac{k_j}{f_3} + f_3 \Delta\delta \quad (2.18)$$

Šo divu papildus izteiksmju ieviešana, kopā veido vienādojumu sistēmu, kura sastāv no pieciem nezināmajiem un sešiem vienādojumiem. Tā kā vienādojumu sistēmā ir redundance to iespējams atrisināt, izmantojot mazāko kvadrātu metodi, tomēr [2], [53] norāda uz to, ka iegūstamais rezultāts, salīdzinājumā ar platas joslas signāla izmantošanu nespēj sniegt apmierinošu rezultātu [23].

Ievērojot frekvenču lineārās sakarības izteiksmi (2.15), gadījumam, kad tiek izmantotas frekvences f_1 un f_3 varam pierakstīt sekojošu izteiksmi:

$$N_{pj(1,3)} = \Phi_{pj(1,3)} - \frac{f_1 - f_3}{f_1 + f_3} (R_1 + R_3) \quad (2.19)$$

Gadījumam, kad $f_3 = 1176,45$, iegūstam, ka $\lambda_{pj(1,3)} = 75,2$ cm.

Ievērojot, ka no plato joslu signālu sakarībām izriet:

$$N_2 = N_1 - N_{pj_{21}}$$

$$N_3 = N_1 - N_{pj_{31}} \quad (2.20)$$

Pārveidojot izteiksmes (2.7 – 2.10) un (2.17 – 2.18) varam pierakstīt pilnu vienādojumu sistēmu sekojoši:

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= \frac{\rho}{c} f_1 - \frac{k_j}{f_1} + N_1 + f_1 \Delta\delta \\ \Phi_2 + N_{pj_{21}} &= \frac{\rho}{c} f_2 - \frac{k_j}{f_2} + N_1 + f_2 \Delta\delta \\ \Phi_3 + N_{pj_{31}} &= \frac{\rho}{c} f_3 - \frac{k_j}{f_3} + N_1 + f_3 \Delta\delta \\ R_1 &= \frac{\rho}{c} f_1 - \frac{k_j}{f_1} + f_1 \Delta\delta \\ R_2 &= \frac{\rho}{c} f_2 - \frac{k_j}{f_2} + f_2 \Delta\delta \\ R_3 &= \frac{\rho}{c} f_3 - \frac{k_j}{f_3} + f_3 \Delta\delta \end{aligned} \quad (2.21)$$

Kā redzams, tad vienādojumu sistēma (2.21) satur sešus vienādojumus ar tikai trīs nezināmajiem, [73] ieteikts kodu vienādojumus, kuri ir mazāk precīzi, neņemt vērā, jo to devums mazāko kvadrātu metodes risinājumā ir nenozīmīgs un atstāt tikai fāžu vienādojumus, kas tādejādi noved pie vienādojumu sistēmas, kura satur trīs vienādojumus ar trīs nezināmajiem un joprojām ir atrisināma.

Ņemot vērā to kā attīstās GNSS, iespējams runāt arī par vairāku frekvenču izmantošanu mērījumos. Kā galvenos ieguvumus no daudzu frekvenču izmantošanas var minēt [23]:

- kļūst iespējams noteikt nenoteiktības pie garām bāzes līnijām;
- kļūst iespējams panākt „fix” risinājumu īsākā laikā;
- kļūst iespējams sasniegt risinājumu ar augstu ticamības pakāpi;
- palielinās iespēja veikt mērījumus apgrūtinātos apstākļos.

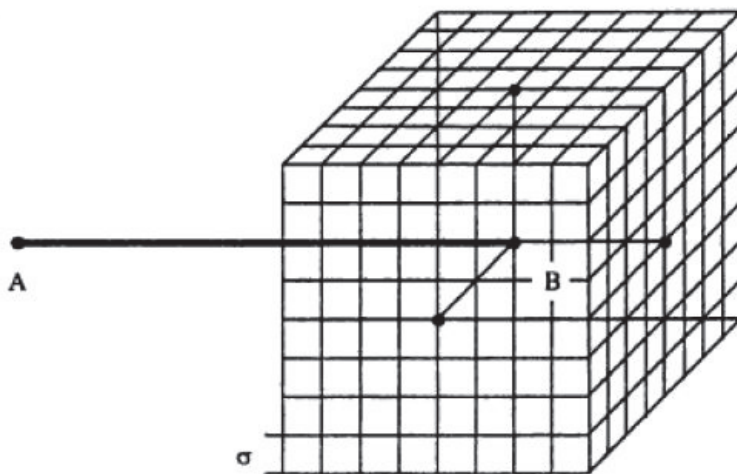
2.1.5. Fāžu ciklu nenoteiktības noteikšana, izmantojot nenoteiktības funkciju

Pastāv daudzas nenoteiktību noteikšanas un meklēšanas metodes un pat to kombinācijas un joprojām tiek piedāvāti jauni risinājumi, lai atrastu iespējami labāko metodi [32], [33], [58]. Uz doto brīdi populārākā, teorētiski un praktiski izmantotā metode ir LAMBDA (*Least-squares*

ambiguity decorrelation adjustment) jeb nenoteiktību noteikšanas metode izmantojot mazāko kvadrātu dekorelāciju [23], [29]. LAMBDA ir vispārīga metode, kurai ir nepieciešama tikai kovariācijas apakšmatrica un aptuvens jeb „float” nenoteiktību risinājums. LAMBDA metode ir viegli pielietojama divu frekvenču mērījumu gadījumā vai pat mērījumiem, kuros tiek izmantotas vairākas frekvences. Vispārīgi runājot LAMBDA metode ir pielietojama jebkurā veselu skaitļu parametru noteikšanas procesā, pielietojot mazāko kvadrātu metodi, neatkarīgi no tā, kāda ir šo parametru fiziskā nozīme [23], [29].

Viena no interesantākajām, lai arī diezgan novecojusi, nenoteiktību noteikšanas metodēm ir nenoteiktību funkcijas metode, kas ir interesanta ar to, ka to neietekmē ciklu nobīdes salīdzinājumā ar citām metodēm, kurās pirms nenoteiktību noteikšanas ir nepieciešams izlabot ciklu nobīdes [31], [32], [33].

Nenoteiktības funkcijas metodes pamatā ir nenoteiktību kuba izmantošana (skat. 2.3 att.) [23], [32]. Šajā situācijā A (bāzes stacijas) pozīcija tiek uzskatīta par zināmu, bet B (rovera) pozīcijas tuvinātam rezultātam un standarta novirzes iegūšanai tiek izmantota fāžu trīskāršā starpība. Tālākā gaitā iegūtā aptuvenā pozīcija tiek pieņemta par centru nenoteiktību kubam ar izmēriem $8\sigma \times 8\sigma \times 8\sigma$, respektīvi $\pm 4\sigma$ katrā virzienā katrai koordinātai un sadala to vienmērīga izmēra režģī.



2.3. att. Nenoteiktību kubs

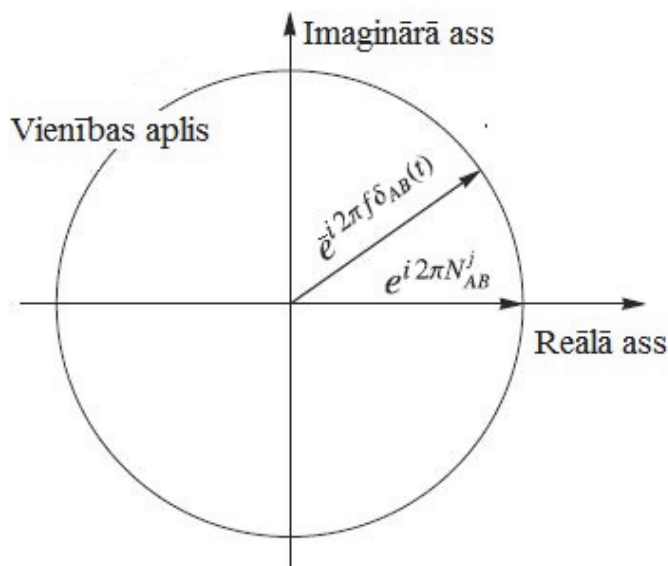
2.3. att. parādītais B punkts ir kuba centrs, kura vērtība, kā minēts, iegūta izmantojot trīskāršo fāžu starpību. Katrs no kuba režģa punktiem tiek uzskatīts par potenciāli pareizu risinājumu. Secīgi, katrs no potenciālajiem risinājumiem tiek ievietots novērojumu vienādojumā, tad tiek veikti nenoteiktību aprēķini, uzskatot aptuveno iegūto pozīciju par

fiksētu. Tālāk, kad visi potenciālie risinājumi ir izskatīti, tiek izvēlēti risinājumi, kuri ir pēc iespējas tuvāki veseliem skaitļiem. Nenoteiktības tiek nofiksētas pie šīm veselo skaitļu vērtībām un galējā pozīcija tiek aprēķināta, kura galvenokārt ir mazliet nobīdīta attiecībā pret kādu no kuba režģa punktiem [32].

Kā tika minēts, tad nenoteiktību funkcijas galvenā īpatnība ir tajā, ka to neietekmē ciklu nobīdes. Nenoteiktību funkcijas pamatā ir vienkāršās fāžu starpības vienādojuma izmantošana, lai formētu eksponenciālu kompleksu funkciju. Metodes būtība (nenoteiktību izslēgšana) slēpjas tajā, lai sinusa un kosinusa funkcijai izmantot argumentu $2\pi N_{AB}^j$, jo kā jau tika minēts iepriekš, tad N_{AB}^j ir vesels skaitlis, lai to panāktu vienkāršās fāžu starpības vienādojums (1.36) tiek reizināts ar 2π un ievietots kompleksajā plaknē, kur imaginārā vienība ir $i = \sqrt{-1}$ [23], [29], [32]. Šādu manipulāciju rezultātā iegūstam:

$$e^{i2\pi\left\{\Phi_{AB}^j(t) - \frac{\rho_{AB}^j(t)}{\lambda}\right\}} = e^{i2\pi\{N_{AB}^j(t) - f\delta_{AB}(t)\}} \quad (2.22)$$

Izteiksmes (2.22) labo pusi iespējams tālāk pārveidot un atspoguļot kompleksajā plaknē, kā parādīts 2.4. att.



2.4. att. Vektora attēlojums kompleksajā plaknē

Ņemot vērā, ka sakarību (2.23) iespējams attēlot kā vienības vektoru ar vērtībām $\cos\alpha$ un $\sin\alpha$:

$$e^{i\alpha} = \cos\alpha + i\sin\alpha \quad (2.23)$$

Pielietojot sakarību (2.23) izteiksmes (2.22) labās puses locekļiem un ņemot vērā, ka nenoteiktība N_{AB}^j ir vesels skaitlis vienai epohai un viena satelīta gadījumam izteiksmi (2.22) varam pārrakstīt sekojoši:

$$e^{i2\pi\left\{\Phi_{AB}^j(t) - \frac{\rho_{AB}^j(t)}{\lambda}\right\}} = e^{-i2\pi f \delta_{AB}(t)} \quad (2.24)$$

Gadījumam, kurā ir iesaistīti vairāki satelīti (n_j) vienā epohā ir jāveic šo satelītu summēšana, kas izteiksmi (2.24) ļauj pierakstīt sekojošā formā:

$$\sum_{j=1}^{n_j} e^{i2\pi\left\{\Phi_{AB}^j(t) - \frac{\rho_{AB}^j(t)}{\lambda}\right\}} = n_j e^{-i2\pi f \delta_{AB}(t)} \quad (2.25)$$

Savukārt, gadījumā, kad tiek izmantotas vairākas epohas, tad jāņem vērā tas, ka pulksteņa kļūdas ir laikā mainīgas. Lai izslēgtu pulksteņa kļūdas, atsaucoties uz attēlu 2.4. redzams, ka $e^{-i2\pi f \delta_{AB}(t)}$ ir vienības vektors, tāpēc pielietojot $\|e^{-i2\pi f \delta_{AB}(t)}\| = 1$ izteiksmi (2.25) varam pierakstīt sekojoši:

$$\left\| \sum_{j=1}^{n_j} e^{i2\pi\left\{\Phi_{AB}^j(t) - \frac{\rho_{AB}^j(t)}{\lambda}\right\}} \right\| = n_j \quad (2.26)$$

Reālam gadījumam, kurā tiek izmantoti vairāki satelīti un vairākas epohas izteiksme (2.26) jāsummē visām izmantojamām epohām, tādejādi iegūstot sekojošu izteiksmi:

$$\sum_{e=1}^{n_e} \left\| \sum_{j=1}^{n_j} e^{i2\pi\left\{\Phi_{AB}^j(t) - \frac{\rho_{AB}^j(t)}{\lambda}\right\}} \right\| = n_e n_j \quad (2.27)$$

Izteiksmes (2.27) kreisā puse tad arī ir nenoteiktību funkcija, kuras nezināmie ir rovera koordinātas. Teorētiskam gadījumam, kad mērījums neietekmē nedz mērījumu, nedz modeļa kļūdas un punktu A un B koordinātas ir precīzas, tad kreisā puse dos rezultātu, kas ir vienāds ar izmantoto satelītu skaitu, respektīvi, ja tiek izmantoti 5 satelīti, tad šim rezultātam būtu jābūt 5. Reālajā situācijā to nav iespējams sasniegt, jo nav iespējams pilnībā izslēgt augstāk minētās kļūdas, tāpēc par patieso rezultātu jāuzskata tas, kurš izteiksmei (2.27) ļauj sasniegt maksimumu jeb [23], [29], [32], [33]:

$$\max_B \left(\sum_{e=1}^{n_e} \left\| \sum_{j=1}^{n_j} e^{i2\pi \left\{ \phi_{AB}^j(t) - \frac{\rho_{AB}^j(t)}{\lambda} \right\}} \right\| \right) \quad (2.28)$$

Atgriežoties pie metodes apraksta sākumā minētā, ka to neietekmē ciklu nobīdes, to lieliski ilustrē izteiksme (2.23), kuru iespējams pierakstīt sekojoši:

$$e^{i2\pi N_{AB}^j} = \cos(2\pi N_{AB}^j) + i \sin(2\pi N_{AB}^j) = 1 + i \cdot 0 \quad (2.29)$$

Izteiksme (2.29) saglabās vienības vektora raksturu arī tad, ja nenoteiktības tajā mainīsies par jebkādu veselu skaitu un tādejādi neietekmēs nenoteiktību funkcijas metodes risinājumu [23], [32].

2.2. Fāžu ciklu nobīdes GNSS mērījumos

Mērīšanas gaitā uztvērēja ciklu skaitītājs palielina vērtību par vienu vienību katru reizi, kad signāla fāze mainās no 2π uz 0. Ciklu nobīde ir piepešs lēciens novērotajā signāla fāzē par veselu skaitu ciklu, taču šī nobīde neietekmē nepilnās viļņa daļas apjomu. Ciklu nobīde var būt gan par vienu, gan neskaitāmi daudziem cikliem [23], [29], [32], [33].

Gadījumā, ja mērījumi tiek veikti vienā punktā, tad pārbaudes lielumus veido neapstrādātas fāzes, fāžu kombinācijas, fāžu un kodu kombinācijas vai fāžu un Doplera frekvenču kombinācijas. Gadījumos, kad mērījumi tiek veikti divos punktos pārbaudes lielumus veido vienkāršās, divkāršās un trīskāršās fāžu starpības. Neapstrādātu fāžu gadījumā fāžu novērojumu modeļi satur no laika atkarīgus locekļus, kuri var traucēt ciklu nobīžu konstatēšanai.

Divu frekvenču fāžu kombinācijas modeļi tiek veidoti par pamatu ņemot mērījumus vienā punktā ar vienu satelītu vienā epohā, tādejādi locekļi, kuri ir atkarīgi no laika un tie, kuri nav atkarīgi no frekvences tiek izslēgti. Manipulējot ar frekvenču un viļņa garumu sakarībām tādā veidā iespējams iegūt divu frekvenču fāžu sakarību sekojošā formā [23]:

$$\Phi_1 - \frac{f_1}{f_2} \Phi_2 = N_1 - \frac{f_1}{f_2} N_2 - \frac{A(t)}{\lambda_1 f_1^2} \left(1 - \frac{f_1^2}{f_2^2}\right) \quad (2.30)$$

Izteiksmē (2.30), kuru mēdz dēvēt arī par jonosfēras starpību vienīgais, no laika atkarīgais loceklis, ir jonosfēras refrakcija A . Šajā izteiksmē pēdējais loceklis labajā pusē jonosfēras ietekmi uz divu fāžu kombināciju ļauj samazināt par 65 % salīdzinājumā ar neapstrādātām fāzēm [22], [32].

Ja šis pārbaudes lielums, normālos apstākļos pie mazām bāzes līnijām, neatklāj netipiski lielas jonosfēras starpības izmaiņas, tad var teikt, ka ciklu nobīde nav notikusi. Tomēr šajā gadījumā saglabājas problēma noteikt vai ciklu nobīde ir notikusi vienai, otrai vai abām fāzēm.

Pārbaudes lielumus iespējams iegūt arī veidojot fāžu un kodu kombinācijas. Pārbaudes lielums tiek iegūts formējot fāžu mērījumu un kodu mērījumu modeļu starpību, tādejādi iegūstot sekojošu izteiksmi:

$$\lambda \Phi_r^s(t) - R_r^s(t) = \lambda N_r^s - 2\Delta^J(t) \quad (2.31)$$

Izteiksmes (2.31) labajā pusē vienīgais no laika atkarīgais loceklis ir jonosfēras refrakcija pārējie tiek izslēgti fāžu un kodu modeļu starpības formēšanas procesā [23]. Lai tiktu galā ar jonosfēras refrakciju, kura ir atkarīga no laika, tā ir jāmodulē vai arī nav jāņem vērā, ja tiek izmantotas tuvu esošas epohas vai arī divkāršās fāžu starpības [32]. Taču šī pārbaudes lieluma mīnuss ir tā jutība pret trokšņu līmeni, kas var ietekmēt mērījumus pat par pieciem cikliem. Tas galvenokārt ir dēļ trokšņiem kodu mērījumos un tikai nelielā mērā dēļ jonosfēras ietekmes. Kodu mērījums, salīdzinājumā ar fāžu mērījumiem, trokšņi ietekmē lielākā mērā, jo mērījumu precizitāte un daudzkanālu izplatīšanās ietekme ir proporcionāla viļņa garumam. Mūsdienās aparatūra ir spējīga veikt mērījumus ar precizitāti, kura sastāda vienu tūkstošo daļu no viļņa garuma tādejādi nodrošinot to, ka fāžu un kodu kombinēšana ir lielisks pārbaudes lielums ciklu nobīžu atklāšanai [23].

Kā pārbaudes lielums var tikt izmantots arī salīdzinājums starp izmērītajām fāzēm un fāžu starpībām, kuras iegūtas izmantojot Doplera integrēšanu, kurai piemīt imunitāte pret ciklu

nobīdēm [23], [33]. Matemātiski, ciklu nobīdes atklāšanu uz darba frekvences f , iespējams pierakstīt sekojošā veidā:

$$\Delta_t N_f = \Delta_t \Phi_f - \int_{t_{f-1}}^{t_f} D_f dt + \varepsilon, \quad (2.32)$$

kur $f = 1, 2, 5$,
 Δ_t – laika starpība,
 D_f – Doplera novērojums frekvencei f .

2.2.1. Fāžu ciklu nobīdes atklāšana un izlabošana

Tiklīdz tiek konstatēta fāžu ciklu nobīde (nobīde) ir divi rīcības scenāriji:

- izlabot fāžu ciklu nobīdi;
- ieviest jaunu nenoteiktības parametru signālu novērojumos;

Lai būtu iespējams izlabot nobīdes ir precīzi jāzina tās vieta un lielums, jo katra neprecīza nobīdes labošana ietekmēs visus turpmākos novērojumus, tāpēc jauna nenoteiktību parametra ieviešana ir drošāka metode [33].

Viena no metodēm kā atklāt ciklu nobīdi ir starpību shēma, kuras principu atspoguļo 2.5. att.

t_i	$y(t_i)$	y^1	y^2	y^3	y^4
t_1	0				
		0			
t_2	0		0		
		0		ε	
t_3	0		ε		-3ε
		ε		-2ε	
t_4	ε		$-\varepsilon$		3ε
		0		ε	
t_5	ε		0		$-\varepsilon$
		0		0	
t_6	ε		0		
		0			
t_7	ε				

2.5. att. Starpību shēma

Šajā variantā $y(t_i)$, $i = 1, 2, \dots, 7$ ir laukrinda signālam, kurš satur lēcieni par vērtību ε epohā t_4 . y^1, y^2, y^3, y^4 - pirmās, otrās, trešās un ceturtais kārtas starpības. Šīs metodes svarīga īpatnība ir tajā, ka lēcieni tiek pastiprināti katrā nākošajā, augstākas kārtas starpībā un tādejādi kļūst vieglāk atklājams. Iemesls, kāpēc tas tā notiek ir tajā, ka starpības tiek formētas, izmantojot starpību filtrus, kuri pēc būtības ir augstfrekvenču filtri, kuri slāpē zemās frekvences un izslēdz konstantos lielumus, bet augšējo frekvenču lielumi tiek pastiprināti. Piemēram, ja signāls $y(t_i)$ tiek aizvietots ar fāžu novērojumu un pieņem, ka ε ir ciklu nobīde kļūst acīmredzama starpību shēmas efektivitāte [23], [32].

Viena no ciklu nobīdes lieluma noteikšanas metodēm ir interpolācijas metode. Šīs metodes būtība ir veikt pārbaudes lielumu līkņu, pirms un pēc ciklu nobīdes, salīdzināšanu. Nobīde starp tām atspoguļo ciklu nobīdes lielumu. To var veikt, izmantojot lineāro regresiju vai mazāko kvadrātu metodi [23], [32].

Cita iespēja ir izmantot Kalmana filtrāciju. Tās pamātā ir prognozēt pārbaudes lielumu vērtību nākamajai epohai, izmantojot vērtības, kuras iegūtas no iepriekšējās epohas, respektīvi, pārbaudes lielumu vērtība epohai $t+1$ tiek prognozēta izmantojot vērtības no epohas $t-1$. Nākošajā solī prognozētā vērtība tiek salīdzināta ar novēroto vērtību, lai konstatētu ciklu nobīdi [23], [32].

Kad ciklu nobīde ir atklāta, tad pārbaudes lielumi var tikt koriģēti, izmantojot iegūtos datus. Atklātās ciklu nobīdes vērtības iekļaušana vienas fāzes novērojumos nav viennozīmīga gadījumam, ja kā pārbaudes lielums tiek izmantota fāžu kombinācija, izņēmums var būt jonosfēru starpība. Pie noteiktas apstākļu sakritības ir iespējama īpaša šī pārbaudes lieluma nodalīšana. Pieņemot, ka notikušas ciklu nobīdes izraisītas, fāžu ciklu nenoteiktību izmaiņas ΔN_1 un ΔN_2 , tad atbilstoša nobīde jonosfēru starpību modelī var tikt pierakstīta sekojoši [23]:

$$\Delta N = \Delta N_1 - \frac{f_1}{f_2} \Delta N_2 \quad (2.33)$$

Tā kā izteiksme (2.33) satur divus nezināmos, tai nav viennozīmīga atrisinājuma, to var pierādīt meklējot risinājumu, kurš dod nulli. Lai nodrošinātu tādu risinājumu ir jāizpildās sekojošam nosacījumam, ievērojot, ka $\frac{f_1}{f_2} = \frac{154}{120} = \frac{77}{60}$:

$$\Delta N_1 = \frac{f_1}{f_2} \Delta N_2 = \frac{154}{120} \Delta N_2 = \frac{77}{60} \Delta N_2 \quad (2.34)$$

Lai arī izteiksme (2.34) norāda uz to, ka tai nav viennozīmīga risinājuma, tomēr risinājums kļūst viennozīmīgs, ja $\Delta N_1 < 77$ [23], [32]. Jāpiemin, ka aprakstītajā situācijā netiek ņemtas vērā mērījumu kļūdas. Tā kā mūsdienu aparatūra ir spējīga mērīt signāla fāzi ar precizitāti, kura ir 1 % no viļņa garuma, tad fāžu mērījumu kļūdas sastāvdaļa var tikt izteikta sekojoši:

$$\sigma_\phi = \pm 0,01(\text{cikli}) \quad (2.35)$$

Tā kā modelis (2.35) tiek piemērots abām frekvencēm, tas dod iespēju izslēgt no mērījumiem kļūdas, kuras ir atkarīgas no frekvences, tādas kā daudzkanālu izplatīšanās [23], [32]. ΔN būtībā tiek iegūta no divām secīgām jonosfēru starpībām, tāpēc:

$$\Delta N = \phi_1(t + \Delta t) - \frac{f_1}{f_2} \phi_2(t + \Delta t) - \left[\phi_1(t) - \frac{f_1}{f_2} \phi_2(t) \right] \quad (2.36)$$

Pielietojot izteiksmei (2.36) kļūdu izplatīšanās likumu iegūstam, ka:

$$\sigma_{\Delta N} = \pm 2,3\sigma_\phi = \pm 0,023(\text{cikli}) \quad (2.37)$$

Tādā veidā 3σ kļūda izteiksmei (2.37) dod aptuveno vērtību $\pm 0,07$ cikli, kas savukārt var tikt interpretēta kā ciklu nobīdes izšķirtspēja. Tas liek secināt, ka aprēķinot divas ΔN vērtības izmantojot izteiksmi (2.33) un brīvi izvēlētas veselu skaitļu vērtības lielumiem ΔN_1 un ΔN_2 to starpībai jāpastāda vismaz 0,07cikli, lai būtu iespējama viennozīmīga to atšķiršana [23], [32].

Divu frekvenču fāžu kombinācijai jeb jonosfēras starpībai, pamatojoties uz mērījumu trokšņu pieņēmumu izteiksmē (2.35) piemīt spēja viennozīmīgi nošķirt ciklu nobīdes, tikai līdz ± 4 cikliem. Gadījumos, kad ciklu nobīde ir lielāka jāizvēlas citas metodes, kuras novērš nepareizu lēmumu pieņemšanu neviennozīmīgās situācijās [23], [32].

Labs risinājums ciklu nobīdes izlabošanai ir GNSS datu un inerciālo navigācijas sistēmu (INS) datu kombinēšana, jo pat vidējas precizitātes un lētas INS iekārtas spēj uzlabot rezultātus līdz noteiktām robežām. Tomēr, ja nepieciešams, lai INS iekārta kompensētu GNSS signālu pārrāvumus, tad pieaugot laikam INS nodrošinātā precizitāte ievērojami samazināsies. Tādējādi izmantot INS autonomā režīmā iespējams no dažām sekundēm līdz dažām minūtēm [23].

3. AUGSTAS PRECIZITĀTES LOKĀLĀS DIFERENCIĀLĀS GNSS ATBALSTA SISTĒMAS IZVEIDE, PĀRBAUDE UN ATTĪSTĪBA

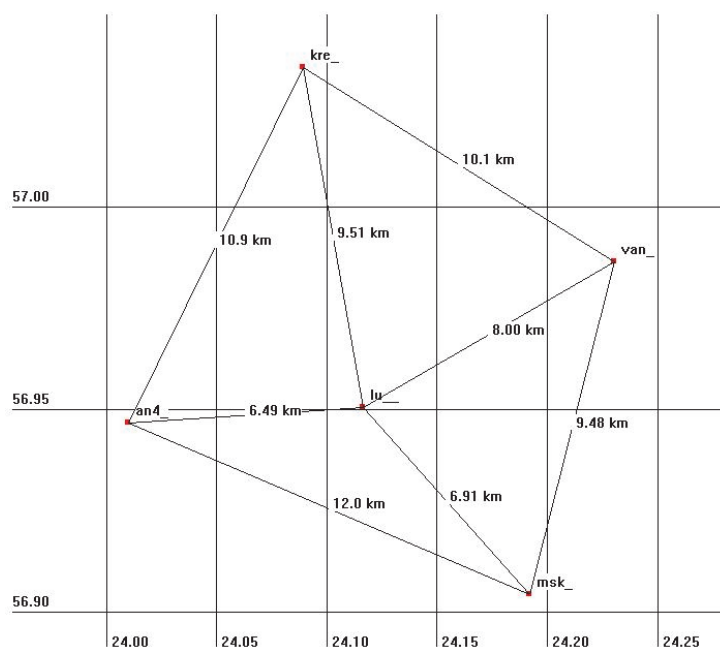
Kā tika minēts iepriekš, tad, lai būtu iespējams veikt augstas precizitātes mērījumus, izmantojot diferenciālās pozicionēšanās metodi, nepieciešams izveidot atbalsta bāzes staciju vai šādu atbalsta staciju tīklu, attiecībā pret kuru lietotājam būtu iespējama savas pozīcijas koriģēšana. Viena no šādām sistēmām Latvijā, kuras izveidē nozīmīgu un tehniskajā uzturēšanā galveno darbu veic autors ir *EUPOS®-RIGA*. Veidojot šāda tipa atbalsta tīklus ir nepieciešama rūpīga bāzes staciju atrašanās vietas izvēle. Bāzes stacijas atrašanās vietas izvēlē ieteicams ņemt vērā vairākus faktorus, piemēram:

- redzamības leņķa maksimizēšana – bāzes stacijas vēlams uzstādīt tā, lai horizonts būtu pēc iespējas atklātāks;
- jā rūpējas, lai bāzes stacijas atrašanās vieta būtu pēc iespējas mazāk pakļauta apstākļiem, kas var izraisīt daudzkanālu izplatīšanās problēmu – tuvumā nav lielāku vai mazāku vides vai cilvēka radītu šķēršļu no kuriem būtu iespējama satelītu signālu atstarošanās;
- jāvairās no elektromagnētiskā starojumu emitējošu iekārtu tuvuma – tās var radīt radio trokšņu interferenci ar GNSS signāliem, kuri, ņemot vērā to augstās frekvences ir lielā mērā pakļauti šim negatīvajam efektam;
- svarīgi, lai bāzes stacijas, ja tās tiek izvietotas uz ēku jumtiem tiktu izvietotas uz apdzīvojamām ēkām ar apkuri ziemas sezonā – konstanta ēkas iekšējā temperatūra minimizē (tik pat kā novērs) gaisa temperatūras ietekmi uz ēkas nesošajām konstrukcijām, tādējādi novēršot ēkas „elpošanas” izraisīto bāzes stacijas fluktuāciju gan augstumā, gan plaknē.

Optimālas bāzes stacijas atrašanās vietas izvēle ir tikai viens no daudzajiem soļiem precīzas, uzticamas un stabilas GNSS atbalsta sistēmas izveides procesā. Kā viens no pirmajiem soļiem, protams, ir atbilstošas un funkcionāli pilnīgas bāzes staciju aparatūras izvēle un iegāde. Laikā (2006. gads), kad tika veidota *EUPOS®-RIGA* sistēma, tirgū labākā pieejamā aparatūra bija *JAVAD* ražotā, kas uz citu ražotāju aparatūras fona izcēlās ar to, ka bija spējīga uztvert gan GPS gan GLONASS satelītu raidītos signālus. Tā kā pozīcijas noteikšanas precizitāte ir atkarīga no mērījumos iekļauto satelītu skaita, tad, iespēja uztvert vairākus satelītus bija ļoti nozīmīga aparatūras izvēlē, jo īpaši tāpēc, ka atbalsta sistēmas darbības zona tika plānota Rīgas pilsētai [11], kuras teritorijā ir daudz šauru ielu ar augstām ēkām gar ielu malām, kas ievērojami samazina redzamo satelītu skaitu lietotāja atrašanās vietā.

Tā kā *EUPOS®-RIGA* tika veidota atbilstoši starptautiskiem standartiem, tad viena no galvenajām prasībām, ko *EUPOS®* izvirza atbalsta sistēmām ir tāda, ka to bāzes staciju antenām ir nepieciešams veikt antenu absolūto kalibrēšanu [9]. Kalibrēšanas procesā tiek veikta bāzes staciju uztverošo antenu fāzes centra variāciju noteikšana ar precizitāti, kas ir augstāka par 1 mm [4].

Lai nodrošinātu pēc iespējas augstāku uzticamību bāzes staciju ģenerētajām korekcijām, jo īpaši tas attiecas uz jonosfēras ietekmi, un ņemot vērā, ka *EUPOS®-RIGA* primāri tika veidots Rīgas pašvaldības vajadzībām, tad sākotnējā darbības posmā bāzes stacijas tika izvietotas maksimāli tuvu viena otrai, bet vienlaicīgi, lai nosegtu Rīgas teritoriju un attālumi nepārsniegtu 15 km. Bāzes staciju izvietojums *EUPOS®-RIGA* darbības pirmsākumos shematiski parādīts 3.1. att.



