TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
Infotehnoloogia teaduskond

Liisi Nõojärv IAIB206183
Andero Raava IAIB205952
Stina Maria Tohver IABB194036

ANDROID SEADME SISESE GNSS SENSORIGA ASUKOHA MÄÄRAMISE TÄPSUSTAMISE PÜSIJAAMADE ANDMETEGA

Bakalaureusetöö

Juhendaja: Juhan-Peep Ernits
PhD

Tallinn 2023

Autorideklaratsioon

Kinnitame, et oleme koostanud antud lõputöö iseseisvalt ning seda ei ole kellegi teise poolt varem kaitsmisele esitatud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on töös viidatud.

Autorid: Liisi Nõojärv, Andero Raava, Stina Maria Tohver

22.05.2023

Annotatsioon

Bakalaureusetöö eesmärgiks oli kasutades Android seadme sensoreid saavutada positsioneerimise keskmine viga umbes 30 cm. Selleks, et saavutada soovitud täpsust töödeldi telefonide toorandmeid järeltöötlusel.

Töö käigus võrreldi erinevaid parandite saamise võimalusi nagu RTK2go, ESTPOS ja HAS. Täpsuse kontrollimiseks viidi läbi mitmeid katseid erinevate Android seadmete ja ESTPOSi paranditega. Telefoni toorandmeid ja töödeldud andmete täpsuste hindamiseks koguti ka referentsandmeid maamõõdu GNSS seadmetega nagu Budget Survey GNSS Multiband (IP66) antenni, simpleRTK2B Fusion ZED-F9R GNSS vastuvõtjat ja u-centre ver 22.07 tarkvara.

Töö käigus selgus, et Android seadmed, mis saavutaksid antud eesmärki, peavad olema kahesagedusliku vastuvõtjaga ja salvestama kandefaasi andmeid. Samuti segavad täpsust mõõtmisala läheduses ümbritsevad hooned. Sellest hoolimata on õigete seadmetega võimalik saavutada alla meetrilise täpsuse, kui andmeid on mõõtmise algul statsionaarselt kogutud vähemalt 10 minutit.

Parim tulemus, mis saadi kogu eksperimendi raames on keskmine viga 67 cm, kuid lõiguti on tulemus saavutatud.

Lõputöö on kirjutatud eesti keeles ning sisaldab teksti 52 leheküljel, 7 peatükki, 26 joonist, 13 tabelit.

Abstract

Improving the Positioning Accuracy of Internal GNSS Sensors of Android Devices Using the Data of Reference Stations

The aim of the bachelor's thesis was to achieve a standard deviation of the positioning error of about 30 cm using the sensors of the Android device. In order to achieve the desired accuracy for lawn mowers, the raw data of the phones were processed in post-processing.

In the course of the work, various ways of obtaining GNSS corrections were compared, such as RTK2go, ESTPOS and HAS. In order to verify the accuracy, several tests were carried out with different Android devices and ESTPOS reference station network. In order to evaluate the accuracy of phone raw data and processed data, reference data was also collected with high-accuracy GNSS devices such as Budget Survey GNSS Multiband (IP66) antenna, simpleRTK2B Fusion ZED-F9R GNSS receiver and u-centre, v22.07 software to evaluate the accuracy of raw phone data and processed data.

During the work, it became clear that Android devices that could achieve this goal must have a dual-frequency receiver and the ability to record carrier phase data. Also, surrounding buildings in the vicinity of the measurement area interfere with the accuracy. Nevertheless, with the right equipment, it is possible to achieve accuracy of less than a meter if the data is collected stationary for at least 10 minutes at the beginning of the measurement.

The thesis is written in Estonian and is 52 pages long, including 7 chapters, 26 figures and 13 tables.

Lühendite ja mõistete sõnastik

A-GNSS	*Assisted GNSS*
AP	*Application program*, rakendus
API	*Application Programmine Interface*, rakendusliides
BeiDou	Hiina satelliitsüsteem
CUI	*Command-line user interface*
DGNSS	*Differential Global Navigation Satellite System* ehk diferentsiaalne asukohamäärang
EPOS	*Exact Positioning Operating System* ehk täpse asukoha määramise operatsioonisüsteem
ESA	Euroopa Kosmoseagentuur
FLP	*Fused Location Provider*
Galileo	Euroopa Globaalne Satelliitnavigatsioonisüsteem
GLONASS	Vene Föderatsiooni globaalne satelliitnavigatsioonisüsteem
GLP	*GPS Location Provider*
GNSS	*Global Navigation Satellite System*, globaalne satelliitnavigatsioonisüsteem
GPS	*Global Positioning System*, globaalne positsioneerimise süsteem
GSDC	*Google Smartphone Decimeter Challenge*
GUI	*Graphical user interface*
HAS	*Galileo High Accuracy Service*
NLP	*Network Location Provider*
NMEA	*National Marine Electronics Association*
NTRIP	*Networked Transport of RTCM via Internet Protocol*
PPP	*Precice Point Positioning*
QZSS	*Quasi-Zenith Satellite System*, Quasi-Zenith satelliitsüsteem
RINEX	*Receiver Independent Exchange Format*
RTK	*Real Time Kinematic*
RTN	*Real Time Network*
SBAS	*Satellite Based Augmentation System*, satelliidipõhine parendussüsteem

