

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 darba kopsavilkums

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

RTU Izdevniecība
Rīga 2016

Mitrofanovs I. Satelītu navigācijas sistēmu veikspējas pētījumi ar fāžu mērījumiem. Promocijas darba kopsavilkums. – R.: RTU Izdevniecība, 2016. – 31 lpp.

Iespiests saskaņā ar ETF promocijas padomes „RTU P-08” 2016. gada 17. marta lēmumu, protokols Nr. 33.

**PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU
ELEKTRONIKAS UN TELEKOMUNIKĀCIJU DOKTORA GRĀDA
IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ**

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2016. g. 7. jūlijā Rīgas Tehniskās universitātes Elektronikas un telekomunikāciju fakultātē, Āzenes ielā 12, 2-38. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors, *Dr. sc. ing.* **Guntars Balodis**
Rīgas Tehniskā universitāte, Latvija

Profesors, *Dr. habil. sc. ing.* **Igors Kabaškins**
Transporta un sakaru institūts, Latvija

Profesors, *Dr. sc. ing.* **Eimuntas Kazimieras Paršeliūnas**
Viļņas Ģedimina tehniskā universitāte, Lietuva

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis doto promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai. Promocijas darbs nav iesniegts nevienā citā universitātē zinātniskā grāda iegūšanai.

Ingus Mitrofanovs (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, satur ievadu, 5 nodaļas, secinājumus, literatūras sarakstu, 58 attēlus un 38 tabulas, kopā 149 lappuses. Literatūras sarakstā ir 80 nosaukumi.

SATURS

PROMOCIJAS DARBA VISPĀRĒJAIS RAKSTUROJUMS	5
Tēmas aktualitāte	5
Darba mērķis	6
Darbā izvirzītie uzdevumi	6
Pētījumu metodika	6
Zinātniskā novitāte	7
Pētījumu rezultāti	7
Darba praktiskais lietojums	8
Aizstāvamās tēzes	8
Darba aprobācija	9
Publikācijas	11
Darba struktūra un apjoms	12
PROMOCIJAS DARBA SATURS	12
1. Nodaļa GLOBĀLĀS NAVIGĀCIJAS SATELĪTU SISTĒMAS	12
2. Nodaļa FĀŽU CIKLU NENOTEIKTĪBA UN NOBĪDES GNSS MĒRĪJUMOS	14
3. Nodaļa AUGSTAS PRECIZITĀTES LOKĀLĀS DIFERENCIĀLĀS GNSS ATBALSTA SISTĒMAS IZVEIDE, PĀRBAUDE UN ATTĪSTĪBA	14
4. Nodaļa EUPOS®-RIGA NODROŠINĀTĀS MĒRĪJUMU PRECIZITĀTES IZPĒTE REĀLĀ LAIKĀ DINAMISKOS MĒRĪJUMU APSTĀKĻOS	19
5. Nodaļa GNSS ATBALSTA SISTĒMAS DARBĪBAS NODROŠINĀŠANAI UN LIETOTĀJAM NEPIECIEŠAMĀ SAKARU KANĀLA KAPACITĀTE	25
Secinājumi	28
LITERATŪRAS SARAKSTS	29

PROMOCIJAS DARBA VISPĀRĒJAIS RAKSTUROJUMS

Tēmas aktualitāte

Mūsdienās GNSS uztvērējus apvienojumā ar atbalsta sistēmām izmanto arvien plašāk un vairākās tautsaimniecības nozarēs [6], [16]. Galvenās nozares šādu sistēmu lietošanā ir tās, kurās ir nepieciešama īpaši augsta pozicionēšanās precizitāte, piemēram, ģeodēziskie mērījumi, kartogrāfija un monitoringa. Šajās nozarēs ar standarta precizitātēs GNSS uztvērējiem sasniedzamā 1–3 m precizitāte ir pārāk zema [9], [14], [15]. Salīdzinājumam ar klasiskajām ģeodēziskās uzmērīšanas un monitoringa metodēm GNSS atbalsta sistēmas nodrošina ievērojami ātrāku šo darbu izpildi ar mazāku cilvēkresursu skaitu [6].

Veicot kādu nozīmīgu būvju, piemēram, ūdens dambja monitoringu, svarīgāk par to, cik ļoti precīzi GNSS *RTK* instruments spēj iekoordinēt to attiecībā pret kādu no koordinātu sistēmām, ir tas, ar kādu uzticamību GNSS *RTK* instruments spēj veikt savas pozīcijas atkārtotu noteikšanu. Tādā veidā nodrošinot augstāku precizitāti un līdz ar to rodot lietojumu dažādu specifisku uzdevumu veikšanā, piemēram, kādu atvasinātu sistēmu (RTU TETk izveidotās satelītu signālu retranslācijas sistēmas) precīzās pozīcijas noteikšanā.

Iepriekš minētie lietojuma piemēri saistās ar mērījumiem statiskos apstākļos, respektīvi, tos var izpildīt ar nekustīgu GNSS *RTK* uztvērēju un atkārtot vairākkārtīgi, kas tādā veidā tehniski ievērojami atvieglo uzstādītās, augstās mērījumu precizitātes sasniegšanu. Savukārt mūsdienās GNSS *RTK* uztvērēji ir raduši lietojumu ne tikai statiskos uzdevumos, bet arī tādus uzdevumos, kuri saistās ar pārvietošanos, piemēram, lauksaimniecības vai ceļubūves specializētās tehnikas datorizētā vadība. Gadījumos, kad mērījumi ar GNSS *RTK* uztvērējiem tiek veikti dinamiskos apstākļos, fāžu ciklu nenoteiktības atrisināšana kļūst sarežģītāka [10]. Ņemot vērā šādas atbalsta sistēmas izveides augstās izmaksas, ir svarīgi, lai tā būtu lietojama pēc iespējas plašāk, taču, lai to droši lietotu dinamiskos apstākļos, ir nepieciešams ticami noteikt mērījumu sasniedzamās precizitātes līmeni. Atšķirībā no statiskiem mērījumiem dinamiskajos mērījumos nav pieejams kāds atskaites lielums attiecībā pret kuru veikt precizitātes kontroli, lai to atrisinātu, bija nepieciešams izstrādāt mērījumu veikšanas un to apstrādes metodi, kas nodrošinātu uzticamus rezultātus.

Situācijā, kad nepieciešams atpelnīt vai minimizēt izdevumus par šādas dārgas infrastruktūras uzturēšanu, svarīgi ir veikt tās optimizāciju, pēc iespējas racionālāk izvietojot pieejamās bāzes stacijas, kas tādā veidā nodrošinātu lielāku darbības zonu un potenciālo klientu loku. Mūsdienās plašu lietojumu radis mobilais internets, kurš ar saviem datu pārraides ātrumiem spēj nodrošināt nepieciešamo datu plūsmas ātrumu, tādā veidā samazinot izmaksas par interneta pakalpojumiem un paplašinot iespējamās bāzes staciju atrašanās vietu variantus, jo ir nepieciešams tikai elektrotīkla pieslēgums.

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.

Darbā izvirzītie 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 mērījumos 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.

Pētījumu metodika

Promocijas darba mērķu un tam izvirzīto uzdevumu sasniegšanai tika izmantota kvantitatīvā pētījumu metode – matemātiski statistiskā. Lai pilnvērtīgi veiktu eksperimentālos pētījumus, tika izmantoti ģeodēziskās klases GNSS *RTK* instrumenti *TOPCON GRS-1*, *TOPCON Hiper+*, *LEICA 1200* un *TRIMBLE R8*. Uzdevumu risināšanai un rezultātu grafiskai attēlošanai izmantots šāds datorprogramma nodrošinājums: *Bentley PowerMap*, *Topcon Tools*, *Bernese*, *Microsoft Excel*, *GPS Visualizer*.

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 pēcapstrādes metodi, iegūts, ka notiek Zemes virsmas ģeodinamiskās 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.

Pētījumu rezultāti

1. Izpētīta GNSS instrumentu veikspēja statistiskos 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 ģeodinamiskā kustība ziemeļrietumu virzienā, kuras ātrums ir 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 pēc šiem rezultātiem, piedāvāts risinājums, kā samazināt uzturēšanas izmaksas ~15 reizes.