3.1. att. *EUPOS®-RIGA* bāzes staciju shematisks izvietojums

Bāzes staciju stabila novietošana ir pamats uzticama un precīza atbalsta tīkla izveidei, konkrēti *EUPOS®-RIGA* bāzes stabilitātes pētījumus ir veicis G. Silabriedis [11]. Tomēr šādas infrastruktūras gala patērētājam, pēc autora domām, svarīgāka ir precizitāte, ko iespējams sasniegt izmantojot GNSS atbalsta sistēmu un iegūto rezultātu uzticamība, un atkārtotamība, nevis precizitāte ar kādu šī sistēma izveidota. Turpmākajās šīs nodaļas apakšnodaļās ir aprakstīti autora veikti pētījumi, kuri parāda, kāda ir *EUPOS®-RIGA* tīkla precizitāte, respektīvi, kāda ir pašu mērījumu izkliede ap mērījumu vidējo vērtību, nepiesaistot to klasiskajam ģeodēziskajam tīklam jeb nosacīti brīvā koordinātu sistēmā. Tā kā nozīmīgs šādu

atbalsta sistēmu lietotāju segments ir mērnieki, tad viņiem ir svarīgi arī tas ar cik augstu precizitāti, izmantojot šādu sistēmu, iespējams noteikt ģeodēzisko punktu koordinātas vai kāda ir precizitāte viņu veikto mērījumu sasaistei ar klasiskiem ģeodēziskiem tīkliem. Klasiskie ģeodēziskie tīkli ir dažādu klašu un ir veidoti ar atšķirīgām precizitātēm. Autors, lai pārbaudītu ar kādu precizitāti iespējams sasaistīt mērījumos iegūtos rezultātus ar ģeodēzisko punktu kataloga vērtībām izvēlējās RG2 tīkla punktus. RG2 ir Rīgas pilsētas tīkls, kura mērķis ir nodrošināt pilsētu un tās apkārti ar stabiliem augstas precizitātes ģeodēziskajiem punktiem. Šis tīkls tika izveidots laika posmā no 2000.-2004. gadam. RG2 tīkls ir izveidots tādā veidā, ka tas turpmāk var kalpot par pamatu pārējo ģeodēzisko punktu noteikšanai un kontrolei, ieskaitot pastāvīgo GPS staciju uzraudzību. Tīkla izveides nosacījums bija, ka tā punktu koordinātu precizitātei jābūt 1-2 cm robežās. Kopējais RG2 tīkla punktu skaits ir 65. Atkarībā no nostiprinājuma veida un GPS mērījumu apstākļiem punkti iedalās divās grupās:

- RG2 A – grunts reperi un citi dziļāk par 0,7 m nostiprināti punkti ar labiem GPS mērījumu apstākļiem – bez traucējošas būvju, koku, reljefa vai cita veida ietekmes;
- RG2 B – ģeodēziskie punkti, kur mērījumus var ietekmēt būvju, koku vai citu šķēršļu tuvums un seklāk par 0,7 m nostiprināti punkti.

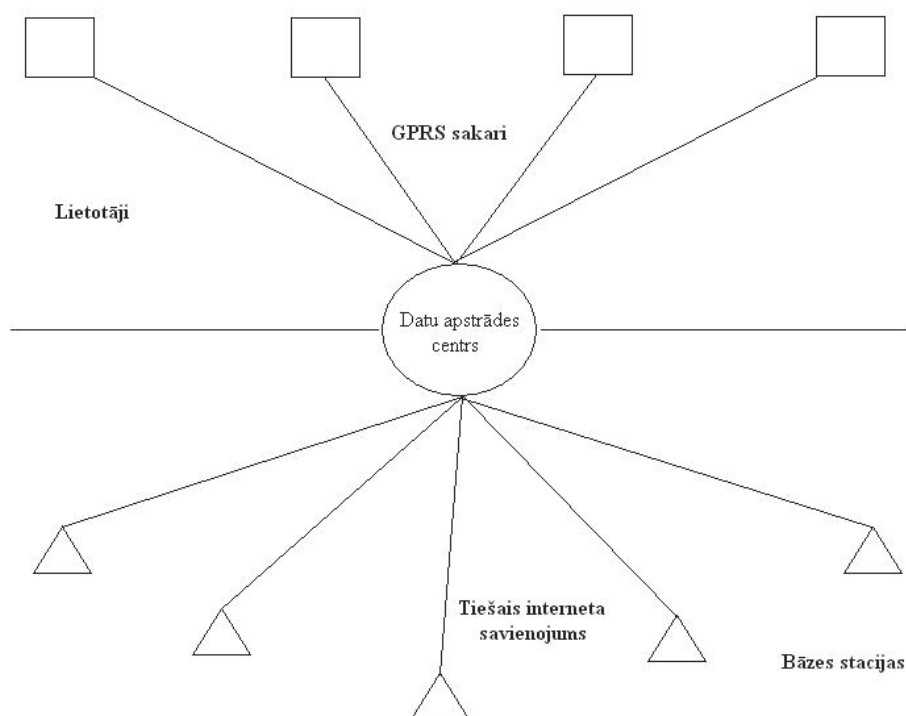
Sīkāks RG2 tehniskais apraksts ir sniegts [60].

3.1. Tīkla precizitātes novērtēšanas tehniskais risinājums

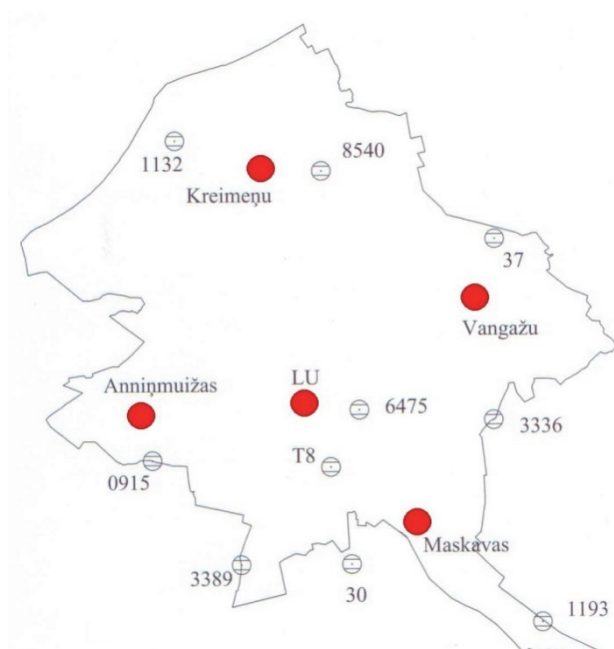
Atbalsta sistēmas uzturēšanas gaitā ir nepieciešams veikt regulāru tās darbības uzticamības pārbaudi, lai novērstu iespējamību, ka tiek nepamanīta, piemēram, bāzes stacijas nobīde kādā ārējās ietekmes rezultātā. Šādas nobīdes var izraisīt nodrošināmo mērījumu precizitātes pasliktināšanos un novest pie situācijas, kad sistēma nav izmantojama augstas precizitātes ģeodēzisko mērījumu veikšanai. Autors piedalījās *EUPOS®-RIGA* atbalsta sistēmas izveidē un tā testa režīmā sāka darboties 2006. gada vidū, kad tika uzsākta sistēmas darbības stabilitātes un nepārtrauktības testēšana. Vienkāršots *EUPOS®-RIGA* uzbūves modelis shematiski ir attēlots 3.2. att.

Pēc tam, kad tika pārbaudīta *EUPOS®-RIGA* atbalsta tīkla darbības stabilitāte un nepārtrauktība autors veica sistēmas nodrošinātās precizitātes izpēti. Pirmie pētījumi tika veikti 2007. gada pirmajā pusē. Kā minēts [11], tad autors bija norīkots veikt šo izpēti kā viens no SIA „Rīgas ĢeoMetr” pārstāvjiem. Pirmreizējās precizitātes novērtēšanai tika izvēlēti 10 RG2 tīkla punkti, kuri atradās tiešā tīkla darbības pārklājumā un to attālums līdz tuvākajai bāzes

stacijai nepārsniedza 15 km. Punkti, uz kuriem tika veikti mērījumi tīkla precizitātes novērtēšanai ir parādīti 3.3. attēlā.



3.2. att. Vienkāršots *EUPOS®-RIGA* uzbūves shematiskais modelis



3.3. att. Mērījumu veikšanai izvēlētie RG2 punkti

3.3. attēlā attēloti gan punkti, uz kuriem tika veikti mērījumi, gan arī atbalsta sistēmas bāzes staciju atrašanās vietas (attēlā ar sarkanu). Ar mērķi panākt pēc iespējas precīzākus mērījumus,

GNSS instruments tika uzstādīts uz trijkāja un centrēts uz punkta izmantojot optisko centrieri. Augstums no RG2 punkta līdz GNSS instrumenta antenas atskaites punktam (*ARP – Antenna Reference Point*) tika noteikts, izmantojot mērlenti. Šādā veidā, ja augstuma vērtība tiek nolasīta korekti un centrēšana ir bijusi precīza instrumenta uzstādīšana ir iespējama ar 1 mm precizitāti. Augstāk aprakstītajai instrumenta uzstādīšanai nepieciešamais aprīkojums parādīts 3.4. attēlā.



3.4. att. Aprīkojums GNSS instruments precīzai uzstādīšanai uz RG2 punktiem

3.2. Tīkla precizitātes pirmreizējā novērtēšana

Autors pētījumu gaitā veica ne tikai *EUPOS®-RIGA* nodrošināto mērījumu precizitāti, bet arī tobrīd Latvijā abu esošo (*EUPOS®-RIGA* un *LATPOS*) atbalsta sistēmu salīdzinošus precizitātes pētījumus, bet tie šeit netiks apskatīti, jo līdzīgus pētījumus ir veicis J. Zvirgzds [57]. Tā kā *EUPOS®-RIGA* tajā laikā tika nodota lietošanā visiem interesentiem, tad autors koncentrējās uz to kāda ir mērījumu precizitāte un iegūstamo rezultātu atkārtojamība izmantojot konkrēto atbalsta sistēmu.

Kā tika minēts, tad 2007. gadā mērījumi tika veikti uz desmit RG2 tīkla punktiem Rīgas pašvaldības teritorijā. Tā kā tajā laikā šāda sistēma bija liela novitāte, tad autors pirmreizējo precizitātes novērtēšanu izvēlējās veikt ar trīs dažādu ražotāju instrumentiem, lai samazinātu instrumentālās kļūdas ietekmi mērījumos. Izvēlētie instrumentu ražotāji bija *TOPCON*, *TRIMBLE* un *LEICA*, kuri joprojām ir visplašāk pārstāvēti šāda veida instrumentu tirgū.

Uz katra no izvēlētajiem punktiem ar katru no instrumentiem tika veikti desmit mērījumi. Katrs mērījums veidojās no aprēķiniem no divdesmit epohām. Starp katru no mērījumiem tika ievērota 20-30 s ilga pauze. Tā kā atkārtotā mērījumu precizitātes pētījumu sesijā autors izvēlējās tikai piecus no 3.3. attēlā parādītajiem RG2 ģeodēziskā tīkla punktiem, tad zemāk precizitātes aprēķinu izklāsts tiks sašaurināts līdz šiem pieciem punktiem, kuri tika novēroti gan 2007., gan 2011. gadā. Tabulā 3.1. ir parādītas izvēlēto RG2 ģeodēzisko punktu oficiālās koordinātas. Jāatzīmē, ka autors precizitātes pētījumos koncentrējās uz nodrošināto precizitātes izpēti plaknē. Tajā laikā, kad tika veikta pirmreizējā precizitātes novērtēšana Latvijā nebija pieejams pietiekami augstas precizitātes augstuma kvaziģeoīda modelis priekš GNSS mērījumiem, tā brīža augstuma kvaziģeoīda modeļa precizitāte bija 6-8 cm robežās, kas salīdzinot ar iespējamo GNSS mērījumos sasniedzamo precizitāti [25] ir zemāka un tādā veidā nav uzskatāma par objektīvu mēru precizitātes novērtēšanai.

3.1. tabula

RG2 ģeodēzisko punktu oficiālās koordinātas LKS-92 koordinātu sistēmā

Punkta kods	X(m)	Y(m)	H(m)
1132	322277,350	501996,061	0,948
37	318330,760	514846,686	7,047
T8	309177,035	508228,007	4,746
3389	305254,987	504592,871	12,313
1193	302934,011	516713,585	10,570

3.2. tabulā ir parādītas 2007. gadā veikto mērījumu sesiju vidējās vērtības attiecībā pret RG2 punktu oficiālajām vērtībām. Vidējās vērtības atspoguļotas datu pārskatāmības labad, lai pārskatāmi varētu rast pirmo priekšstatu par potenciāli sasniedzamo mērījumu precizitāti. Lai arī iepriekš tika minēts, ka autors koncentrējās uz plaknes koordināšu mērījumu precizitāti 3.2. tabulā ir uzrādītas arī RG2 punktu augstumu vērtības. Tomēr apskatot visus rezultātus ir redzams, ka dažiem (piemēram, punkts 3389, *LEICA* uztvērējs) šķietami ir liela kļūda. Skaidrojums tam ir, ka pārvietojoties no punkta uz punktu uztvērēja programmatūrā pirms mērījumu sākšanas katrā jaunā lokācijā bija jāievada ar mērlenti nolasītā ARP augstuma vērtība. Tas ne vienmēr tika izdarīts un līdz ar to augstuma komponentes vērtība dažos punktos ir ar lielu nobīdi no oficiālās vērtības, taču šāda nianse nekādā mērā neietekmē plaknes koordināšu noteikšanas procesu.

Mērījumu sesijās iegūtie vidējie rezultāti

N GPS	TOPCON	TRIMBLE	LEICA	RG2
0915	309453,2540	309453,2555	309453,2578	309453,267
	501019,8857	501019,8883	501019,8840	501019,882
	11,8162	11,8289	11,8338	11,816
3389	305254,9692	305254,9738	305254,9742	305254,987
	504592,8743	504592,8704	504592,8658	504592,871
	12,3282	12,3727	12,8956	12,313
30	305273,2707	305273,2582	305273,2720	305273,279
	509049,7971	509049,7955	509049,7984	509049,791
	9,2199	9,2244	9,1912	9,166
T8	309177,0277	309177,0200	309177,0315	309177,035
	508228,0031	508228,0134	508228,0081	508228,007
	4,7996	4,8091	4,1380	4,746
1193	302933,9868	302933,9949	302934,0045	302934,011
	516713,5910	516713,5876	516713,5852	516713,585
	11,1895	10,6311	10,5414	10,570
1132	322277,3384	322277,3322	322277,3323	322277,350
	501996,0568	501996,0577	501996,0583	501996,061
	1,0117	1,0312	1,0831	0,948
8540	321068,0755	321068,0732	321068,0781	321068,099
	507900,9087	507900,9116	507900,9113	507900,904
	9,6776	9,6922	9,7731	9,625
37	318330,7524	318330,7407	318330,7526	318330,760
	514848,6832	514846,6761	514846,6831	514846,686
	7,1137	7,1516	7,1048	7,047
3336	311053,0192	311053,0211	311053,0182	311053,041

	514781,4814	514781,4769	514781,4821	514781,481
	9,4857	9,5234	9,5192	9,441
6475	311460,4986	311460,4961	311460,4912	311460,506
	509386,0351	509386,0364	509386,0352	509386,036
	15,2866	15,2855	15,2801	15,206

3.3. tabulā atspoguļotas mērījumu vidējās aritmētiskās vērtības vidējās kvadrātiskās kļūdas (vidējās kvadrātiskās kļūdas), kuras tika aprēķinātas pēc sekojošas formulas:

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - x_{vid})^2}{N(N-1)}}, \quad (3.1)$$

kur:

x_i – i-tajā mērījumā iegūtā koordinātas vērtība;

x_{vid} – mērījumu sesijas vidējā vērtība koordinātām;

N – mērījumu skaits mērījumu sesijā.

Izpētot 3.3. tabulā atspoguļotos rezultātus, redzams, ka vidējās kvadrātiskās kļūdas vērtība nepārsniedz 5 mm, kas, pēc autora domām ir apliecinājums, ka *EUPOS®-RIGA* spēj nodrošināt mērījumus ar ļoti augstu precizitāti un rezultātu atkārtojamības uzticamību. 3.3. tabulā paralēli X un Y koordinātas mērījumu vidējām kvadrātiskajām kļūdām atspoguļota arī summārā pozīcijas mērījumu kļūda, kas aprēķināta pēc sekojošas formulas:

$$\Sigma = \sqrt{X^2 + Y^2}, \quad (3.2)$$

kur:

X, Y – konkrētās mērījumu sesijas koordinātu noteikšanas vidējās kvadrātiskās kļūdas.

2007. gada mērījumu sesijas vidējās kvadrātiskās kļūdas un summārā kļūda

Mērījumu vidējās kvadrātiskās kļūdas (m)				
		TOPCON	TRIMBLE	LEICA
915	X	0,000667	0,000401	0,000593
	Y	0,000539	0,000260	0,000683
	Σ	0,000858	0,000478	0,000905
3389	X	0,001467	0,000249	0,000442
	Y	0,002028	0,000371	0,000757
	Σ	0,002503	0,000447	0,000877
30	X	0,000870	0,000554	0,000558
	Y	0,000547	0,000428	0,000499
	Σ	0,001028	0,000700	0,000749
T8	X	0,000746	0,000471	0,000820
	Y	0,000379	0,000733	0,000314
	Σ	0,000837	0,000871	0,000878
1193	X	0,003527	0,004811	0,002672
	Y	0,001738	0,000980	0,002205
	Σ	0,003932	0,004910	0,003464
1132	X	0,000653	0,000442	0,000667
	Y	0,000975	0,000396	0,000423
	Σ	0,001173	0,000593	0,000790
8540	X	0,000500	0,000359	0,000567
	Y	0,000396	0,000267	0,000473
	Σ	0,000638	0,000447	0,000738
37	X	0,000945	0,000775	0,000427
	Y	0,000800	0,001560	0,000690
	Σ	0,001238	0,001742	0,000811
3336	X	0,001031	0,001337	0,000712
	Y	0,001002	0,000526	0,000233
	Σ	0,001438	0,001437	0,000749

6475	X	0,000371	0,000767	0,000249
	Y	0,000482	0,000400	0,000389
	Σ	0,000608	0,000865	0,000462

Augstāk atspoguļoto rezultātu grafisks attēlojums tiks parādīts nākošajās apakšnodaļās ar mērķi salīdzināt laika gaitā iegūtos rezultātus, jo autors ir veicis šādus mērījumus un precizitātes izpēti vairāk kārt.

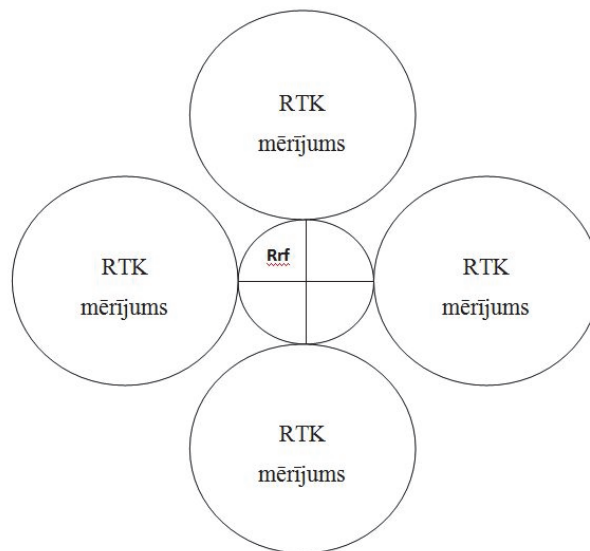
3.3. *EUPOS®-RIGA* atbalsta sistēmas izmantošana specifisku uzdevumu veikšanai

Veicot *EUPOS®-RIGA* nodrošinātās precizitātes izpēti autors secināja, ka sistēma nodrošina pietiekoši augstu precizitāti un rezultātu atkārtojamības uzticamību, lai ar to iegūtos rezultātus varētu izmantot zemākas klases sistēmu pārbaudei un izveidei. Rezultātu atkārtojamības uzticamības labums, pēc autora domām, ir tajā, ka tā ļauj veidot sistēmas, kurām nav svarīga piesaiste valsts koordinātu tīklam vai kādam starptautiskam koordinātu tīklam. Tajā pat laikā nodrošinot ļoti augstu sistēmu iekšējo precizitāti.

Iegūstot apliecinājumu, ka ar *EUPOS®-RIGA* atbalsta sistēmas nodrošinātajām korekcijām iespējams veikt augstas precizitātes mērījumus ar augstu uzticamību autors veica Rīgas Tehniskās universitātes (RTU) Elektronikas un Telekomunikāciju Fakultātes (ETF) Transporta elektronikas un telemātikas katedras (TETK) telpās Lomonosova ielā 1, Rīgā uzstādītās GPS satelītu signālu retranslācijas sistēmas uztverošās antenas koordinātu noteikšanu ar vairākiem paņēmieniem. Tā kā nebija iespējama 3.5. attēlā parādītās retranslācijas antenas demontāža, lai tās vietā uzstādītu kādu GNSS RTK instrumentu mērījumu veikšanai, tad autors izvēlējās veikt četrus mērījumus no kuriem būtu iespējams iegūt patieso vērtību. Mērījumi tikai veikti retranslācijas antenas diametrāli pretējās pusēs pa pāriem (skat. 3.6. att.), tādā veidā iegūstot retranslācijas antenas centra atrašanās vietu. Autors atzīst, ka šāds paņēmiens nevar sniegt augstākās precizitātes mērījumu rezultātus, bet tas bija vienīgais iespējama veids kā veikt satelītu signālu retranslācijas sistēmas uztverošās antenas pozīcijas uzmērīšanu ārpus telpām. Ņemot vērā to, ka retranslācijas antenas forma ir apaļa, tad veicot mērījumus no divām diametrāli pretējām pusēm iespējams iegūt antenas vidus pozīciju, bet veicot vēl divus diametrāli pretējus mērījumus iespējams iecentrēt antenas pozīciju, ar samērā labu precizitāti, lai šādi rezultāti būtu gana labas izejas vērtības turpmākajos koda GPS uztvērēju pētījumos.



3.5. att. satelītu signālu retranslācijas sistēmas uztverošās antenas nostiprinājums



3.6. att. satelītu signālu retranslācijas sistēmas uztverošās antenas uzmērīšanas shēma

Lai pārliecinātos par iegūtā rezultātā uzticamību autors veica vēl divas mērījumu sesijas, izmantojot retranslēto signālu, tādējādi novēršot neprecizitāti instrumenta novietošanā. Vienā no sesijām tika veikti GPS (retranslējošā antena spēj pārraidīt tikai GPS sistēmas signālus) mērījumi reālā laikā izmantojot *EUPOS®-RIGA* korekcijas, bet otrā tika veikta datu uzkrāšana 40 min garumā ar mērķi veikt to pēcspēlā izmantojot *JAVAD Pinnacle* pēcspēlādes programmatūru.

Visās mērījumu sesijās tika izmantots viens un tas pats uztvērējs – *TOPCON Hiper+* ar FC-100 kontrolieri. Iegūto rezultātu vidējās vērtības parādītas 3.4. tabulā.

Retranslācijas sistēmas uztverošās antenas pozīcijas mērījumu rezultāti

Salīdzinošie rezultāti			
Point	North(m)	East(m)	Elevation(m)
Telpās (RTK)	310866,738	509478,771	30,368
Telpās (PP)	310866,729	509478,781	30,378
Ārā	310866,756	509478,773	30,419
Vidējā vērtība	310866,741	509478,775	30,388
Izkliede	0,027	0,010	0,051

Aplūkojot 3.4. tabulā attēlotos rezultātus redzams, ka lielākā rezultātu izkliede starp mērījumu sesijām ir augstuma komponentes noteikšanai. Autors to pamato ar to, ka veicot mērījumus ārpus telpām mērījumos izmantotā instrumenta augstums nebija precīzs attiecībā pret retranslācijas antenas augstumu. Šo rezultātu nesaisti var pamatot ar to, ka abu antenu fāzes centri neatradās vienā augstumu plaknē. Iegūtie rezultāti arī apliecina vairākos literatūrās avotos minēto, piemēram [25], ka augstuma noteikšanas precizitāte, izmantojot GNSS RTK sistēmas ir aptuveni divas reizes zemākā nekā plaknes koordināšu noteikšanas precizitāte.

Šo mērījumu rezultātā tika iegūtas koordinātas, kuras šobrīd kalpo kā etalona vērtības studiju procesā, studentu praktiskajās nodarbībās, kurās tiek veikti mērījumi ar dažādu veidu GPS aparāturu.

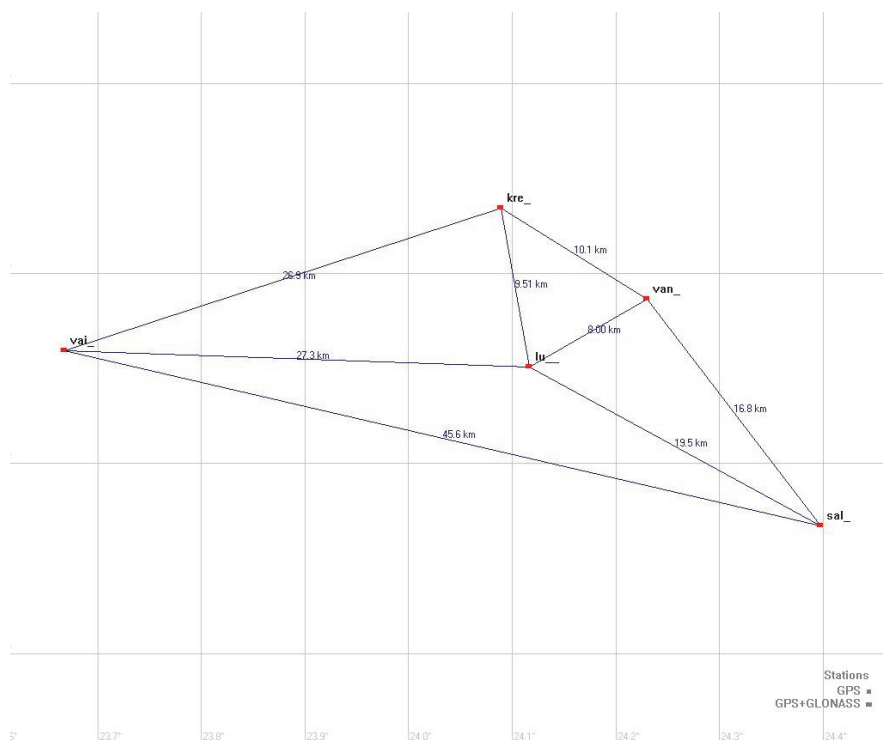
3.4. EUPOS®-RIGA precizitātes pārbaude pēc tīkla pārbūves

Sākotnēji šis atbalsta tīkls jeb tika būvēts primāri Rīgas pašvaldības vajadzībām ar iespēju to lietot citām ieinteresētām personām un institūcijām. Taču 2008.gadā sākusies ekonomiskā krīze ieviesa savas korekcijas un uz to brīdi atbalsta tīkla uzturēšana bija kļuvusi par dārgu, lai tā pastāvēšana būtu iespējama bez ārējā finansējuma. Tika pieņemts lēmums atbalsta tīkla izmantošanai noteikt abonentmaksu. Taču, tā kā Latvijas teritorijā tobrīd darbojās tīkls, kura pārklājuma zona aptvēra visu valsti, tad EUPOS®-RIGA tīklu nācās paplašināt, izmantojot esošos resursus, lai padarītu to pievilcīgāku lietotājiem, kuru darbības teritorija neaprobežojas ar Rīgas pilsētas teritoriju. Ņemot vērā potenciālo lietotāju skaitu un atstājot iespēju paplašināt tīkla darbības zonu nepalielinot bāzes staciju skaitu, 2010.gadā tika nolemts pārvietot divas bāzes stacijas. Viena bāzes stacija no Zolitūdes mikrorajona tika pārvietota uz Jūrmalas pilsētas

Vaivariem, bet otra bāzes stacija no Maskavas ielas rajona uz Salaspili. Jaunais bāzes staciju izvietojums apvidū, kāds ir saglabājies joprojām ir parādīts 3.7. attēlā. 3.8. attēlā parādīts jaunais bāzes staciju izvietojums shematiski ar savstarpējiem attālumiem starp stacijām.



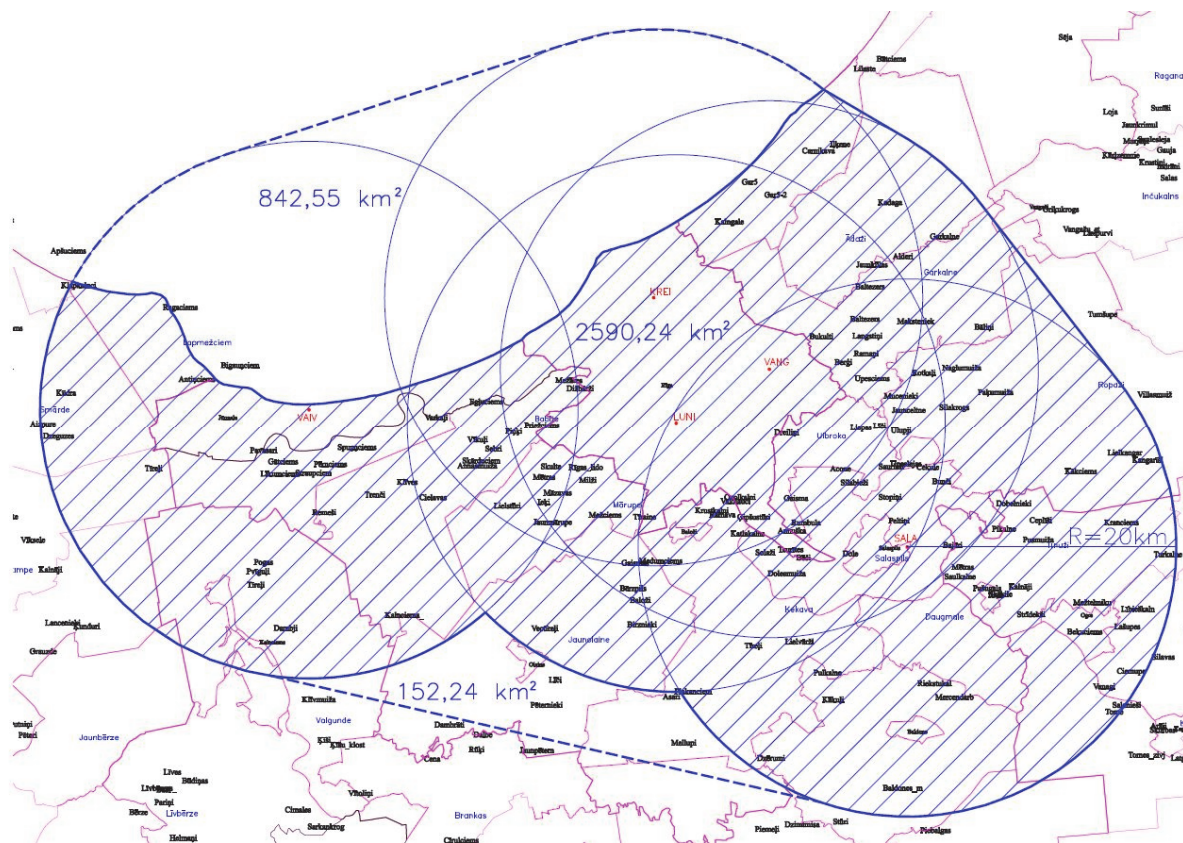
3.7. att. EUPOS®-RIGA bāzes staciju izvietojums pēc pārbūves



3.8. att. Attālumi starp EUPOS®-RIGA bāzes stacijām pēc pārbūves

Salīdzinot attēlus 3.1. un 3.8. redzams, ka bāzes staciju darbības rādus maksimālais lielums starp jebkurām divām blakus esošajām stacijām ir palielinājies no 6 km līdz nepilniem

23 km. Turpmākajā tīkla attīstības koncepcijā tika pieņemts, ka bāzes staciju darbības rādiuss ir 20 km, tādā veidā *EUPOS®-RIGA* kopējā pārklājuma teritorija, kas parādīta 3.9. attēlā pēc pārbūves sastāda nepilnus 2600 km² salīdzinājumā ar nepilniem 400 km² pirms pārbūves.



3.9. att. *EUPOS®-RIGA* darbības pārklājuma teritorija

Pirmais solis pēc tīkla pārbūves bija jauno bāzes staciju atrašanās vietu precīzo koordinātu noteikšana. To veica Latvijas Universitātes Ģeodēzijas un Ģeoinformātikas institūta darbinieki, izmantojot zinātnisko GNSS datu apstrādes programmatūru *Bernese 5.0*.

Pēc tam, kad tika saņemtas jaunās bāzes staciju koordinātas autors nokonfigurēja *EUPOS®-RIGA* atbalsta tīkla darbību nodrošinošo programmatūru *GNSMART* un varēja veikt atkārtotu mērījumu precizitātes novērtēšanu, izmantojot *EUPOS®-RIGA* atbalsta tīkla korekcijas. Šajā posmā, tiešā autora vadībā, mērījumus uz pieciem RG2 punktiem veica divi SIA „Rīgas ĢeoMetr” praktikanti – RTU Būvniecības fakultātes studenti. Šajos mērījumos tika izmantota līdzīga mērījumu metodika kā aprakstīts augstāk, tomēr ar dažām izmaiņām:

- Mērījumos tika izmantots tikai viens uztvērējs (*TOPCON Hiper+*);
- Uz katra no izvēlētajiem punktiem tika veikti 20 mērījumi;
- Pēc katriem 10 mērījumiem uztvērēja antena tika pagriezta par 180°;

Pagriezt uztvērēja antenu par 180° pēc katriem 10 mērījumiem tika izvēlēts, lai tādā veidā censtos samazināt iespējamo antenas kalibrēšanas ietekmi uz mērījumiem.

Iegūto rezultātu apstrādi autors veica analogi iepriekšējā apakšnodaļā aprakstītajam. Tā kā iepriekšējā mērījumu sesijā, kas tika veikta 2007. gadā augstuma komponente uz RG2 punktiem tika veikta pavirši vai netika veikta vispār, tad autors šajā mērījumu sesijā uzdeva praktikantiem reģistrēt arī augstuma komponentes mērījumu rezultātus. Lai novērstu precizitātes kropļojumus, kurus ievieš augstuma kvaziģeoīda modeļa izveides precizitāte, autors šajā mērījumu sesijā iegūtās augstuma komponentes vērtības aplūkot tādā pat veidā kā plaknes koordinātas. Kā minēts iepriekš, tad pēc autora domām daudzās jomās svarīgāka ir sistēmas iekšējā precizitāte, nevis tās precīza sasaiste ar kādiem ģeodēziskiem tīkliem.

2011. gadā veikto mērījumu un 2007. gadā veikto mērījumu plaknes koordināšu vidējās vērtības salīdzināšanai ir atspoguļotas 3.5. tabulā.