Sisukord

1 Sissejuhatus **10**

2 GNSS ülevaade **12**
2.1 DGNSS 13
2.2 RTK 14
2.3 RTN 15
2.3.1 RTN meetodid 15
2.4 PPP ehk Precise Point Positioning 17

3 Android seadmed **19**
3.1 Android toorandmed 19
3.2 Rakendused toorandmete kogumiseks 20
3.2.1 GPSTest ja GnssLogger tehnilised omadused 20
3.2.2 Rakenduste võrdlus 21
3.3 Google Smartphone Decimeter Challenge 21

4 GNSS parandid ja nende kasutamine **23**
4.1 RINEX 23
4.1.1 RINEX versioon 3 vaatlusfailid 23
4.2 Parandid ja baasjaama andmed 25
4.2.1 NTRIP protokoll 25
4.2.2 ESTPOS 26
4.2.3 RTK2go 28
4.2.4 HAS 29
4.3 RTKLIB 31
4.3.1 Kalmani filter 33

5 Mõõtmised ja andmetõõtlus **34**
5.1 Skriptid 36
5.1.1 Toorandmete konverteerimine 36
5.1.2 Järeltöödeldud andmete konverteerimine 37
5.1.3 Referentsandmete konverteerimine 37
5.1.4 Keskmise vea ja standardhälbe arvutamine 37
5.1.5 Juhtprogramm 38
5.2 Eelmõõtmised 38
5.2.1 Olulised järeldused eelmõõtmistest 40

5.3 Eksperimendid 44

6 Eksperimentide analüüs 50

7 Kokkuvõte 52

Kasutatud kirjandus 54

Lisa 1 – Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks 59

Jooniste loetelu

1 Vastuvõtja asukoha määramise tööpõhimõte [4]. 13
2 *DGNSS-mõõtmise tööpõhimõte [12]*. 14
3 RTK meetodi tööpõhimõte [13]. 15
4 PPP meetodi tööpõhimõte [18]. 18

5 GPSTesti ja GnssLoggeri toorandmete võrdlus. 21

6 RINEX versioon 3.04 GPS vaatluskoodid [32]. 24
7 RINEX versioon 3.04 GLONASS vaatluskoodid [32]. 24
8 RINEX versioon 3.04 Galileo vaatluskoodid [32]. 25
9 NTRIP voogedastuse süsteem [11]. 26
10 ESTPOS GNSS-püsijaamade võrk [7]. 27
11 RTK2go baasjaamad Eesti läheduses 10.04.2023 seisuga [36]. 29

12 Seadmete asetus eksperimentide ajal. 35
13 Järeltöötluse protsess. 35
14 Skriptide ülevaade. 36
15 Telefonide asetus eelmõõtmisel 39
16 Eelmõõtmise toorandmed ja järeltöödeldud koordinaadid telefonide kaupa ilma algse kalibreerimiseta. 40
17 Eelmõõtmise toorandmed ja järeltöödeldud koordinaadid telefonide kaupa koos algse kalibreerimisega. 41
18 Asukoha pakkujate võrdlus. 42
19 26.03 eelmõõtmise toorandmed ja täpsustatud koordinaadid telefonide kaupa lumetormi ajal. 43
20 04.04 eelmõõtmise toorandmed ja täpsustatud koordinaadid telefonide kaupa selge taevaga. 43
21 04.04 eelmõõtmise toorandmed ja järeltöödeldud koordinaadid telefonide kaupa. 44
22 04.04 eelmõõtmise toorandmed ja järeltöödeldud koordinaadid telefonide kaupa lähemalt. 45
23 04.04 eelmõõtmise toorandmed ja järeltöödeldud andmed erinevate konstellatsioonide kaupa. 45
24 21.04 eksperimendi tulemused TalTechi staadioni ühel lõigul. 46
25 22.04 eksperimendi tulemused TalTechi Tudengimaja ja Majandusteaduskonna õppehoone vahelisel alal. 47

26 Referentsandmete usaldusväärsus. 49

Tabelite loetelu

1 Satelliitsüsteemide ülevaade [10]. 12
2 RTN meetodite võrdlus [16]. 17

3 ESTPOSi ühenduspunktid. 28
4 HASi omadused [39]. 30
5 RTKLIBi programmid [41] 31

6 Kasutatud seadmete spetsifikatsioonid. 34
7 Eksperimentide kirjeldus. 46
8 Satelliidisüsteemide võrdlus TalTech staadionil 21.04.2023 Pixel 5 seadmega. 47
9 Satelliidisüsteemide võrdlus STU hoone juures 22.04.2023 Pixel 5 seadmega. 48
10 Perioodiliste seismistega eksperiment staadionil. 48