Darba praktiskais lietojums

1. Statisko mērījumu rezultātā iegūts apliecinājums, ka, ievērojot homogēnu un optimālu attālumu starp atbalsta sistēmas bāzes stacijām, iespējams nodrošināt mērījumus, kuru vidējā kvadrātiskā kļūda nepārsniedz 10 mm, bet mērījumu standartnovirze nepārsniedz 20 mm.
2. Novērtējot *EUPOS®-RIGA* atbalsta sistēmas nodrošināto precizitāti pēc tīkla pārbūves, pierādīts, ka mērījumu precizitāte nepasliktinās un, pamatojoties uz to, izstrādāts tīkla tālākas optimizācijas variants, kurš, saglabājot mērījumu precizitāti, nodrošinātu darbības zonas palielinājumu par 20 %.
3. Iekoordinēta un novērtēta RTU TETk katedrā izveidotās satelītu signālu retranslācijas sistēmas darbība, tādā veidā izveidojot modernu laboratorijas aprīkojumu studentu praktisko nodarbību un zinātnisko eksperimentu veikšanai.
4. Veicot *EUPOS®-RIGA* uzkrāto datu pēcapstrādi, pierādīts, ka šī atbalsta sistēma ir izveidota ar augstu stabilitāti un tās uzkrātie rezultāti ir lietojami Zemes virsmas ģeodinamisko kustību monitoringam.
5. Eksperimentos dinamiskos mērījumu apstākļos pierādīts, ka GNSS *RTK* instrumenti ātrumiem, kuri nepārsniedz 30 km/h, 80 % spēj nodrošināt mērījumus, kuru vidējā kvadrātiskā kļūda nepārsniedz 10 mm, bet mērījumu standartnovirze nepārsniedz 15 mm. Tādā veidā iegūts apstiprinājums, ka šādi instrumenti ir izmantojami automatizētai lauksaimniecības tehnikas vadībai. Iegūtie rezultāti izmantoti RTU projekta Nr. ZP-2008/15 „Algoritmu izstrāde slēpto objektu atpazīšanai un pozicionēšanai” un valsts pētījumu programmas projekta „Inovatīvas signālapstrādes tehnoloģijas viedu un efektīvu elektronisko sistēmu radīšanai” mērķu sasniegšanai.
6. Teorētisku un praktisku datu plūsmu apjomu izpētes rezultātā rasts risinājums, kā samazināt atbalsta sistēmas uzturēšanas izmaksu sakaru sadaļu ~15 reizes, nodrošinot nepieciešamo sakaru kanālu kapacitāti.

Aizstāvamās 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 ģeodinamiskās kustības Rīgas reģionā ar izteiktu tendenci plaknes koordinātām.

Darba aprobācija

Par promocijas darba galvenajiem atzinumiem un rezultātiem sniegti ziņojumi konferencēs.

1. Silabriedis G., Mitrofanovs I., Plotņikovs S. „EUPOS-RĪGA gatavība GOCE misijai” RTU 48. Starptautiskā zinātniskā konference, Rīga, Latvija, 2007, 12. oktobris.
2. Silabriedis G., Mitrofanovs I., Plotņikovs S., Ratkus B., Želinska E. „EUPOS-RĪGA antenu piesaiste augstākās klases līmetņošanas tīkliem Rīgā”. RTU 48. Starptautiskā zinātniskā konference, Rīga, Latvija, 2007, 12. oktobris.
3. Caunīte M., Mitrofanovs I., Plotņikovs S., Ratkus B., Želinska E. „EUPOS-IRC iespaidi Vācijā”. RTU 48. Starptautiskā zinātniskā konference, Rīga, Latvija, 2007, 12. oktobris.
4. Silabriedis G., Mitrofanovs I. „EUPOS-RĪGA gada ekspluatācijas pieredze”. Latvijas Universitātes 66. Konference, Astronomijas un Ģeodēzijas sekcijas 2. Sēde, Rīga, Latvija, 2008, 7. februāris.
5. Abele M., Balodis J., Mitrofanovs I., Rubans A., Silabriedis G., Zarinjš A. „EUPOS-RIGA and SLR”. Geophysical Research Abstracts. Volume 10, 2008. EGU General Assambly 2008. ISSN: 1029-7006.
6. Abele M., Balodis J., Balodis K., Caunite M., Janpaule I., Mitrofanovs I., Rubans A., Silabriedis G., Zarinjš A. „Implementation of New Positioning System in Riga”. International Symposium EUREF – 2008. Brussels, June 18–20, 2008.
7. Mitrofanovs I. „GPS atbalsta tīkla *EUPOS-RIGA®* precizitātes pētījumi reālajā laikā” RTU 50. Starptautiskā zinātniskā konference, Rīga, Latvija, 2009, 15. oktobris.
8. Balodis J., Silabriedis G., Caunite M., Janpaule I., Balodis K., Rubans A., Aleksejenko I., Otto R., Ratkus B., Reiniks M., Mitrofanovs I., Plotnikovs S., Zvirgzds J. „*EUPOS®-RIGA* Network Elevation Analyses. International Symposium on Global Navigation Satellite Systems, Space-Based and Ground-Based Augmentation Systems and Applications, Berlin, Germany, from 30 November to 2 December 2009.
9. Mitrofanovs I. „GPS ar fāžu mērījumiem precizitātes izpēte reālā laikā”. Latvijas Universitātes 68. Konference, Astronomijas un Ģeodēzijas sekcijas 2. Sēde, Rīga, Latvija, 2010, 19. februāris.

10. Balodis J., Balodis K., Janpaule I., Kaminskis J., Normand M., Mitrofanovs I., Plotņikovs S., Rubans A., Silabriedis G., Zvirgzds J. „On road of „EUPOS® Contribution to GOCE Mission””. International Symposium on Global Navigation Satellite Systems, Space-based and Ground-based Augmentation Systems and Applications. Brussels, Belgium, 28–29 November 2010.
11. Balodis J., Mitrofanovs I., Morozova K., Normand M., Silabriedis G. „EUPOS – Rīga tīkla modifikācija 2011. gadā”. RTU 52. Starptautiskā zinātniskā konference, Rīga, Latvija, 2011, 11. oktobris.
12. Kluga A., Kluga J., Bricis A., Mitrofanovs I. „MULTIPLE FREQUENCIES PRECISE GNSS RTK SYSTEM RESEARCH IN DYNAMIC MODE”. IFAC/IEEE PDeS 2013 conference, 12th conference on programmable devices and embedded systems, September 25–27, 2013, Velke Karlovice, Czech Republic
13. Balodis J., Haritonova D., Janpaule I., Jumare I., Normand M., Silabriedis G., Zvirgzds J., Mitrofanovs I., Zariņš A. “GNSS staciju koordinātu izmaiņu vektori laika gaitā”. Latvijas Universitātes 72. konference, Astronomijas un Ģeodēzijas sekcijas sēde, Rīga, Latvija, 2014, 5. februāris.
14. Mitrofanovs I., “GPS ar fāžu mērījumiem precizitātes izpēte dinamiskajā režīmā, izmantojot divus instrumentus”. Latvijas Universitātes 73. konference, Astronomijas un Ģeodēzijas sekcijas sēde, Rīga, Latvija, 2015, 11. februāris.
15. Silabriedis G., Balodis J., Kaļinka M., Liepiņš I., Rubans A., Balodis K., Mitrofanovs I., “Ģeoīda modeļa projekta izpildes gaita”. Latvijas Universitātes 73. konference, Astronomijas un Ģeodēzijas sekcijas sēde, Rīga, Latvija, 2015, 11. februāris.
16. Balodis J., Morozova K., Mitrofanovs I. „General Concept of Geoid Model Determination and its Verification using RTK”. The FOTONIKA-LV conference „Achievements and Future prospects” 23–24 April 2015, Riga, Latvia.
17. Mitrofanovs I. “Performance Studies of the GNSS Receivers with Carrier Phase Measuring in Dynamic Mode”. ICG Experts meeting: Global Navigation Satellite Systems Services 14–18 December 2015, Vienna, Austria.
18. Morozova K., Silabriedis G., Balodis J., Baltmane I., Balodis K., Kaļinka M., Jumare I., Haritonova D., Mitrofanovs I. “Viena cm precizitātes ģeoīda modelis”. Latvijas Universitātes 74. konference, Ģeodēzijas un Ģeoinformātikas sekcijas sēde, Rīga, Latvija, 2016, 11. februāris.
19. Mitrofanovs I., Klūga J., Klūga A., Bricis A. “GNSS RTK mērījumi ātrgaitas kustībā”. Latvijas Universitātes 74. konference, Ģeodēzijas un Ģeoinformātikas sekcijas sēde, Rīga, Latvija, 2016, 11. februāris.