3.5. tabula

2007. un 2011. gadā veikto mērījumu vidējās vērtības

Punkta Nr.	Koordināta	2007. g.	2011. g.	Starpība, m
1193	X	302933,987	302933,989	0,002
	Y	516713,591	516713,590	0,001
3389	X	305254,969	305254,978	0,009
	Y	504592,874	504592,866	0,008
T8	X	309177,028	309177,031	0,003
	Y	508228,003	508228,005	0,002
1132	X	322277,338	322277,337	0,001
	Y	501996,057	501996,064	0,007
37	X	318330,752	318330,758	0,006
	Y	514848,683	514848,691	0,008

Aplūkojot 3.5. tabulā atspoguļotos rezultātus, redzams, ka to vidējo vērtību starpība starp divām sesijām nepārsniedz 10 mm. To var uzskatīt par pirmo apliecinājumu, ka tīkls, pēc pārbūves nav zaudējis savu precizitāti, neraugoties uz to, ka attālumi starp blakusesošajām bāzes stacijām ir pieauguši. Jāatzīmē, ka 2007. gada mērījumi sesijas vidējais rezultāts, tika aprēķināt izmantojot tikai tos rezultātus, kuri iegūti ar *TOPCON* instrumentu, lai novērstu instrumentālās kļūdas ietekmi salīdzinājumā ar 2011. gada mērījumu sesiju.

Nākošajā mērījumu analīzes solī apskatīsim kādas ir vidējās kvadrātiskās kļūdas mērījumiem 2007. un 2011. gadā, šie rezultāti attēloti 3.6. tabulā.

3.6. tabula

2007. un 2011. gada mērījumu vidējās kvadrātiskās kļūdas

Punkta Nr.		2007	2011
3389	X	0,001467	0,001714
	Y	0,002028	0,001054
	Σ	0,002503	0,002012
T8	X	0,000746	0,000968
	Y	0,000379	0,000526
	Σ	0,000837	0,001101
1193	X	0,003527	0,003391
	Y	0,001738	0,001378
	Σ	0,003932	0,003660
1132	X	0,000653	0,001584
	Y	0,000975	0,001517
	Σ	0,001173	0,002194
37	X	0,000945	0,001018
	Y	0,000800	0,002804
	Σ	0,001238	0,002983

Kā redzams no 3.6. tabulas, tad arī mērījumu vidējā kvadrātiskā kļūda būtiski neatšķiras, ja salīdzinām 2007. gada un 2011. gada mērījumus, tas pēc autora domām ir uzskatāms par uzticamu apliecinājumu tam, ka tīkla nodrošinātā rezultātu atkārtojamība pēc tā pārbūves nav pasliktinājusies.

Tā kā plānojot 2011. gada mērījumu sesiju autors nolēma pievērst uzmanību arī augstuma komponentes noteikšanas precizitātei un atkārtojamības uzticamībai, tad paralēli plaknes koordinātu mērījumiem tika veikti arī pozīcijas augstuma mērījumi, kuru noteikšanas vidējā kvadrātiskā kļūda parādīta 3.7. tabulā. Aplūkojot 3.7. tabulā redzamos rezultātus autors konstatēja, ka arī augstuma komponentes mērījumu vidējā kvadrātiskā kļūda ir ļoti maza un nepārsniedz 6 mm. Šāda rezultāta iegūšana pamudināja autoru veikt augstuma komponentes noteikšanas atkārtotus mērījumus un to analīzi, lai pārliecinātos par iegūtā rezultāta uzticamību.

Vidējā kvadrātiskā kļūda augstumiem 2011. gadā veiktajos mērījumos

Punkta Nr.	Vid. kv. kļ., m
1193	0,005625
3389	0,001878
T8	0,004161
1132	0,003056
37	0,001311

2014. gada nogalē Rīgas pilsētas būvvaldes būvniecības kontroles pārvaldes būvju uzmērīšanas nodaļas vadītāja U. Krutova, kopā ar autora kolēģi Rīgas domes pilsētas attīstības departamenta ģeomātikas pārvaldes topogrāfiskās informācijas uzturēšanas nodaļas vadītāju S. Plotņikovu veica jaunā augstuma kvaziģeoīda modeļa LV'14 precizitātes pārbaudi. Autors, izmantojot izdevību, lūdza ievāktos datus nodot atkārtotai augstuma komponentes un plaknes koordināšu noteikšanas precizitātes izpētei. Šim nolūkam autors palūdza veikt atkārtotus mērījumus arī uz RG2 punktiem nr. 37 un nr. 3389. Autoram šie punkti izraisīja interesi, jo pēc tīkla pārbūves punktam nr. 37 nelielos attālos atrodas trīs *EUPOS®-RIGA* bāzes stacijas, bet punkts nr. 3389 atrodas uz garākās bāzes līnijas starp stacijām kas atrodas Jūrmalā un Salaspilī (skat. 3.3. att.). Izpētot šos rezultātus autors cerēja iegūt mērījumu precizitātes atkarību no attāluma līdz bāzes stacijām *EUPOS®-RIGA* tīklam. Tā kā mērījumi tika plānoti ar mērķi pārbaudīt augstuma kvaziģeoīda modeli, tad autoram bija pieejami arī augstuma komponentes mērījumi, kas tādejādi sniedza iespēju atkārtoti izpētīt ar kādu precizitāti iespējams noteikt pozīcijas augstumu.

Iegūstot rezultātus no 2014. gadā veiktajiem mērījumiem autors sākotnēji veica salīdzinājumu starp 2007., 2011. un 2014. gada mērījumu sesiju vidējām vērtībām, lai gūtu priekšstatu vai šajā gadu gaitā nav novērojama kāda lielāka koordinātu atšķirība. Visu mērījumu sesiju salīdzinošie rezultāti ir parādīti 3.8. tabulā.

3.8. tabula

2007., 2011. un 2014. gadā veikto mērījumu vidējās vērtības

Mērījumu sesiju vidējās vērtības				
Punkta Nr.	Koordināta	2007	2011	2014
3389	X	305254,974	305254,978	305254,998
	Y	504592,870	504592,866	504592,881
37	X	318330,741	318330,758	318330,757
	Y	514846,676	514846,691	514846,691

Koordinātu vidējo vērtību starpību absolūtās vērtības parādītas 3.9. tabulā

3.9. tabula

Koordinātu sesiju vidējo vērtību starpības

Mērījumu sesiju vidējo vērtību starpības				
Punkta Nr.	Koordināta	2007-2011	2007-2014	2011-2014
3389	X	0,004	0,024	0,020
	Y	0,004	0,011	0,015
37	X	0,017	0,016	0,001
	Y	0,015	0,015	0,000

Apskatot 3.9. tabulu redzams, ka maksimālā vērtība par kādu atšķiras divu mērījumu sesiju vidējās vērtības sastāda 24 mm. Tam par iemeslu varētu būt instrumenta centrēšanas precizitāte virs RG2 punkta, tomēr, tā kā centrēšanu 2007. un 2014. gados veica cilvēks ar lielu pieredzi šādos darbos, tad autors sliecas domāt, ka tam par iemeslu varētu būt gadu gaitā notikušas bāzes staciju nobīdes vai arī tas, ka punkts 3389 atrodas tālāk no bāzes stacijām un līdz ar to tas ietekmē sasniedzamo precizitāti mērījumos. Lai pārliecinātos par bāzes staciju stabilitāti autors, kopīgi ar saviem kolēģiem no Latvijas Universitātes Ģeodēzijas un Ģeoinformātikas Institūta veica bāzes staciju koordinātu stabilitātes izpēti gadu gaitā, kas tiks apskatīta turpmāk darbā.

Paturot prātā, ka precizitāte varētu būt ietekmēta dēļ bāzes staciju nestabilitātes vai izvietojuma autors veica 2014. gada mērījumu precizitātes izpēti un rezultātu salīdzināšanu ar 2007. un 2011. gadā iegūto mērījumu analīzes rezultātiem. 3.10. tabulā ir parādīta 2014. gadā veikto mērījumu vidējā kvadrātiskā kļūda plaknes koordinātām un augstumam, kā arī summārā

vidējā kvadrātiskā kļūda divām dimensijām, kura aprēķināta izmantojot izteiksmi (3.2) un summārā vidējā kvadrātiskā kļūda trīs dimensijām kura iegūta izmantojot sekojošu izteiksmi:

$$\Sigma_{3D} = \sqrt{X^2 + Y^2 + H^2} \quad (3.3)$$

3.10. tabula

2014. gadā veikto mērījumu vidējās kvadrātiskās kļūdas

Punkta nr.	Kļūdas dimensija	Vērtība, m
3389	X	0,000902
	Y	0,000344
	H	0,001553
	$\Sigma 2D$	0,000965
	$\Sigma 3D$	0,001829
37	X	0,002332
	Y	0,001726
	H	0,001453
	$\Sigma 2D$	0,002901
	$\Sigma 3D$	0,003245

Tagad, kad ir pieejami dati plaknes koordinātām no trīs dažādām mērījumu sesijām un pozīcijas augstuma noteikšanai dati no divām dažādām sesijām varam aplūkot to salīdzinājumu, kas attēlots 3.11. tabulā. Aplūkojot 3.11. tabulā attēlotos rezultātus redzam, ka neviena no vidējām kvadrātiskajām kļūdām nesasniedz 10 mm robežu, kas ļauj secināt, ka mērījumus, izmantojot *EUPOS®-RIGA*, iespējams veikt ar subcentimetra atkārtojamības precizitāti. Vadoties no iegūtajiem rezultātiem var secināt, ka tīkla pārbūve nav ietekmējusi precizitāti kādu iespējams sasniegt mērījumu sesijā, nepiesaistot to ģeodēziskajam tīklam. Tā kā ir lietotāju segments, kuram ir svarīgi ar kādu precizitāti, izmantojot *EUPOS®-RIGA* ir iespējams uzmērīt klasisko ģeodēzisko punktu koordinātas aplūkosim RG2 punktu nr. 37 un nr. 3389 mērījumus, respektīvi, salīdzināsim katras mērījumu sesijas vidējo vērtību un visu sesiju vidējo vērtību ar RG2 oficiālajām koordinātām. Starpības starp katras mērījumu sesijas vidējo vērtību, kā arī visu trīs mērījumu sesiju vidējās vērtības un RG2 oficiālo koordinātu starpība ir attēlota 3.12. tabulā.

Trīs dažādu mērījumu sesiju rezultātu salīdzinājums

Punkta nr.	Kļūdas dimensija	2007	2011	2014
3389	X	0,001467	0,001714	0,000902
	Y	0,002028	0,001054	0,000344
	H	n/a	0,001878	0,001553
	$\Sigma 2D$	0,002503	0,002012	0,000965
	$\Sigma 3D$	n/a	0,002752	0,001829
37	X	0,000945	0,001018	0,002332
	Y	0,000800	0,002804	0,001726
	H	n/a	0,001311	0,001453
	$\Sigma 2D$	0,001238	0,002983	0,002901
	$\Sigma 3D$	n/a	0,003258	0,003245

3.12. tabula

Mērījumu sesiju vidējo vērtību atšķirība no oficiālajām RG2 koordinātām

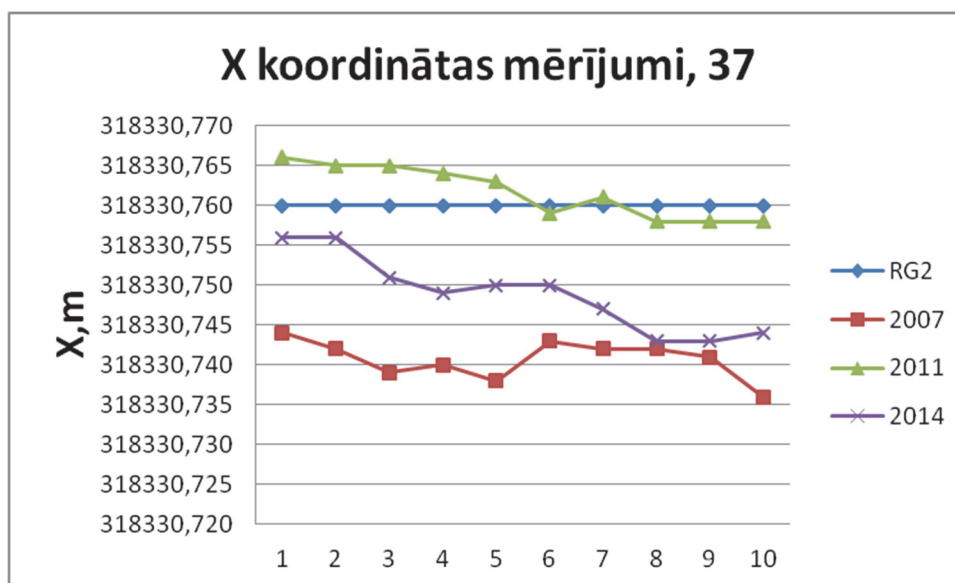
Punkta Nr.	Koordināta	2007-RG2	2011-RG2	2014-RG2	3 gadu vidējā-RG2
3389	X	0,013	0,009	0,011	0,004
	Y	0,001	0,005	0,010	0,001
37	X	0,019	0,002	0,003	0,008
	Y	0,010	0,005	0,005	0,000

Aplūkojot 3.12. tabulā attēlotos rezultātus, redzams, ka mērījumu starpība nepārsniedz 20 mm, kas bija būtisks nosacījums, kurš bija jāievēro, lai *EUPOS®-RIGA* tiktu validēta atbilstoši [46] un rezultāti publicēti [44]. Tādā veidā autors secina, ka veiktā tīkla pārbūve ir ļāvusi saglabāt nepieciešamo precizitāti, kādai ir jāatbilst šādai sistēmai, lai to savā darbībā varētu izmantot arī mērnieki veicot ģeotelpiskās informācijas pamatdatu iegūšanu.

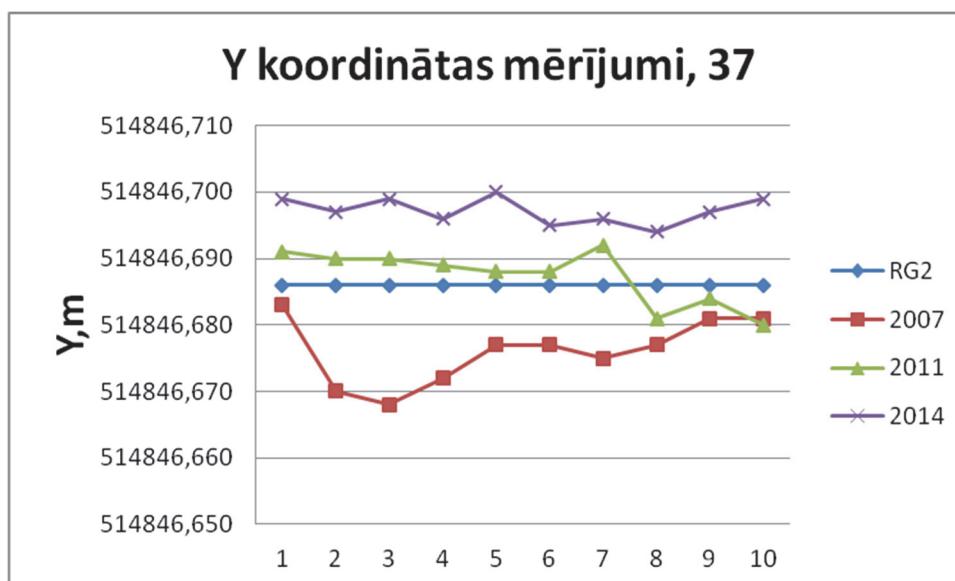
Rezultātu vizualizācijai aplūkosim dažus attēlus, kuros attēlots kā katrs konkrētais mērījums fluktuē attiecībā pret oficiālajām RG2 koordinātām.

- 3.10. attēls – X koordinātas mērījumu fluktuācija gadu gaitā punktam nr. 37;
- 3.11. attēls – Y koordinātas mērījumu fluktuācija gadu gaitā punktam nr. 37;
- 3.12. attēls – X koordinātas mērījumu fluktuācija gadu gaitā punktam nr. 3389;

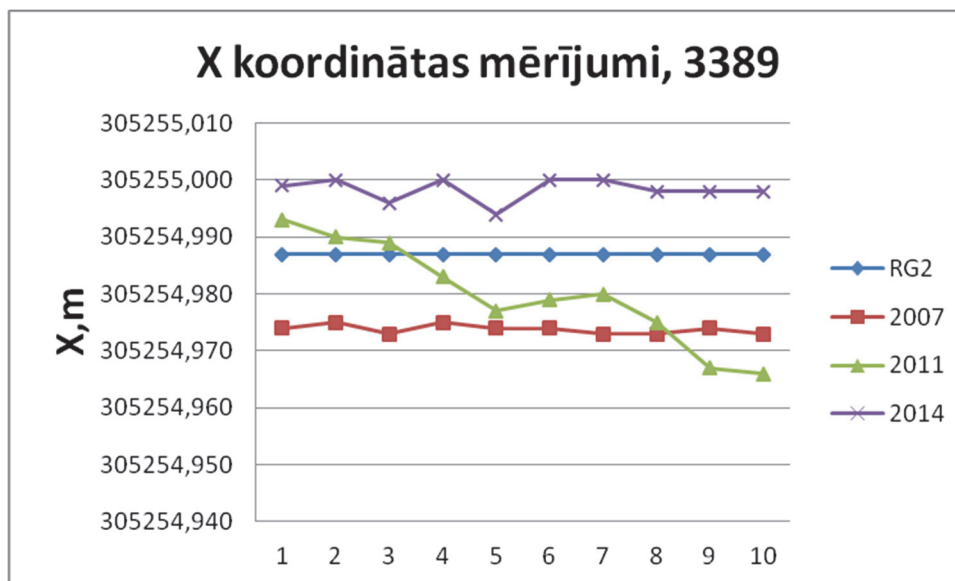
- 3.13. attēls – Y koordinātas mērījumu fluktuācija gadu gaitā punktam nr. 3389;



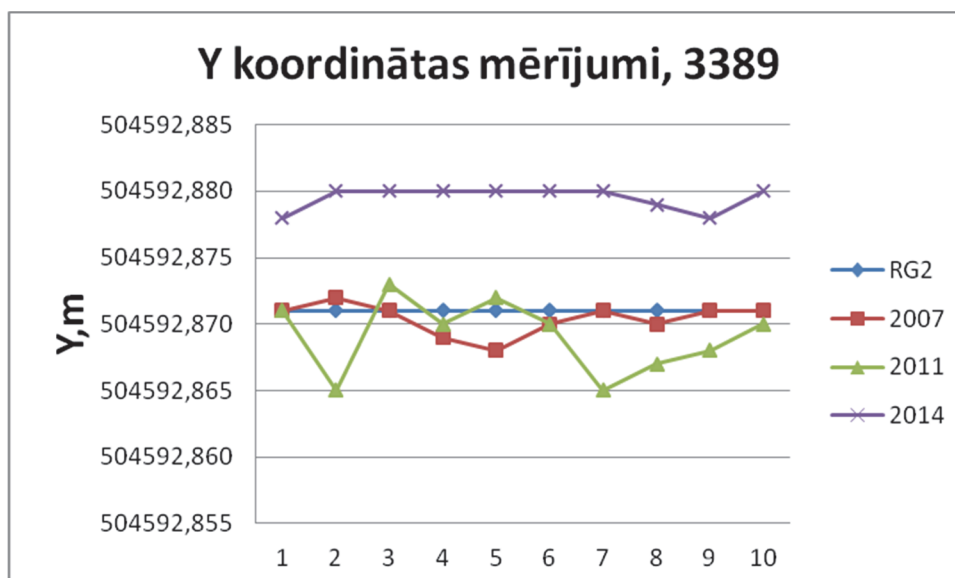
3.10. att. – X koordinātas mērījumu fluktuācija gadu gaitā punktam nr. 37



3.11. att. – Y koordinātas mērījumu fluktuācija gadu gaitā punktam nr. 37



3.12. att. – X koordinātas mērījumu fluktuācija gadu gaitā punktam nr. 3389



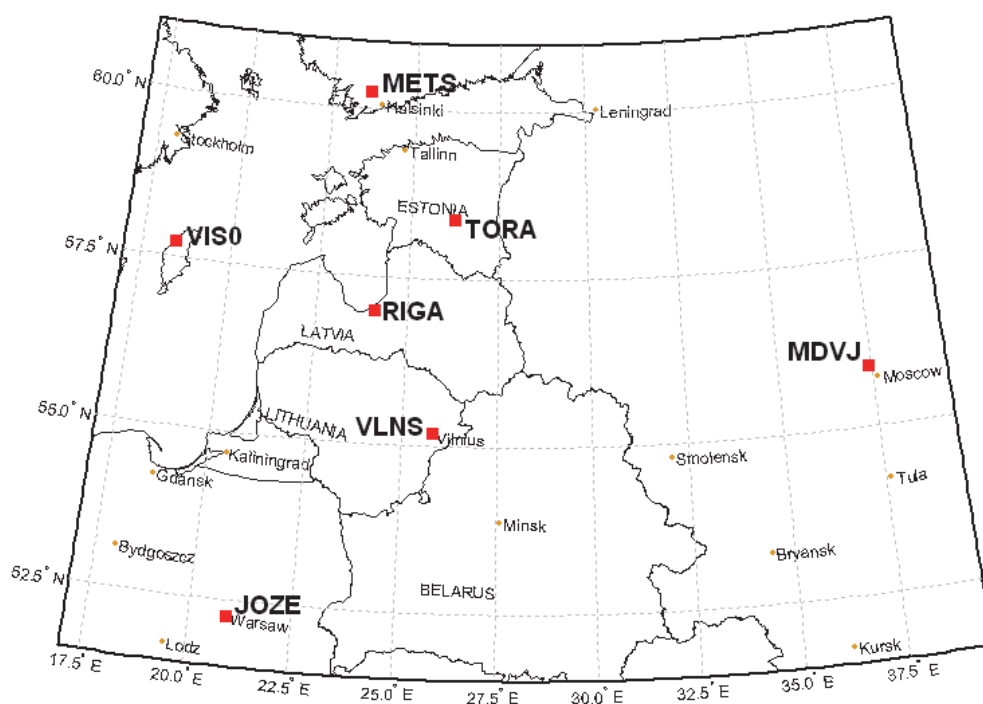
3.13. att. – Y koordinātas mērījumu fluktuācija gadu gaitā punktam nr. 3389

3.5. EUPOS®-RIGA bāzes staciju stabilitāte laika gaitā

Kā tika minēts iepriekš, tad autors ar kolēģiem no Latvijas Universitātes Ģeodēzijas un Ģeoinformātikas Institūta veica aprēķinus, lai izpētītu kā EUPOS®-RIGA bāzes stacijas „uzvedas” laika gaitā. Aprēķinu mērķis bija izpētīt kā EUPOS®-RIGA bāzes stacijas fluktuē attiecībā pret stabilākajām EPN (*European Permanent Network*) bāzes stacijām, līdzīgi kā [10]. EPN bāzes stacijas par atbalsta stacijām šiem aprēķiniem tika izvēlētas dēļ augstajām prasībām, kuras tiek piemērotas EPN stacijām [37]. Veicot šos aprēķinus vienlaicīgi tika izpētīta iespējamā EUPOS®-RIGA bāzes staciju koordinātu izmaiņu ietekme uz reālā laika mērījumu

precizitāti, kuru nodrošina *EUPOS®-RIGA* atbalsta sistēma. Lai arī 3.9. tabulā attēlotie rezultāti liecina, ka koordinātu atšķirībās varētu būt vainojams instrumenta centrējums vai palielinātais attālums starp bāzes stacijām atbalsta sistēmas pārbūves rezultātā, šāda bāzes staciju stabilitātes izpēte ir ļoti svarīga arī no sistēmas iekšējās precizitātes viedokļa. Laicīgi konstatējot bāzes staciju koordinātu nestabilitāti iespējams novērst kļūdainus mērījumus, kas, piemēram, precīzas būvniecības vai augstas precizitātes navigācijas uzdevumos nav pieļaujama.

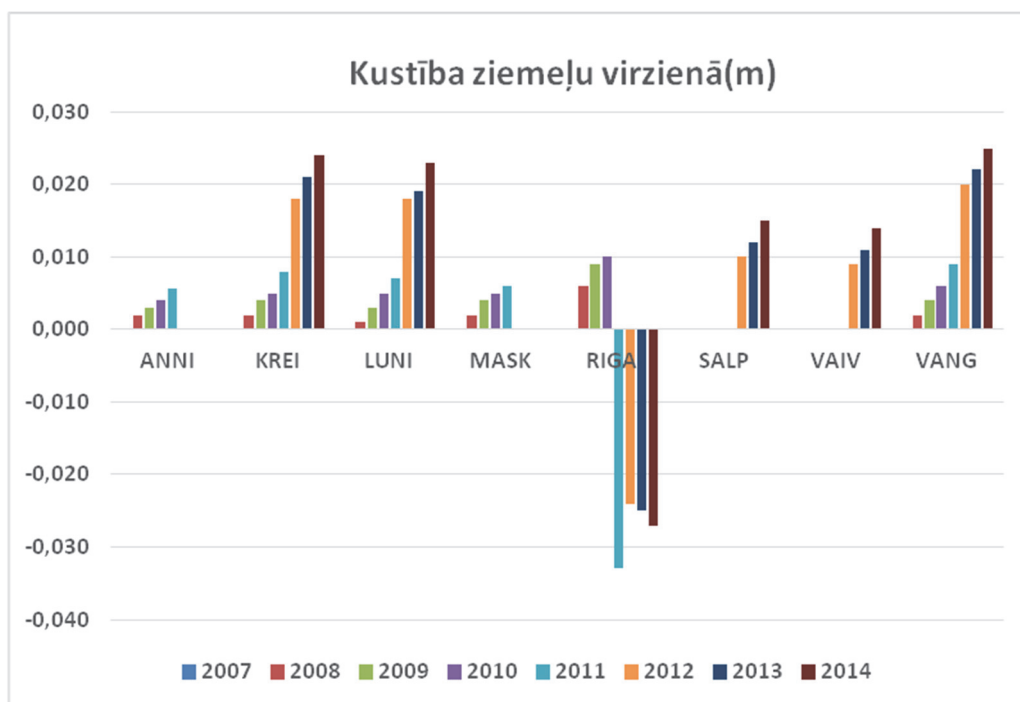
Tā kā *EUPOS®-RIGA* darbojas kopš 2007. gada, tad aprēķini tika veikti sākot no 2007. gada. Aprēķinu rezultātā tika iegūtas bāzes staciju kustības laika gaitā. Bāzes staciju uzkrātie dati tika aprēķināti katrai dienai, izmantojot pēcapstrādes metodi. Atsevišķu dienu aprēķini tika sasummēti un iegūta attiecīgā gada koordinātu vidējā vērtība. 2007. gada vērtība tika pieņemta par nulles vērtību ar kuru salīdzināt nākošo gadu rezultātus. Papildus *EUPOS®-RIGA* bāzes stacijām aprēķinos tika iekļauta arī Latvijas EPN stacija *RIGA* [13], ar mērķi salīdzināt *EUPOS®-RIGA* bāzes staciju stabilitāti ar *RIGA* stacijas stabilitāti attiecībā pret citām EPN stacijām. Aprēķinos tika izmantotas EPN stacijas, kuru ģeogrāfiskais izvietojums attēlotas 3.14. attēlā.



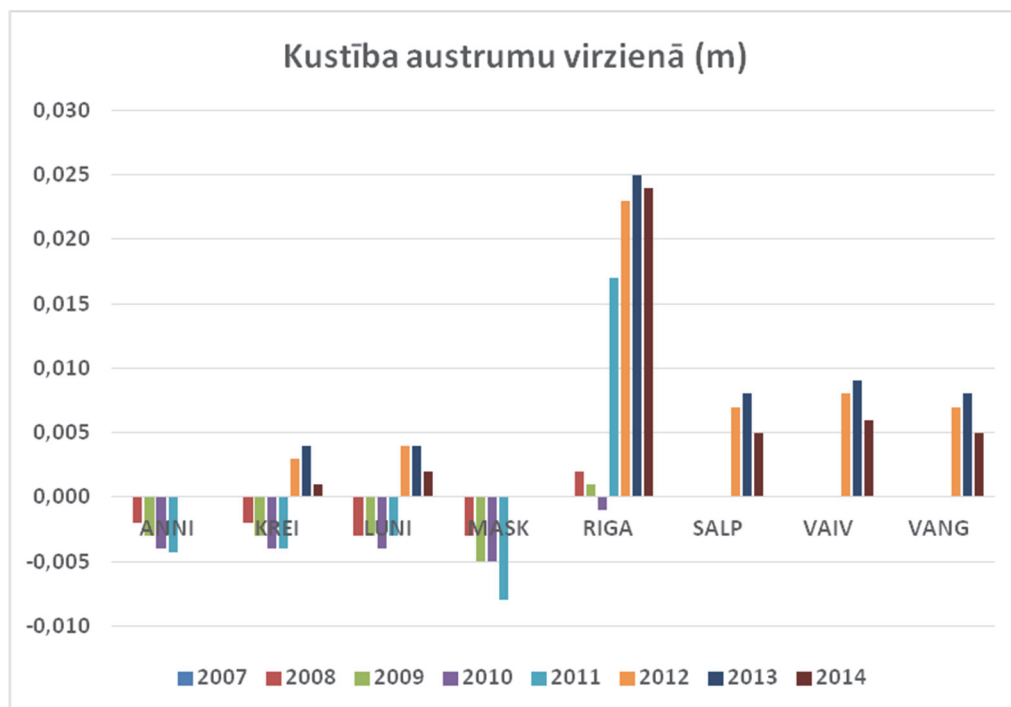
3.14. att. Aprēķinos izmantoto EPN staciju ģeogrāfiskais izvietojums

Iegūtie staciju koordināšu aprēķinu rezultāti grafiski attēloti attēlos 3.15., 3.16. un 3.17.. 3.15. attēlā atspoguļoti rezultāti, kuri parāda kādas ir staciju koordināšu izmaiņas ziemeļu

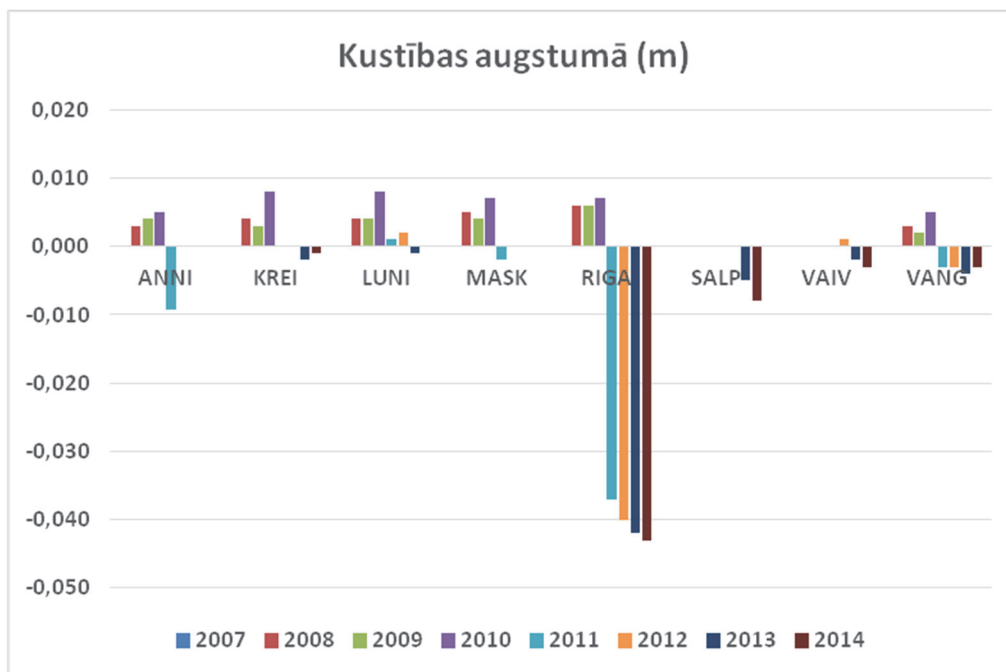
virzienā jeb pa koordināšu X asi. 3.16. attēlā – staciju koordināšu izmaiņas austrumu virzienā jeb pa koordināšu Y asi, bet 3.17. attēlā atspoguļotas bāzes staciju augstumu izmaiņas.



3.15. att. Bāzes staciju kustības ziemeļu virzienā



3.16. att. Bāzes staciju kustības austrumu virzienā



3.17. att. Bāzes staciju kustības augstumā

Aplūkojot 3.15. un 3.16. attēlus ir pamanāms, ka 2012. gadā ir novērojamas lēcienveida X un Y koordinātu izmaiņas par ~10 mm, salīdzinājumā ar vienmērīgajām izmaiņām laikā no 2007. – 2011. gadam. Autors to skaidro ar izmainīto bāzes staciju izvietojumu. Pēc 2012. gada turpinās vienmērīgs bāzes staciju koordinātu pieaugums ziemeļu virzienā un vadoties pēc 3.16. attēlā redzamajiem rezultātiem ir novērojams, ka bāzes staciju kustība austrumu virzienā ir negatīva. Vērtējot bāzes stacijas koordinātu izmaiņas ir secināms, ka notiek Zemes virsmas ģeodinamiska kustība ziemeļrietumu virzienā. Aplūkojot 3.17. attēlu, kurā atspoguļotas bāzes staciju kustības augstumā, redzams, ka tām nav novērojama vienmērīga tendence pieaugt vai samazināties, kas tādā veidā varētu liecināt par Zemes virsmas grimšanu vai celšanos, taču arī kustībām augstumā ir novērojamas lēcienveida izmaiņas 2012. gadā, kas sakrīt ar *EUPOS®-RIGA* bāzes staciju izvietojuma izmaiņām. Salīdzinājumam, apskatot EPN stacijas *RIGA* rezultātus ir novērojams, ka augstums lēcienveidīgi 2011. gadā izmainījies par aptuveni 5 cm, bet X un Y koordinātas šajā pat laikā izmainījušās par 2 – 3 cm. Tas vedina domāt, ka šīs EPN stacijas konfigurācija ir izmainījusies, jo fiziskā tās atrašanās vieta laika gaitā nav mainījusies. [13] atrodamā informācija liecina, ka 2013. gada nogalē ir veikta šīs EPN bāzes stacijas antenas nomaina, tas varētu būt izskaidrojums augstāk minētajām koordinātu izmaiņām, taču oficiālais antenas nomainas laiks nesakrīt ar konstatētajām lēcienveidīgajām koordinātu izmaiņām.