11 21.04.2023 eksperimendi tulemused. 50
12 22.04.2023 eksperimendi tulemused. 50
13 13.05.2023 eksperimendi tulemused. 50

1 Sissejuhatus

Tänases maailmas toimub nutiseadmete areng jätkuvalt suure kiirusega ja tihti jäävad mõne aasta vanused seadmed kasutuseta. Käesolev bakalaureusetöö meeskonnaprojekt on kantud ideest, et leida kasutatud nutitelefonidele võimalik alternatiivne kasutusvaldkond.

Üks rakendus, kus saaks kasutada nutitelefonis paiknevaid andureid, on positsioneerimine. Oleme kõik harjunud kasutama GNSS-l (globaalne navigatsioonisatelliitide süsteem) põhinevaid Google Maps, HereWeGo vms programme reisidel ja igapäevaelus tee leidmiseks sihtkohta. Paraku piirab laiemat kasutust telefonide GNSS andurite suur mõõtmisviga, mis on üksikute satelliidisüsteemide puhul [1] andmetel kohati suurem kui 7 m (GLONASS), samas, kui näiteks kombineerides BeiDou ja Galileo andmeid võib statsionaarse mõõtmise veaks saada keskmiselt 21 cm, kui kasutada andmete järeltöötlust statsionaarse GNSS vastuvõtja andmetele. Lisaks näitavad [1] hiljutised tulemused, et kahesageduslike GNSS vastuvõtjatega Android telefonide puhul on võimalik saavutada mõõtemääramatus, mis jääb 30 cm piiresse ka liikuva vastuvõtja puhul.

Seega on käesoleva lõputöö eesmärk saavutada nutitelefoni sensoreid kasutades piiratud alal positsioneerimise standardhälbeks *ca* 30 cm.

Üheks võimalikuks rakendusvaldkonnaks, kus sellise täpsusega GNSS vastuvõtjat saaks kasutada, on robotmuruniidukid. Alles 2023. aastal on laiatarbeturule tulnud piirdetraadita robotniidukeid, mis kasutavad baasjaamaga GNSS lahendust [1] või kaameralahendust [2]. Kui õnnestub leida lähenemine, kus saab GNSS mõõteandmete järgi otsustada, kui usaldusväärne ja täpne mõõtmine on, siis saaks laiendada OpenMoweri tarkvaral [3] tuginevat avatud lähtekoodiga niidukit, nt [2], kasutama Android GNSS vastuvõtjat ja miks mitte tulevikus ka jooksutama ROS põhist OpenMower tarkvara Android seadmel. Nutikal muruniiduki juhtimisprogrammil peab olema võimalik robotit positsioneerida ja tarkvaraliselt defineerida alasid, mida on vaja niita.

WEEE foorumi andmetel langesid 2022.-l aastal igapäevasest kasutusest 5,3 miljardit mobiiltelefoni [3]. Seetõttu peatakse lahenduses ka silmas ringmajanduse aspekte taaska-

[1] Husqvarna EPOS lahendus, pöördutud 1.05.2023 `https://www.husqvarna.com/ee/robotmuruniidukid/automower-320nera-koos-husqvarna-epos-komplektiga/`.

[2] Ameerika tootja Toro kaameralahendus, mis peaks turule tulema 2023. aasta kevadel. Pöördutud 1.05.2023 `https://smartyard.toro.com/`.

[3] OpenMower ROS tarkvara, pöördutud 1.05.2023 `https://github.com/ClemensElflein/open_mower_ros`.

sutades vanemate generatsioonide Android telefone alates Android 7.0 Nougat versioonist. Seda seetõttu, et alates sellest versioonist tehti GNSS toorandmed kõigile kättesaadavaks [4]. Paraku osutub, et päris kõik Android 7.0 või uuemad Android seadmed ei sobi täpseks positsioneerimiseks, kuna nende salvestatavad toorandmed ei sisalda infot kõikide oluliste parameetrite kohta. Seega on üks käesoleva töö tulemusi aidata leida, millised seadmed võiksid antud ülesandesse sobida.

Tihedalt asustatud piirkondades on tehtud katseid, kus kombineerides erinevaid mõõtmistehnoloogiaid nagu GNSS, IMU ja RTK, on saavutatud 0,14 - 0,72 m veaga asukoha mõõtmistulemus [5]. Kasutades Android nutitelefonides täna kasutusel olevat lahendust GNSS koordinaadi rehkendamiseks, on võimalik saada ainult 3-5 m määramatusega positsioneerimistäpsus [6]. Nutika muruniiduki kontekstis ei ole seega telefoni GNSS ilma täiendava järeltöötluseta piisavalt täpne.