Publikācijas

1. Abele M., Balodis J., Balodis K., Normand M., Janpaule I., Mitrofanovs I., Rubans A., Silabriedis G., Zarins A. „Implementation of New Positioning System in Riga” International Symposium EUREF – 2008, 18–20 June, 2008, Bruxelles, Belgium, 2008, pp. 2–6.
2. Abele M., Balodis J., Mitrofanovs I., Rubans A., Silabriedis G., Zarins A. “EUPOS-RIGA and SLR EUPOS-RIGA and SLR” Geophysical Research Abstracts Vol. 10, 2008, pp. 1–2., EGU General Assembly.
3. Balodis J., Silabriedis G., Caunite M., Janpaule I., Balodis K., Rubans A., Aleksejenko I., Otto R., Ratkus B., Reiniks M., Mitrofanovs I., Plotnikovs S., Zvirgzds J. *EUPOS®-RIGA NETWORK ELEVATION ANALYSES*. International Symposium on Global Navigation Satellite Systems, Space-Based and Ground-Based Augmentation Systems and Applications, Berlin, Germany, 30 November to 2 December 2009; Conference Proceedings. Senate Department for Urban Development, Berlin, Germany 2010, pp. 68–72. ISBN 978-3-938373-93-4.
4. Balodis J., Balodis K., Janpaule I., Kaminskis J., Normanda M., Mitrofanovs I., Plotnikovs S., Rubans A., Silabriedis G., Zvirgzds., On Road of ”EUPOS® Contribution to GOCE Mission”. In: International Symposium on Global Navigation Satellite Systems, Space-Based and Ground-Based Augmentation Systems and Applications: Conference Proceedings, Belgium, Brussels, 29–30 November 2010. Berlin: Senate Department for Urban Development, 2011, pp. 47–50. ISBN 978-3-938373-94-1.
5. Kluga A., Kluga J., Mitrofanovs I. „GPS Receiver with Phase Measuring Precision Estimation”. Proceedings of 13th Biennial Baltic Electronics Conference (BEC2012), Estonia, Tallinn, 3–5 October 2012. Tallinn: Tallinn University of Technology, 2012, pp. 169–172. ISBN 978-1-4673-2772-5.
6. Kluga A., Kluga J., Bricis A., Mitrofanovs I. „MULTIPLE FREQUENCIES PRECISE GNSS RTK SYSTEM RESEARCH IN DYNAMIC MODE”. Programmable Devices and Embedded Systems: 12th IFAC Conference on Programmable Devices and Embedded Systems. Vol. 12, Part 1, Czech Republic, Velké Karlovice, 25–27 September 2013. Velké Karlovice: International Federation of Automatic Control, 2013, pp. 95–98. ISBN 978-3-902823-53-3.
7. Kluga A., Mitrofanovs I., Kluga J., Jeralovics V.. „State and Dynamic Precision Research Using Two GPS Receivers with RTK”. The 14th Biennial Baltic Electronics Conference, Proceedings of the 14th Biennial Baltic Electronics Conference, Tallinn, Estonia, 6–8 October 2014. Tallinn University of Technology, 2014, pp. 141–144. ISBN 978-9949-23-672-5.

8. Balodis J., Morozova K., Mitrofanovs I. „General Concept of Geoid Model Determination and its Verification using RTK”. The FOTONIKA-LV conference „Achievements and Future prospects”, 23–24 April 2015, Riga, Latvia. Book of Abstracts, pp. 60. ISBN 978-9984-45-993-6.
9. Balodis J., Silabriedis G., Haritonova D., Kaļinka M., Janpaule I., Morozova K., Jumāre I., Mitrofanovs I., Zvirgzds J., Kaminskis J., Liepiņš I. “Development of the One Centimeter Accuracy Geoid Model of Latvia for GNSS Measurements”. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (MSE) Volume 96, 30 September to 2 October 2015, Riga, Latvia, pp.1–8. ISSN 1757-8981.
10. Mitrofanovs I. „Performance Studies of the GNSS Receivers with Carrier Phase Measuring in Dynamic Mode”. International Committee on Global Navigation Satellite Systems Experts Meeting on Global Navigation Satellite Systems (GNSS) Services: Abstracts, 14–18 December, 2015, Vienna, Austria, pp. 26.

Darba struktūra un apjoms

Promocijas darbs ir patstāvīgs zinātnisks pētījums, un tas sastāv no ievada, 5 nodaļām, secinājumiem un izmantotās literatūras saraksta. Darba apjoms ir 149 lappuses, tas satur 58 attēlus un 38 tabulas, izmantotās literatūras sarakstā ir 80 nosaukumi.

PROMOCIJAS DARBA SATURS

Promocijas darba ievadā ir formulēta tēmas aktualitāte, izvirzītais mērķis un veicamie uzdevumi tā sasniegšanai, kā arī pētījuma novitāte, praktiskā nozīme un aizstāvēšanai izvirzītās tēzes.

1. Nodaļa GLOBĀLĀS NAVIGĀCIJAS SATELĪTU SISTĒMAS

Šajā nodaļā tiek apskatīti GNSS nodrošinātas precizitātes ietekmējošie faktori. Kā galvenie avoti, kas izraisa kļūdas mērījumos, kuri veikti, izmantojot GNSS, ir:

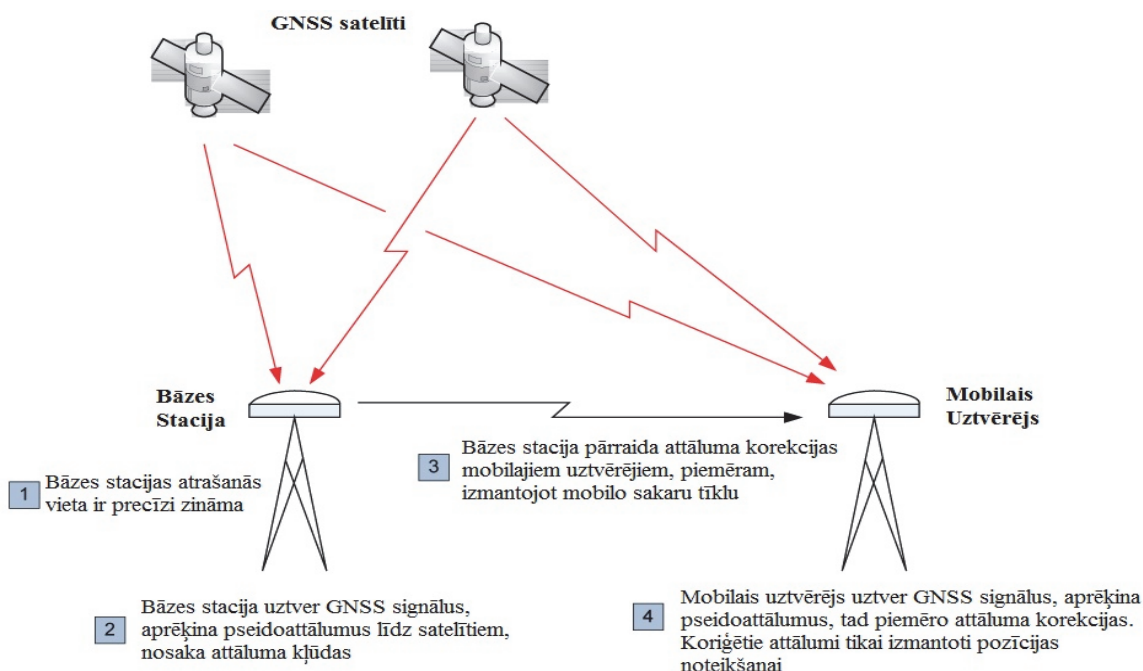
- kļūdas satelītu aparatūras darbībā un izmaiņas satelītu orbītās;
- radiosignāla izplatīšanās kļūdas (atmosfēras ietekme un daudzkanālu izplatīšanās);
- kļūdas lietotāja aparatūras darbībā;
- satelītu stāvokļa izraisītās kļūdas jeb ģeometriskais faktors.

Tāpat tiek apskatīts arī, kāda ir GNSS uzturētāju nodrošinātā precizitāte, izmantojot standarta (C/A) un precīzā (P) koda uztvērējus [14], [15]. Salīdzinājumam

tiek aprakstīts, kāds mērījumu precizitātes uzlabojums ir gaidāms, ja mērījumi tiek veikti, izmantojot nesošās frekvences signāla fāzes mērījumus apvienojumā ar uz zemes bāzētām atbalsta stacijām vai tīkliem (atbalsta sistēmām) [20]. Tipisks fāžu mērījumu atbalsta sistēmas darbības princips attēlots 1.1. attēlā.

Pirmajā nodaļā tiek apskatīti arī matemātiskie mērījumu veikšanas modeļi abām mērījumu metodēm, kuras iespējamas, izmantojot GNSS signālus, un tās ir:

- koda pseidoattālumu (attālums starp satelītu un uztvērēju [11]) mērījumi;
- nesošās frekvences fāzes mērījumi.