3.6. *EUPOS®-RIGA* darbības zonas paplašināšanas iespējas

Ņemot vērā to, ka *EUPOS®-RIGA* ir komerciāla atbalsta sistēma, tad, lai būtu iespējams piesaistīt pēc iespējas vairāk lietotāju tai ir jānodrošina iespējami liela pārklājuma teritorija. Ir pieņemts, ka *EUPOS®-RIGA* atbalsta sistēmas bāzes staciju darbības rādiuss nedrīkst pārsniegt 20 km. Ņemot vērā 3.4. nodaļā izklāstīto precizitātes izpēti, autors uzskata, ka šī brīža *EUPOS®-RIGA* bāzes staciju izvietojums, kas parādīts 3.8. attēlā nav racionāls. To būtu iespējams uzlabot un tādā veidā panākt, ka *EUPOS®-RIGA* pārklājuma teritorija, kas parādīta 3.9. attēlā tiktu palielināta, vienlaicīgi nesamazinot nodrošināto mērījumu precizitāti. Zemāk tiks apskatīts iespējamais *EUPOS®-RIGA* bāzes staciju izvietojuma optimizācijas variants, kurš nodrošinātu gan homogēnāku bāzes staciju izvietojumu, gan arī pārklājuma teritorijas palielinājumu tādā veidā efektīvāk izmantojot atbalsta sistēmas tehniskos resursus.

2012. gadā autora vadībā Rīgas Tehniskās universitātes būvniecības fakultātes transportbūvju institūta ģeomātikas katedras bakalauru programmas students J. Koļesņikovs veica mērījumus uz vairākiem ģeodēziskajiem punktiem. Mērījumu mērķis bija noskaidrot kā mainās *EUPOS®-RIGA* atbalsta sistēmas nodrošinātā mērījumu precizitāte pēc potenciālās tīkla pārbūves [12]. Autors, izvērtējot, ka bāzes stacija, kura atrodas Rīgā Juglā veido visīsāko bāzes līniju ar tai tuvāko kaimiņu staciju varētu tikt pārvietota. Mērījumu gaitā J. Koļesņikovam tika uzdots veikt divas mērījumu sesijas:

- bāzes stacija, kas atrodas Juglā darbojas;
- bāzes stacija, kas atrodas Juglā ir atslēgta.

Šādu mērījumu rezultātā tika plānots iegūt mērījumu precizitātes atkarību no bāzes stacijas darbības Juglā. Mērījumiem tika izvēlēti trīs dažādi ģeodēziski punkti. Viens no tiem atradās ap 30 km ziemeļaustrumu virzienā no Juglas bāzes stacijas, viens ģeodēziskais punkts tika izvēlēts atbalsta sistēmas darbības zonas vidusdaļā – Zaķusalā, Rīgā. Trešais ģeodēziskais punkts tika izvēlēts potenciālās jaunās bāzes stacijas atrašanās vietas tuvumā – Olaines novada teritorijā.

Kā jau tika minēts iepriekš, tad uz katra no ģeodēziskajiem punktiem tika veiktas divas mērījumu sesijas. Katrā mērījumu sesijā tika izdarīti ap 300 mērījumiem. Apstrādājot mērījumu rezultātus atklājās, ka mērījumu sesijā, kas veikta ziemeļaustrumos no *EUPOS®-RIGA* atbalsta sistēmas pārklājuma teritorijas mērījumu vidējās kvadrātiskās kļūdas vērtība augstuma komponentei sasniedz 0,026 mm. Šis rezultāts bija sliktākais no visiem iegūtajiem, tas pamatojams, ka izvēlētais ģeodēziskais punkts atradās ārpus *EUPOS®-RIGA* pārklājuma

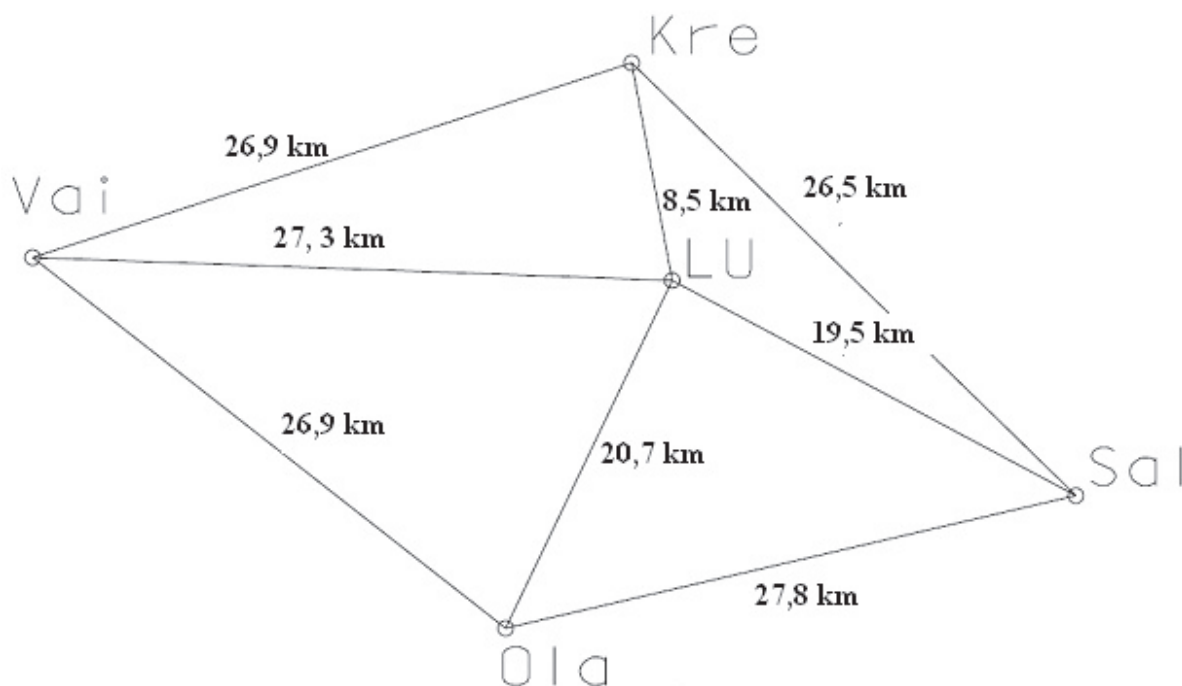
teritorijas vai ar neprecīzu augstuma vērtības nolasišanu, jo plaknes koordināšu mērījumu vidējās kvadrātiskās kļūdas šajā vietā nepārsniedza 10 mm.

Veicot mērījumus uz ģeodēziskā punkta Olaines novadā mērījumu vidējās kvadrātiskās kļūdas nepārsniedza 15 mm vērtību nevienai no komponentēm. Šāds rezultāts, salīdzinājumā ar mērījumiem pirmajās divās sesijās ir likumsakarīgs, jo šajā gadījumā mērījuma atrašanās vieta, lai arī atradās ārpus *EUPOS®-RIGA* pārklājuma teritorijas, tomēr bija tuvāk tai.

Noslēdzošās mērījumu sesijas tika ieplānotas *EUPOS®-RIGA* pārklājuma vidusdaļā – Rīgas pilsētā, Zaķusalā. Tā kā abos gadījumos (vai bāzes stacija Juglā darbojas vai nedarbojas) ģeodēziskais punkts atradās *EUPOS®-RIGA* pārklājuma teritorijā tas ļāva objektīvāk novērtēt, kā izmainās mērījumu precizitāte ar darbojošos un nedarbojošos Juglas bāzes staciju. Pirmajā mērījumu sesijā (bāzes stacija Juglā darbojas) mērījumu vidējā kvadrātiskā kļūda nepārsniedza 8 mm, bet otrajā mērījumu sesijā (bāzes stacija Juglā ir atslēgta) mērījumu vidējā kvadrātiskā kļūda nepārsniedza 6 mm.

Iegūtie mērījumu rezultāti sniedz apstiprinājumu tam, ka bāzes staciju no Juglas būtu iespējams pārvietot uz Olaini neietekmējot *EUPOS®-RIGA* nodrošināto mērījumu precizitāti. Protams, objektīvākam mērījumu precizitātes novērtējumam ir nepieciešams pārvietot šo staciju uz jauno atrašanās vietu un veikt plašākus precizitātes pētījumus.

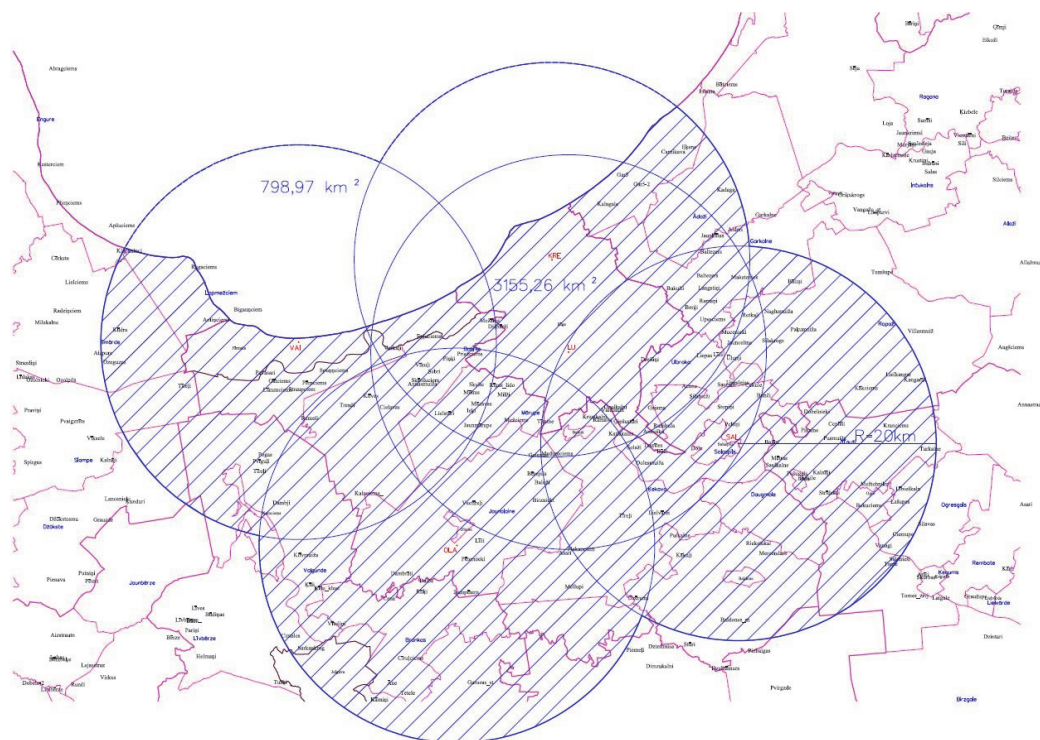
Veicot bāzes stacijas pārvietošanu no Juglas uz Olaini *EUPOS®-RIGA* bāzes staciju tīkls varētu izskatīties kā parādīts 3.18. attēlā.



3.18. att. Iespējamais *EUPOS®-RIGA* bāzes staciju izvietojums

Salīdzinot 3.8. un 3.18. attēlu redzams, ka 3.18. attēlā parādītājā variantā *EUPOS®-RIGA* bāzes stacijas ir izvietotas vienmērīgāk un maksimālais attālums starp divām blakus esošajām stacijām nepārsniedz 27 km, salīdzinājumā ar 46 km, kas ir pašreizējā *EUPOS®-RIGA* konfigurācijā.

Savukārt 3.19. attēlā ir parādīts kāda būtu *EUPOS®-RIGA* pārklājuma teritorija, ja bāzes stacijas tiktu izvietotas atbilstoši 3.18. attēlā parādītajai shēmai.



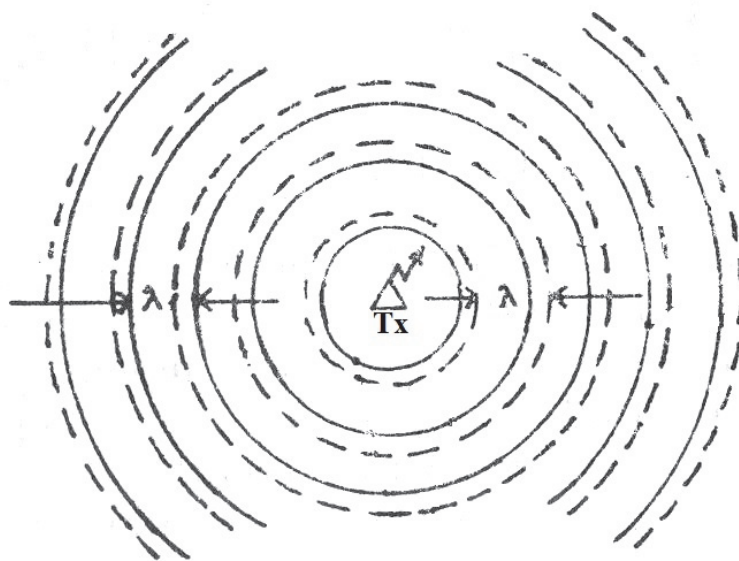
3.19. att. *EUPOS®-RIGA* darbības pārklājuma teritorija pēc iespējamās pārbūves

Salīdzinot *EUPOS®-RIGA* pārklājuma teritoriju, kas parādīta 3.9. attēlā un 3.19. attēlā redzams, ka autora piedāvātās pārbūves rezultātā pārklājuma teritoriju būtu iespējams palielināt par 565 km². Tādā veidā būtu iespējams palielināt *EUPOS®-RIGA* darbības pārklājuma teritoriju par 20 % neieieģādājoties jaunu tehnisko aprīkojumu.

4. EUPOS®-RIGA NODROŠINĀTĀS MĒRĪJUMU PRECIZITĀTES IZPĒTE REĀLĀ LAIKĀ DINAMISKOS MĒRĪJUMU APSTĀKĻOS

GNSS RTK mērījumu nozīmīgs lietotāju segments izmanto šāda veida mērījumus statiskiem mērījumiem. Šādos mērījumos GNSS uztvērējs ir nekustīgs vai tā kustība, mērījumu veikšanas brīdī, ir nenoīmīga un neietekmē fāžu nenoteiktību tik lielā mērā kā mērījumos, kuri tiek veikti dinamiskos apstākļos [32]. Taču ir lietotāji, kuriem būtu interesants šāda veida pakalpojums un tā nodrošinātā augstā mērījumu precizitāte dinamiskos mērījumu apstākļos, piemēram, autotransporta, lauksaimniecības un ceļu būves tehnikas vadībai. Vadoties no šādiem apsvērumiem autoram radās interese izpētīt kāda ir GNSS RTK mērījumu nodrošinātā precizitāte dinamiskos mērījumu apstākļos, respektīvi, apstākļos, kuros vienā lietotāja pozīcijā ir iespējams tikai viens mērījums. Salīdzinājumam, statiskos mērījumu apstākļos mērījumu skaits vienā pozīcijā ir iespējams tik liels, cik nepieciešams.

Veicot mērījumus dinamiskos apstākļos, noteicošs faktors veiksmīgai mērījumu veikšanai ir mērītāja jeb uztvērēja (lietotāja) pārvietošanās ātrums. Pārvietošanās ātrumam ir tieša ietekme uz mērītāja spēju fiksēt mērījumu viena fāžu celiņa robežās. Fāžu celiņa platums ir atkarīgs no radioviļņa garuma un tas ir vienāds ar radioviļņa garumu jeb λ [78]. Ilustratīvi fāžu celiņi ir attēloti 4.1. attēlā. GNSS mērījumu gadījumā fāžu celiņa platums ir aptuveni 19–24 cm. Katrs no fāžu celiņiem sadalās vairākās stāvokļu līnijās, kuru kopējais skaits ir atkarīgs no sistēmas darbības attāluma.



4.1. att. Fāžu celiņi un stāvokļa līnijas

C/A kods tiek izmantots, lai veiktu sava veida nesošās frekvences fāzes inicializāciju, kas pateicoties tā salīdzinoši nelielajam garumam, kas laika izteiksmē ir tikai 1 ms [21], ļauj ātri atrast kurā no fāžu celiņiem atrodas noteiktā stāvokļa līnija. Ņemot vērā, ka C/A kods atkārtojas katru milisekundi un zinot signāla viļņa garumu, varam noteikt maksimālo mobilā objekta pārvietošanās ātrumu pie kura, tas mērījuma veikšanas laikā atradīsies vienā un tajā pašā fāžu celiņā, tādējādi nodrošinot iespēju atrisināt fāžu ciklu nenoteiktību. GPS sistēmā maksimālie teorētiski iespējamie mobilā objekta pārvietošanās ātrumi ir sekojoši:

$$v_{max_{L_1}} = \frac{\lambda_{L_1}}{0,001 \text{ s}} \times 3600 \text{ s} \approx 684 \text{ km/h} \quad (4.1)$$

$$v_{max_{L_2}} = \frac{0,24 \text{ m}}{0,001 \text{ s}} \times 3600 \text{ s} \approx 864 \text{ km/h} \quad (4.2)$$

Izmantojot izteiksmes (4.1) un (4.2) atrodam kāds teorētiski ir veiktais attālums 1 ms laikā pie ātruma 30 km/h, tas ir ātrums, kurš tiek izmantots praktiskajos eksperimentos.

$$v_{30} = \frac{30000 \text{ m}}{3600 \text{ s}} \times 0,001 \text{ s} = 0,0083 \text{ m} \quad (4.3)$$

Vadoties no izteiksmes (4.3) var teikt, ka veicot mērījumus dinamiskos apstākļos pie ātruma 30 km/h attāluma izmaiņas nepārsniegs 8,4 mm, kas attiecīgi sastāda aptuveni 4,4 santiciklus L_1 frekvencei un 3,5 santiciklus L_2 frekvencei jeb attiecīgi aptuveni 0,28 radiānus un 0,22 radiānus.

Ievērojot leņķisko ātrumu vienādības un zinot maksimālos iespējamos pārvietošanās ātrumus, pie kuriem mobilais objekts mērījuma veikšanas laikā (0,001 s) atradīsies vienā un tajā pašā fāžu celiņā, mēs varam atrast arī maksimālo objekta leņķisko pārvietojumu $\Delta\varphi_{max} = \omega \cdot \Delta t$. Maksimālais leņķiskais pārvietojums atrodams pēc sekojošas izteiksmes:

$$\Delta\varphi_{max_{F_{1,2}}} = \frac{\omega v_{max_{F_{1,2}}} t_m}{c} \quad (4.4)$$

kur:

$F_{1,2}$ – L_1 , L_2 frekvences;

ω – leņķiskais ātrums;

$v_{max_{F_{1,2}}}$ – maksimālais pārvietošanās ātrums, pie kura objekts atrodas vienā fāžu celiņā;

t_m – mērījuma veikšanas laiks;

c – gaismas ātrums.

Izmantojot izteiksmi (4.4) iegūstam sekojošas maksimālās leņķiskā pārvietojuma vērtības:

$$\Delta\varphi_{\max_{F_1}} \approx 6,27 \text{ rad} \approx 99,6 \text{ sc};$$

$$\Delta\varphi_{\max_{F_2}} \approx 6,17 \text{ rad} \approx 98,1 \text{ sc};$$

Izmantojot izteiksmi (4.4) iegūstam tādu pašu rezultātu, ka izmantojot izteiksmi (4.3).

Ņemot vērā, ka mūsdienu fāžu korelātori spēj mērīt signāla fāzi ar 1 % precizitāti jeb līdz 99 sc (6,22 rad) nobīdei, iespējams iegūt maksimālos lineārās pārvietošanās ātrumus, pie kuriem objekts, mērījuma veikšanas laikā atradīsies vienā fāžu celiņā. Maksimālo ātrumu, izejot no izteiksmes (4.4) varam atrast sekojoši:

$$v_{\max_{F_{1,2}}} = \frac{c\Delta\varphi_{\max_{F_{1,2}}}}{\omega t_m} \quad (4.5)$$

kur:

$\Delta\varphi_{\max_{F_{1,2}}}$ – maksimālā iespējamā uztvērējā ģenerētās replikas un uztvertā signāla fāžu nobīde.

Izmantojot izteiksmi (4.5) iegūstam sekojošas vērtības:

$$v_{\max_{F_1}} \approx 679 \text{ km/h};$$

$$v_{\max_{F_2}} \approx 871 \text{ km/h};$$

Izmantojot izteiksmi (4.3) vai (4.4) viegli iegūstamas gaidāmās attālumu izmaiņas tipiskā pilsētas satiksmes plūsmā. Atkarībā no ātruma ierobežojumiem satiksmes plūsmas ātrums pilsētā ir robežās no 30-70 km/h, tātad attāluma izmaiņas attiecīgi ir robežās no 8,3 – 19,4 mm. Šādas attāluma izmaiņas ļauj izmantot GNSS mērījumus ar augstu precizitāti standarta pilsētas satiksmes plūsmā, ja tiek nodrošināt labi satelītu redzamības apstākļi, kas pilsētās ir viena no galvenajām problēmām. Papildus, lai mērījumi dinamiskos apstākļos būtu iespējami, ir svarīgi izvēlēties aparatūru, kura shematiski ir veidota tā, lai šādus mērījumus būtu iespējams īstenot. GNSS aparatūrā galvenokārt tiek izmantota pirmās, otrās vai trešās kārtas fāzes automātiskās regulēšanas cilpa (*Phase Locked Loop* jeb *PLL*). *PLL* pēc savas būtības ir nelineāra atgriezeniskā saite, kura seko signāla fāzei. *PLL* kārtā GNSS aparatūrā nosaka sekojošo [28]:

- 1. kārtā – šāda *PLL* ir jutīga pret ātrumu;
- 2. kārtā – šāda *PLL* ir jutīga pret vienmērīgu paātrinājumu;
- 3. kārtā – šāda *PLL* ir jutīga pret nevienmērīgu paātrinājumu.

Veidojot *PLL* svarīgi ir panākt optimālu attiecību starp tās frekvences joslas platumu un dinamisko veiktspēju. Šis kompromiss ir svarīgs tāpēc, ka palielinoties frekvences joslas platumam palielinās trokšņu ietekme uz lietderīgo signālu, bet mērījumu dinamisko apstākļu ietekme samazinās [54]. Citiem vārdiem sakot, jo augstākas prasības aparatūras veiktspējai dinamiskos apstākļos (jo augstāks pārvietošanās ātrums), jo platākai ir jābūt *PLL* frekvences joslai. *PLL* galvenokārt sastāv no fāzes detektora, laikā nemainīga lineārās atgriezeniskās saites filtra un sprieguma kontrolēta oscilatora. *PLL* uzdevums ir sekot signāla fāzes izmaiņām, kuras atbilstoši [74] nedrīkst pārsniegt 15° vērtību no viļņa garumu jeb GPS sistēmas gadījumā L1 frekvencei 8 mm un L2 frekvencei 10 mm pie vienas sigmas robežvērtības. Gadījumā, ja šī vērtība tiek pārsniegta iegūtie rezultāti ir uzskatāmi par neuzticamiem. Matemātiski tas izsakāms sekojoši:

$$\sigma_{PLL} = \sqrt{\sigma_{tPLL}^2 + \sigma_v^2 + \sigma_A^2} + \frac{\sigma_e}{3} \leq 15^\circ \quad (4.6)$$

kur:

σ_{tPLL} – termālā trokšņa standarta deviācija izteikta grādos;

σ_v – oscilatora nestabilitātes izraisītas nobīdes standarta deviācija izteikta grādos;

σ_A – Allana variācijas izraisīta oscilatora kļūda izteikta grādos;

σ_e – dinamisko apstākļu izraisīta kļūda *PLL*.

Bez šaubām, visas no augstāk minētajām kļūdu komponentēm ietekmē kopējo vietas noteikšanas precizitātes līmeni, it īpaši dinamiskos mērījumu apstākļos un smalkāks izklāsts ir atrodams [74]. Šajā gadījumā autors akcentēs dinamisko apstākļu ietekmi uz mērījumiem. Mērījumos tika izmantota aparatūra ar trešās kārtas *PLL* un frekvences joslas platumu 25 Hz [72]. Kā minēts [6] tad *PLL* darbību ļoti ietekmē satelītu signālu traucējumi, respektīvi, dažādi šķēršļi tiešā izplatīšanās ceļā, kas ietekmē to uztveršanu. Eksperimentos tika izvēlēti pēc iespējas labvēlīgāki apstākļi kādus pilsētas apstākļos bija iespējams nodrošināt. Atšķirībā no [6] modelētajiem apstākļiem autora veiktajos mērījumos apstākļi bija labvēlīgāki tāpēc

pacēluma lenķa maska tika izvēlēta 10° . Dinamisko apstākļu izraisīto kļūdu vienas sigmas robežvērtībai var izteikt sekojoši :

$$\sigma_e = \left(0,4828 \frac{d^3 R/dt^3}{B_n^3}\right)/3 \text{ (grādi)}, \quad (4.7)$$

kur: $d^3 R/dt^3$ – maksimālā redzamības līnijas dinamiskā izmaiņa ($^\circ/s^3$);

B_n – PLL joslas platums.

Veicot eksperimentus, kuri aprakstīti [48] tika fiksēts, ka šādai, 3. kārtas sistēmai reālā satiksmē rodas problēmas, jo reālā ceļu satiksmē bieži rodas situācijas, kurās ir nepieciešama straujāka vai lēnāka bremsēšana vai straujāka akselerācija, kas ir pretrunā ar 3. kārtas PLL iespējām. Vadoties no šiem rezultātiem eksperimentos, kas sīkāk apskatīti šajā nodaļā, autors izvēlējās tādu eksperimentu veikšanas vietu, kurā būtu iespējams izvairīties no nepieciešamības strauji bremsēt vai strauji uzsākt kustību. Novērst strauju kustību ietekmi uz rezultātiem, kā minēts, piemēram, [74] var izmantojot augstākas kārtas PLL par trešo kārtu. Ir izstrādāti arī risinājumi augsti dinamiskiem mērījumiem, kā minēts [54], bet autora mērķis bija izpētīt standarta, tirgū plaši pieejamu GNSS instrumentu veiktspēju dinamiskos apstākļos, kuros tiek pielietota 3. kārtas PLL. Visplašāk GNSS uztvērējos tiek izmantotas standarta PLL, jo tās nodrošina tiešus un precīzus nesošās frekvences fāzes mērījumus.

Izmantojot izteiksmi (4.7) aprēķināsim iespējamo dinamisko kļūdu, kāda varētu rasties pie ātruma 30 km/h ($\sim 0,85g$). Lai to izdarītu un rezultātu varētu izteikt $^\circ/s^3$, tad dinamikas izmaiņas ir jā sareizina ar nesošo viļņu skaitu 1 m, kas izteikts vērtībās $^\circ/m$ [74]. Matemātiski GPS L1 un L2 tas pierakstāms sekojoši:

$$(d^3 R/dt^3)_{L1} = \frac{(8,33 \text{ m/s}^3)(360^\circ/\text{ciklī})(1575,42 \times 10^6 \text{ ciklī/s})}{c} = 15758,800^\circ/s^3$$

$$(d^3 R/dt^3)_{L2} = \frac{(8,33 \text{ m/s}^3)(360^\circ/\text{ciklī})(1227,60 \times 10^6 \text{ ciklī/s})}{c} = 12279,585^\circ/s^3$$

Ievietojot iegūtās vērtības izteiksmē (4.7) iegūstam, ka 25 Hz platas joslas PLL 1σ kļūda GPS L1 frekvencei ir $0,16^\circ$, bet L2 frekvencei $0,13^\circ$, kas ir ievērojami zem noteiktā limita izteiksmē (4.7). Pārvēršot šīs vērtības attāluma vienībās tās sastāda attiecīgi $0,084$ mm L1 un $0,087$ mm L2 frekvencei. Pie paātrinājuma izmaiņām, kuras sastāda $10 g$ šīs vērtības attiecīgi ir 1 mm L1 un $0,98$ mm L2 frekvencei.

Kā minēts izteiksmē (4.6) tad bez dinamisko apstākļu ietekmes pastāv vēl trīs lielumi, kas ietekmē sistēmas stabilitāti dinamiskos mērījumu apstākļos. Pēc GPS sistēmas izveides standarta IS-GPS-200 šo lielumu summa nedrīkst pārsniegt $5,7^\circ$. Pieņemot, ka Allana variācijas un oscilatora vibrācijas izraisītā ietekme ir līdzīga, kā rakstīts [74] un to, ka izmantoto instrumentu PLL joslas platums ir 25 Hz, integrācijas laiks 1 ms, kā arī signāla/trokšņa attiecība ir 51 db-HZ [72] pēc izteiksmes (4.8) iegūstam, ka termālais troksnis sastāda aptuveni $0,81^\circ$.

$$\sigma_{tPLL} = \frac{360}{2\pi} \sqrt{\frac{B_n}{C/N_0} \left(1 + \frac{1}{2TC/N_0}\right)} \text{ (grādi)} \quad (4.8)$$

kur:

C/N_0 – signāls/troksnis attiecība, kura izteikta dB-Hz;

T – integrācijas laiks;

Nemot vērā, ka šie dinamiskie apstākļi kopā sastāda aptuveni $3,63^\circ$, tad pārveidojot izteiksmju (4.1) un (4.2) rezultātus paātrinājuma vērtībās un attiecīgi iegūstot vērtības 19,4 g un 24,5 g iespējams pārbaudīt sistēmas darbības stabilitāti, kuru nosaka izteiksme (4.6). Izmantojot izteiksmi (4.7) varam iegūt sekojošus rezultātus:

$$\sigma_{PLL_{L1}} = 7,33^\circ$$

$$\sigma_{PLL_{L2}} = 7,27^\circ$$

Šie rezultāti pilnībā apmierina nosacījumus sistēmas stabīlai darbībai, kuri definēti izteiksmē (4.6). Pārvietojoties ar ātrumu, kurš viena mērījuma laikā ļauj atrasties vienā un tajā pašā fāžu celiņā un pie labiem mērījumu nosacījumiem, mērījumi ar šiem standarta ģeodēziskajiem instrumentiem ir iespējami.

Gadījumā, kad pārvietošanās ātrums ir nemainīgs, piemēram, izmantojot auto kruīza kontroli vai nākotnē izmantojot autopilota sistēmas tas ļauj paaugstināt mērījumu precizitāti, tomēr tas nebūs spēkā gadījumā, ja ātrums ir mainīgs, jo prognozētā fāzes izmaiņa neatbilst reālajam pārvietošanās ātrumam. Apskatot izteiksmes (4.1) un (4.2) redzams, ka augstas precizitātes GNSS mērījumi iespējami arī lielākos ātrumos. Pilsētas satiksmes plūsma, kā minēts, nepārsniedz 70 km/h, bet ātrvilcienu satiksmes ātrums (piemēram, RailBaltica) var sasniegt vairāk nekā 200 km/h lielu ātrumu. Tā kā vilcieni pārvietojas relatīvi labākos satelītu novērošanas apstākļos, tad pēc autora domām GNSS ar reālā laika korekcijām ir izmantojams arī šādas satiksmes navigācijā un pat nekomerciālā gaisa satiksmē, kurā ātrums ir zem 600 km/h.

Mērījumu vidējā vērtība ir labākais mērs, nosakot mērāmo lielumu [36], [75]. Taču dinamiskos mērījumu apstākļos nav iespējams veikt vairāk par vienu mērījumu vienā atrašanās pozīcijā. Šādā situācijā nepieciešams meklēt citus ceļus, lai novērtētu mērījumos sasniedzamo precizitāti un novērtētu to uzticamību.

Autoram pieejamie GNSS instrumenti nodrošina automātisku mērījumu veikšanu pēc iestatītiem kritērijiem tādiem kā:

- pēc konkrēta laika kopš iepriekšējā mērījuma veikšanas – katrs jauns mērījums tiek veikts pēc iestatīta laika posma, kopš pēdējā veiktā mērījuma, piemēram, ik pēc sekundes;
- pēc konkrēta veiktā attāluma – katrs jauns mērījums tiek veikts sasniedzot noteiktu attālumu no iepriekšējā mērījuma veikšanas pozīcijas, piemēram, ik pēc 10 m.

Taču šādā gadījumā nav iespējams veikt kaut cik objektīvu mērījumu precizitātes novērtējumu, jo nav orientējoša lieluma ar kuru salīdzināt iegūtos mērījumus. Šādā veidā veiktos mērījumos iespējama aparātūras ātrdarbības ietekme uz rezultātiem, kas samazina mērījumu vidējās vērtības atbilstību patiesajai vērtībai. Veicot datu apstrādi autors secināja, ka rezultāti ir nevienmērīgi un ir nepieciešama labāka mērījumu veikšanas un apstrādes metodika, tāpēc šiem mērījumiem turpmākajās apakšnodaļās autors pievērsīsies tikai virspusēji. Tas tiks darīts, jo, veicot papildus mērījumus, radās teicama doma kā pārbaudīt vai GNSS RTK spēj darboties dinamiskos mērījumu apstākļos ar statistiskiem apstākļiem līdzvērtīgu precizitāti. Turpmākajās apakšnodaļās tiks aprakstīti iegūtie rezultāti dinamiskos mērījumu apstākļos gan pēc minētajiem diviem automātiskajiem mērījumu veikšanas variantiem, gan pēc vizuālas tuvinātas precizitātes novērtēšanas. Galvenais uzvars tiks likts uz oriģinālu dinamisko mērījumu veikšanas un apstrādes metodi, jo, kā izrādījās salīdzinājumā ar pirmreizējām apstrādes metodēm, tā izrādījās ievērojami labāka [65].