Selleks, et parandada Android telefonide positsioneerimise täpsust käesoleva töö raames, koguti esmalt toorandmeid ning seejärel täpsustati saadud andmeid järeltöötluse käigus, kasutades referentsandmeid ESTPOSist [7] ning Android seadmete toorandmetele kohandatud RTKLIB teegi rakendust RTKPOST. ESTPOSi parandeid on võimalik ka kasutada toorandmete töötlusel reaalajas läbi NTRIP protokolli. Lisaks uuriti ka Galileo kõrgtäpsuse teenust (HAS), mis pakub täiustatud andmeid kas interneti kaudu või satelliitsignaali kaudu otse kasutaja vastuvõtjale [8], mis alustas esialgset teenusepakkumist käesoleva aasta jaanuarist.

Töö esimeses osas antakse ülevaade GNSSi tööpõhimõttest ja standarditest, juba olemasolevatest lahendustest ning tehakse ülevaated kasutatud tehnoloogiate kohta. Teises osas kirjeldatakse mõõtmisi ja andmetöötlust. Kolmandas osas võrreldakse saadud andmeid referentsandmetega ja analüüsitakse tulemusi.

2 GNSS ülevaade

Globaalne Navigatsioonisatelliit Süsteem (GNSS) on satelliitide võrk, mis edastab GNSS vastuvõtjatele kosmosest signaale aja ja positsioneerimise teabega, mille põhjal määratakse vastuvõtja asukoht [9]. GNSS põhineb ümber maa tiirlevatel satelliitidel, mis edastavad signaale, näidates enda asukohta ja aega. Selle infoga määratakse GNSS vastuvõtja positsioon maailmas.

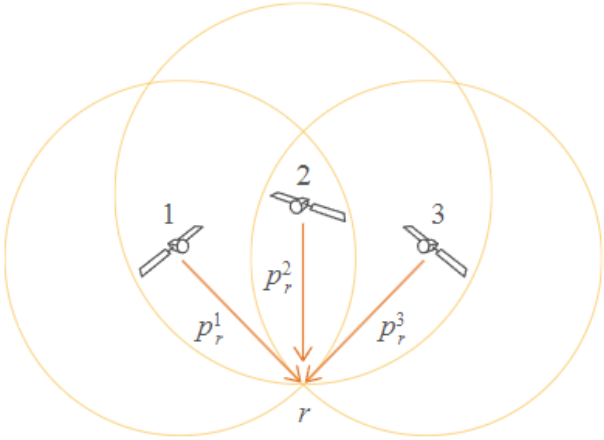
Hetkel on maailmas kokku 6 satelliitsüsteemi, millest osad on kättesaadavad globaalselt ning teised regionaalsed, pakkudes teenust kindlas piirkonnas [10]. Satelliitsüsteemide ülevaade on toodud välja tabelis 1.

Tabel 1. Satelliitsüsteemide ülevaade [10].

Satelliitsüsteem	**Riik**	**Kättesaadavus**	**Satelliitide arv**
GPS	USA	Globaalne	31
GLONASS	Venemaa	Globaalne	24
Galileo	Euroopa Liit	Globaalne	26
BeiDou	Hiina	Globaalne	48
QZSS	Jaapan	Regionaalne	4
IRNSS/NavIC	India	Regionaalne	8

Kasutaja umbkaudne asukoht määratakse GNSS seadme vastuvõtja antenni ja vähemalt nelja satelliidi vahelise kauguse ehk pseudokauguse (*pseudorange*) põhjal. Mõlemad määrab vastuvõtja, mis hindab vastavalt satelliidi signaali ja navigatsioonisõnumit. Seda teavet nõuab PVT (*Position, Velocity and Time*) lahendus, mis annab kasutaja asukoha ja kellaaja kõikjal maailmas [4].

Teades ühe satelliidi asukohta, asub vastuvõtja kuskil satelliiti ümbritseval sfääril, mille raadius on võrdne levialaga. Kui kolme satelliidi ulatuse mõõtmised on saadaval, ristuvad kolm sfääri kahes punktis. Kuna üks punkt ei asu Maa pinna lähedal, vaid avakosmoses või Maa sisemuses, on teine punkt vastuvõtja tegelik asukoht. Teisisõnu, kolme satelliidi kauguste samaaegne mõõtmine võimaldab määrata fikseeritud kolmemõõtmelise asukoha, nagu on näidatud joonisel 1 [4].