1.1. att. Tipiskas atbalsta sistēmas darbības princips

Izpētot, kāda ir teorētiski iespējamā precizitāte, kuru spēj nodrošināt GNSS, atklājas, ka vienīgais variants, lai sasniegtu centimetra līmeņa precizitāti, ir GNSS *RTK* instrumentu izmantošana ar korekciju saņemšanu reālā laikā, kuru pamatā ir fāžu starpību aprēķini [6], [10]. Augstas precizitātes GNSS ar fāžu mērījumiem tiek izmantoti pirmās, otrās un trešās kārtas fāžu starpības vienādojumi, kuri attiecīgi ir uzrakstāmi šādi:

$$\Phi_{AB}^j(t) = \frac{1}{\lambda} \rho_{AB}^j(t) + N_{AB}^j - f^j \delta_{AB}(t) \quad (1.1)$$

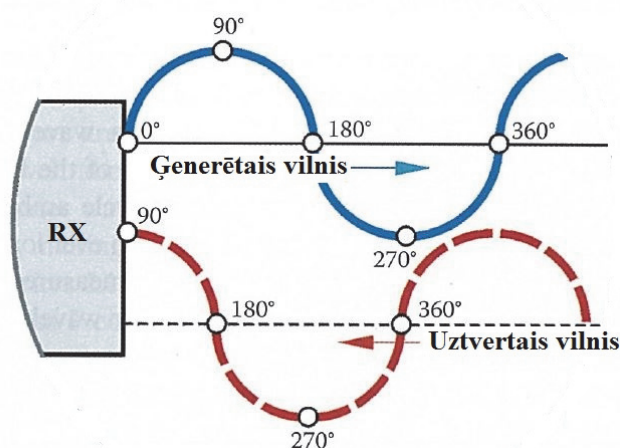
$$\Phi_{AB}^{jk}(t) = \frac{1}{\lambda} \rho_{AB}^{jk}(t) + N_{AB}^{jk} \quad (1.2)$$

$$\Phi_{AB}^{jk}(t_{12}) = \frac{1}{\lambda} \rho_{AB}^{jk}(t_{12}) \quad (1.3)$$

Izmantojot pirmās kārtas fāžu starpību vienādojumus, iespējams izslēgt satelīta pulksteņa nobīdes ietekmi, otrās kārtas starpību vienādojumus – uztvērēja pulksteņa nobīdi, bet trešās kārtas fāžu starpību vienādojums neietekmē fāžu cikliskā nenoteiktība.

2. Nodaļa FĀŽU CIKLU NENOTEIKTĪBA UN NOBĪDES GNSS MĒRĪJUMOS

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 pastāv vēl tāda problēma, ka nav zināms arī nepilnā viļņa daļas apjoms, respektīvi, no satelīta uztvertais signāls un uztvērēja ģenerētais signāls nav vienādā fāzē, vizuāli šī problēma parādīta 2.1. attēlā. Nepilnās viļņa daļas noteikšana ir ievērojami vienkāršāka, jo mūsdienu aparatūra tiešos mērījumos spēj noteikt to ar 1 % precizitāti no viļņa garuma [6], [11].



2.1. att. Uztvertā un ģenerētā viļņa fāzes nobīde

Nodaļas turpinājumā tiek apskatītas interesantākās un izplatītākās fāžu ciklu nenoteiktību atrisināšanas metodes, tādas kā:

- fāžu ciklu nenoteiktības noteikšana ar divu frekvenču fāžu mērījumiem;
- fāžu ciklu nenoteiktības noteikšana ar daudzfrekvenču fāžu un kodu mērījumiem u.c.

Otrās nodaļas nobeigumā tiek apskatīta tāda problēma kā fāžu ciklu nobīde, kas pēc būtības ir piepešs lēcienš novērotā signāla fāzē par veselu ciklu skaitu, kas neietekmē nepilnās viļņa daļas apjomu un, ja netiek laicīgi novērsta (izlabota) ievieš ievērojamu mērījumu precizitātes samazināšanos [5], [9], [10], [11].

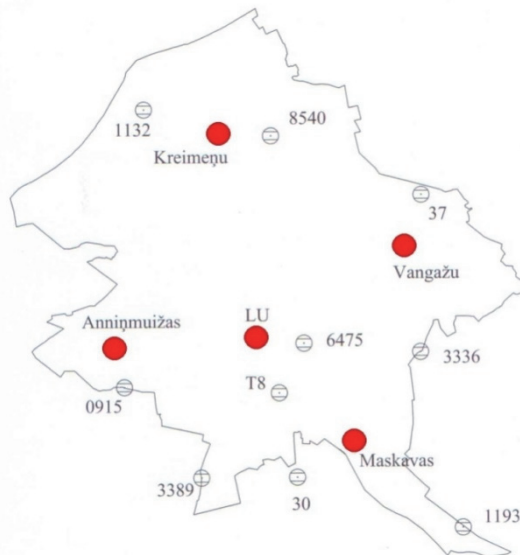
3. Nodaļa AUGSTAS PRECIZITĀTES LOKĀLĀS DIFERENCIĀLĀS GNSS ATBALSTA SISTĒMAS IZVEIDE, PĀRBAUDE UN ATTĪSTĪBA

Nodaļas sākumā īsi tiek aprakstīta *EUPOS®-RIGA* atbalsta sistēmas izveides gaita un norādīts uz to, ka šī atbalsta sistēma ir veidota atbilstoši *EUPOS* kopējiem tehniskajiem standartiem un ieteikumiem [1], [3].

Trešās nodaļas apakšnodaļās ir apkopoti autora veikto pētījumu rezultāti par GNSS sniegumu statistiskos mērījumu apstākļos. Mērījumi ir veikti vairākos etapos:

- nodrošinātās precizitātes novērtēšana pēc tīkla izveides;
- nodrošinātās precizitātes novērtēšana pēc tīkla pārbūves;
- atkārtota precizitātes novērtēšana tīkla stabilitātes kontrolei.

Lai novērtētu, ar kādu precizitāti iespējams veikt mērījumus attiecībā pret klasiskajiem ģeodēziskajiem punktiem, visās mērījumu sesijās tika izvēlēti vairāki ģeodēziskā tīkla RG2 punkti [17]. Katrā no trim mērījumu sesijām punktu skaits bija atšķirīgs un kopējais izmantoto punktu attēlojums parādīts 3.1. attēlā.



3.1. att. Precizitātes novērtēšana mērījumos izmantotie RG2 punkti (sarkans – sākotnējais *EUPOS®-RIGA* bāzes staciju izvietojums)

Mērījumi tika veikti, uzstādot GNSS *RTK* instrumentu uz trijkāja, kurš ar optiskās centrēšanas metodi tika centrēts uz punkta, šādā veidā instrumentu iespējams uzstādīt ar 1 mm precizitāti. Vizuāli šāds izpildījums parādīts 3.2. attēlā.



3.2. att. Aprīkojums precīzai GNSS instrumenta uzstādīšanai

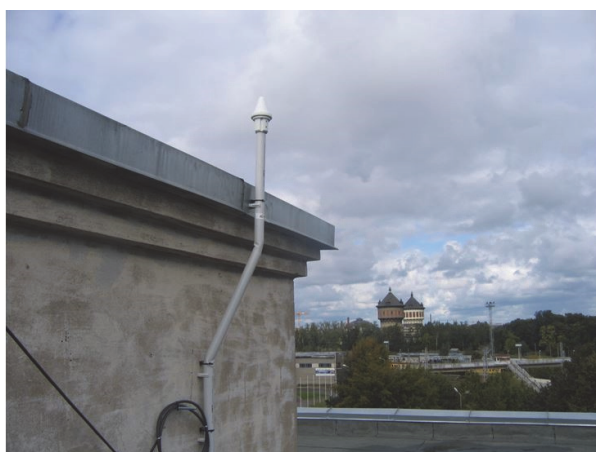
Pirmreizējās precizitātes novērtēšanas gaitā tika izmantoti trīs dažādu ražotāju (*TOPCON*, *TRIMBLE* un *LEICA*) instrumenti, tādā veidā samazinot instrumentālās kļūdas ietekmi, tika atklāts, ka sasniedzamā precizitātē tikpat kā neatšķiras starp dažādu instrumentu iegūtajiem rezultātiem.

Šajā pētījumu posmā tika konstatēts, ka summārā (X un Y koordinātas) vidējā kvadrātiskā kļūda, kas tika aprēķināta pēc izteiksmēm (3.1) un (3.2), nepārsniedz 5 mm robežu, kas apliecināja sistēmas stabilu darbību un izveides precizitāti.

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

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

Iegūtie rezultāti liecināja par augstu sistēmas uzticamību, kas tādā veidā ļauj to lietot specifisku uzdevumu veikšanai, kuros nepieciešamā un sagaidāmā precizitāte ir zemāka. *EUPOS®-RIGA* tika izmantota, lai iekoordinētu un pārbaudītu RTU TETk katedrā izveidoto GPS signālu retranslācijas iekārtu [8], kura attēlota 3.3. attēlā.