4.1. GNSS RTK mērījumi dinamiskos apstākļos, izmantojot automātisko mērījumu veikšanu

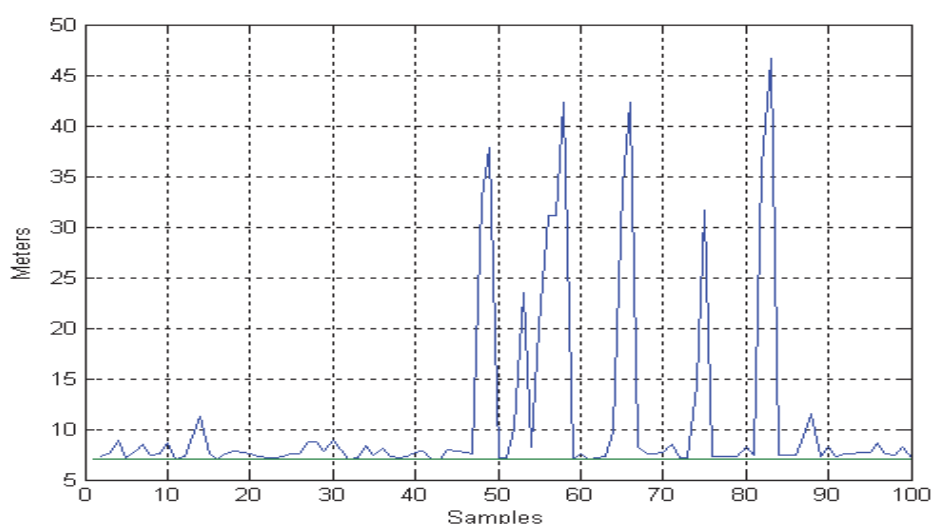
Pēc tam, kad autors bija apstrādājis 2007. gadā veikto statisko mērījumu rezultātus un konstatējis, ka *EUPOS®-RIGA* atbalsta sistēma nodrošina augstas precizitātes un augstas uzticamības mērījumu atkārtojamību, radās pirmās idejas par sistēmas darbības pārbaudi dinamiskos mērījumu apstākļos. Tā kā nebija pilnīgas pārliecības par mērījumu augstu precizitāti dinamiskos apstākļos, tad pirmie mērījumi tika veikti salīdzinoši pavisam. Sākotnējos

mērījumos netika pievērsta īpaša uzmanība tam kā tiek nostiprināts instruments uz automašīnas jumta. Uztverošā antena nebija nostiprināta horizontāli, kas daļēji varētu skaidrot iegūto rezultātu zemo precizitāti. Protams, arī tādi faktori, kā izvēlētie ātrumi mērījumu veikšanas brīdī apzināti tika izvēlēti lielāki nekā teorētiski pieļaujamie. Piemēram, automātiskā mērījumu veikšana tika iestatīta uz 7 m intervālu, bet pārvietošanās ātrums 60 km/h, ņemot vērā instrumenta tehniskos parametrus, kuri pieļauj vienu mērījumu sekundē ir skaidrs, ka šādā variantā 7 m tiek veikti ātrāk nekā vienā sekundē. Taču šādi mērījumi tika veikti ar mērķi pārbaudīt vai šāda veida sistēma spēj saglabāt „Fix” pozīcijas risinājumu arī pie šādiem ātrumiem. Analizējot uzkrātos datus, autors, loģiskā kārtā secināja, ka ir nepieciešama lielāka precizitāte pašā mērījumu veikšanā, jo instruments spēj saglabāt „Fix” risinājumu dinamiskos apstākļos. Pirmreizējā GNSS RTK instrumenta darbības novērtēšanā dinamiskos apstākļos autors veica mērījumus sekojošos apstākļos:

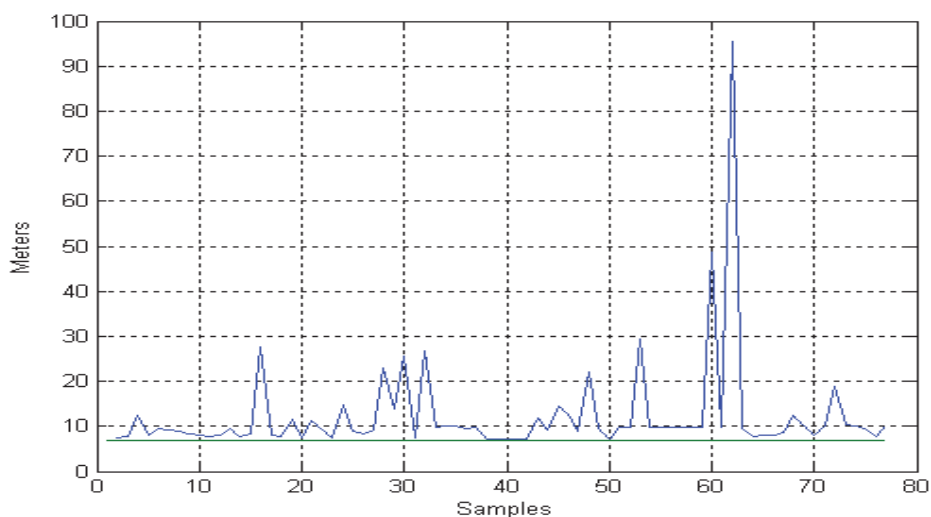
- Auto pārvietojas ar ātrumu ~20 km/h – 1 s veiktais ceļš 5,55 m;
- Auto pārvietojas ar ātrumu ~40 km/h – 1 s veiktais ceļš 11,11 m;
- Auto pārvietojas ar ātrumu ~60 km/h – 1 s veiktais ceļš 16,66 m.

Attēlos zemāk īsi atspoguļoti iegūtie mērījumu rezultāti:

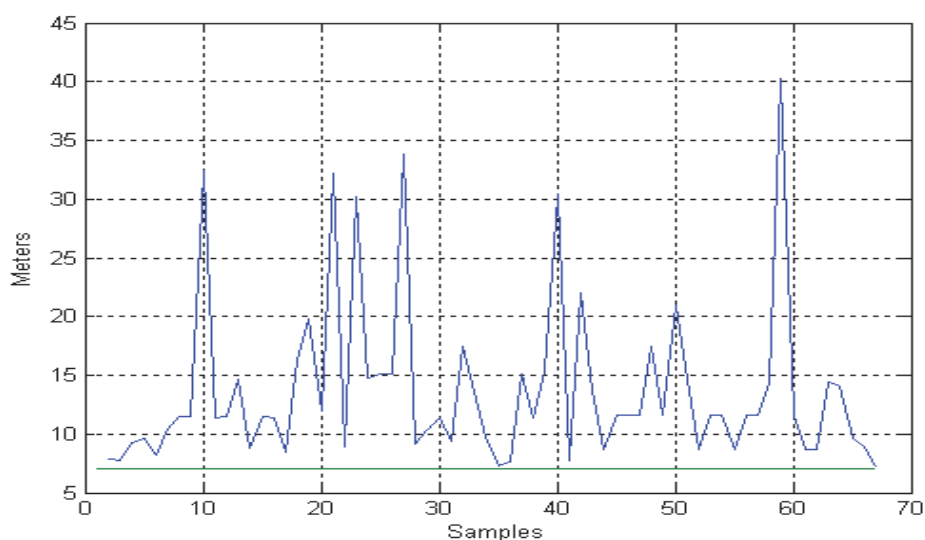
- 4.2. attēls – izmērītie intervāli pie pārvietošanās ātruma ~20 km/h;
- 4.3. attēls – izmērītie intervāli pie pārvietošanās ātruma ~40 km/h;
- 4.4. attēls – izmērītie intervāli pie pārvietošanās ātruma ~60 km/h.



4.2. att. Izmērītie intervāli pie pārvietošanās ātruma ~20 km/h



4.3. att. Izmērtie intervāli pie pārvietošanā ātruma ~40 km/h



4.4. att. Izmērtie intervāli pie pārvietošanā ātruma ~60 km/h

Apskatot 4.2. attēlu redzams, ka izmērīto intervālu vērtības mērījumu sākumposmā ir visnotaļ tuvas iestatītajai vērtībai, kura bija 7 m. Kā redzams no 4.5. – 4.7. attēliem tad mērījumi tika veikti braucot ar auto elipses veida maršrutā. Mērījumi tika veikti braucot pa izvēlētu ielas nogriezni un nepārtraucot mērījumus auto apgriezās un veica to pašu ceļu atpakaļ. Skatoties uz 4.2. attēlu ir redzams, ka intervālu mērījumos parādās lielas kļūdas tieši distances vidusdaļā, tas skaidrojams ar dinamisko apstākļu izmaiņām – ātruma samazināšanās, virziena maiņa, kam seko ātruma palielināšanās.

4.3. attēlā redzams, ka intervālu mērījumos nav tik daudz liela apjoma kļūdu kā pirmajā mērījumu sesijā. Autors to skaidro, ka instruments bija izslēdzis ciklu nenoteiktību no

vairākiem satelītiem nekā pirmajā eksperimentā. Šie rezultāti vedināja domāt, ka GNSS RTK izmantošana dinamiskos mērījumu apstākļos ir iespējama un ar samērā labu precizitāti.

4.4. attēlā attēloti rezultāti tuvojas iestatītajam 7 m intervālam tikai mērījumu sākumposmā, vidusdaļā un pašās beigās. Tas, loģiski, parāda, ka pie šāda ātruma 1 s veiktie nepilni 17 m liedz nomērīt tik īsu intervālu. Izmērīto intervālu sakritību ar iestatīto garumu sesijas sākumā, vidū un beigās autors skaidro ar to, ka šajās pozīcijās auto pārvietošanās ātrums ir bijis ļoti zems un līdz ar to instruments bija spējīgs veikt iestatītajam intervālam pietuvinātus mērījumus.

Jāņem vērā, ka attēlos 4.2. – 4.4. ir uzrādīti absolūtie attālumi starp diviem blakusesošiem punktiem, tātad tie neatspoguļo virzienu, kurā šis attālums ir fiksēts. Autoram līdz ar to radās ideja vizuālā veidā veikt tuvinātu mērījumu precizitātes novērtēšanu, kas tiks parādīta zemāk.

4.2. GNSS RTK mērījumu dinamiskos apstākļos precizitātes tuvināta novērtēšana vizuāli

Kā tika minēts iepriekš, tad attēlos 4.2. – 4.4. ir atspoguļoti absolūtie attālumi starp divām blakus esošām mērījumu veikšanas pozīcijām. Autors, secināja, ka šādā gadījumā nav iespējams pilnvērtīgi novērtēt kāda ir mērījumu precizitāte. Izmantotais instruments nenodrošina pozīcijas attēlošanu uz kartes reālā laikā un tā kā auto pārvietojās pa ielu, tad atspoguļotie rezultāti neparāda vai pozīcija katrā mērījumā saglabājas uz ielas vai tā piemēram ir vairākus metrus ārpus ielas robežām. Lai novērtētu vai auto pozīcija mērījumu laikā saglabājas ielas robežās tika veikta uzkrāto mērījumu attēlošana uz satelītkartes, izmantojot interneta vietni <http://www.gpsvisualizer.com>. Jāņem vērā, ka satelītkartes precizitāte var būt zemāka par GNSS RTK mērījumu precizitāti, tādēļ tā ir izmantojama tikai kā tuvināts precizitātes novērtējums.



4.5. att. Mērījumu pie pārvietošanās ātruma ~20 km/h vizualizācija



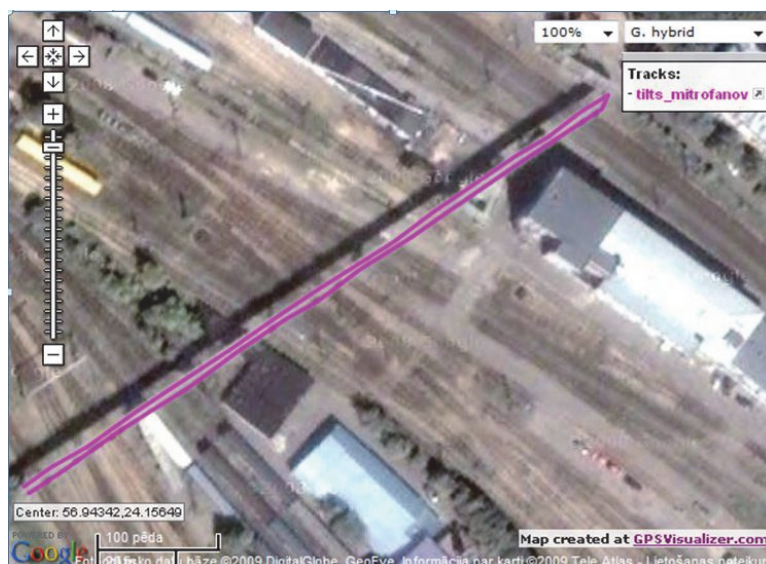
4.6. att. Mērījumu pie pārvietošanās ātruma ~40 km/h vizualizācija



4.7. att. Mērījumu pie pārvietošanās ātruma ~60 km/h vizualizācija

Apskatot attēlus 4.5. – 4.7. redzams, ka lielākā daļa mērījumu iekļaujas ielas robežās un minimāla to nobīde ir vērojama tikai retos gadījumos. Tas, pēc autora domām, bija uzskatāms par apliecinājumu tam, ka GNSS RTK instrumenti spēj darboties ar salīdzinoši labu precizitāti arī dinamiskos mērījumu apstākļos. Autors, ņēma vērā lielo intervālu mērīšanas neprecizitāti un veica vēl dažus eksperimentus, kuru rezultātus novērtēja vizuāli. Šajos eksperimentos mērījumi tika veikti pārvietojoties kājām, bet pa šaurāku nekā iela gājēju tiltiņu un pa aptuveni 30-40 cm platu betona konstrukciju. Autors cerēja iegūt rezultātus, kuri vizuāli būtu ļoti precīzi, tādā veidā iegūstot apstiprinājumu, ka GNSS RTK instrumenti ir izmantojami dinamiskos apstākļos. Kā redzams no 4.8. un 4.9. attēliem, tad autoram tas arī izdevās un bija nepieciešams rast metodi, kā pārbaudīt šādu instrumentu precizitāti kvalitatīvāk. Metodi, kura nodrošinātu gan absolūto precizitātes novērtēšanu, gan vizuālu tās kontroli.

Apskatot 4.8. attēlu redzams, ka visi veiktie mērījumi atrodas uz tilta, kas liecina, ka pie nelieliem ātrumiem GNSS RTK noteikti spēj darboties ar augstu mērījumu precizitāti. Ja eksperimentā ar auto ielas platums bija aptuveni 6-7 m, tad šajā gadījumā tilta platums nepārsniedza 3-4 m.



4.8. att. Mērījumi ejot kājām pa gājēju tiltu

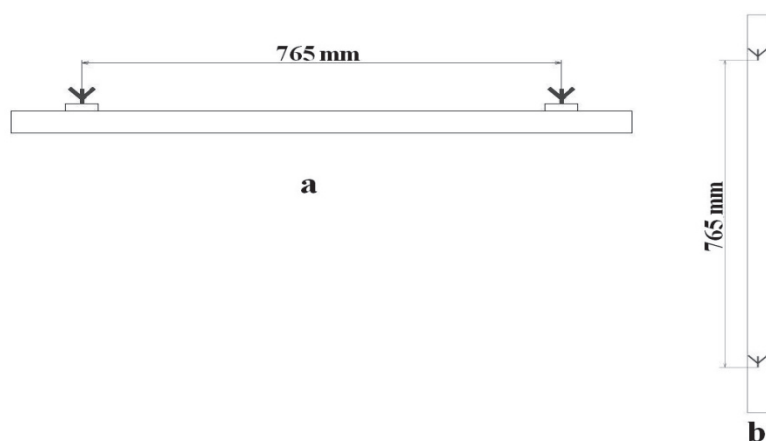


4.9. att. Mērījumi uz šauras betona konstrukcijas

Lai būtu iespējama mērījumu precizitātes vizuāla novērtēšana ar augstāku precizitāti, autors, izvēlējās veikt mērījumus uz 30-40 cm platām betona konstrukcijām. Tādā veidā, mērījumu rezultātiem neizejot no šo konstrukciju robežām (kā tas arī notika) jau būtu iespējams runāt par submetra GNSS RTK mērījumu precizitāti dinamiskos apstākļos. Aplūkojot 4.9. attēlu redzams, ka mērījumi iekļaujas betona konstrukcijas robežās un līdz ar to apliecina, ka dinamiskos apstākļos ar GNSS RTK instrumentiem arī ir iespējams sasniegt augstu mērījumu precizitāti.

4.3. GNSS RTK mērījumi dinamiskos apstākļos izmantojot divus instrumentus

Kā iepriekš tika minēts, tad pēc pirmajiem mērījumiem dinamiskos apstākļos, bija nepieciešams izstrādāt mērījumu veikšanas un to apstrādes metodiku, kura ļautu objektīvāk spriest par GNSS RTK instrumentu veikspēju mērot dinamiskos mērījumu apstākļos. Atšķirībā no mērījumiem statiskos apstākļos, kad GNSS RTK instruments ir nekustīgs un nepieciešamības gadījumā to iespējams atkārtoti uzstādīt iepriekšējā mērījumu veikšanas vietā, dinamiskos mērījumu apstākļos šādas iespējas nav. Dinamiskos mērījumu apstākļos vienā pozīcijā iespējams veikt tikai vienu mērījumu [25]. Statisko mērījumu apstrādes procesā autors pārliecinājās, ka atbalsta sistēmas *EUPOS®-RIGA* nodrošinātā mērījumu precizitāte nav atkarīga no GNSS RTK instrumenta, ja tiek lietots vienāda korekciju plūsma un instrumenti ir līdzvērtīgas klases. Vadoties no iepriekšējo pētījumu rezultātiem radās ideja mērījumus veikt ar diviem GNSS RTK instrumentiem vienlaicīgi. Uzstādot tos uz transportlīdzekļa, nemainīgā attālumā vienu no otra, būtu iespējams veikt mērījumus un kā pārbaudes lielumu izmantot šo nemainīgo, bet zināmo attālumu starp abiem instrumentiem. Lai minimizētu iespējamās signālu apstrādes procesa izraisītās kļūdas, tika izvēlēti divi viena ražotāja (*TOPCON*) GNSS RTK instrumenti. Mērījumu procesā instrumenti viens no otra atradās 765mm attālumā kā parādīts 4.10. attēlā.



4.10. att. GNSS RTK instrumentu stiprinājumi mērījumu procesā

Arī šajā mērījumu procesā tika veiktas divas dažādas mērījumu sesijas. Pirmajā no tām instrumenti tika nesti rokās, ejot kājām. Šī mērījumu sesija no augstuma komponentes mērīšanas viedokļa un uztvērēju savstarpējā novietojuma stabilitātes viedokļa, pēc autora domām uzskatāma par sliktāku nekā otrā mērījumu sesija. Otrajā mērījumu sesijā instrumenti tika nostiprināti uz automašīnas jumta un līdz ar to bija labāk fiksēti vertikālajā un arī

horizontālajā plaknē. Taču pirmā mērījumu sesija bija nepieciešama, lai pārlicinātos par to vai iespējams sasniegt tādu mērījumu precizitāti, kura būtu pielīdzināma statiskos mērījumu apstākļos iegūstamajai.

4.3.1. GNSS RTK mērījumi pārvietojoties kājām

Šajā mērījumu sesijā instrumenti tika nostiprināti uz metāliska stieņa kā parādīts 4.10. a) attēlā, attālums starp tiem bija 765 mm. Mērījumus abi instrumenti veica automātiskajā režīmā ar rezultātu ierakstu atmiņā ik pēc 1 s. Lai būtu iespējams veikt mērījumu rezultātu apstrādi, autors izmantoja oriģinālu rezultātu apstrādes metodi.

Sākumā iegūtie mērījumu dati tika importēti profesionālā programmatūrā, kuru ražo *Bentley* kompānija. Tās ražotā programmatūra ir paredzēta precīzu arhitektūras, ģeodēzijas un citu veidu inženiertehnisku uzdevumu veikšanai. Tā spēj darboties arī ar koordinētiem mērījumu datiem kādi šajā gadījumā bija autora veiktie mērījumi. Tā kā mērījumos tika izmantoti divi paralēli nostiprināti instrumenti, tad vizuāli tie veidoja divas līnijas, kuras attēlotas 4.11. attēlā. Mērījumi tika veikti ejot no viena tilta gala līdz otram un pēc tam atpakaļ, attēloti tiek mērījumi tikai vienā virzienā, jo pretējā virzienā attēls veidojās identisks.



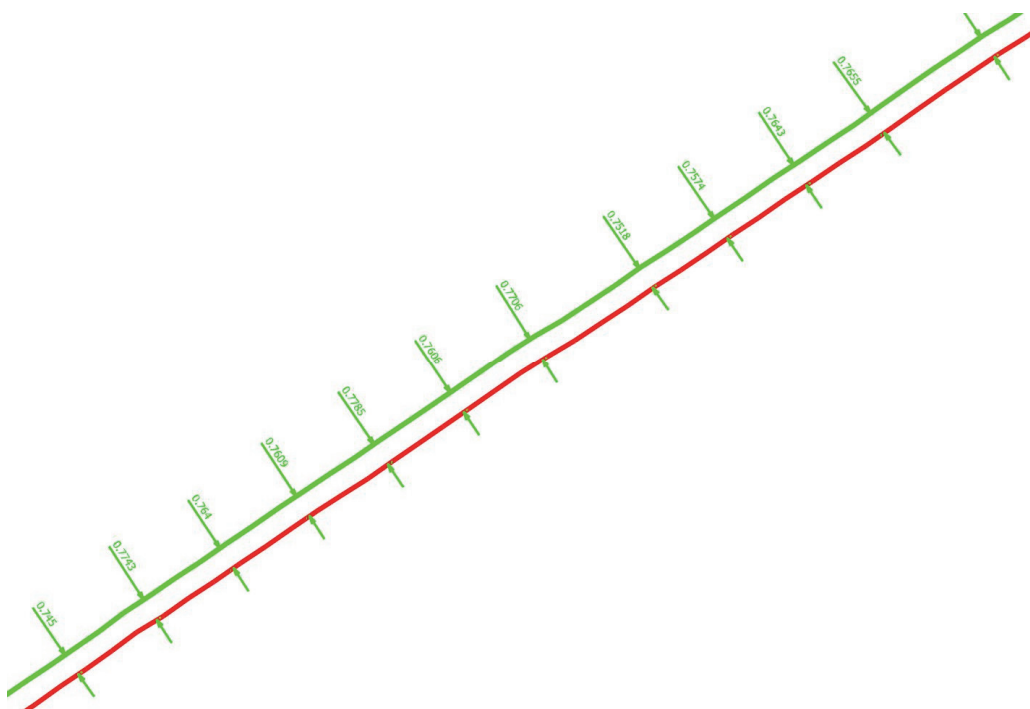
4.11. att. Mērījumu rezultātu vizuāls attēlojums

Ņemot vērā to, ka mērījumu ierakstīšanas process netika uzsākts sinhroni, jo fiziski nav iespējams vienlaicīgi uzsākt mērījumus, autors, lai izvairītos no iespējamās kļūdas laika sinhronizācijas ietekmē izvēlējās iegūtos mērījumus savienot ar paralēlām līnijām, kā parādīts

4.11. attēlā. Izmantotā *Bentley* programmatūra nodrošina iespēju veikt mērījumus ar augstu precizitāti starp diviem punktiem ar dažādiem kritērijiem. Autors izvēlējās sekojošus kritērijus:

- mērījumi starp iegūtajām līnijām jāveic perpendikulārā leņķī – tas ļauj novērst laika sinhronizācijas problēmu;
- mērījumu veikšanas vieta jāizvēlas tā, lai nesakristu ar instrumenta fiksētu pozīciju.

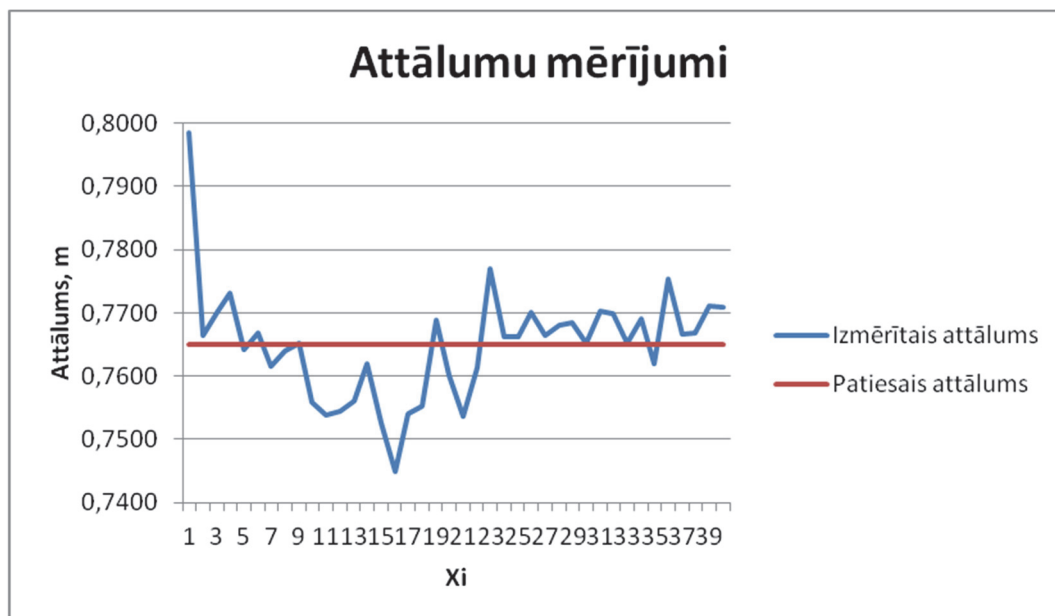
Mērījumu apstrādes rezultātā tika iegūti attālumi starp līnijām ar precizitāti līdz milimetra desmitdaļai. Iegūto rezultātu piemērs parādīts 4.12. attēlā.



4.12. att. Mērījumu veikšanas piemērs *Bentley* vidē

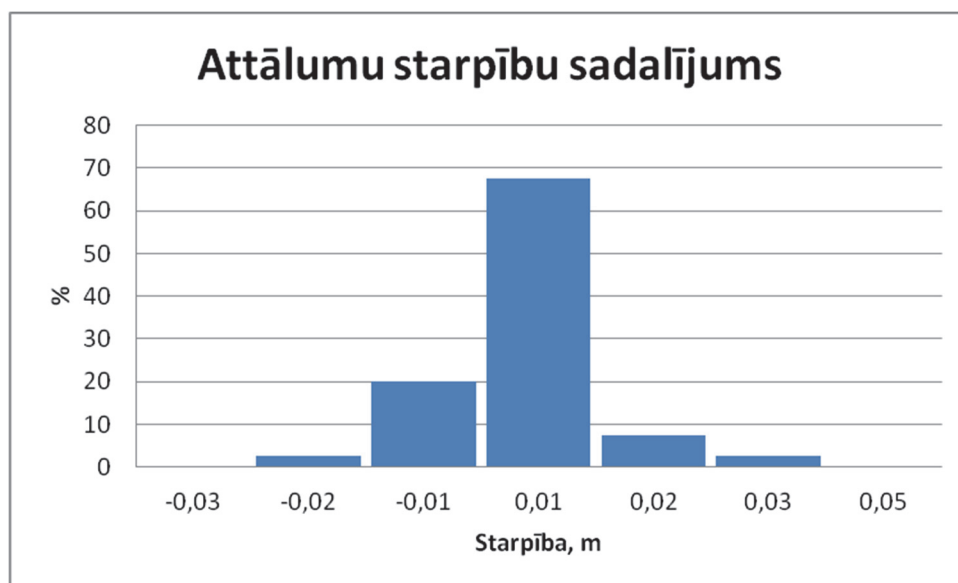
Veikto mērījumu precizitātes novērtēšanai autors izvēlējās kopumā 81 vērtību. 40 mērījumu vērtības vienā virzienā un 41 vērtību otrā virzienā. Apstrādājot rezultātus katrā mērījumu veikšanas vietā iegūtais rezultāts tika atņemts no patiesā attāluma vērtības. Mērījumu absolūtās kļūdas ir parādītas 4.13. attēlā. Šajā mērījumu posmā absolūtā mērījumu kļūda ir robežās:

$$-0,0201 \leq x \leq 0,0335 \text{ m}$$



4.13. att. Mērījumu absolūtās kļūdas

Absolūto mērījumu kļūdu blīvuma sadalījums parādīts 4.14. att.



4.14. att. Mērījumu absolūto kļūdu blīvuma sadalījums

Kā redzams no 4.14. attēla, tad ~90 % mērījumu absolūtā kļūda dinamiskos mērīšanas apstākļos nepārsniedz ± 1 cm.

Šajā mērījumu posmā 40 mērījumu vidējā vērtība ir:

$$x_v = 0,7649 \text{ m}$$

Tātad vidējās vērtības un patiesās vērtības atšķiras tikai par 0,1 mm.

Mērījumu standartnovirze šajā posmā:

$$\sigma_x = 0,00884 \text{ m}$$

Mērījumu vidējās vērtības vidējā kvadrātiskā kļūda:

$$\sigma_{x_v} = 0,001398 \text{ m}$$

Ņemot vērā, ka mērījumi tika veikti izmantojot divus uztvērējus vienlaicīgi un tie bija viena ražotāja, tad pēc autora domām var uzskatīt, ka to instrumentālās kļūdas ir līdzīgas un tādā veidā, lai iegūtu viena instrumenta mērījumu kļūdu vērtības tās ir jādala ar 2, kas dod sekojošas vērtības:

$$\sigma_x = 0,00442 \text{ m}$$

$$\sigma_{x_v} = 0,000699 \text{ m}$$

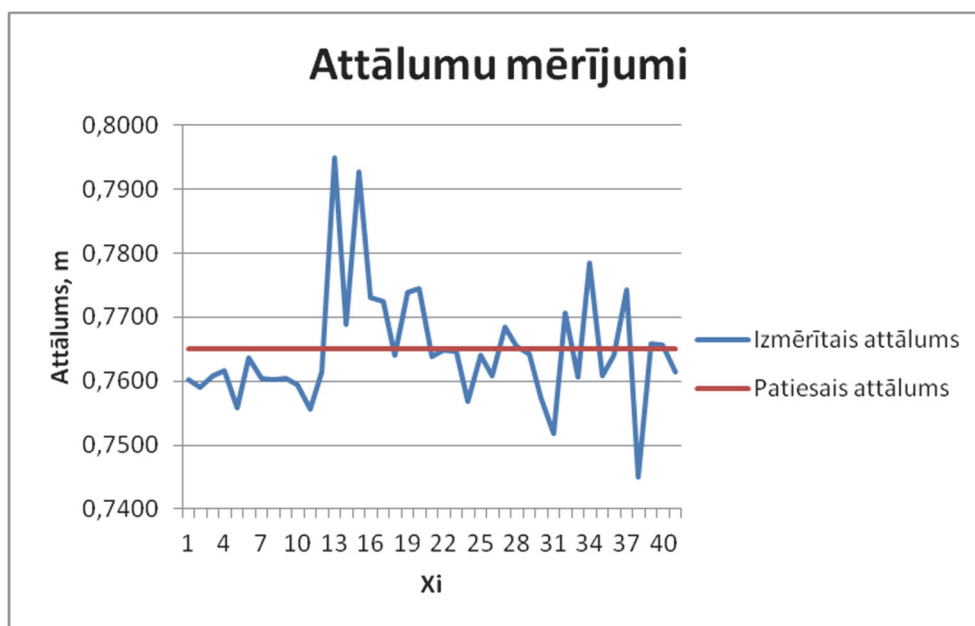
Otra mērījumu sesijas daļa tika veikta analogi pirmajai tikai ar izmainītu uztvērēju pozīciju, jo pārvietošanās notika pretējā virzienā. Tādā veidā maršruta līnijas, salīdzinājumā ar 4.11. attēlā redzamajām samainījās vietām un izskatījās kā parādīts 4.14. attēlā.



4.14. att. Mērījumu maršruta līnijas

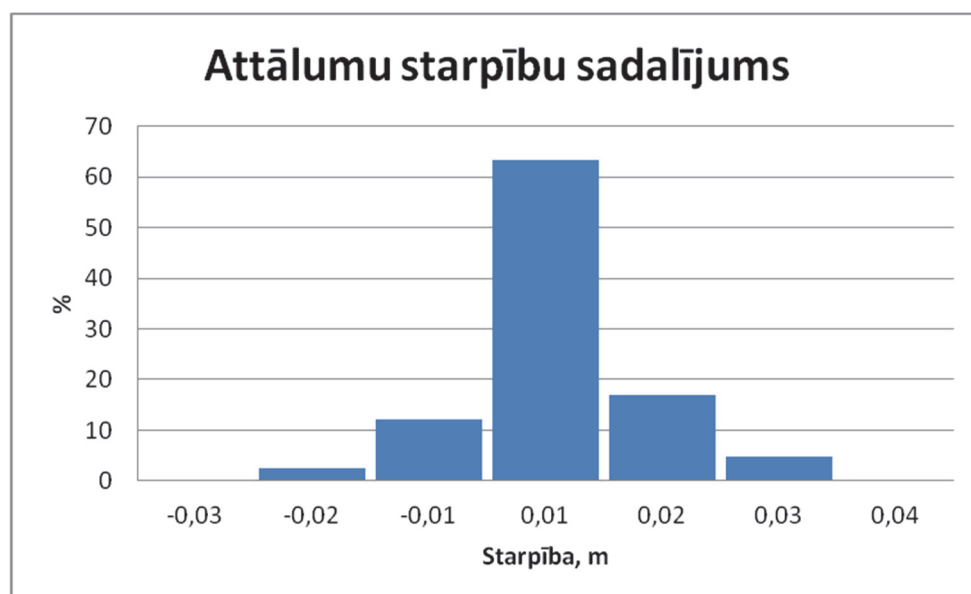
Mērījumi tika apstrādāti analogā veidā kā pirmajā posmā un kā jau tika minēts iepriekš, tad šajā mērījumu apstrādes posmā bija 41 mērījums, kuru absolūtās kļūdas, skat. 4.15. attēlu, bija sekojošās robežās:

$$-0,02 \leq x \leq 0,03 \text{ m}$$



4.15. att. Mērījumu sesijas otrā posma absolūtās kļūdas

Absolūto mērījumu kļūdu sadalījuma blīvums parādīts 4.16. attēlā.