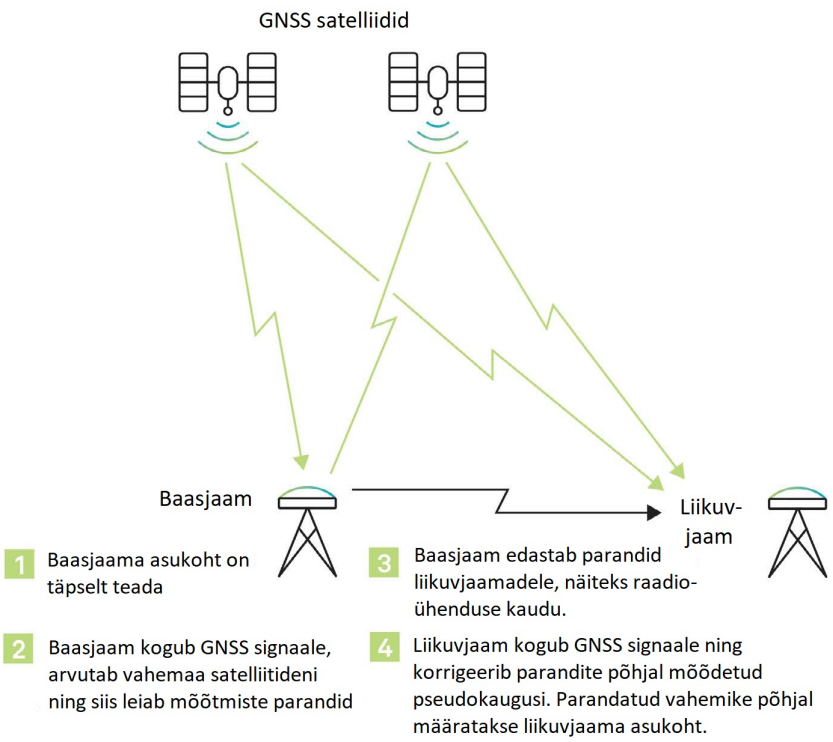


Joonis 1. Vastuvõtja asukoha määramise tööpõhimõte [4].

Vastuvõtja kellavea tõttu ei ristu kolm sfääri ühises punktis. Seda nimetatakse neljanda tundmatu satelliidi positsioneerimisprobleemiks, mistõttu on vaja vähemalt nelja nähtavat GNSS satelliiti täpse asukoha määramiseks [4].

2.1 DGNSS

DGNSS ehk diferentsiaalne asukohamäärangu tööpõhimõte seisneb selles, et vastuvõtja, mille koordinaadid on teada, kogub kõigi nähtavate satelliitide andmeid ning võrdleb vastuvõtja ja satelliitide vahemaad mõõdetud pseudokaugustega. Saadud erinevus ehk parand edastatakse liikuvjaamale, mis korrigeerib antud pseudokaugusi. DGNSS meetodit saab kasutada nii reaalajas kui ka järeltöötlusel. See aitab vältida peamisi vigu, kuid signaali mitmeteelisust, müra ega orbiidi häireid pole võimalik arvesse võtta. Seetõttu on selle meetodi täpsus enamasti 50-100 cm [11]. DGNSS tööpõhimõte on kirjeldatud joonisel 2.



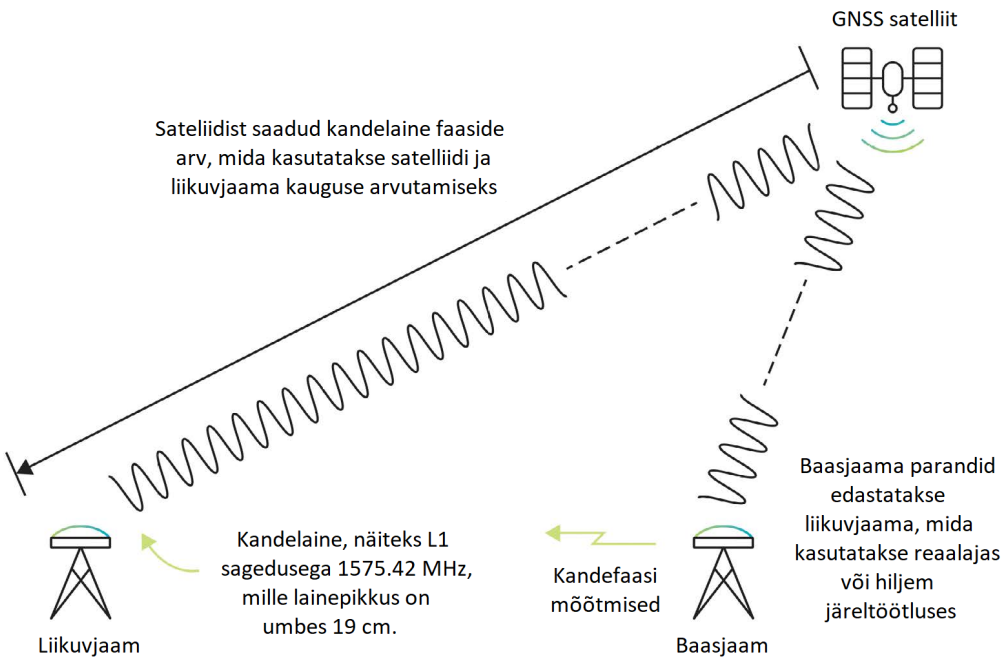
Joonis 2. *DGNSS-mõõtmise tööpõhimõte [12].*