3.3. att. RTU TET katedras GPS signālu retranslācijas uztverošā antena

Retranslācijas sistēma tika iekoordinēta, veicot tiešos GNSS *RTK* mērījumus, un pēc tam pārbaudīta, izmantojot tās retranslētos signālus reālā laika mērījumos un ar pēcstrādes metodi. Telpās iegūtie rezultāti no tiešajiem rezultātiem atšķiras par 0,8–27 mm plaknes koordinātām un par 41–51 mm augstuma komponentes noteikšanā.

Pēc *EUPOS®-RIGA* pārbūves attālums starp blakus esošajām bāzes stacijām pieauga no maksimālajiem 13 km līdz maksimālajiem 46 km, tādā veidā bāzes staciju darbības rādiuss palielinājās no 6,5 km līdz 23 km. Tīkla attīstības koncepcijā tika pieņemts, ka bāzes staciju darbības rādiuss ir 20 km, tādā veidā darbības zona pieauga no 400 km² līdz 2600 km².

Lai novērtētu tīkla nodrošināto mērījumu precizitāti, tikai veikti atkārtoti mērījumi uz 5 no etapā veiktajiem punktiem un iegūti rezultāti, ka mērījumu vidējā kvadrātiskā

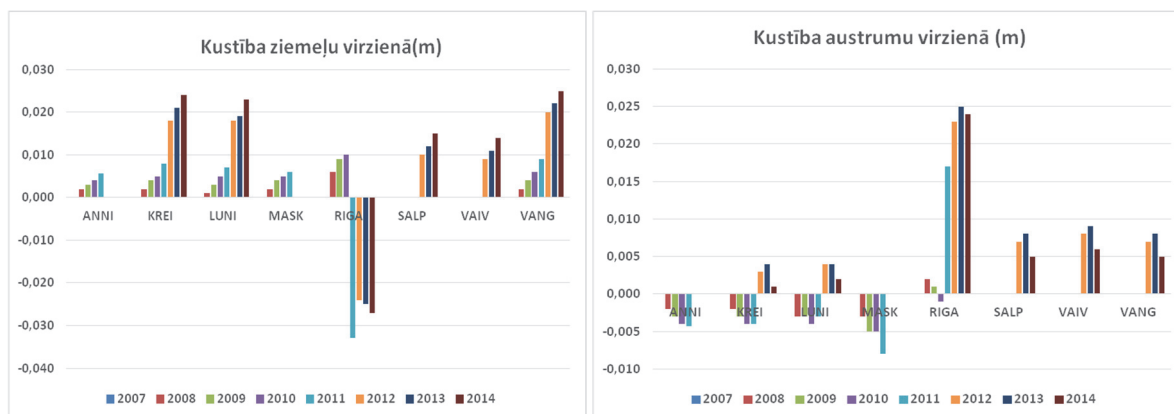
kļūda pēc tīkla pārbūves arī nepārsniedz 5 mm robežu plakņu koordinātu noteikšanā. Augstuma komponentes noteikšanā vidējā kvadrātiskā kļūda nepārsniedz 6 mm.

Lai pārliecinātos par tīkla darbības stabilitāti, 2014. gadā tika veikti atkārtoti mērījumi precizitātes novērtēšanai, kuros tika noteikts, ka kopējā mērījumu vidējā kvadrātiskā kļūda plaknes koordinātām nepārsniedz 3 mm, bet augstuma komponentei – 2 mm. Vidējā kvadrātiskā kļūda visām trim dimensijām nepārsniedz 4 mm robežu.

Iegūtie rezultāti liecina par augstu mērījumu atkārtojamības precizitāti, kas tādā veidā ļauj GNSS RTK instrumentu mērījumus izmantot, piemēram, ģeodēziskajā monitoringā.

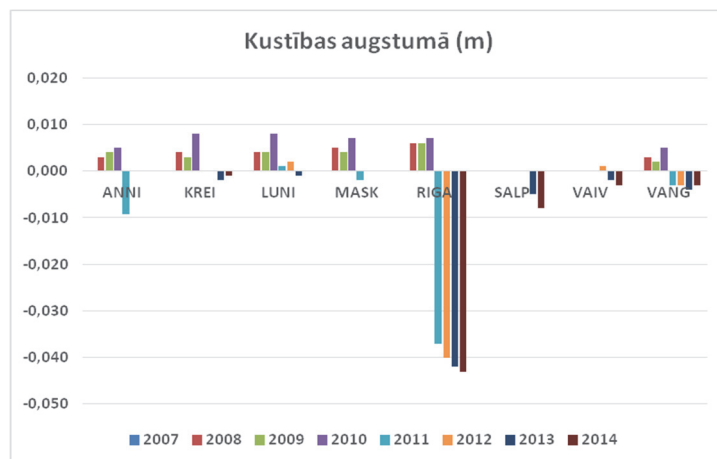
Paralēli tika noteikts arī ar cik augstu precizitāti mērījumi atbilst ar klasiskām ģeodēziskajām mērīšanas metodēm iegūtajiem rezultātiem, un, salīdzinot visu trīs mērījumu sesiju vidējo rezultātu ar oficiālām RG2 koordinātām, tika iegūts, ka atšķirības plaknē nepārsniedz 10 mm robežu, tātad sistēma spēj nodrošināt mērījumus ar precizitāti, kas augstāka par centimetru.

Veicot *EUPOS®-RIGA* uzkrāto datu apstrādi ar pēcapstrādes metodi attiecībā pret stabilajām EPN stacijām [12], atklājās, ka *EUPOS®-RIGA* bāzes stacijas ir ierīkotas ar ļoti augstu stabilitāti un atklāj ģeodinamisko Zemes virsmas kustību ziemeļrietumu virzienā, ko apliecina 3.5. attēlā attēlotā informācija.



3.5. att. *EUPOS®-RIGA* uzkrāto datu pēcapstrādes rezultāts (plaknē)

Savukārt 3.6. attēlā ir attēloti analogā veidā iegūtie rezultāti augstuma komponentes izmaiņai laika gaitā. Aplūkojot attēlu, redzams, ka augstuma komponentes izmaiņām nav novērojamas izteiktas un konstantas izmaiņas laika gaitā, tātad staciju izvietojanas vietu izvēlē un nostiprinājums apliecina sistēmas stabilas un uzticamas darbības spējas.

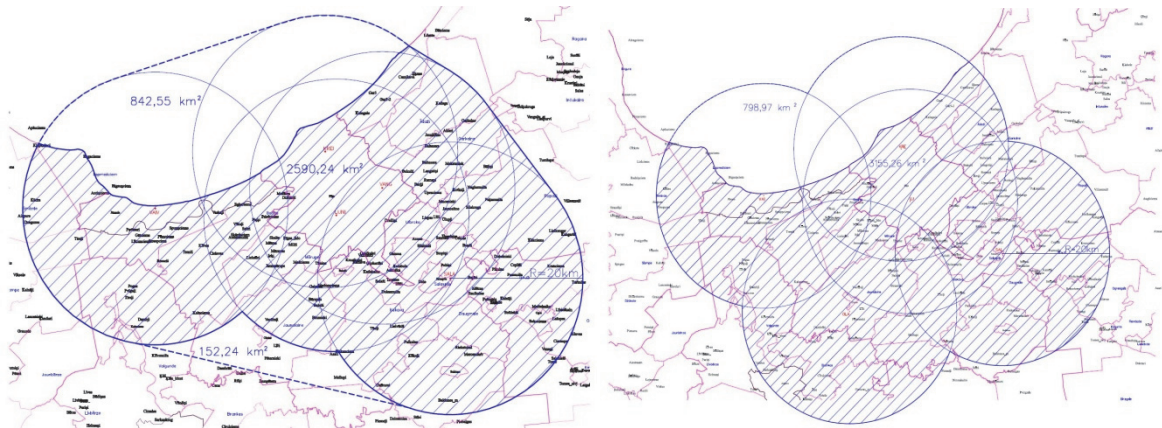


3.6. att. EUPOS®-RIGA bāzes staciju augstuma komponentes izmaiņas laika gaitā

Ievērojot EUPOS®-RIGA bāzes staciju izvietojuma nosacījumus – darbības rādiuss ir 20 km, autors izstrādāja piedāvājumu, kā, ievērojot šo nosacījumu un nepalielinot tehnisko nodrošinājumu, palielināt tīkla darbības zonu par 20 %. Balstoties uz iepriekš veiktajiem mērījumiem, tika veikti jauni mērījumi, kuros tiek atslēgta potenciāli pārvietojamā stacija. Mērījumus autora vadībā veica RTU Būvniecības fakultātes Transportbūvju institūta Ģeomātikas katedras bakaluru programmas students J. Koļešņikovs, izstrādājot savu bakalaura darbu. Tādā veidā tika plānots iegūt rezultātus tam, kā izmainās tīkla precizitāte pēc iespējamās tās tālākās pārbūves [4]. Mērījumu rezultātā tika iegūts, ka, atrodoties ārpus tiešas tīkla darbības zonas nelielā, ~15 km attālumā, vidējā kvadrātiskā kļūda plaknes koordinātām nepārsniedz 10 mm, bet augstuma komponentei 26 mm. Veicot mērījumus tuvāk tīkla darbības zonai, kas tiek piedāvāta kā jaunā vieta bāzes stacijas izvietošanai, vidējā kvadrātiskā kļūda nepārsniedz 15 mm vērtību. Veicot mērījumus tiešā tīkla darbības zonas iekšpusē, atšķirība starp mērījumiem ar pieslēgtu un atslēgtu Juglas bāzes staciju ir tikai 2 mm, piedevām mērījumos, kuros dati no Juglas bāzes stacijas netika izmantoti, precizitāte bija augstāka. Iegūtie rezultāti pamato, ka, pārbūvējot EUPOS®-RIGA tīklu, tiktu saglabāta esošā precizitāte, vienlaicīgi ievērojami palielinot tā darbības zonu, kas ir svarīgs aspekts plašāka lietotāju skaita piesaistei.