4.16. att. Mērījumu absolūto kļūdu sadalījuma blīvums

Kā redzams no 4.16. attēla, šajā mērījumu veikšanas posmā salīdzinājumā ar iepriekšējo tikai ~75 % mērījumu absolūto kļūdu vērtību ir diapazonā ± 1 cm. Tas ir mazāk kā pirmajā posmā, taču šajā posmā maksimālās absolūto kļūdu vērtības ir mazākas nekā pirmajā posmā.

Mērījumu vidējā vērtība šajā posmā sakrīt ar patieso vērtību, tātad:

$$x_v = 0,7650 \text{ m}$$

Mērījumu standartnovirze un vidējā kvadrātiskā kļūda attiecīgi:

$$\sigma_x = 0,009244 \text{ m}$$

$$\sigma_{x_v} = 0,001444 \text{ m}$$

Analogi pirmajam mērījumu posmam iegūstam viena instrumenta mērījumu standartnovirzi un vidējo kvadrātisko kļūdu, attiecīgi:

$$\sigma_x = 0,004622 \text{ m}$$

$$\sigma_{x_v} = 0,000722 \text{ m}$$

Salīdzinot iegūtos rezultātus ar 3. nodaļā iegūtajiem rezultātiem, autors secina, ka GNSS RTK instrumenti dinamiskos mērījumu apstākļos, spēj nodrošināt mērījumu precizitāti, kura ir līdzvērtīga statiskos mērījumu apstākļos iegūstamajai. Tomēr, mērījumu apstākļu dinamika bija zema, jo mērījumi tika veikti pārvietojoties kājām un pārvietošanās ātrums nepārsniedza 5 km/h. Neraugoties uz to, iegūtie rezultāti liecina par to, ka arī augstākas mērījumu dinamikas apstākļos būtu iespējams sasniegt līdzvērtīgu mērījumu precizitāti. Lai pārlicinātos par GNSS RTK sniegumu augstākas dinamikas apstākļos, autors veica mērījumus, kuros pārvietošanās notika ar auto, šo mērījumu rezultāti tiks atspoguļoti 4.3.2. nodaļā.

4.3.2. GNSS RTK mērījumi pārvietojoties ar auto

Iegūstot labas precizitātes rezultātus mērījumiem dinamiskos apstākļos, bija pamats domāt, ka arī palielinoties pārvietošanas ātrumam tiks iegūta līdzīga mērījumu precizitāte. Autors veica mērījumus pārvietojoties ar auto, līdzīgi kā pārvietojoties kājām, respektīvi, mērījumos tika izmantoti divi GNSS RTK instrumenti. Tie tika nostiprināti uz tā paša metāliskā stieņa ar nemainīgu attālumu starp tiem 765 mm. Šajā reizē instrumenti tika nostiprināti uz auto

jumta kā parādīts 4.10. b attēlā. Šajos mērījumos ātrums bija lielāks nekā ejot kājām un tas bija ~30 km/h. Ņemot vērā paaugstināto pārvietošanās ātrumu, tika nolemts, ka mērījumu skaitam jābūt lielākam un tie jāveic dažādos režīmos. Mērījumi tika veikti divos sekojošos režīmos:

- Mērījumi ar automātisku ierakstu ik pēc 10 veiktiem metriem;
- Mērījumi ar automātisku ierakstu ik pēc 1 s.

Tādā veidā mērījumi tika veikti nosacītos četros posmos:

- Mērījumi ik pēc 10 m virzienā „turp”;
- Mērījumi ik pēc 10 m virzienā „atpakaļ”;
- Mērījumi ik pēc 1 s virzienā „turp”;
- Mērījumi ik pēc 1 s virzienā „atpakaļ”

Mērījumu režīms ar ierakstu ik pēc 10 m tika izvēlēts, lai novērstu iespējamo instrumentu laika sinhronizācijas ietekmi, jo atšķirībā no mērījumiem, kuri tika veikti pārvietojoties kājām abi instrumenti neatradās paralēli, bet gan vienā līnijā. Līdz ar to nebija iespējams veikt attālumu mērījumus starp divām maršruta līnijām kā tas parādīts 4.12. attēlā. Savukārt, ja mērījumi tiek veikti ik pēc kāda noteikta veiktā attāluma, šo attālumu abi instrumenti veiks vienādā laikā līdz ar to arī šajā gadījumā laika sinhronizācijas ietekme tika izslēgta.

Mērījumu apstrādes gaitā, kuras rezultāti izklāstīti 4.3.1. nodaļā, autoram radās priekšnojauta, ka laika sinhronizācija starp diviem uztvērējiem nav nepieciešama. To autors pamato ar to, ka pēc uztvērēju iekšējo pulksteņu sinhronizācijas ar satelītu pulksteni tie ir sinhronizēti vienā laikā. Lai par to pārliecinātos, autors izvēlējās arī veikt mērījumus, kuri tiktu fiksēti ik pēc 1 s, līdzīgi kā tas tika darīts eksperimentos, kuru gaita aprakstīta šīs apakšnodaļas sākumā. Ja mērījumu apstrādes gaitā tiktu iegūts rezultāts, kurš līdzinātos rezultātam, kurš iegūts veicot mērījumus ik pēc noteikta veiktā attāluma, tas būtu apliecinājums tam, ka īpaša uztvērēju pulksteņu savstarpējā sinhronizācija nav nepieciešama, lai sasniegtu subcentimetra standartnovirzi mērījumiem.

4.3.2.1. Mērījumu veikšana ik pēc 10 m veiktā attāluma

Izvēlētā mērījumu apstrādes programmatūra nodrošina iespēju nomērīt attālumu starp diviem koordinētiem punktiem ar ļoti augstu precizitāti, kura ir augstāka par mērījumu gaitā gaidāmo absolūtās kļūdas vērtību. Šajos mērījumos attālumus starp uztvērējiem autors ieguva

tiešos mērījumos, respektīvi, attālums netika mērīts kā iepriekš (4.12. attēls), bet tieši starp diviem blakusesošiem punktiem kā parādīts 4.17. attēlā.



4.17. att. Attālumu starp uztvērējiem vērtību nolasīšana

Mērījumos, kuri tika veikti ik pēc 10m rezultātu apstrādei tika nolasītas 40 attālumu starpības abos maršruta virzienos. Reāli veiktie mērījumi jeb pozīcijas attēlotas 4.18. attēlā. Šajā mērījumu posmā absolūtās kļūdas bija sekojošās robežās:

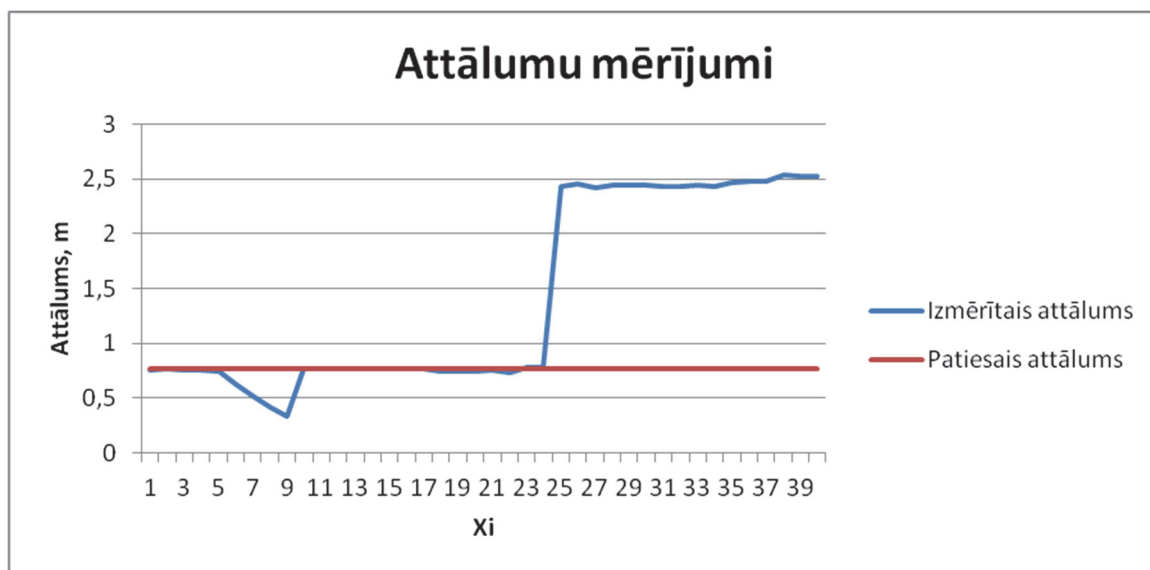
$$-0,3366 \leq x \leq 1,7685 \text{ m}$$

Iegūto attālumu starpības šim mērījumu posmam attēlotas 4.19. attēlā, bet to sadalījuma blīvums 4.20. attēlā. Šajā mērījumu sesijas posmā iegūto attālumu starpību vidējā vērtība:

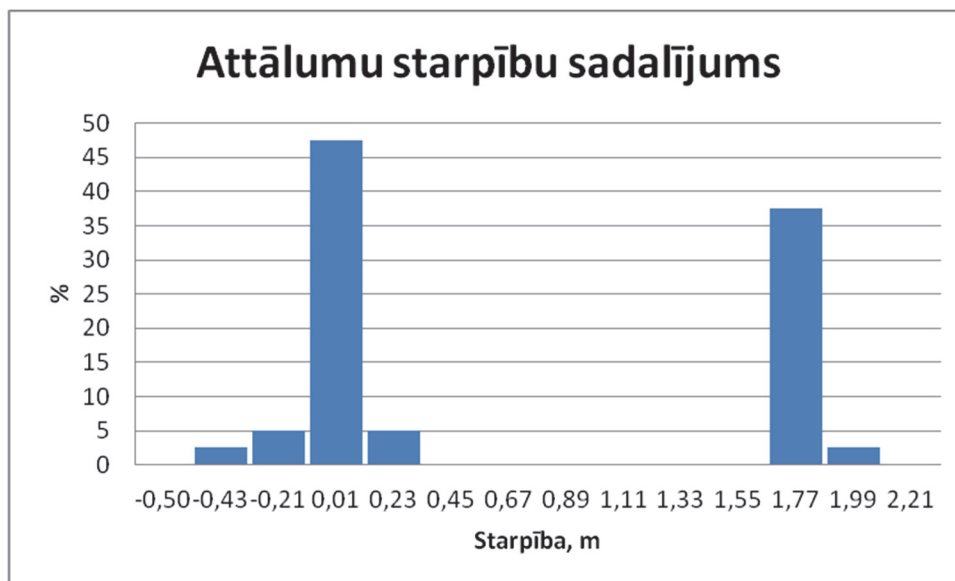
$$x_v = 1,4111 \text{ m}$$



4.18. att. Mērījumos, braucot ar auto, fiksēto pozīciju attēlojums dabā



4.19. att. Iegūto attālumi mērījumos ar auto ik pēc 10 m virzienā „Turp”



4.20. att. Attālumu vērtību sadalījums mērījumiem
ar auto ik pēc 10 m virzienā „Turp”

Līdzīgi kā iepriekš, šajā posmā mērījumu standartnovirze un vidējā kvadrātiskā kļūda sastādīja attiecīgi:

$$\sigma_x = 0,436801 \text{ m}$$

$$\sigma_{x_v} = 0,081629 \text{ m}$$

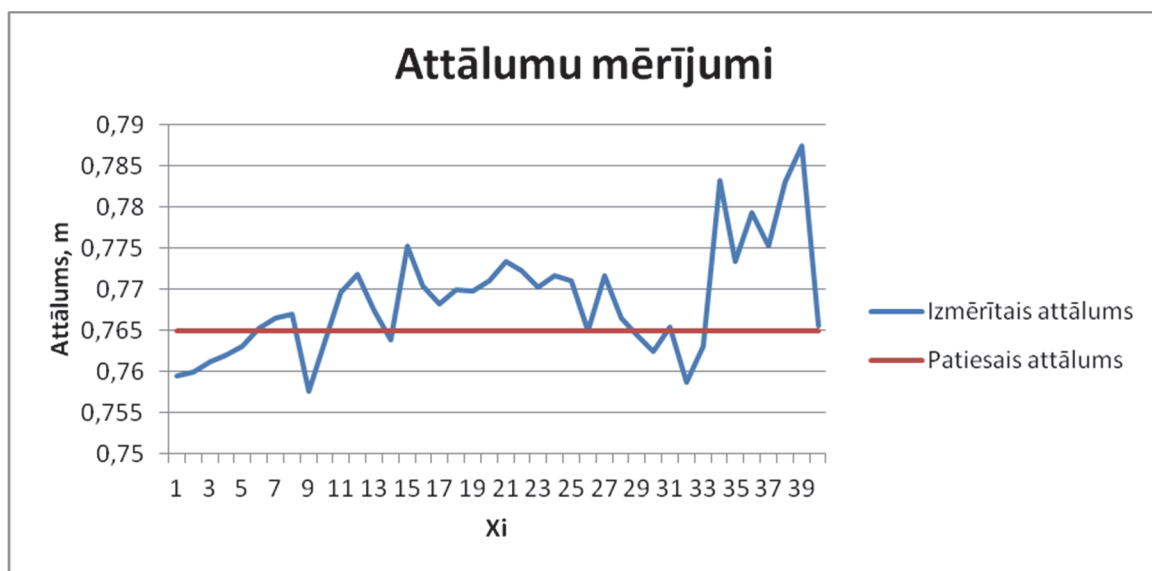
Iegūtais mērījumu precizitātes novērtējums parāda, ka tas ir nesalīdzināmi sliktāks nekā iepriekšējos mērījumos iegūtais. Autors izpētīja instrumentu sistēmas reģistrētos datus un atklāja, ka viens no instrumentiem bija zaudējis fāžu ciklu nenoteiktību risinājumu un tādā veidā darbojās bez *EUPOS®-RIGA* atbalsta sistēmas nodrošinātajām korekcijām. Tas pamato šajā mērījumu posmā iegūto zemo precizitāti.

Nākamais mērījumu posms bija analogs pirmajam ar auto veiktajam, atšķirīgs bija vien pārvietošanās virziens. Kā būs redzams zemāk, tad šajā mērījumu posmā tika iegūti ievērojami labāki rezultāti, kuri var tikt pielīdzināti mērījumiem statistiskos apstākļos. Šajā posmā mērījumu absolūto kļūdu intervāls un attālumu starpību vidējā vērtība ir attiecīgi:

$$-0,0075 \leq x \leq 0,0224 \text{ m}$$

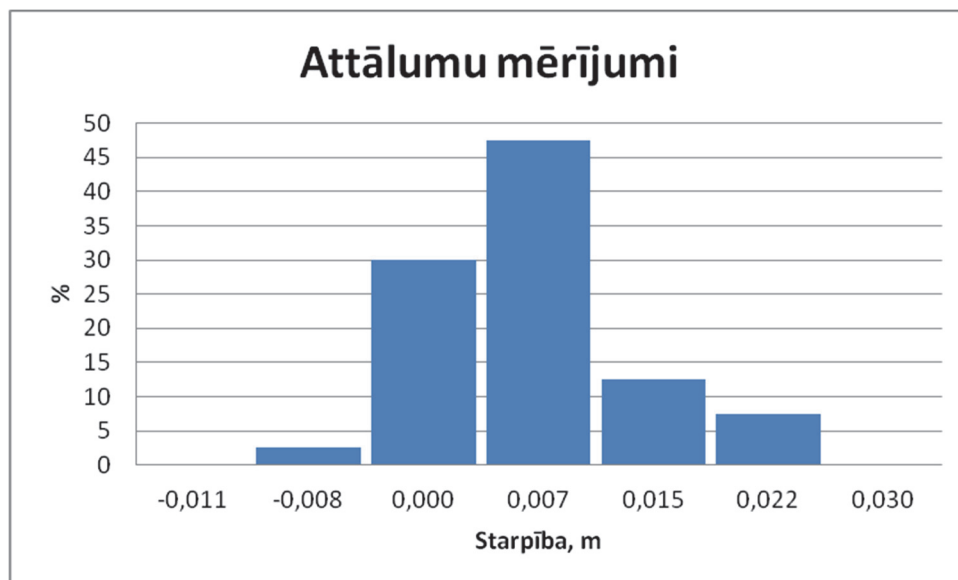
$$x_v = 0,7686 \text{ m}$$

Apskatot šajā posmā veikto mērījumus, kuri attēloti 4.21. attēlā, redzams, ka šajā gadījumā nav redzams tik straujš rezultātu precizitātes kritums, kā 4.19. attēlā. Iemesls tam ir, ka šajos mērījumos abi GNSS RTK instrumenti saglabāja fiksētu fāžu ciklu nenoteiktību risinājumu.



4.21. att. . Iegūtie attālumi mērījumos ar auto ik pēc 10 m virzienā „Atpakaļ”

Nākošajā, 4.22. attēlā parādītas šī mērījumu posma rezultātu blīvuma sadalījums.



4.22. att. Attālumu vērtību sadalījums mērījumiem ar auto ik pēc 10 m virzienā „Atpakaļ”

Kā redzams 4.22. attēlā, tad šajā posmā ~95 % mērījumi ir ± 1 cm robežās, respektīvi, to nobīde no patiesās vērtības nepārsniedz 2 cm. Mērījumu rezultātu vidējā vērtība no patiesās vērtības atšķiras par 0,0036 m, kas ir pirmais uzticamais apliecinājums, ka GNSS RTK instrumenti spēj nodrošināt augstu precizitāti arī dinamiskos mērījumu apstākļos. Šajā posmā rezultātu standartnovirze un vidējā kvadrātiskā kļūda attiecīgi:

$$\sigma_x = 0,0034 \text{ m}$$

$$\sigma_{x_v} = 0,000611 \text{ m}$$

Salīdzinot iegūtos rezultātus ar statisko mērījumu rezultātiem ir secināms, ka tie ir ļoti līdzīgi un līdz ar to var teikt, ka mērījumu precizitāte dinamiskos apstākļos ir pielīdzināma mērījumu precizitātei statiskos apstākļos, pie nosacījuma, ka GNSS RTK instrumenti saglabā fiksētu fāžu ciklu nenoteiktības risinājumu. Apstiprinājums tam ir krasa mērījumu precizitātes pasliktināšanās, gadījumā, ja fāžu ciklu nenoteiktības risinājums nesaglabājas, skat., 4.19. attēlu.

4.3.2.2. Mērījumu veikšana ik pēc 1 s

Bez GNSS RTK mērījumu precizitātes, dinamiskos apstākļos, noteikšanas autors vēlējās noskaidrot vai pastāv laika sinhronizācijas ietekme uz mērījumiem, ja tā netiek veikta. Veicot mērījumus ar ierakstu ik pēc 1 s un pārvietojoties ar ātrumu ~30 km/h mērījumos iegūtajiem attālumiem starp uztvērējiem būtu ievērojami jāatšķiras no patiesā attāluma, kurš ir 765 mm. Piemēram, ja mērījumu sākums abos instrumentos atšķiras par 0,5 s, tad ievērojot izteiksmi (4.9), attālumiem starp instrumentiem jābūt vismaz 4,932 m.

$$s = \frac{v}{t} \quad (4.9)$$

kur:

- s – veiktais ceļš;
- v – pārvietošanās ātrums;
- t – laiks.

Gadījumā, ja laiks instrumentos nesakrīt tikai par 0,1 s, tad pat šādā gadījumā attālumam, ko fiksē instrumenti būtu jābūt 1,598 m. Fiziski, ar tik mazu laika nobīdi, mērījumus uzsākt nav

iespējams, to procesa tehniskā izpildījumā dēļ. Iegūstot rezultātus, kuri no patiesās vērtības atšķiras ne vairāk par dažiem centimetriem tiktu iegūts apstiprinājums, ka šādā tehniskajā izpildījumā nav nepieciešams veikt instrumentu pulksteņu sinhronizēšanu.

Veicot mērījumus ar ierakstu ik pēc 1 s tika fiksēti 139 mērījumi, 76 no kuriem braucot vienā virzienā jeb virzienā „Turp”, bet 63 – braucot virzienā „Atpakaļ”. Mērījumi sesijas vieta tika izvēlēta tā pati, kura mērījumiem, kad fiksācija notika ik pēc 10 m veiktā attāluma. Tādā veidā tika novērsta vides objektu iespējamā ietekme uz mērījumu rezultātiem.

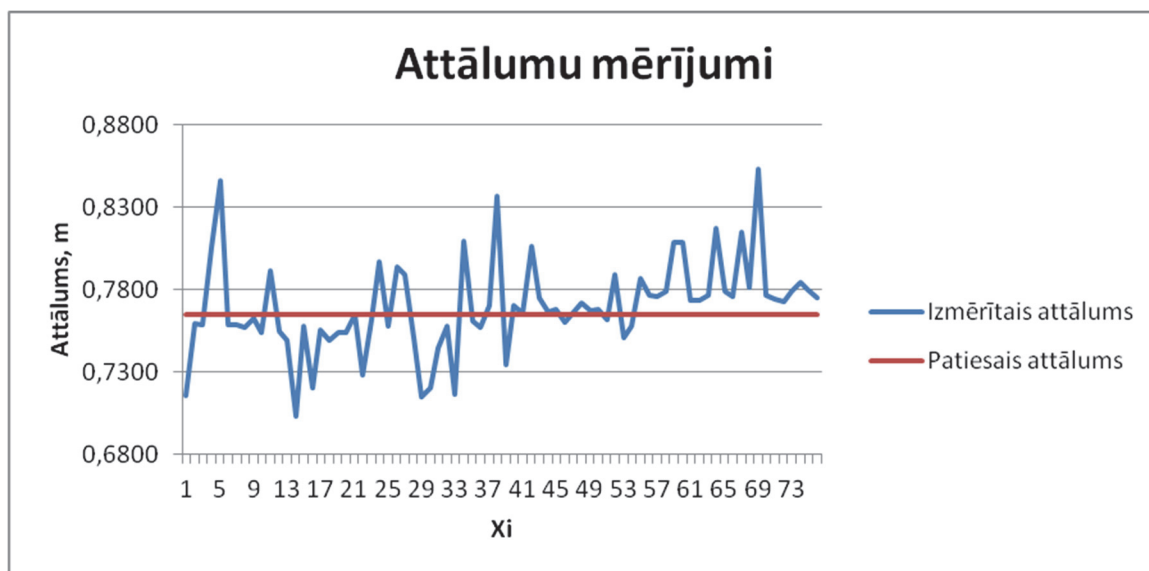
Otrās mērījumu sesijas, kurā pārvietošanās notika ar auto, pirmajā posmā mērījumu absolūtās kļūdas ir sekojošās robežās:

$$-0,0619 \leq x \leq 0,0880 \text{ m}$$

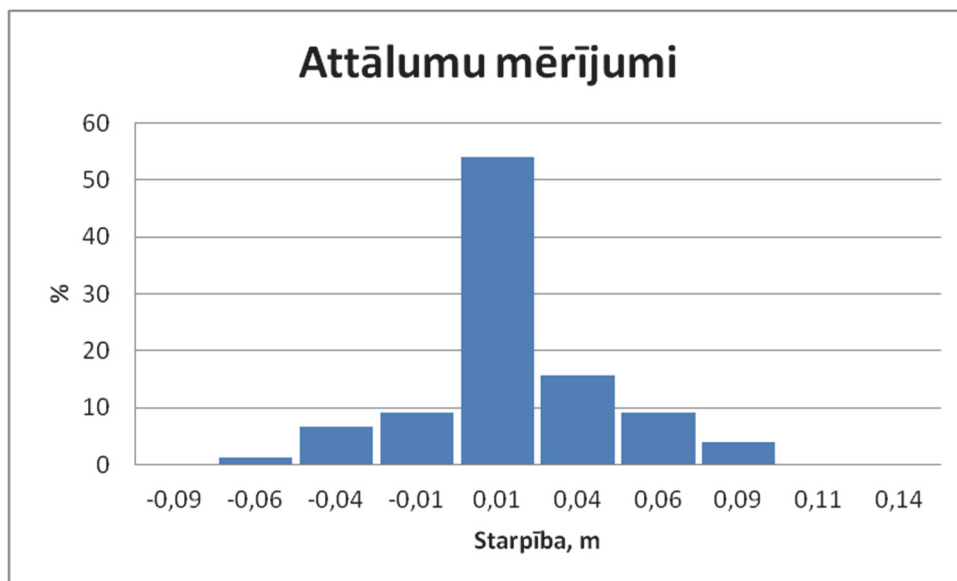
Mērījumos iegūto vērtību vidējā vērtība:

$$x_v = 0,7697 \text{ m}$$

Attēlos 4.23. un 4.24. attiecīgi attēlotas iegūto attālumu vērtības un to absolūto kļūdu blīvuma sadalījums.



4.23. att. Attālumu vērtības mērījumiem ar auto ik pēc 1 s virzienā „Turp”



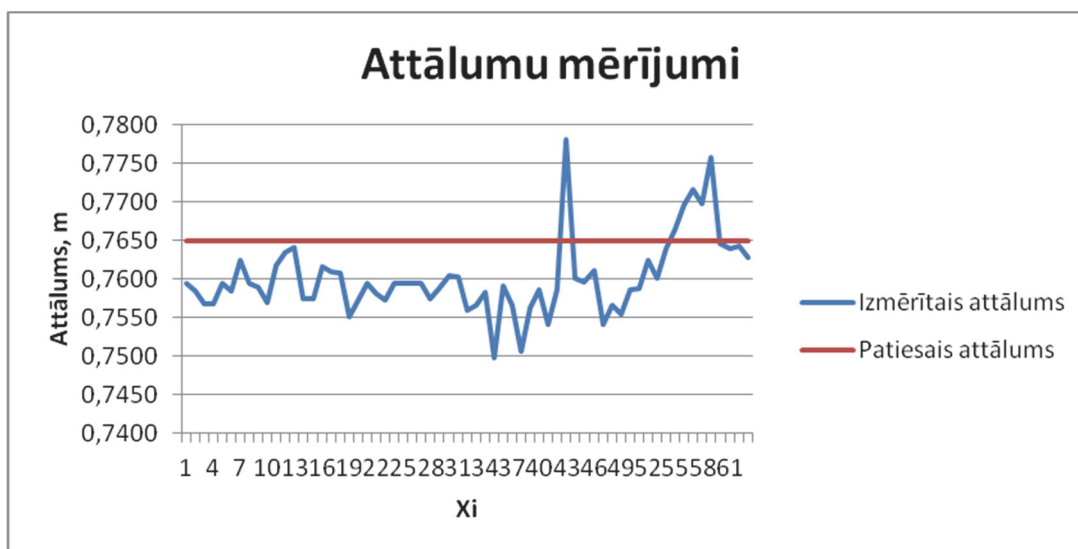
4.24. att. Absolūto kļūdu blīvuma sadalījums mērījumiem ar auto ik pēc 1 s virzienā „Turp”

Šajā mērījumu sesijas posmā mērījumu standartnovirze un vidējā kvadrātiskā kļūda katram instrumentam ir attiecīgi:

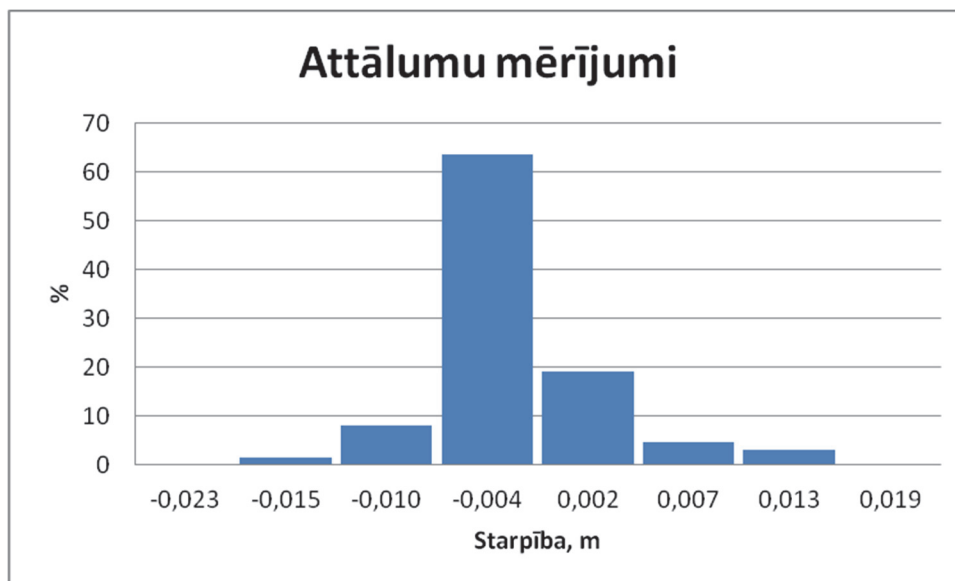
$$\sigma_x = 0,014014 \text{ m}$$

$$\sigma_{x_v} = 0,00163 \text{ m}$$

Noslēdzošajā mērījumu posmā iegūtās vērtības attēlotas 4.25. attēlā, bet mērījumu absolūto kļūdu blīvuma sadalījums – 4.26. attēlā.



4.25. att. Attālumu vērtības mērījumiem ar auto ik pēc 1 s virzienā „Atpakaļ”



4.26. att. Absolūto kļūdu blīvuma sadalījums mērījumiem ar auto ik pēc 1 s virzienā „Atpakaļ”

Šajā mērījumu posmā absolūtās kļūdas ir sekojošās robežās:

$$-0,0152 \leq x \leq 0,0131 \text{ m}$$

Mērījumos iegūtā vidējā vērtība:

$$x_v = 0,7602 \text{ m}$$

Mērījumu standartnovirze un vidējā kvadrātiskā kļūda, attiecīgi:

$$\sigma_x = 0,00248 \text{ m}$$

$$\sigma_{x_v} = 0,000438 \text{ m}$$

4.4. Dinamiskos apstākļos veikto mērījumu kopsavilkums

Vērtējot abās mērījumu sesijās veikto mērījumu rezultātus apkoposim tos divās tabulās. 4.1. tabulā attēloti kopējie rezultāti mērījumiem, kuri tika veikti pārvietojoties kājām, bet 4.2. tabulā – mērījumu rezultāti braucot ar auto. Jāatzīmē, ka veidojot 4.2. tabulu netika ņemti vērā rezultāti, kuros notika fāžu ciklu nenoteiktības fiksēta risinājuma pārtraukums. Autors šos

rezultātus neiekļāva kopējos rezultātos, jo tie neatspoguļo precizitāti, kuru iespējams sasniegt mērījumos, ja fāžu ciklu nenoteiktības risinājums saglabājās nepārtraukti.

4.1. tabula

Mērījumu kopsavilkums sesijai pārvietojoties kājām

Mērījumu skaits	81
Mērījumu vidējā vērtība, m	0,765
Mērījumu absolūtā kļūda, m	$-0,0201 \leq x \leq 0,0335$
Mērījumu standartnovirze, m	0,0045
Vidējā kvadrātiskā kļūda, m	0,0005

4.2. tabula

Mērījumu kopsavilkums sesijai pārvietojoties ar auto

Mērījumu skaits	179
Mērījumu vidējā vērtība, m	0,7661
Mērījumu absolūtā kļūda, m	$-0,0619 \leq x \leq 0,088$
Mērījumu standartnovirze, m	0,0096
Vidējā kvadrātiskā kļūda, m	0,0007

Salīdzinot rezultātus, redzams, ka mērījumos, kuri tika veikti pārvietojoties kājām iegūtā precizitāte ir augstāka nekā mērījumiem pārvietojoties ar auto, tas liecina, ka precizitāte samazinās palielinoties pārvietošanās ātrumam. Mērījumos, kuri tika veikti pārvietojoties kājām ~85 % rezultātu ir robežās $\pm 0,01$ m no patiesās vērtības. Mērījumos pārvietojoties ar auto 80 % mērījumos iegūtās vērtības no patiesās vērtības atšķiras mazāk par 0,015 m. Taču, ņemot vērā, ka mērījumi tika veikti ar diviem vienas klases instrumentiem, šīs vērtības var uzskatīt attiecīgi $\pm 0,005$ m un 0,0075 m. Iegūtie rezultāti ļauj secināt, ka GNSS RTK instrumenti, ja tie saglabā atrisinātu fāžu ciklu nenoteiktību, dinamiskos apstākļos, kuros pārvietošanās ātrums ir līdz 30 km/h, vismaz 80 % gadījumu spēj veikt mērījumus, kuru absolūtā kļūda nepārsniedz 0,01 m.

Mērījumi, kuros rezultāti tika fiksēti ik pēc 1 s neatklāja kļūdu, kuru izraisa instrumentu pulksteņu nesinhronizēšana savā starpā, tātad tie tiek sinhronizēti ar satelītu sistēmas laiku.

Tādā veidā, lai veiktu mērījumus dinamiskos apstākļos ar centimetra precizitāti papildus laika sinhronizācija nav nepieciešama.