2.2 RTK

RTK (*Real-Time Kinematic* ehk kinemaatiline mõõtmine reaalajas ühe baasjaama suhtes) on mõõtmismeetod, mis kasutab GNSS-i liikuvjaamalt, baasjaama ja kandefaasi vahemike (*carrier-base ranging*). Kandefaasi vahemikud on täpsemad kui traditsioonilised positsioneerimismeetodid (nt koodipõhine positsioneerimine ehk *code-based positioning*) [13]. Vahemike arvutamiseks määratakse satelliidi ja liikuvjaama vaheliste kandetsüklite arv, seejärel korrutatakse see arv kande lainepikkusega. Seda matemaatilist protsessi nimetatakse mitmetähenduslikkuse lahendamiseks (*ambiguity resolution*) [13].

Arvutatud vahemikud sisaldavad endiselt vigu allikatest nagu sateliidi kell, efemeriidid ning ionosfääri ja troposfääri viivitused. Selleks, et eelmainitud vigu minimeerida ja kasutada kandefaaside vahemike täpsuse täielikku võimekust RTKga, tuleb mõõteandmed edastada baasjaamast liikuvjaama [13]. RTK meetodi tööpõhimõte on kirjeldatud joonisel 3.

Liikuvjaama saavutatav asukoha täpsus sõltub muuhulgas selle kaugusest baasjaamast (alusvariant) ja diferentsiaalkorrektsioonide täpsusest. Korrektsioonide täpsus oleneb sellest kui täpselt on baasjaamal teada enda asukoht ning vaatlusandmete kvaliteedist, mis baasjaam satelliitidelt saab. Samuti võivad negatiivselt mõjutada positsioneerimise täpsust keskkonnast tingitud faktorid nagu välised segajad, hoonetelt tulevad signaali peegeldused



Joonis 3. RTK meetodi tööpõhimõte [13].

ja liikuvjaama ning baasjaama vastuvõtjate ja antennide võimekused [13]. Vastuvõetava signaali signaal-müra suhet Android seadme ja geodeetilise kvaliteediklassiga GNSS vastuvõtjaga on mõõdetud näiteks järgmises töös [14].

Peegeldused tekivad siis, kui signaal jõuab vastuvõtjani erinevaid teid pidi. Peamiseks põhjustajaks on antenni läheduses paiknevad peegeldavad pinnad nagu näiteks aknad, mis jäävad antenni satelliitide vaatlustsooni sisse [15].

2.3 RTN

Kinemaatiline mõõtmine reaalajas tugijaamade võrgus (RTN ehk Real Time Network) sarnaneb RTK-mõõtmistele. Erinevus seisneb selles, et parandid edastatakse tugijaamade võrgu lahendusest, mitte ainult ühest tugijaamast, mille tööraadius on limiteeritud [11]. Tugijaamade võrgus edastatakse reaalaja parandeid üle interneti kasutades NTRIP protokolli (vt jaotis 4.2.1).

2.3.1 RTN meetodid

GNSS-tugijaamade võrgus kasutatakse parandite arvutamiseks keerukaid algoritme, millele vastavalt on loodud erinevaid võrgulahendite kontseptsioone [11]. Iga meetodi puhul vähendatakse vigade hulka [16].

FKP meetodis liikuvjaama asukohta serverile ei edasta ning liikuvjaam saab parandid ning mõõtmisandmed kogu võrgu kohta. Selle põhjal arvutatakse liikujaamas kasutaja asukohast sõltuvad parandid. See meetod ei arvesta kohalike atmosfäärinähtustega, mis võib mõõtmistulemusi oluliselt häirida [11].

MAX meetodi korral on üks võrgu jaam põhijaamaks ja ülejäänud tugijaamad abijaamadeks. MAX-võrgus leitakse põhijaama absoluutsed parandid ning abijaamadele suhtelised parandid põhijaama suhtes. Kasutajale edastatakse põhijaama parandid, koordinaadid, vaatlusandmed ning abijaamade parandite erinevused. Selle põhjal interpoleeritakse liikuvjaamas asukoha korrektsioonid [11].

i-MAX meetodi puhul edastatakse, nagu MAX-meetodika puhul, serverist kasutajale põhijaama parandid, koordinaadid, vaatlusandmed ja abijaamade parandite erinevused. Serverisse edastatakse kasutaja asukoha koordinaadid, mille tulemusena on võimalik vähendada kasutajale edastavate andmete hulka, sest need on juba interpoleeritud kasutaja asukohale, mitte tervele võrgule nagu MAX meetodis. See vähendab liikuvjaamas tehtava andmetöötluse mahtu [11].