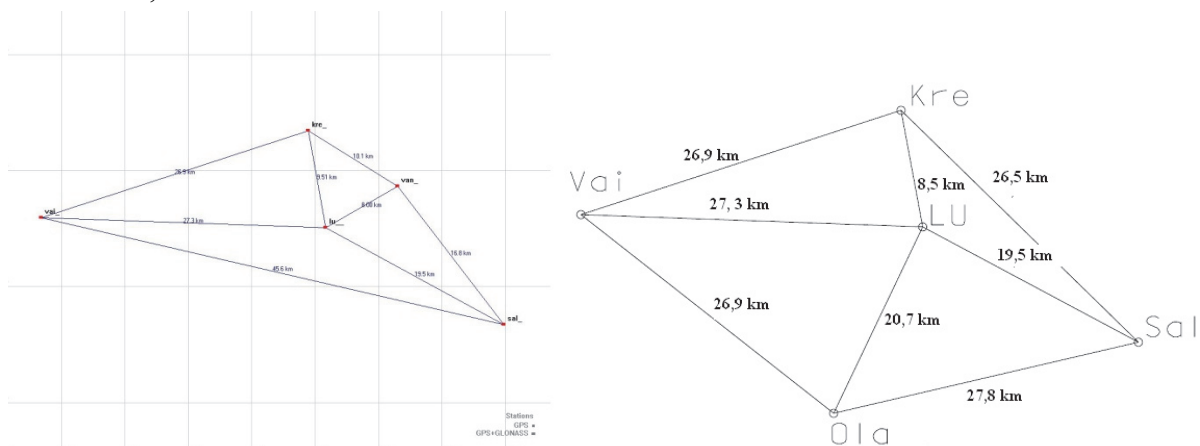
Veicot autora piedāvāto EUPOS®-RIGA tīkla pārbūvi, tiks nodrošināts arī tas, ka bāzes stacijas tiks izvietotas homogēnāk (3.7. att., 3.8. att.) un samazināsies attālums starp blakusesošajām bāzes stacijām. Vienmērīgais attālums starp bāzes stacijām nodrošinās, ka visā tīkla darbības zonā nodrošinātā precizitāte būs vienmērīgāka un neatkarīga no lietotāja ģeogrāfiskās atrašanās vietas tīkla darbības zonā līdzīgo bāzes līniju garuma dēļ.

Autora piedāvātās pārbūves rezultātā tīkla darbības zona tiks paplašināta par 565 km². Esošā un iespējamā tīkla pārklājuma teritorija parādīta 3.7. attēlā.



3.7. att. Esošā (pa kreisi) un piedāvātā (pa labi) tīkla pārklājuma teritorija

Veicot autora piedāvāto pārbūvi, bāzes staciju izvietojuma homogenitāte uzlabosies, kas attēlots 3.8. attēlā.



3.8. Esošais (pa kreisi) un piedāvātais (pa labi) bāzes staciju ģeometriskais izvietojums homogenitātes uzlabošanai

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

Galvenā atšķirība starp mērījumiem dinamiskos un statiskos apstākļos ir tā, ka dinamiskos apstākļos vienā atrašanās vietā ir iespējams tikai viens mērījums, un līdz ar to mērījumu vidējā vērtība, kas ir labākais mērs mērāmā lieluma noteikšanas precizitātes novērtēšanai [2], [23], nav pieejams. Noteicošais faktors veiksmīgai mērījumu veikšanai dinamiskos apstākļos 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 [24]. Ņemot vērā, ka mūsdienu fāžu korelatori 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 varam atrast šādi:

$$v_{\max_{F_{1,2}}} = \frac{c\Delta\varphi_{\max_{F_{1,2}}}}{\omega t_m} \quad (4.1)$$

kur

c – gaismas ātrums;

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

ω – leņķiskais ātrums;

t_m – mērījuma veikšanas laiks;

Izmantojot izteiksmi (4.1), iegūstam šādas vērtības:

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

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

Iegūtās vērtības liecina, ka GNSS *RTK* spēj nodrošināt augstas precizitātes mērījumus ne tikai virszemes satiksmē, bet arī nekomerciālajā gaisa satiksmē. Precizitāte iespējama viena radioviļņa garuma ietvaros, kas aptuveni ir no 19 cm līdz 24 cm. Tas autoru mudināja veikt GNSS *RTK* instrumentu nodrošinātās precizitātes izpēti dinamiskos mērījumu apstākļos.

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 šādi [7]:

- 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.

PLL uzdevums ir sekot signāla fāzes izmaiņām, kuras atbilstoši [22] nedrīkst pārsniegt 15° vērtību no viļņa garuma, kas GPS sistēmas gadījumā L1 frekvencei ir 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 šādi:

$$\sigma_{PLL} = \sqrt{\sigma_{tPLL}^2 + \sigma_v^2 + \sigma_A^2} + \frac{\sigma_e}{3} \leq 15^\circ \quad (4.2)$$

kur

σ_{tPLL} – termālā trokšņa standartnovirze, izteikta grādos;

σ_v – oscilatora nestabilitātes izraisītās nobīdes standartnovirze, izteikta grādos;

σ_A – Alana variācijas izraisītā oscilatora kļūda, izteikta grādos;

σ_e – dinamisko apstākļu izraisīta kļūda *PLL*.

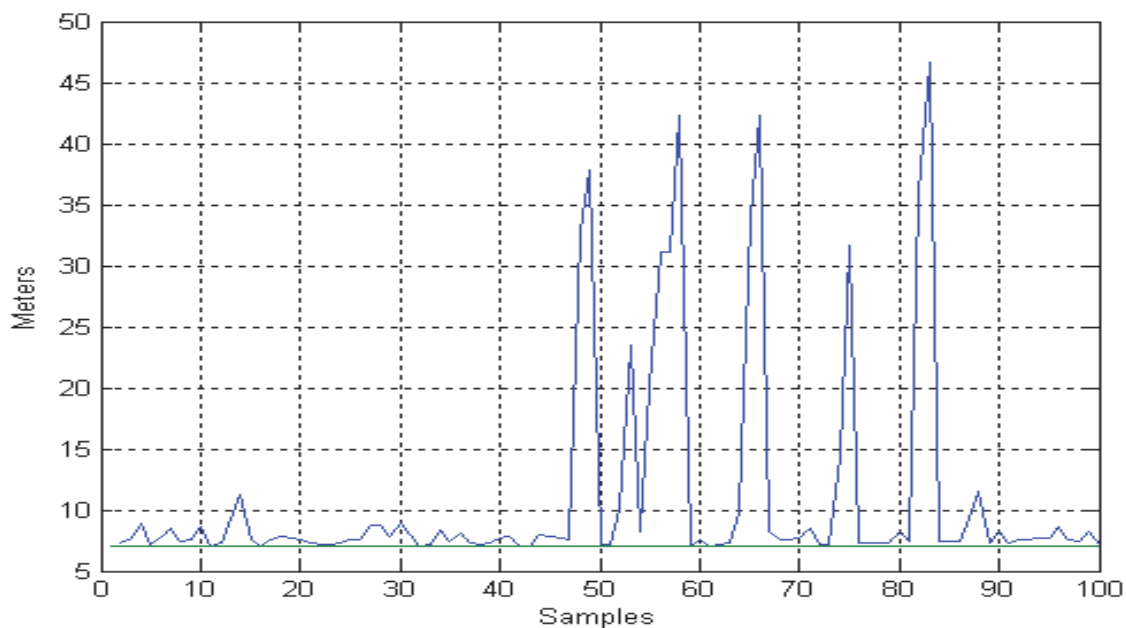
Izteiksmes (4.2) labās puses pirmā daļa (izņemot dinamisko apstākļu izraisīto kļūdu) saskaņā ar GPS izveides standartu IS-GPS-200 nedrīkst pārsniegt $5,7^\circ$. Mērījumos izmantotās aparatūras *PLL* joslas platums ir 25 Hz, pieņemot, ka Alana variācijas un oscilatora vibrācijas izraisītā ietekme ir līdzīga kā [22] un to, ka izmantoto instrumentu integrācijas laiks ir 1 ms, bet signāla/trokšņa attiecība ir 51 dB-Hz [21], iegūstam, ka izteiksmes (4.2) labās puses pirmās daļas komponentes veido kļūdu, kura nepārsniedz $3,63^\circ$ no viļņa garuma. Pārveidojot iepriekš minētos maksimālos pārvietošanās ātrumus paātrinājuma vērtībās, iegūstam attiecīgi 19,4 g un 24,5 g, izmantojot šīs vērtības izteiksmē (4.2), iegūstam:

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

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

Iegūtie rezultāti pilnībā apmierina (4.2) izteiksmes prasības, kas ir noteicošais faktors veiksmīgiem praktiskajiem mērījumiem dinamiskos apstākļos.

Autoram pieejamie GNSS *RTK* instrumenti spēj veikt mērījumus automātiski pēc laika un attāluma kritērijiem. Pārvietojoties un veicot mērījumus pēc laika kritērija, nepieciešams zināt pārvietošanās ātrumu ar augstu precizitāti, lai būtu iespējams noteikt veiktā ceļa attālumu, taču GNSS *RTK* instrumenti pārvietošanās ātrumu nefiksē. Nolasot ātruma vērtību no kustīga auto spidometra, tā vērtība ir ļoti aptuvena, un līdz ar to par centimetra precizitātes mērījumiem nevar runāt. Labāka situācija ir ar mērījumiem pēc attāluma kritērija. Šajā gadījumā, piemēram, ik pēc 7 m tiek fiksēta pozīcija un, aprēķinot starpību starp koordinātām, ir iespējams noteikt veiktā ceļa attālumu, kā tas, piemēram, parādīts 4.1. attēlā.



4.1. att. Veiktā ceļa attālumi pie pārvietošanās ātruma 20 km/h.

Attēlā redzams, ka tikai brauciena sākumposmā izmērītie attālumi tuvinās uzdotajam mērījumu veikšanas intervālam, bet, sākot no distances vidusdaļas, attālumu intervāli ir pat līdz 47 m. Pie ātruma 20 km/h vienā sekundē transportlīdzeklis veic attālumu 5,55 m, tātad tas ir mazāk par uzdoto lielumu un GNSS uztvērējam būtu jāspēj fiksēt pozīciju ik pēc uzdotajiem 7 m. Palielinot ātrumu līdz 40 km/h un 60 km/h, situācija arvien pasliktinās un nomērītie intervāli uzdotajai vērtībai tuvojas tikai distances sākumā un vidusdaļā, kas pamatojams ar mazāku ātrumu sākumā un ar mazāku ātrumu distances vidusdaļā, kur tika veikts pagrieziens, lai brauktu pretējā virzienā.

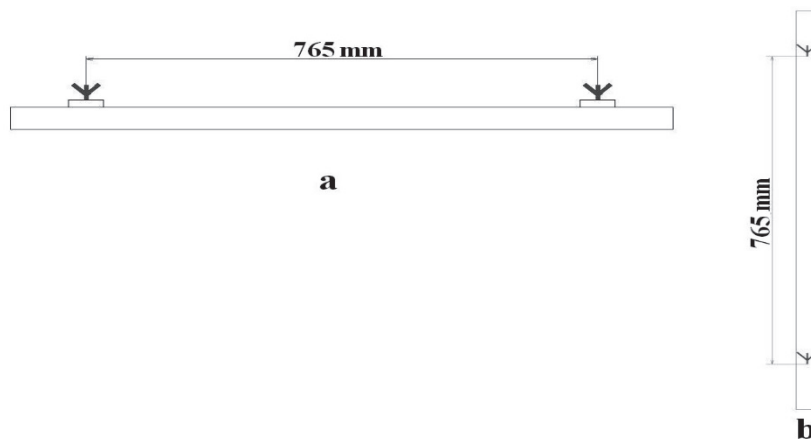
Lai izprastu, vai fiksētā pozīcija nobīdās vairākos virzienos vai tikai radiālās kustības virzienā, izmantojot interneta vietni <http://www.gpsvisualizer.com>, tika veikta auto kustības maršruta vizuāla novērtēšana, kuras rezultāti parādīti 4.2. attēlā.



4.2. att. Auto kustības maršruta vizuāla novērtēšana.

Apskatot attēlu, kurā ar rozā līnijām iezīmēts auto pārvietošanās maršruts mērījumu veikšanas laikā, redzams, ka tām nav novērojamas nobīdes, kuras varētu sastādīt kaut 20 m, jo līnijas uzgulstas uz ceļa. Tas vedina domāt, ka nobīdes, kuras sastādīja pat vairāk nekā 40 m, notiek tikai radiālās kustības virzienā un ir saistāmas ar pārvietošanās ātrumu vai mērījumu veikšanas tehnisko izpildījumu. Līdzīgā veidā apstrādājot rezultātus kustībai 40 km/h un 60 km/h, atklājās līdzīga situācija kā 4.2. attēlā parādītajai, respektīvi, nav novērojamas maršruta līniju izkliedes. Veicot papildu mērījumus, kuru laikā pārvietošanās notika, ejot kājām pa sīkākām konstrukcijām un dažādos virzienos, atklājās, ka mērījumi iekļaujas vismaz 50 cm robežās.

Tā kā iegūtie rezultāti liecināja par iespēju sasniegt vismaz 50 cm precizitāti, tikai izstrādāta oriģināla mērījumu veikšanas un apstrādes metode, kuras lietošanai nav nepieciešams uzdot veikto attālumu intervālus. Metodes pamatā ir divu vienādas precizitātes klases instrumentu izmantošana, kuri visā mērījumu laikā atrodas nemainīgā attālumā viens no otra, tādā veidā nodrošinot atskaites lielumu attiecībā pret kuru pārbaudīt rezultātu precizitāti līdzīgi kā tas ir statistiskos mērījumos.



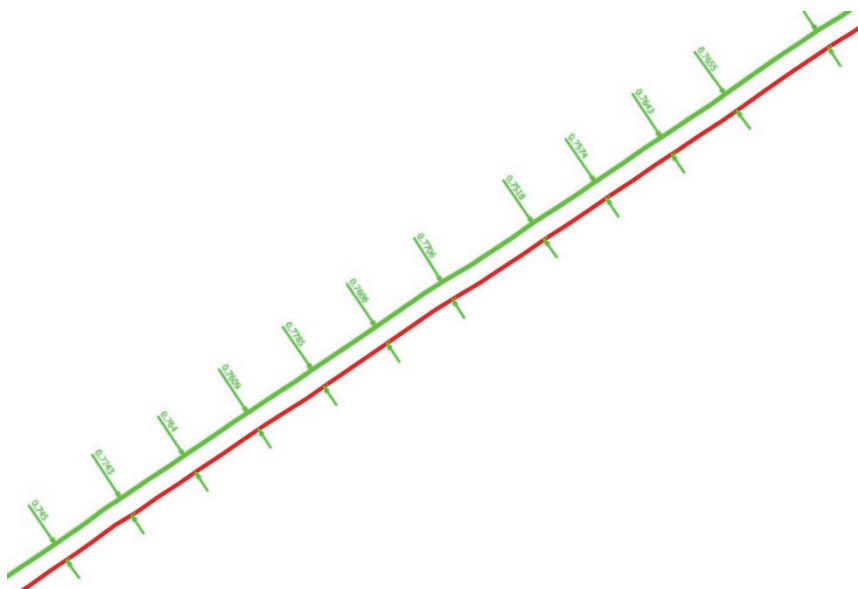
4.3. att. Instrumentu novietojums mērījumu veikšanai dinamiskos apstākļos.

4.3. attēlā ir parādīts GNSS *RTK* instrumentu izvietojums mērījumu laikā.

- a variantā mērījumu rezultātā tiek iegūtas divas paralēlas līnijas, starp kurām ar augstu precizitāti, izmantojot *Bentley PowerMap* programmatūru, iespējama attāluma noteikšana.
- b variantā mērījumu rezultātā tiek iegūta punktu kopa, starp kuriem jābūt attālumam, kāds fiziski ir starp uztvērējiem. Arī šajā gadījumā rezultātu apstrādei tika izmantota *Bentley PowerMap* programmatūra.

a varianta uztvērēju izvietojums ļauj novērst arī laika sinhronizācijas starp uztvērējiem ietekmi uz mērījumu rezultātiem.