Iegūtie rezultāti liecina par to, ka šāda veida GNSS RTK instrumentu rezultāti var tikt izmantoti kā etalons veicot vienkāršāku GPS uztvērēju precizitātes novērtēšanu arī dinamiskos, ne tikai statiskos mērījumu apstākļos [48].

5. GNSS ATBALSTA SISTĒMAS DARBĪBAS NODROŠINĀŠANAI UN LIETOTĀJAM NEPIECIEŠAMĀ SAKARU KANĀLA KAPACITĀTE

GNSS atbalsta sistēmas galvenās sastāvdaļas ir serveris, kurš veic visus nepieciešamos aprēķinus, lai nodrošinātu lietotājiem satelītu signālu korekcijas un bāzes stacijas. Bāzes stacijas pastāvīgi uztver signālus no satelītiem, kuri ir to redzamības līnijā un neapstrādātus datus pārraida uz serveri turpmākām darbībām. Veidojot GNSS atbalsta sistēmas ir nepieciešams zināt, kāds ir datu apjoms, kurš tiek pārraidīts no bāzes stacijām. Tādā veidā iespējams nodrošināties pret sakaru kanālu pārslodzi, racionāli izvēloties sakaru kanālu kapacitāti starp bāzes stacijām un serveri iespējams minimizēt atbalsta sistēmas uzturēšanas pašizmaksas. Atbalsta sistēmas lietotājam, savukārt, ir nepieciešams zināt, kāds datu apjoms tam ir nepieciešams, lai būtu iespējama korekciju saņemšana. Ņemot vērā mobilo operatoru tarifu specifikācijas ir būtiski izvēlēties lietotāja patēriņam atbilstošu tarifu plānu, lai izvairītos no papildus izdevumiem vai neizvēlētos tādu tarifu, kurš netiek pilnvērtīgi izlietots. Šādu sistēmu pirmsākumos kā galvenais korekciju pārraides kanāls tika izmantots FM radio sakaru diapazons ierobežoja ne tikai korekciju pārraides attālumu, bet arī šādu kanālu izmantošanas vienkāršību, jo tam pārsvarā ir nepieciešamas licences [32].

Korekciju pārraidīšanai no servera lietotājiem tiek izmantoti standartizēti ziņojumi, kurus ir apstiprinājusi īpaša radiotehniskā komiteja *RTCM SC-104 (Radio Technical Committee for Maritime Special Committee No.104)* un detalizēts ziņojumu apraksts versijai 2.x ir atrodams [34], [62]. Turpmāk darbā autors paplašināti izklāstīs tikai tos ziņojumus, kuri tiek izmantoti atbalsta sistēmā *EUPOS®-RIGA*.

5.1. *EUPOS®-RIGA* atbalsta sistēmā izmantotie ziņojumi korekciju nodrošināšanai

EUPOS®-RIGA nodrošina lietotājiem iespēju saņemt korekcijas izmantojot vairākus servissus un tie ir:

- *EUPOS_DGPS* – diferenciālai kodu korekcijas serviss. Tiek nodrošinātas korekcijas atbilstoši standartam *RTCM v2.3* un pārraidīti ziņojumi nr. 1, 3 un 31. Korekcijas tiek pārraidītas vienai frekvencei visiem GPS un GLONASS sistēmu satelītiem. Šis ir zemākās precizitātes korekciju serviss, kurš nodrošina precizitāti 0,3-1,0 m;
- *FKP01* – augstas precizitātes fāžu korekciju serviss. Nodrošina korekcijas atbilstoši standartam *RTCM v2.3* pārraidot ziņojumus nr. 3, 14, 16, 20, 21, 22, 23

un 24. Korekcijas tiek pārraidītas abām (L1 un L2) frekvencēm visiem GPS un GLONASS sistēmu satelītiem. Korekcijas tiek raidītas ik sekundi un nodrošina mērījumu precizitāti 0,01-0,02 m;

- PRS01 – augstas precizitātes fāžu korekciju serviss. Nodrošina korekcijas atbilstoši standartam *RTCM* v2.3 pārraidot ziņojumus nr. 3, 14, 16, 20, 21, 22, 23 un 24. Korekcijas tiek pārraidītas abām frekvencēm visiem GPS sistēmas satelītiem. Korekcijas tiek raidītas ik sekundi un nodrošina precizitāti 0,01-0,02 m, atšķiras no FKP01 ar korekciju aprēķināšanas matemātisko tehniku;
- PRS02 – augstas precizitātes fāžu korekciju serviss, kurš nodrošina korekcijas atbilstoši standartam *RTCM* v3.0 pārraidot ziņojumus nr. 1004, 1006, 1008, 1012. Korekcijas tiek pārraidītas ik sekundi, abām frekvencēm visiem GPS un GLONASS sistēmu satelītiem. Nodrošinātā precizitāte: 0,01-0,02 m;
- PRS03 – augstas precizitātes fāžu korekciju serviss, kurš nodrošina korekcijas atbilstoši standartam *RTCM* v2.3, pārraidot ziņojumus nr. 3, 14, 16, 18, 19, 22, 23 un 24. Korekcijas tiek pārraidītas ik sekundi abām frekvencēm visiem GPS un GLONASS sistēmu satelītiem. Nodrošinātā precizitāte ir 0,01-0,02 m;
- PRS_5Hz – augstas precizitātes fāžu korekciju serviss, kurš pēc tehniskā izpildījuma ir identisks PRS03 servisam ar vienu atšķirību. Šis korekciju serviss no PRS03 servisa atšķiras ar to, ka korekcijas tiek pārraidītas piecas reizes biežāk, respektīvi, ik pēc 0,2 s.

Ziņojumos ietvertā informācija parādīta 5.1. tabulā. Ziņojumi, tā kā tajos esošās informācijas atjaunošanas biežums ir atšķirīgs, tiek pārraidīti ar dažādu intensitāti. *EUPOS®-RIGA* atbalsta sistēmā korekciju ziņojumi tiek pārraidīti ar sekojošiem intervāliem:

- | | |
|----------------------|-----------------------|
| • Nr. 1 – 1x/1 s; | • Nr. 22 – 1x/17 s; |
| • Nr. 3 – 1x/17 s; | • Nr. 23 – 1x/17 s; |
| • Nr. 14 – 1x/61 s; | • Nr. 24 – 1x/17 s; |
| • Nr. 16 – 1x/301 s; | • Nr. 31 – 1x/1 s; |
| • Nr. 18* – 1x/1 s; | • Nr. 1004 – 1x/1 s; |
| • Nr. 19* – 1x/1 s; | • Nr. 1006 – 1x/17 s; |
| • Nr. 20 – 1x/1 s; | • Nr. 1008 – 1x/31 s; |
| • Nr. 21 – 1x/1 s; | • Nr. 1012 – 1x/1 s; |

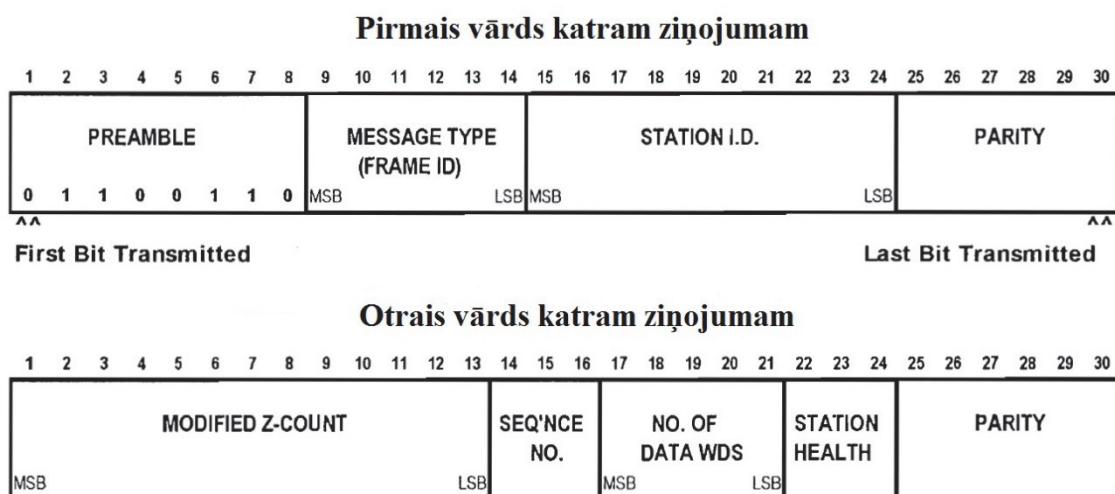
* Ziņojumi nr. 18 un nr. 19 korekciju servisā PRS_5Hz tiek pārraidīti 1x/0,2 s.

Informācija korekciju ziņojumos

Ziņojuma nr. (tips)	Informācija
1	Diferenciālā korekcija (pseidoattālums un ātrums)
3	Atbalsta staciju koordinātas (ECEF, XYZ)
14	GPS laiks (GPS nedēļa un pilns stundu skaits nedēļā, laika nobīdes informācija starp UTC un GPS laiku)
16	Īpašs ziņojums (maksimālais atļautais garums – 90 ASCII teksta simboli)
18	RTK nesošā fāze, nekoriģēta
19	RTK pseidoattālums, nekoriģēts
20	RTK nesošās fāzes korekcijas
21	RTK pseidoattālumu korekcijas
22	Paplašināts atbalsta staciju parametri (uzlabotas ziņojumā nr. 3 iekļautās koordinātas (dX, dY, dZ), pēc izvēles atbalsta staciju antenu augstums un dX, dY, dZ priekš L2 frekvences
23	Antenas parametri (nosaukums), identifikators, pēc izvēles – antenas seriālais numurs
24	Atbalsta stacijas antenas atskaites punkta (ARP) koordinātas (ECEF, XYZ), pēc izvēles – antenas augstums
31	Diferenciālās korekcijas GLONASS sistēmai (analogi ziņojumam nr. 1)
1004	GPS L1 un L2 novērojumi, paplašināta informācija (signāla-trokšņa attiecība, pilna milisekunde koda novērojumiem)
1006	Atbalsta stacijas antenas ARP koordinātas (ECEF, XYZ) un paplašināta informācija (antenas augstums)
1008	Atbalsta stacijas antenas tips, paplašināta informācija (antenas seriālais numurs)
1012	GLONASS L1 un L2 novērojumi, paplašināta informācija (signāla-trokšņa attiecība, pilna milisekunde koda novērojumiem)

Minimālais kadra garums *RTCM* v2.x standartā ir 2 vārdi, bet maksimālais garums, kurš paredzēts standartā ir 33 vārdi. Šajā standartā katrs ziņojuma vārds ir 30 bitus garš un ir veidots pēc tādām pašām vadlīnijām kā GPS signālu ziņojumu vārdi. Pirmie divi ziņojumu vārdi satur galveni un ir visos ziņojuma vārdos, tādā veidā maksimālais datu vārdu skaits ir 31. Katram ziņojuma vārdam var būt kāds no pieciem formātiem, kas paredzēti standartā [62].

Pirmie divi kadra vārdi satur informāciju par atbalsta bāzes staciju, atbalsta laiku un informāciju, kura nepieciešama, lai sinhronizētu lietotāja kadrus un tie ir vienādi visiem ziņojumiem. Pirmo divu ziņojumu vārdu uzbūve parādīta 5.1.



5.1. att. Pirmo divu vārdu uzbūve katram no ziņojumiem

Tā kā ziņojumu kadru un vārdu uzbūve, kā arī to izmērs ir noteikts standartā tad turpinājumā autors saīsināti apskata ziņojumu izmērus, kas nepieciešams, lai teorētiski aprēķinātu nepieciešamo kapacitāti lietotāja aparatūrā korekciju saņemšanai. Autors atspoguļos tikai konkrētu ziņojumu izmērus, sīkāks ziņojumu iztīrējums atrodams [62]. Augstāk jau tika pieminēti konkrētie ziņojumi, kurus raida *EUPOS®-RIGA* atbalsta sistēma.

Ziņojuma nr. 1 saturs un garums attēlots 5.2. tabulā.

Ziņojuma nr. 1 saturs un izmērs

Parametrs	Bitu skaits
Mēroga faktors	1
UDRE	2
Satelīta ID	5
PRC(t_0)	16
RRC	8
Datu pieprasījums	8
Kopā	$40 \times N_s$
Aizpildījums	$8 \times [N_s \bmod 3]$
Paritāte	$N \times 6$

UDRE – lietotāja diferenciālā attāluma kļūda (*User Differential Range Error*);

PRC(t_0) – pseidoattāluma korekcija;

RRC – attāluma proporcijas korekcija (*Range Rate Correction*);

N_s – satelītu skaits, kuriem korekcijas iekļautas ziņojumā;

N – vārdu skaits, kuri satur datus, ziņojumā. Kadra garums $N + 2$.

Ziņojums nr. 3 satur informāciju par atbalsta staciju koordinātām ar precizitāti līdz tuvākajam centimetram un sastāv no 4 datu vārdiem tādā kopumā ir 6 vārdus garš. Ziņojuma nr.3 saturs un garums parādīts 5.3. tabulā

Ziņojuma nr. 3 saturs un izmērs

Parametrs	Bitu skaits
ECEF X koordināta	32
ECEF Y koordināta	32
ECEF Z koordināta	32
Paritāte	24

Ziņojums nr. 14 ir īpašs ziņojums (tags), kas papildina informāciju par laiku, kuru satur modificētā Z-secība ziņojuma galvenē. Modificētā Z-secība satur informāciju par laiku tikai stundas robežās, bet nenorāda nedz kura stunda, nedz kura diena tā ir. Ziņojuma saturs un garums parādīts 5.4. tabulā. Standarts paredz, ka ziņojumu nr. 14 jāpārraida vismaz divas reizes stundā.

5.4. tabula

Ziņojuma nr. 14 saturs un izmērs

Parametrs	Bitu skaits
GPS nedēļa	10
Nedēļas stunda	8
Laika starpība	6
Paritāte	6

Ziņojums nr. 16 ir īpašs ASCII teksta ziņojums, ko iespējams attēlot monitorā vai izdrukāt. Katrs ziņojums var būt līdz 90 simbolus garš.

Ziņojumi nr. 18-21 satur informāciju, kura ir nepieciešama augstas precizitātes mērījumiem. Šajos ziņojumos tiek pārraidīta informācija, kura palīdz atrisināt fāžu ciklu nenoteiktības. Ziņojuma nr.18 saturs un izmērs parādīts 5.5. tabulā

5.5. tabula

Ziņojuma nr. 18 saturs un izmērs

Parametrs	Bitu skaits
Frekvences indikators	2
Rezervēts	2
GNSS mērījumu laiks	20
Vairāku ziņojumu indikators	1
P un C/A koda indikators	1
GPS/GLONASS satelītu zvaigznāja indikators	1
Satelīta ID	5
Datu kvalitāte	3
Kopējais nepārtrauktības zuduma indikators	5

Nesējfrekvences fāze	32
Kopā	$48 \times N_s + 24$
Paritāte	$N \times 6$

N - vārdu skaits ziņojumā, kuri satur datus $2N_s + 1$ un kopējais ziņojuma garums – $2N_s + 3$.

Tabulā 5.6. parādīts ziņojuma nr. 19 saturs un izmērs.

5.6. tabula

Ziņojuma nr. 19 saturs un izmērs

Parametrs	Bitu skaits
Frekvences indikators	2
Izlīdzināšanas intervāls	2
GNSS mērījumu laiks	20
Vairāku ziņojumu indikators	1
P un C/A koda indikators	1
GPS/GLONASS satelītu zvaigznāja indikators	1
Satelīta ID	5
Datu kvalitāte	4
Daudzkanālu izplatīšanās kļūda	4
Pseidoattālums	32
Kopā	$48 \times N_s + 24$
Paritāte	$N \times 6$

N - vārdu skaits ziņojumā, kuri satur datus $2N_s + 1$ un kopējais ziņojuma garums – $2N_s + 3$.

Tabulā 5.7. parādīts ziņojuma nr. 20 saturs un izmērs.

5.7. tabula

Ziņojuma nr. 20 saturs un izmērs

Parametrs	Bitu skaits
Frekvences indikators	2
Rezervēts	2
GNSS mērījumu laiks	20
Vairāku ziņojumu indikators	1
P un C/A koda indikators	1
GPS/GLONASS satelītu zvaigznāja indikators	1
Satelīta ID	5
Datu kvalitāte	3
Kopējais nepārtrauktības zuduma indikators	5
Datu pieprasījums (GPS)/dienas laiks (GLONASS)	8
Nesošās frekvences fāzes korekcija	24
Kopā	$48 \times N_s + 24$
Paritāte	$N \times 6$

N - vārdu skaits ziņojumā, kuri satur datus $2N_s + 1$ un kopējais ziņojuma garums – $2N_s + 3$.

Tabulā 5.8. parādīts ziņojuma nr. 21 saturs un izmērs

5.8 tabula

Ziņojuma nr. 21 saturs un izmērs

Parametrs	Bitu skaits
Frekvences indikators	2
Izlīdzināšanas intervāls	2
GNSS mērījumu laiks	20
Vairāku ziņojumu indikators	1
P un C/A koda indikators	1

GPS/GLONASS satelītu zvaigznāja indikators	1
Satelīta ID	5
Attāluma proporcijas korekcijas faktors	1
Datu kvalitāte	3
Pseidoattāluma korekcijas faktors	1
Daudzkanālu izplatīšanās kļūda	3
Datu pieprasījums (GPS)/dienas laiks (GLONASS)	8
Pseidoattāluma korekcija	16
Attāluma proporcijas korekcija	8
Kopā	$48 \times N_s + 24$
Paritāte	$N \times 6$

N - vārdu skaits ziņojumā, kuri satur datus $2N_s+1$ un kopējais ziņojuma garums – $2N_s+3$.

Ziņojumā nr. 22 tiek pārraidīta informācija, kas nodrošina bāzes staciju koordinātu precizitāti augstāku par 1mm un bāzes staciju antenu augstumu, kas tādā veidā lietotājiem ļauj piesaistīt savu uzmērīto pozīciju bāzes stacija reālā laikā. Ziņojuma nr. 22 pirmais datu vārds nodrošina korekcijas katrai ECEF koordinātei un tās var būt gan pozitīvas, gan negatīvas. Otrais datu vārds nodrošina antenas L1 frekvences fāzes centra augstuma korekcijas un tās vienmēr ir pozitīvas, taču ziņojums šo datu vārdu var nesaturēt, kas nozīmē, ka fāzes centra augstuma korekcijas netiek nodrošinātas. Analogi ir ar antenas L2 frekvences fāzes centra augstuma pārraidi. Ziņojuma nr. 22 saturs un izmērs atspoguļots 5.9. tabulā.

5.9. tabula

Ziņojuma nr. 22 saturs un izmērs

Parametrs	Bitu skaits
L1 ECEF dX	8
L1 ECEF dY	8
L1 ECEF dZ	8
Rezervēts	2
GNSS indikators	1
Antenas tips	1

Antenas atskaites punkts	1
NH – Augstuma korekcija netiek pārraidīta	1
Ja NH=0 – Antenas L1 fāzes centra augstums. Ja NH=1 – aizpildījuma biti	1
L2 ECEF dX	8
L2 ECEF dY	8
L2 ECEF dZ	8
Kopā	24, 48 vai 72
Paritāte	Nx6

$N - 1, 2$ vai 3 atkarībā no pārraidāmajām korekcijām.

Ziņojums nr. 23 satur informāciju par antenas tipu, kāds tiek lietots atbalsts sistēmas atbalsta. Ziņojuma nr. 23 saturs un izmērs parādīts 5.10. tabulā.

5.10. tabula

Ziņojuma nr. 23 saturs un izmērs

Parametrs	Bitu skaits
Rezervēts	1
Antenas atskaites punkts	1
Seriālā numura karodziņš	1
Simbolu skaits antenas aprakstam (NAD)	5
Antenas apraksts (AD)	8*NAD
Uzstādīšanas ID	8
Rezervēts	3
Simbolu skaits antenas seriālajam numuram (NAS)	5
Antenas seriālais numurs	8*NAS
Aizpildījums (katram baitam)	8
Kopā	32+8*(NAD+NAS)
Paritāte	Nx6

Ziņojums nr. 24 tika ieviests, lai aizvietotu ziņojumus nr. 3 un nr. 22 RTK mērījumos. L1 fāzes centra atrašanās vieta ir tieši atkarīga no metodes, kāda tika izmantota antenas kalibrēšanas procesā, tādā veidā tas var būt atšķirīgs arī vienam un tam pašam antenas modelim. Ziņojums nr. 24 novērš šo problēmu, jo izmanto konkrētu antenas atskaites punktu nevis to, kuru nodrošina starptautiskais globālās pozicionēšanās serviss (IGS – *International GPS service*). Ja tiek pārraidīts ziņojums nr. 24 kopā ar to ir jāpārda arī ziņojums nr. 23, kas tādā veidā ļauj nodrošinātu pilnīgu informāciju [62]. Ziņojuma nr. 24 saturs un izmērs atspoguļots 5.11. tabulā.

5.11. tabula

Ziņojuma nr. 24 saturs un izmērs

Parametrs	Bitu skaits
ECEF X koordināta	38
Rezervēts	2
ECEF Y koordināta	38
Rezervēts	2
ECEF Z koordināta	38
GNSS indikators	1
Antenas augstums (AH)	1
Antenas augstums, ja AH=1	18
Rezervēts	6
Kopā	120 (AH=0)
	144 (AH=1)
Paritāte	6*6 (AH=0)
	6*7 (AH=1)

Ziņojums nr. 31 satur diferenciālās korekcijas GLONASS satelītu sistēmai. Šis ir galvenais ziņojums, kurš nodrošina lietotājiem pseidoattālumu korekcijas GLONASS satelītu signāliem. Ziņojums satur korekciju visiem satelītiem, kuri ir atbalsta bāzes stacijas redzamībā. Tā kā katra satelīta korekciju pārraidei ir nepieciešami 40 biti, tad katru reizi nebūs viens konkrēts skaits nepieciešamo vārdu kadrā. Iespējami tādi ziņojumi, kuros nepieciešams 8 vai 16 bitu aizpildījums, lai noslēgtu kadru. Ziņojuma nr. 31 saturs un izmērs attēlots 5.12. tabulā.

Ziņojuma nr. 31 saturs un izmērs

Parametrs	Bitu skaits
Mēroga faktors	1
UDRE	2
Satelīta ID	5
PRC(t_0)	16
RRC	8
Bitu maiņa	1
Dienas laiks	7
Kopā	$40 \times N_s$
Aizpildījums	$8 \times [N_s \bmod 3]$
Paritāte	$N \times 6$

N_s – satelītu skaits, kuriem korekcijas iekļautas ziņojumā;

N – vārdu skaits, kuri satur datus, ziņojumā. Kadra garums $N + 2$.

Tabulā 5.13. atspoguļoti *RTCM* v3.x standarta ziņojumu izmēri, kurus lietotājiem pārraida *EUPOS®-RIGA* atbalsta sistēma, to saturs attēlots 5.1. tabulā. Plašāks *RTCM* v3.x standarta izklāsts pieejams [63].

EUPOS®-RIGA pārraidīto *RTCM* v3.x standarta ziņojumu saturs un izmērs

Ziņojuma Nr.	Bitu skaits
1004	$64 + 125 \times N_s$
1006	168
1008	48 – 544
1012	$61 + 130 \times N_s$

Tabulā 5.13. redzams, ka ziņojuma nr. 1004 galvenes izmērs ir 64 biti, bet ziņojuma nr. 1012 galvenes izmērs – 61 bits. *RTCM* 3.x versijas kadra uzbūve parādīta 5.2. attēlā.

Preamble	Reserved	Message Length	Variable Length Data Message	CRC
8 bits	6 bits	10 bits	Variable length, integer number of bytes	24 bits

5.2. att. RTCM 3.x versijas kadra uzbūve

Korekcijas L1 un L2 frekvencēm vispārīgā formā var tikt noteiktas pēc sekojošām izteiksmēm:

$$L1C_s = s_s - \Phi_{s,1}(t) - \frac{c}{f_1}N_{s,1} + t_{s,1} + A_{s,1} \quad (5.1)$$

$$L2C_s = s_s - \Phi_{s,2}(t) - \frac{c}{f_2}N_{s,2} + t_{s,2} + A_{s,2} \quad (5.2)$$

kur:

s_s – aprēķinātais ģeometriskais attālums starp atbalsta stacijas „s” antenas atskaites punktu (ARP) un satelītu metros;

$\Phi_{s,1}(t)$, $\Phi_{s,2}(t)$ – fāzes attāluma mērījums metros stacijai „s” attiecīgi L1 un L2 frekvencēm;

$\frac{c}{f_1}N_{s,1}$, $\frac{c}{f_2}N_{s,2}$ – ciklu nenoteiktības nolīdzinātas līdz metriem, attiecīgi L1 un L2 frekvencēm;

$t_{s,1}$, $t_{s,2}$ – uztvērēja pulksteņa vērtība fāzes attāluma mērījumam attiecīgajai frekvencei;

$A_{s,1}$, $A_{s,2}$ – antenas nobīde un fāzes centra variācijas korekcija attiecīgajai frekvencei;

f_1 – L1 nesējfrekvence;

f_2 – L2 nesējfrekvence.

Kā redzams no augstāk attēlotajām tabulām, tad viennozīmīgi noteikt, cik liels datu apjoms, korekciju veidā, tiek noraidīts lietotājam nav iespējams. Noraidāmo datu apjomu tieši ietekmē redzamībā esošo satelītu skaits, respektīvi, jo vairāk satelītu, kuru signāliem nepieciešamas korekcijas, jo lielāks noraidāmo datu apjoms. Aptuveni, korekciju veidā pārraidāmo datu apjomi ir pieejami arī [41].

5.2. Lietotājam nepieciešamā sakaru kanāla kapacitāte

Autors, lai novērtētu lietotāja kanāla nepieciešamo kapacitāti korekciju saņemšanai, sākumā līdzīgā veidā kā [41], balstoties uz *RTCM* standartiem, aprēķināja teorētisko sakaru kanāla noslodzi pie dažādiem skaitiem redzamo satelītu. Pēc iegūtas teorētiskās kanāla noslodzes, autors salīdzināja to ar faktisko, reālos mērījumos iegūto, apstrādājot *EUPOS®-RIGA* datu bāzē pieejamo informāciju. *EUPOS®-RIGA* lietotāju aktivitāšu datubāzē tiek uzkrāta pietiekoši plaša informācija, lai būtu iespējams novērtēt cik liels datu apjoms tiek noraidīts lietotājam laika vienībā. 5.3. attēlā parādīts fragments no *EUPOS®-RIGA* lietotāju aktivitāšu datubāzes.

Geo++@ GNACCOUNT - User Account Administration

File Edit Import Export Options Help

GNCS GRWEB USER USER

Users Groups Organisations Account Streams Networks Casters GnTracking Plug-Ins Administrators Additional Information

Filter

Load no datasets
Load online datasets
Activate Filter for datasets

Export status

all
only exported
only non exported

Time frame

After 25 04 2015
Before 25 05 2015
Last Month

User Name

Exact match

Connection-ID	User Name	Mountpoint	Start-Date	Start-Time	End-Date	End-Time	Bytes	1.Pos (Lat)	1.Pos (Lon)	still online
		PR503	2015-05-25	07:23:48	2015-05-25	07:26:24	141240	56,941755	24.200488	0
		PR503	2015-05-25	07:40:08	2015-05-25	07:48:48	467925	56,940301	24.200902	0
		PR503	2015-05-25	07:51:09	2015-05-25	07:56:47	303405	56,941882	24.199910	0
		PR503	2015-05-25	08:02:12	2015-05-25	08:10:46	464030	56,941885	24.199951	0
		PR503	2015-05-25	08:12:58	2015-05-25	08:19:35	351540	56,942306	24.199637	0
		PR503	2015-05-25	08:20:03	2015-05-25	08:23:05	153030	56,942075	24.199949	0
		PR503	2015-05-25	08:29:18	2015-05-25	08:38:27	460250	56,940299	24.200955	0
		PR503	2015-05-25	09:15:11	2015-05-25	09:18:08	165010	56,940905	24.196055	0
		PR503	2015-05-25	09:21:41	2015-05-25	09:27:39	323490	56,940640	24.195024	0
		PR503	2015-05-25	09:32:51	2015-05-25	09:33:28	30120	56,939228	24.194246	0
		PR503	2015-05-25	09:49:31	2015-05-25	10:06:02	916805	56,940212	24.192997	0
		PR503	2015-05-25	10:06:33	2015-05-25	10:08:28	106200	56,939774	24.193493	0
		PR503	2015-05-25	10:44:42	2015-05-25	10:48:00	181040	56,941450	24.194191	0
		PR503	2015-05-22	08:46:00	2015-05-22	08:47:40	82100	56,906584	24.087457	0
		PR504	2015-05-22	08:47:42	2015-05-22	08:48:20	11366	56,906581	24.087453	0
		PR503	2015-05-21	06:49:03	2015-05-21	07:25:20	2051415	56,962152	24.121203	0
		FKP01	2015-05-21	07:25:28	2015-05-21	07:30:16	281495	56,964730	24.128286	0
		FKP01	2015-05-21	07:51:58	2015-05-21	07:57:38	317975	56,962923	24.124874	0
		FKP01	2015-05-21	08:54:49	2015-05-21	08:57:34	137260	57,000455	24.159549	0
		PR503	2015-05-21	08:57:43	2015-05-21	09:14:44	880170	57,000369	24.159371	0
		PR503	2015-05-21	10:14:30	2015-05-21	10:21:41	389565	57,075484	24.111358	0
		FKP01	2015-05-21	10:21:48	2015-05-21	10:48:35	1496515	57,075446	24.111341	0
		FKP01	2015-05-21	11:44:38	2015-05-21	11:46:36	105815	56,906271	24.196229	0
		FKP01	2015-05-21	11:49:38	2015-05-21	11:51:26	94620	56,905939	24.196564	0
		PR503	2015-05-20	08:36:21	2015-05-20	08:37:27	56470	56,985316	24.170843	0
		PR503	2015-05-20	08:50:26	2015-05-20	08:52:49	109620	57,005285	24.162013	0
		PR503	2015-05-20	09:01:27	2015-05-20	09:04:20	140850	57,005819	24.162105	0
		PR503	2015-05-20	09:06:18	2015-05-20	09:10:13	196760	57,005723	24.160364	0
		PR503	2015-05-20	09:12:27	2015-05-20	09:12:53	20520	57,006531	24.159813	0
		PR503	2015-05-20	09:19:21	2015-05-20	09:27:27	438555	56,996046	24.143303	0
		PR503	2015-05-20	10:07:38	2015-05-20	10:08:23	37445	56,966779	24.050887	0
		PR503	2015-05-20	10:30:05	2015-05-20	10:36:54	367335	56,947229	24.066608	0
		PR503	2015-05-20	10:44:48	2015-05-20	10:47:40	153465	56,946317	24.067992	0
		PR502	2015-05-19	06:51:51	2015-05-19	07:28:49	765089	56,945466	24.119860	0
		PR502	2015-05-19	07:29:47	2015-05-19	08:16:22	952552	56,929877	24.154227	0
		PR502	2015-05-19	08:18:53	2015-05-19	08:20:07	24530	56,965930	24.181532	0
		PR503	2015-05-19	08:20:09	2015-05-19	08:30:29	540585	56,965933	24.181543	0
		PR503	2015-05-19	08:31:02	2015-05-19	08:43:54	720475	56,965595	24.172500	0
		PR503	2015-05-19	08:45:11	2015-05-19	10:00:15	4027635	56,964731	24.160352	0
		PR503	2015-05-19	10:01:01	2015-05-19	10:02:32	80005	56,928027	24.171012	0
		PR502	2015-05-19	10:11:09	2015-05-19	10:14:25	67161	56,929518	24.172000	0
		PR502	2015-05-19	10:34:45	2015-05-19	10:37:09	49467	56,920388	24.071966	0
		PR503	2015-05-19	10:37:12	2015-05-19	10:38:22	61350	56,920404	24.072068	0
		PR503	2015-05-19	11:06:20	2015-05-19	11:08:07	98180	56,935340	24.075596	0
		PR501	2015-05-16	16:59:11	2015-05-16	17:02:32	93515	57,154135	24.852749	0
		PR501	2015-05-15	07:21:18	2015-05-15	07:26:19	161750	57,092513	24.563110	0
		PR501	2015-05-15	07:27:31	2015-05-15	07:27:37	2450	57,092519	24.563120	0
		PR502	2015-05-13	07:24:25	2015-05-13	07:51:01	551987	57,028797	23.998151	0
		PR502	2015-05-13	07:52:29	2015-05-13	08:00:00	156526	56,958247	24.003505	0
		PR502	2015-05-13	08:00:35	2015-05-13	08:01:56	27919	56,961090	24.000254	0
		PR503	2015-05-13	08:57:47	2015-05-13	09:05:37	433915	56,949223	24.014885	0
		PR503	2015-05-13	09:06:21	2015-05-13	09:40:23	1711565	56,941746	24.029006	0
		PR503	2015-05-13	09:41:02	2015-05-13	09:41:54	46445	56,924349	24.061083	0

5.3. att. *EUPOS®-RIGA* lietotāju aktivitāšu reģistra fragments no datu bāzes

Kā redzams 5.3. attēlā, tad datubāzē tiek fiksēts noraidīto datu apjoms un laiks, cik ilgi lietotājs ir bijis pieslēdzies atbalsta tīklam. Tas, protams, neļauj novērtēt kanāla noslodzi ar 100 % precizitāti, bet novērtējums ir pietiekoši precīzs, lai uz tā pamata būtu iespējams izvēlēties, gan nepieciešamo kanāla kapacitāti, gan arī nepieciešamo mobilo datu apjomu. *EUPOS®-RIGA* korekciju serviss tiek nodrošināts izmantojot TCP/IP protokolu, kas salīdzinājumā ar FM radiofrekvenču kanālu ir vieglāk nodrošināms, jo nav nepieciešama apraides licenču iegāde.