VRS meetodi puhul edastatakse serverile ka liikuvjaama asukoht NMEA formaadi kaudu. Liikuvjaama asukoha põhjal genereeritakse serveris kasutaja lähedusse virtuaalne tugijaam, millel arvutatakse vaatlusandmed. Iga initsialiseerimise korral genereeritakse virtuaalne tugijaam erinevas kohas, mis tõttu pole võimalik mõõtmisi korrata ning serveril on suur koormus [11].

RTN meetodeid eristatakse järgmiste parameetrite põhjal [16]:

- **Standardiseeritud/mitte-standardiseeritud meetod** - Standardiseeritud meetodid kasutavad rahvusvahelistel standarditel põhinevaid avalikke algoritme. See tagab, et liikuvjaamadele saadetav informatsioon järgib alati standardeid hoolimata seadme või tarkvara tootjast. Mitte-standardiseeritud meetodite puhul kasutatakse serveri tarkvaras mitte-avalikke algoritme.
- **Liikuvjaama/serveri poolt kontrollitud võrgulahendus** - Serveri poolt kontrollitud võrgulahenduses kasutab server sama strateegiat kõigi liikuvjaamade puhul, mis on optimaalne kogu võrgule, kuid see ei pruugi olla optimaalne igale üksikule liikuvjaamale. Liikuvjaama kontrollitud lahenduses kontrollib liikuvjaam, milliseid referentsjaamu lahenduses kasutatakse. Selle eeliseks on, et liikuvjaam saab pidevalt hinnata ning jälgida RTK lahenduse ning korrektsiooni kvaliteeti. Selleks, et kindlustada kiiret initsialiseerimist ja optimeeritud RTK lahendust, peab seda kontrollima liikuvjaam.

- **Satelliitide andmete maksimaalne ärakasutamine** - Selleks, et maksimeerida liikuvjaama RTK lahenduse arvutust peab RTN meetod maksimaalselt ära kasutama kõikide satelliitide andmeid. Muidu ei pruugi mõningates tingimustes olla võimalik RTK lahendust arvutada.
- **Jälgitavus ja korratavus** - Kõik mõõtmised peavad olema seotud füüsiliste objektidega ja neid mõõtmisi peab olema võimalik otseselt korrata.
- **Järjepidavus ja jätkuvus** - Positsioon ja selle täpsus peavad olema ühtlased kogu mõõtmise ajal.

Tabelis 2 on toodud välja RTN meetodid eelnevate parameetrite lõikes [16].

Tabel 2. RTN meetodite võrdlus [16].

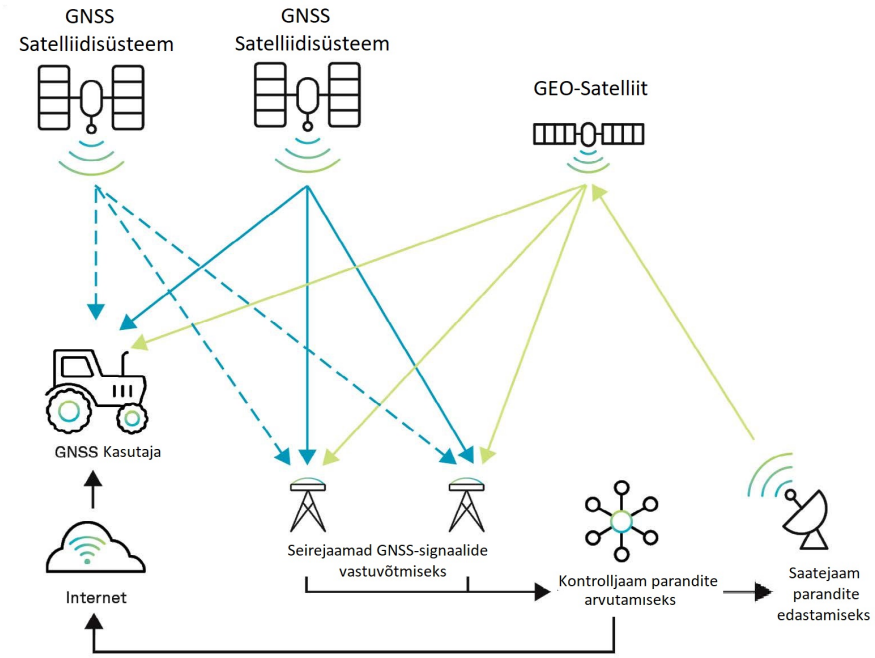
Omadused	**MAX**	**i-MAX**	**VRS**	**FKP**
Distantsist tulenevate vigade vähedamine	jah	jah	jah	jah
Standardiseeritud meetod	jah	ei	ei	ei
Liikuvjaama kontrollitud võrgulahendus	jah	ei	ei	ei
Maksimaalne sateliidiandmete kasutamine	jah	ei	ei	ei/jah
Jälgitavus ja korratavus	jah	jah	ei	jah
Järjepidavus ja jätkuvus	jah	jah	ei	jah