Maršruta līnijas, kuras veidojas a varianta mērījumos, un attālumu nolases starp tām ir parādītas 4.4. attēlā.



4.4. att. Maršruta līnijas un attālumu nolases starp tām.

Šādā veidā tika iegūts 81 rezultāts mērījumiem, kuros pārvietošanās notika kājām un 179 rezultāti mērījumiem, kuros pārvietošanās notika ar auto ar ātrumu ap 30 km/h. Kopējie rezultāti mērījumiem, kuros tika saglabāta atrisināta fāzu ciklu nenoteiktība, attēloti 4.1. un 4.2. tabulā.

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 iegūtos rezultātus, redzams, ka mērījumos, kuri veikti, pārvietojoties kājām, tiek sasniegta augstāka precizitāte jeb kļūda mērījumos ir mazākā nekā tajos, kuros pārvietošanās notiek ar auto, kas liecina, ka, palielinoties ātrumam, samazinās precizitāte [19].

Mērījumos tika atklāts, ka pie pārvietošanās ātruma līdz 30 km/h vismaz 80 % gadījumu GNSS RTK instrumenti nodrošina mērījumus, kuru absolūtā kļūda nepārsniedz 10 mm.

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

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.

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 [13], [18].

EUPOS®-RIGA nodrošina lietotājiem korekcijas, izmantojot gan RTCM2.3, gan RTCM3.0 standartus un DGPS korekcijas, kuras satur informāciju tikai par korekcijām vienai frekvencei. Ir korekciju servisi, kuri satur korekcijas tikai GPS satelītiem un GPS un GLONASS satelītiem.

Šajā nodaļā tiek pētīts atbilstoši *EUPOS®-RIGA* konfigurācijai teorētiski iespējamais datu pārraides apjoms un salīdzināts ar faktiski reģistrēto, lai iegūtu vidējos viena pieslēguma raksturlielumus, pēc kuriem vadoties, lietotājs spētu aprēķināt sev nepieciešamo datu apjomu.

Tabulā 5.1. un 5.2. attēlots attiecīgi teorētiskais pārraidāmo datu apjoms pie dažāda redzamo satelītu skaita un vidējais faktiski reģistrētais pārraidīto datu apjoms vienā sekundē.

5.1. tabula

Teorētiskais pārraidāmo datu apjoms baitos

Korekciju serviss	Redzamo satelītu skaits		
	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

5.2. 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

Sistēmas reģistrā ir fiksēts, ka vidējais vienlaicīgi novērojamo satelītu skaits bāzes stacijām ir 19,1. Pie šāda satelītu skaita teorētiskais pārraidāmo datu apjoms par 150–2800 B pārsniegtu faktiski pārraidīto, kas skaidrojams ar to, ka lietotāja pozīcijā redzamo satelītu skaits ir mazāks, nekā tas ir bāzes staciju atrašanās vietā. Korekcijas lietotājiem tiek pārraidītas tikai tiem satelītiem, kuri vienlaikus ir redzami gan lietotājam, gan atbalsta sistēmas bāzes stacijai [6], [10].

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* sistēmas korekciju servisa kanāla, kas pēc specifikas atbilst topogrāfisko uzmērījumu veikšanai.

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. Izveidojot virtuālas datu plūsmas, tika fiksēts pārraidīto datu apjoms no bāzes stacijām. Iegūto datu apstrādes rezultāti attēloti 5.3. tabulā.

5.3. tabula

Datu plūsmas apjoms no atbalsta bāzes stacijām

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

Apkopotie rezultāti parāda, ka ienākošā interneta kanāla kapacitātei jābūt vismaz 13 kbit/s, bet katrai atbalsta stacijai jābūt aprīkotai ar interneta pieslēgumu, kura ātrums nav mazāks par 3 kbit/s.

Zinot pārraidāmo datu apjomu, izmantojot izteiksmi (5.1), iegūstam, ka maksimālais datu pārraides apjoms mēnesī nepārsniedz 1,2 GB.

$$DA_{m_{\max}} = DA_{d_{\max}} \times 31 \quad (5.1)$$

Izejot no šiem rezultātiem un telekomunikāciju tirgū pieejamā mobilā interneta abonēšanas piedāvājuma, šī brīža izdevumus par viena sakaru kanāla nodrošināšanu no nepilniem 100 € iespējams samazināt līdz nepilniem 6 €, kas ir aptuveni 15 reizes mazāk un ir ievērojams ietaupījums. 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 veiktspējas pētījumi ar fāžu mērījumiem. Tam par pamatu ir izmantota GNSS *EUPOS®-RIGA* sistēma, kura ļauj novērtēt precizitāti mērījumiem, kuros tiek izmantoti fāžu 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* 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 ierīkotās 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 pēcapstrādes metodi, attiecībā pret EPN stacijām parāda, ka Rīgas reģiona areālā notiek Zemes virsmas ģeodinamiska kustība ziemeļu un rietumu virzienā 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 nesasniedz 10 mm līmeni, bet mērījumu standartnovirze nepārsniedz 15 mm. Ja dinamiskos mērījumu apstākļos fāžu 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.

LITERATŪRAS SARAKSTS

1. 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.
2. 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_standar.htm 10.03.2015.
3. EUPOS Technical standards. Revised 3rd edition// Resolution of the international EUPOS® steering committee 23rd conference. – Tbilisi, Georgia: May, 2013, 17 p.
4. Koļesņikovs J. EUPOS-RĪGA BĀZES STACIJU TĪKLA ĢEOMETRISKĀ IZVIETOJUMA OPTIMIZĀCIJA. Bakalaura darbs. – Rīga: RTU, 2012.
5. Hofmann-Wellenhof B., Lichtegger H., Wasle E. GNSS GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEMS. GPS, GLONASS, GALILEO & MORE. – Austria: Springer Wien NewYork, 2008. – 516 p.

6. Van Sickle J. GPS FOR LAND SURVEYORS. Third edition. – USA: CRC Press Taylor & Francis Group, 2008. – 338 p.
7. Langley R.B. GPS RECEIVER SYSTEM NOISE// GPS WORLD, June 1997. – 40–45 p.
8. Kluga A., Kluga J., Mitrofanovs I. GPS RECEIVER WITH PHASE MEASURING PRECISION ESTIMATION// Proceedings of 13th Biennial Baltic Electronics Conference. – Tallin, Estonia: "Tallin University of Technology" , October 2012. – 169–172 p.
9. Leick A. GPS SATELLITE SURVEYING. Third edition. – New Jersey, USA: John Wiley & Sons Inc, 2004. – 433 p.
10. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J. GPS THEORY AND PRACTICE. Third, revised edition. – Austria: Springer-Verlag Wien New York, 1994. – 355 p.
11. Xu G. GPS THEORY, ALGORITHMS AND APPLICATIONS. Second Edition. – Germany: Springer-Verlag Berlin, 2007. – 340 p.
12. EPN Central Bureau. GUIDELINES FOR EPN STATIONS & OPERATIONAL CENTRES// Belgium: Royal Observatory of Belgium, 2013. – 17 p.
13. GPS WING system design and integration: interface specification / Internets. – <http://www.gps.gov/technical/icwg/IS-GPS-200E.pdf> 07.01.2015.
14. Official U.S Government information about the Global Positioning System: Standard positioning service standard / Internets. – <http://www.gps.gov/technical/ps/2007-PPS-performance-standard.pdf> 11.01.2015.
15. 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.
16. 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.
17. RĪGAS PILSĒTAS ĢEODĒZISKĀ GPS TĪKLA RG2 TEHNISKĀ ATSKAITE. – Rīga: 2005. – 34 lpp.
18. 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.

19. 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.
20. Farrell J. A., Barth M. THE GLOBAL POSITIONING SYSTEM & INERTIAL NAVIGATION. – USA: R.R.Donnelly & Sons Company, 1999. – 340 p.
21. TOPCON products, user manuals / Internets. – <http://www.topcon.com/> 17.04.2015.
22. Kaplan E. D., Hegarty C. J. UNDERSTANDING GPS PRINCIPLES AND APPLICATIONS. Second Edition. – Norwood, USA: Artech House, 2006. – 707 p.
23. Тейлор Дж. ВВЕДЕНИЕ В ТЕОРИЮ ОШИБОК. Пер. с англ. – М.: Мир, 1985. – 272 с.
24. Флеров А. Г., Клуга А. М. РАДИОСИСТЕМЫ ДАЛЬНЕЙ НАВИГАЦИИ. – Рига: РИО РКИИГА, 1987. – 86 с.