Izmantojot standartos definētos ziņojumu izmērus iespējams iegūt aptuvenu datu apjomu, kas tiek noraidīts kādā no korekciju servisiem pie dažāda redzamo satelītu skaita. Autors aprēķināja cik teorētiski liels datu apjoms tiktu noraidīts lietotājiem, ja redzamības lokā tam būtu 8, 10 un 14 satelīti. Galveno pārraidāmo datu apjomu veido tieši pseidoattālumu un fāžu korekciju dati, kurus satur ziņojumi nr. 18, nr. 19, nr. 20, nr. 21, nr. 1004 un nr. 1012. Teorētiskajos datu apjoma aprēķinos iegūtie rezultāti attēloti 5.14. tabulā. Rezultātu pārskatāmībai tie tiek noapaļoti līdz veseliem baitiem, jo, tā kā daži ziņojumi tiek pārraidīti retāk nekā reizi sekundē, tad aprēķinot to proporcionālo izmēru vienā sekundē tiek iegūts neveselu baitu skaits.

Apskatot rezultātus, kuri atspoguļoti 5.14. un 5.15. tabulās secināms, ka visos korekciju servisos pārraidīto datu apjoms ir ļoti tuvs kādam no teorētiskajiem rezultātiem. Jāatzīmē, ka korekciju serviss PRS01 pārraida korekcijas tikai GPS sistēmas satelītiem, līdz ar to pārraidīto datu apjoms ir mazākas nekā FKP01 un PRS03, bet abi šie korekciju servisi pārraida korekcijas atbilstoši *RTCM 2.x* standartam, precīzāk – *RTCM 2.3*. Šajās tabulās ir pamanām vēl viena iezīme, kas izriet no *RTCM* standartiem, respektīvi, PRS02 korekciju servisā pārraidīto datu apjoms ievērojami atšķiras no FKP01 un PRS03, taču ir ļoti līdzīgs pārraidīto datu apjomam korekciju servisā PRS01. Jāatzīmē, ka PRS02 atšķirībā no PRS01 pārraida korekcijas arī GLONASS satelītiem, bet datu apjoms, pateicoties standartam *RTCM 3.0* ir mazāks [41], [61], [63].

Apskatot 5.15. tabulu secināms, ka korekciju saņemšanai ir pietiekami, ja lietotāja aparatūra ir aprīkota ar otrās paaudzes (2G) mobilo interneta modemu, pie nosacījuma, ja korekcijas netiek pārraidītas biežāk kā vienu reizi sekundē [43], [47], [69]. Pēc standarta 2G mobilā interneta maksimālais lejupielādes ātrums ir 14,4 kbit/s [8].

Apstrādājot pārraidītos datus autors ieguva arī vidējo laiku, kādu lietotāji ir pieslēgušies *EUPOS®-RIGA* atbalsta sistēmai. Pieslēguma laiks, protams, ir atkarīgs ne tikai no tā cik ilgs laiks nepieciešams, lai atrisinātu fāžu cikliskās nenoteiktības, bet arī no tā vai vienā mērījumu sesijā tiek uzmērīta tikai viena pozīcija vai vairākas, vai mērījumi ir statiski vai dinamiski u.c.

Tomēr 5.16. tabulā attēlotie rezultāti pietuvināti liecina par to, cik ilgs laiks paiet no autonoma risinājuma līdz mirklim, kad tiek atrisinātas fāžu cikliskās nenoteiktības.

5.14. tabula

Teorētiskais pārraidāmo datu apjoms baitos

	Redzamo satelītu skaits		
Korekciju serviss	8	10	14
EUPOS_DGPS	114	138	187
FKP01	576	696	935
PRS01	291	351	471
PRS02	286	351	478
PRS03	576	696	935
PRS_5Hz	2856	3456	4656

Salīdzinājumam, 5.15. tabulā ir attēlots vidējais faktiski, mērījumu laikā, pārraidīto datu apjoms.

5.15. tabula

Vidējais faktiski pārraidīto datu apjoms

Korekciju serviss	Pārraidīto datu apjoms (baiti)
EUPOS_DGPS	136
FKP01	899
PRS01	463
PRS02	316
PRS03	868
PRS_5Hz	3364

Izpētot *EUPOS®-RIGA* atbalsta sistēmas sistēmfailu reģistrus atklājās, ka reālais vidējais satelītu skaits, kuri ir bāzes staciju redzamībā ir 19,1. Teorētiskais pārraidāmo datu apjoms šādam satelītu skaitam ievērojami (150–2800 B, atkarībā no korekciju servisa) pārsniedz faktiski pārraidīto. Tas pamatojams ar to, ka lietotāja redzamības lokā parasti ir mazāks satelītu skaits nekā tas ir bāzes stacijām. Korekcijas lietotājam tiek pārraidītas vien tiem satelītiem, kuri

ir redzami gan mobilajam lietotājam, gan atbalsta bāzes stacijām vienlaicīgi [25],[32]. Izvērtējot maksimālo datu pārraides apjomu secināms, ka vidēji lietotāja redzamībā ir 10 ± 2 satelīti. Tabulā 5.16. attēlots maksimālais datu apjoms, kurš fiksēts pārraidot datus no servera lietotājam.

5.16. tabula

Maksimālais faktiski pārraidīto datu apjoms

Korekciju serviss	Pārraidīto datu apjoms (baiti)
EUPOS_DGPS	186
FKP01	1028
PRS01	548
PRS02	348
PRS03	946
PRS_5Hz	4098

Pēc padziļinātākas, vidējā viena pieslēguma laika, rezultātu analīzes secināms, ka pārsvarā lietotāji viena pieslēguma laikā veic vairākus mērījumus, kuri ir netālu viens no otra un starp šiem mērījumiem neatslēdzas no *EUPOS®-RIGA* atbalsta sistēmas korekciju servisa kanāla. Izmantojot tabulās 5.15. un 5.17. attēlotos rezultātus varam iegūt, ka vidēji viena pieslēguma laikā, atkarībā no izmantotā korekciju servisa, lietotājs saņem no 30600 – 592064 baitiem. Izejot no šiem rezultātiem katrs potenciālais lietotājs var iegūt aptuveno datu apjomu, kas atbilst tā darbības specifikai. Tabula 5.17., ņemot vērā lietotāju pieslēgumu specifiku un lietotāju aktivitāšu datubāzē reģistrēto informāciju, rāda, ka visplašāk tiek izmantoti *EUPOS®-RIGA* korekciju servisi PRS01, PRS02 un PRS03, bet vismazāk PRS_5Hz. Šāda dinamika skaidrojama ar to, ka korekciju servisa PRS_5Hz izmantošana patērē lielāku datu apjomu, kas, savukārt, palielina mērījumu izmaksas.

Vidējais lietotāja pieslēguma laiks

Korekciju serviss	Vidējais laiks (minūtes)
EUPOS_DGPS	03:45
FKP01	07:04
PRS01	11:42
PRS02	21:04
PRS03	08:12
PRS_5Hz	02:56

5.3. GNSS atbalsta sistēmas darbībai nepieciešamā sakaru kanālu kapacitāte

Zināt sakaru kanāla noslodzi nav lietderīgi tikai lietotājam, bet arī servisa nodrošinātājam. Atšķirībā no lietotāja kanāla noslodzes novērtējuma, sistēmas kanālu noslodzi noteikt nevar pēc tādiem pašiem principiem, jo netiek reģistrēta datu plūsma. Nav noteikts arī kopējs standarts, pēc kura dati no atbalsta bāzes stacijām tiek pārraidīti uz centrālo serveri korekciju aprēķināšanai. Pārraidīto datu apjoms ir atkarīgs ne tikai no redzamībā esošo satelītu skaita, bet arī no katra aparātūras ražotāja individuāla tehnoloģiskā risinājuma. Autoram nebija pieejas attiecīgo bāzes staciju ražotāja izstrādātajiem standartiem, tāpēc kanāla noslodzes novērtējums tika veikts balstoties tikai uz faktiski pārraidīto datu apjomu. Lai būtu iespējams šāds sistēmas kanāla noslodzes novērtējums, autors izveidoja paralēlas neapstrādātas datu plūsmas no atbalsta bāzes stacijām uz serveri. Serverī, līdzīgi kā ar korekciju servisiem, tikai izveidoti papildus servisi, kuri nodrošināja neapstrādātu datu plūsmu. Uz attālināta datora tika instalēts virtuāls mobilā lietotāja imitators (*RTKLIB* programmatūra), kas saņēma datus no *EUPOS®-RIGA* atbalsta sistēmas. Tādā veidā lietotāju aktivitāšu datubāzē tika reģistrēts pārraidīto datu apjoms un tādejādi kļuva iespējams noteikt kāda ir kanāla noslodze, kas savieno attālinātās atbalsta bāzes stacijas ar atbalsta sistēmas centrālo serveri.

EUPOS®-RIGA atbalsta sistēma sastāv no piecām atbalsta bāzes stacijām. Datu plūsmas apjomi, kurus tās pārraida uz serveri apkopotas 5.18. tabulā.

Apskatot 5.18. tabulā apkopotos rezultātus redzams, ka ienākošā interneta kanāla kapacitātei jābūt vismaz ~13 kbit/s, bet katrai atbalsta bāzes stacijai jābūt aprīkotai ar interneta pieslēgumu, kura ātrums nav mazāks par 3 kbit/s.

Datu plūsmas apjoms no atbalsta bāzes stacijām

Atbalsta stacija	Pārraidīto datu apjoms (baiti/s)
KRE_	317
LU__	328
SAL_	307
VAI_	313
VAN_	332

Ņemot vērā šādu atbalsta sistēmu specifiku interneta pakalpojumu sniedzēji, šķiet mākslīgi paaugstina cenas par saviem pakalpojumiem. *EUPOS®-RIGA* atbalsta sistēmas pirmajos darbības gados bāzes stacijas ar centrālo serveri tika savienotas, izmantojot tiešās optisko sakaru līnijas ar kopējo caurlaides ātrumu 2 Mbit/s, kas veidoja 256 kbit/s ātru sakaru kanālu uz katru bāzes staciju. Centrālā bāzes stacija izmantoja atsevišķu sakaru kanālu – tika savienota tieši ar servera tīkla karti. Šāds tehnoloģiskais risinājums izmaksāja aptuveni 300 € par vienu savienojumu, bet kopumā uz visu tīklu 1200 €. Tas bija aptuveni desmit reizes dārgāk nekā vidēji par interneta pakalpojumiem tajā laikā. Šāds risinājums tika saglabāts vairākus gadus. Lai samazinātu izdevumus par sistēmas uzturēšanu 2011. gadā tika pieņemts lēmums mainīt savienojuma starp bāzes stacijām un serveri veidu. Kopš 2011. gada bāzes stacijas savienotas ar serveri izmantojot vispārējo interneta tīklu. Šādā veidā izmaksas par vienu savienojumu izdevās samazināt no 300 € uz nepilniem 100 €. Taču, ņemot vērā, mobilā bezvadu interneta attīstību un cenu samazināšanās dinamiku, pēc autora domām šos izdevumus iespējams samazināt. 5.18. tabulā parādīti vidējie datu apjomi, kādi tiek pārraidīti no bāzes stacijām uz serveri. Izanalizējot visus datus autors atklāja, ka maksimālais datu apjoms, kurš vienā sekundē tiek pārraidīts no bāzes stacijas uz serveri nepārsniedz 460 B. Veicot vienkāršus aprēķinus, iespējams iegūt cik liels datu apjoms tiek pārraidīts no bāzes stacijas uz serveri mēneša laikā tādā veidā izvēloties nepieciešamo mobilā interneta datu plānu.

$$DA_{d_{max}} = 460 \times 86400$$

$$DA_{m_{vid}} = \frac{DA_{d_{max}} \times DS_{vg}}{12} \quad (5.3)$$

$$DA_{m_{max}} = DA_{d_{max}} \times 31 \quad (5.4)$$

$$DA_{m_{min}} = DA_{d_{max}} \times 28 \quad (5.5)$$

kur:

$DA_{m_{vid}}$ – pārraidīto datu apjoms vidēji mēnesī;

$DA_{d_{max}}$ – maksimālais pārraidīto datu apjoms dienā;

DS_{vg} – vidējais dienu skaits gadā;

$DA_{m_{max}}$ – maksimālais pārraidīto datu apjoms mēnesī;

$DA_{m_{min}}$ – minimālais pārraidīto datu apjoms mēnesī.

Izmantojot izteiksmes (5.3–5.5) pārraidīto datu apjoma aprēķināšanai, ievērojot to, ka maksimālais reģistrētais datu pārraides apjoms vienā sekundē nepārsniedz 460 baitus iegūstam, ka maksimāli mēnesī no bāzes stacijas uz serveri tiek pārraidīti aptuveni 1,2 GB. Izvērtējot visus lielākos mobilā interneta pakalpojumu sniedzēju cenrāžus tiek iegūts, ka pie šāda datu apjoma mēnesī izmaksas iespējams samazināt līdz 5,5–11,24 € mēnesī, kas ir vērā ņemams ieguvums. Šo mobilā interneta pakalpojumu sniedzēju publicētā informācija liecina, ka nodrošinātais pārraides ātrums nav zemāks par 9.7 kbit/s, kas ir pietiekoši, lai būtu iespējams nodrošināt datu pārraidi no bāzes stacijām uz serveri bez traucējumiem.

SECINĀJUMI

Promocijas darbā ir veikti satelītu sistēmu ar fāzu mērījumiem veikspējas pētījumi. Tam par pamatu ir izmantota GNSS *EUPOS®-RIGA* atbalsta sistēma, kura ļauj novērtēt precizitāti mērījumiem, kuros tiek izmantoti fāzu mērījumu korekciju dati gan statiskā mērījumu režīmā, gan dinamiskos mērījumu apstākļos. Darbā, pamatojoties uz praktiskiem eksperimentiem, sniegti aprēķini un rekomendācijas *EUPOS®-RIGA* sistēmas darbības zonas paplašināšanai un uzturēšanas izmaksu samazināšanai.

Statisko mērījumu rezultātā parādīts, ka *EUPOS®-RIGA* atbalsta sistēmas, kuras bāzes stacijas izvietotas ievērojot optimālu attālumu starp tām un homogēnu ģeogrāfisko izvietojumu, izmantošana ar GNSS RTK instrumentiem nodrošina mērījumus, kuru vidējā kvadrātiskā kļūda nepārsniedz 10 mm, bet mērījumu standartnovirze nepārsniedz 20 mm.

Palielinot attālumus starp bāzes stacijām no 10-15 km līdz 25-30 km mērījumu precizitāte tiek saglabāta un to vidējā kvadrātiskā kļūda nepārsniedz 10 mm, pamatojoties uz to piedāvāts atbalsta sistēmas optimizācijas variants, kas ļauj palielināt tās pārklājuma teritoriju par 20 %. Atkārtoti mērījumi parāda, ka *EUPOS®-RIGA* atbalsta sistēma ir stabila un uzticama GNSS palīgsistēma, kuru iespējams izmantot augstas precizitātes mērījumiem un specifisku uzdevumu veikšanai.

Balstoties uz statistiskos mērījumos iegūtiem rezultātiem iekoordinēta un novērtēta RTU TET katedrā ierīkotā satelītu signālu retranslācijas sistēma, kura šobrīd tiek izmantota studentu apmācības procesā laboratorijas darbu veikšanai, kā arī zinātnisko darbu izstrādei un pētījumu veikšanai. Sistēmas plaknes koordinātas noteiktas ar precizitāti ± 27 mm, bet augstuma komponente ar ± 51 mm.

EUPOS®-RIGA uzkrāto datu apstrāde, izmantojot pēcāpstrādes metodi, attiecībā pret EPN stacijām parāda, ka Rīgas reģiona areālā notiek Zemes virsmas ģeodinamiska kustība ziemeļu un rietumu virzienos ar ātrumu, kurš ir robežās no 1-3 mm gadā. Augstuma komponente līdzīgu tendenci neatklāj, kas liecina par bāzes staciju antenu stabilo nostiprinājumu vertikālā plaknē.

Izmantojot oriģinālu mērījumu veikšanas un to apstrādes metodi, kurā izmantoti divi GNSS RTK instrumenti, atklājas, ka objekta atrašanās vietas noteikšana dinamiskos apstākļos ātrumam līdz 30 km/h 80 % gadījumu vidējā kvadrātiskā kļūda nerasniedz 10 mm līmeni, bet mērījumu standartnovirze nepārsniedz 15 mm. Ja dinamiskos mērījumu apstākļos fāzu cikliskā nenoteiktība netiek atrisināta, mērījumu vidējā kvadrātiskā kļūda pārsniedz 80 mm, bet standartnovirze 400 mm robežu.

Teorētiskā *RTCM* standarta ziņojumu izmēra izpēte parāda, ka atbilstoši *EUPOS®-RIGA* korekciju servisu konfigurācijai pārraidāmo datu apjoms pie redzamiem 14 satelītiem sastāda 935 baitus, ja korekcijas tiek raidītas vienu reizi sekundē, kas atbilst datu pārraides ātrumam 7,48 kbit/s. Šādu ātrumu spēj nodrošināt 2G standarta mobilā datu pārraide. Praktiskā datu apjomu pārraides izpēte parāda, ka vidējais korekcijas datu apjoms, kas ik sekundi tiek pārraidīts lietotājam nepārsniedz 900 baitus, bet maksimālais – 1030 baitus, kas atbilst 8,24 kbit/s.

Sakaru kanālu noslodzes, starp bāzes stacijām un centrālo serveri, izpēte atklāj, ka maksimālais datu apjoms, kas tiek pārraidīts vienā sekundē nepārsniedz 460 baitus, tātad maksimālais datu apjoms mēnesī nepārsniedz 1,2 GB. Izvēloties atbilstošu mobilo datu plānu šī brīža izmaksas par datu pārraides pakalpojumiem iespējams samazināt aptuveni 15 reizes.

LITERATŪRA

1. Chen Y. A NEW APPROACH FOR COMPUTATIONALLY EFFICIENT AND RELIABLE CARRIER INTEGER AMBIGUITY RESOLUTION IN GPS/INS. – USA: University of California Riverside, 2014. – 194 p.
2. Sjöberg L.E. A NEW METHOD FOR GPS PHASE BASE AMBIGUITY RESOLUTION BY COMBINED PHASE AND CODE OBSERVABLES// Survey Review. – 1998. – Vol. 34, No. 268. – 363 – 372 p.
3. A SOFTWARE-DEFINED GPS AND GALILEO RECEIVER: A SINGLE-FREQUENCY APPROACH/ Borre K., Akos D.M., Bertelsen N., et al. – USA: Springer Science & Business Media, 2007. – 176 p.
4. Wubben G., Schmitz M., Boettcher G., Schumann C. ABSOLUTE GNSS ANTENNA CALIBRATION WITH A ROBOT: REPEATABILITY OF PHASE VARIATIONS, CALIBRATION OF GLONASS AND DETERMINATION OF CARRIER-TO-NOISE PATTERN// Proceedings of the IGS workshop "Perspectives and Visions for 2010 and beyond" – Garbsen, Germany: May, 2006, 12 p.
5. Prasad R., Ruggieri M. APPLIED SATELLITE NAVIGATION USING GPS, GALILEO AND AUGMENTATION SYSTEMS. – USA: Artech House mobile communications series, 2005. – 290 p.
6. Deabrogio L., Julien O. CHARACTERIZATION OF CARRIER PHASE MEASUREMENTS QUALITY IN URBAN ENVIRONMENTS// EWGNSS 2013, 6th European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing. – Munich, Germany: December, 2013. – 7 p.
7. Huo G., Miao L. CYCLE-SLIP DETECTION OF GPS CARRIER PHASE WITH METHODOLOGY OF SA4 MULTI-WAVELET TRANSFORM// Chinese journal of Aeronautics. – April 2012. – Volume 25, Issue 2. – 227-235 p.
8. Engadget: 2G, 3G and 4G mobile internet / Internets. – <http://www.engadget.com/2011/01/17/2g-3g-4g-and-everything-in-between-an-engadget-wireless-prim/> 15.04.2015.
9. EUPOS Technical standards. Revised 3rd edition// Resolution of the international EUPOS® steering committee 23rd conference. – Tbilisi, Georgia: May, 2013, 17 p.
10. Balodis J., Caunite M., Janpaule I., Silabriedis G. EUPOS® NETWORK SOLUTION// Proceedings of the international symposium on global navigation satellite systems, space-

- based and ground-based augmentation systems and applications. – Berlin, Germany: December, 2009.
11. Silabriedis G. *EUPOS®-RIGA ĢEODEZISKAIS ATBALSTA TĪKLS UN TĀ DAUDZFUNKCIONĀLĀ LIETOŠANA*. Promocijas darbs. – Rīga: RTU, 2012. – 98lpp.
 12. Koļesņikovs J. *EUPOS®-RIGA BĀZES STACIJU TĪKLA ĢEOMETRISKĀ IZVIETOJUMA OPTIMIZĀCIJA*. Bakalaura darbs. – Rīga: RTU, 2012.
 13. EUREF permanent network: List of permanent base stations / Internets. – http://www.epncb.oma.be/_networkdata/stationlist.php 03.03.2015.
 14. University of Liège: Galileo / Internets. – http://www2.ulg.ac.be/ipne/garnir/time/galileo/gal_stf_final_paper.pdf 17.12.2014.
 15. Navipedia: Galileo ground segment / Internets. – http://www.navipedia.net/index.php/Galileo_Ground_Segment 16.12.2014.
 16. European Commission: Galileo open service 2014 / Internets. – http://ec.europa.eu/enterprise/policies/satnav/pubconsult-2/files/galileo_os_sis_icd_v1-2-3_short_version270614_en.pdf 17.12.2014.
 17. European Space Agency: Galileo overview / Internets. – <http://www.unoosa.org/pdf/sap/2006/china/presentations/04-01.pdf> 17.12.2014.
 18. European Space Agency: Galileo satellites / Internets. – http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/The_future_-_Galileo/Galileo_satellites 16.12.2014.
 19. Navipedia: Galileo space segment / Internets. – http://www.navipedia.net/index.php/Galileo_Space_Segment 16.12.2014.
 20. University of Montana: Global positioning system explanation / Internets. – <http://www.montana.edu/gps/understd.html> 05.12.2014.
 21. Parkinson B.W., Spilker J.J. Jr. *GLOBAL POSITIONING SYSTEM: THEORY AND APPLICATIONS VOLUME I*. – Washington DC, USA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. 1995. – 793 p.
 22. Žagars J., Zvirgzds J., Kaminskis J. *GLOBĀLĀS NAVIGĀCIJAS SATELĪTU SISTĒMAS (GNSS)*. – Ventspils: SIA „Drukātava”, 2014. – 231 lpp.
 23. Hofmann-Wellenhof B., Lichtengger H., Wasle E. *GNSS GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEMS. GPS, GLONASS, GALILEO & MORE*. – Austria: Springer Wien NewYork, 2008. – 516 p.
 24. NovAtel: GNSS overview / Internets. – <http://www.novatel.com/an-introduction-to-gnss/chapter-1-gnss-overview/> 10.12.2014.

25. Van Sickle J. GPS FOR LAND SURVEYORS. Third edition. – USA: CRC Press Taylor & Francis Group, 2008. – 338 p.
26. School of civil and environmental engineering of Australia: GPS measuring / Internets. – http://www.sage.unsw.edu.au/snap/gps/gps_survey/chap1/149.htm 16.01.2015.
27. Navipedia: GPS performance / Internets. – http://www.navipedia.net/index.php/GPS_Performances 16.01.2015.
28. Langley R.B. GPS RECEIVER SYSTEM NOISE// GPS WORLD, June 1997. – 40 – 45 p.
29. Leick A. GPS SATELLITE SURVEYING. Third edition. – New Jersey, USA: John Wiley & Sons Inc, 2004. – 433 p.
30. GPS signals / Internets. – <http://what-when-how.com/a-software-defined-gps-and-galileo-receiver/gps-signal-gps-and-galileo-receiver-part-3/> 08.01.2015.
31. University of Colorado: GPS themes / Internets. – <http://www.colorado.edu/ASEN/asen6090/gpsttopics.html> 12.01.2015.
32. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J. GPS THEORY AND PRACTICE. Third, revised edition. – Austria: Springer-Verlag Wien New York, 1994. – 355 p.
33. Xu G. GPS THEORY, ALGORITHMS AND APPLICATIONS. Second Edition. – Germany: Springer-Verlag Berlin, 2007. – 340 p.
34. GPS WING system design and integration: interface specification / Internets. – <http://www.gps.gov/technical/icwg/IS-GPS-200E.pdf> 07.01.2015.
35. GPS World electronic version of the magazine: Phase cycle slip / Internets. – <http://gpsworld.com/innovation-cycle-slips/> 05.02.2015.
36. GraphPad software: Error computations, mean squared error and standard deviation / Internets. – http://www.graphpad.com/guides/prism/6/statistics/index.htm?stat_standard_deviation_and_standard.htm 10.03.2015.
37. EPN Central Bureau. GUIDELINES FOR EPN STATIONS & OPERATIONAL CENTRES// Belgium: Royal Observatory of Belgium, 2013. – 17 p.
38. Positim: High accuracy GNSS solutions and services / Internets. – http://www.positim.com/galileo_overview.html 21.12.2014.
39. Jung J. HIGH INTEGRITY CARRIER PHASE NAVIGATION USING MULTIPLE CIVIL GPS SIGNALS. Thesis. – USA: Bell & Howell Information and Learning Company, 2000. – 156 p.

40. TomTom: How Galileo works / Internets. – <http://www.tomtom.com/howdoesitwork/page.php?ID=26&CID=7&Language=1> 16.12.2014.
41. Heo Y., Yan T., Lim S., Rizos C. INTERNATIONAL STANDARD GNSS REAL-TIME DATA FORMATS AND PROTOCOLS// International Global Navigation Satellite Systems Society IGNSS Symposium. – Australia: 2009. – 17 p.
42. NovAtel: Introduction in to GNSS / Internets. – <http://www.novatel.com/an-introduction-to-gnss/chapter-1-gnss-overview/> 11.01.2015.
43. Ken's technical advises: GSM standards, download speed / Internets. – <http://kenstechtips.com/index.php/download-speeds-2g-3g-and-4g-actual-meaning> 15.04.2015.
44. Latvijas ģeotelpiskās informācijas aģentūra: Validētās bāzes stacijas Latvijā / Internets. – http://map.lgia.gov.lv/index.php?lang=0&cPath=2&txt_id=125 01.03.2015.
45. Pennsylvania state university: Lecture courses, GPS error sources / Internets. – <https://www.e-education.psu.edu/geog160/node/1924> 16.01.2015.
46. Likumi: Ģeodēziskās atskaides sistēmas un topogrāfisko karšu sistēmas noteikumi / Internets. – <http://likumi.lv/doc.php?id=239759> 01.03.2015.
47. WIKIPEDIA: Mobile wideband internet / Internets. – http://en.wikipedia.org/wiki/Mobile_broadband 15.04.2015.
48. Kluga A., Kluga J., Bricis A., Mitrofanovs I. MULTIPLE FREQUENCIES PRECISE GNSS RTK SYSTEM RESEARCH IN DYNAMIC MODE// Programmable Devices and Embedded Systems. – Velke Karlovice, Czech Republic: "International Federation of Automatic Control", 2013. – 95 – 98 p.
49. Government of India: National Technology Training Program / Internets. – http://nptel.ac.in/courses/105104100/lectureB_6/B_6_4codes.htm 23.12.2014.
50. Official U.S Government information about the Global Positioning System and related topics / Internets. – <http://www.gps.gov/> 05.12.2014.
51. Official U.S Government information about the Global Positioning System: Precise positioning service standard / Internets. – <http://www.gps.gov/technical/ps/2007-PPS-performance-standard.pdf> 11.01.2015.
52. Official U.S Government information about the Global Positioning System: Standard positioning service standard / Internets. – <http://www.gps.gov/technical/ps/2008-SPS-performance-standard.pdf> 11.01.2015.

53. Sjöberg L.E. ON OPTIMALITY AND RELIABILITY FOR GPS BASE AMBIGUITY RESOLUTION BY COMBINED PHASE AND CODE OBSERVABLES// Zeitschrift für Vermessungswesen. – 1997. – Vol.122, No. 6. – 270 – 275 p.
54. Roncagliolo P.A., Garcia J.G., Muravchik C.H. OPTIMIZED CARRIER TRACKING LOOP DESIGN FOR REAL-TIME HIGH-DYNAMICS GNSS RECEIVERS// International Journal of Navigation and Observation. – 2012. – Volume 2012. – 18 p.
55. Navipedia: overall information / Internets. – http://www.navipedia.net/index.php/Main_Page 12.01.2015.
56. Eisenberger R. PUBLIC TRANSPORT OPERATION MANAGEMENT SYSTEM (BERLIN PUBLIC TRANSPORT COMPANY BVG, GERMANY)// International symposium on global navigation satellite systems, space-based and ground-based augmentation systems and applications. – Berlin, Germany: November, 2008.
57. Zvirgzds J. RACIONĀLA LATPOS SISTĒMA. Promocijas darbs. – Rīga: RTU, 2012. – 264 lpp.
58. Anning C. RELIABLE GPS INTEGER AMBIGUITY RESOLUTION. – USA: University of California Transportation Center, 2011. – 102 p.
59. Resources and analysis for electronics engineers: GPS accuracy, errors and precision / Internets. – <http://www.radio-electronics.com/info/satellite/gps/accuracy-errors-precision.php> 16.01.2015.
60. RĪGAS PILSĒTAS ĢEODEZISKĀ GPS TĪKLA RG2 TEHNISKĀ ATSKAITE. – Rīga: 2005. – 34 lpp.
61. Lin M. RTCM 3.0 IMPLEMENTATION IN NETWORK RTK AND PERFORMANCE ANALYSIS. Thesis, Department of geomatics engineering. – Calgary, Alberta: 2006. – 140 p.
62. RTCM special committee No. 104. RTCM RECOMMENDED STANDARDS FOR DIFFERENTIAL GNSS (GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEMS) SERVICES, Version 2.3. RTCM paper 136-2001/SC104-STD// Radio Technical Commission for Maritime Services. – Alexandria, Virginia, USA, August 2001. – 190 p.
63. RTCM special committee No. 104. RTCM STANDARD 10403.1 FOR DIFFERENTIAL GNSS (GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEMS) SERVICES – VERSION 3. RTCM paper 177-2006-SC104-STD// Radio Technical Commission for Maritime Services, Arlington, Virginia, USA, October, 2006. – 98 p.
64. Klūga A. SATELĪTU RADIONAVIGĀCIJAS SISTĒMAS. – Rīga: RTU izdevniecība, 2010. – 152 lpp.

65. Kluga A., Mitrofanovs I., Kluga J., Jeralovics V. STATE AND DYNAMIC PRECISION RESEARCH USING TWO GPS RECEIVERS WITH RTK// Proceedings of the 14th Biennial Baltic Electronics Conference. – Tallinn, Estonia: "Tallin University of Technology", October, 2014. – 141–144 p.
66. European Commission: Structure of Galileo frequencies and signals / Internets. – http://ec.europa.eu/dgs/energy_transport/galileo/doc/galileo_stf_ion2002.pdf 17.12.2014.
67. Vidmar M: Technical information on GPS and GLONASS satellite receivers / Internets. – <http://lea.hamradio.si/~s53mv/navsats/theory.html> 22.12.2014.
68. Tekmon geomatics: Phase cycle ambiguities and RTCM format description / Internets. – <http://www.tekmon.eu/2-3-2-ambiguity-resolution-techniques/> 10.02.2015.
69. Telecommunication news of India: GSM standards / Internets. – <http://www.indiantelecomnews.com/mobile-internet-standards-2g-3g-4g-hspa-lte-evdo-gprs-edge-rtt> 15.04.2015.
70. Farrell J.A., Barth M. THE GLOBAL POSITIONING SYSTEM & INERTIAL NAVIGATION. – USA: R.R.Donnelly & Sons Company, 1999. – 340 p.
71. Navipedia: TMCOC / Internets. – http://www.navipedia.net/index.php/Time-Multiplexed_BOC_%28TMCOC%29 07.01.2015.
72. TOPCON products, user manuals / Internets. – <http://www.topcon.com/> 17.04.2015.
73. Sjoberg L.E. TRIPLE FREQUENCY GPS FOR PRECISE POSITIONING// Krumm F. and Schwarze V.S. (eds.) Festschrift for E.W. Grafarend on the occasion of his 60th birthday. – 1999. – Vol 1999. – 467–471 p.
74. Kaplan E.D., Hegarty C.J. UNDERSTANDING GPS PRINCIPLES AND APPLICATIONS. Second Edition. – Norwood, USA: Artech House, 2006. – 707 p.
75. Тейлор Дж. ВВЕДЕНИЕ В ТЕОРИЮ ОШИБОК. Пер. с англ. – М.: Мир, 1985. – 272 с.
76. Интернет-форум Chipinfo: системы ГЛОНАСС и GPS / Internets. – <http://www.chipinfo.ru/literature/chipnews/200110/9.html> 20.12.2014.
77. Московский авиационный институт: сигналы системы ГЛОНАСС / Internets. – <http://kaf401test.rloc.ru/articles/9/31/> 20.12.2014.
78. Флеров А.Г., Клуга А.М. РАДИОСИСТЕМЫ ДАЛЬНЕЙ НАВИГАЦИИ. – Рига: РИО РКИИГА, 1987. – 86 с.
79. Конин В.В., Кониная Л.А. СПУТНИКОВЫЕ СИСТЕМЫ НАВИГАЦИИ. УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ. Киев: 2008. – 286 с.
80. Федеральное космическое агентство: информационно-аналитический центр / Internets. – <http://www.glonass-center.ru/> 17.12.2014.