2.4 PPP ehk Precise Point Positioning

PPP ehk Precise Point Positioning on absoluutne ehk üksikpunkti positsioneerimise viis, mis mudeldab GNSS süsteemi vigu, et saavutada ühe vastuvõtjaga täpset positsioneerimist [17]. PPP, erinevalt RTK-st, ei nõua baasjaama kasutaja läheduses, vaid kasutatakse globaalseid või regionaalseid referentsjaamu (vt joonis 4).

PPP meetodi täpsus sõltub mõõtmise ajast, mida pikem on mõõtmine seda täpsem tulemus. Selleks, et saada sentimeetri täpsus tuleb andmeid koguda vähemalt 20-30 minutit ühes punktis, kuid detsimeetri täpsust on võimalik saada juba 5-20 minutiga [11].

Võrreldes RTK-ga on PPP-l kaks eelist: pole vaja baasjaama kasutaja läheduses üles panna ning PPP täpsus on järjepidev globaalselt. Peamiseks nõrkuseks RTK kõrval on pikk koonduvusaeg, et saada sentimeetri täpsust [19].



Joonis 4. PPP meetodi tööpõhimõte [18].

3 Android seadmed

Madala hinnaklassi GNSS antenni ja sisseehitatud kiibistikuga nutiseadmeid kasutatakse laialdaselt asukohapõhiste teenustega seotud rakendustes. Selleks, et saada esmased andmed asukoha määramiseks peab GNSS-süsteem saama kätte võimalikult paljude horisondist kõrgemal paiknevate satelliitide signaalid ning leidma orbiidi ja kella andmed [20]. Nutitelefoni GNSS-mooduli positsioneerimistäpsus on väheste peegeldustega tingimuste korral tavaliselt 3–5 m ja suuremate peegeldustega keskkondades üle 10 m [21].

Enamus tänapäevaseid nutitelefone kasutavad lisaks GNSSile võrgupõhist positsioneerimist, kus telefoni asukoht määratakse mobiilside mastide raadiolainetest. Selle täpsus jääb enamasti 500 m piiresse. Selleks, et määrata seadme asukoht raskete tingimustega keskkondades nagu näiteks kõrgete majade vahel või siseruumides, kasutatakse A-GNSSi (Assisted GNSS), mis integreerib võrgu ja GNSS põhise asukohamäärangu [11].

Toorandmetest on eristatavad kolme tüüpi andmed: GPS (GNSS Location Provider), NLP (Network Location Provideri ehk mobiilvõrgu andmed) ja FLP (Fused Location Provideri ehk A-GNSSi andmed). Sisetingimustes on A-GNSS abiks asukoha täpsustamisel, aga antud töö käigus tehtud katsetes tuli välja, et välitingimustes mõjub A-GNSS ja mobiilvõrk täpsusele negatiivselt (vt jaotis 5.2.1). Seetõttu otsustati A-GNSSi ja mobiilvõrgu andmeid lõputöö analüüsides mitte kasutada. Selle asemel kasutati ainult GPSi andmeid ehk telefoni toorandmete kontekstis GNSS Location Provideri andmeid.

3.1 Android toorandmed

Massturustatud seadmetelt oli esimest korda võimalik GNSSi toorandmetele ligipääseda Android 7.0 Nougat versioonist. Kombineerides väliste sensorite andmed toorandmetega saab seadme asukohta ja kiirust kiiremini arvutada [4].

Selleks, et pääseda ligi Android telefoni GNSS toorandmetele tuleb kasutada android.location API-t. Sealt pole võimalik saada otse kätte pseudokauguse, aga selle asemel on olemas kõik parameetrid, mida läheb vaja selle arvutamiseks [4].

Android seadmete GNSS võimekuse infot on keeruline määrata. Need sõltuvad mitmetest faktoritest nagu [22]:

- telefoni väljalaske asukoht - erinevates riikides kasutatakse telefonides erinevaid kiibistikke,
- lisatud GNSS riistvara, mida ei ole kirjeldatud telefonide spetsifikatsioonides,
- riistvaralised piirangud - isegi kui seadmel on kahesageduslik GNSS vastuvõtja ei pruugi see saada kasutada L5 ja E5a signaale,
- regionaalsed piirangud - Ameerika Ühendriikides pole FCC piirangute tõttu võimalik pääseda osadel seadmetel ligi Galileo ja BeiDou konstellatsioonide andmetele,
- tarkvara - Android seadme GNSS funktsioonid võivad muutuda tarkvara uuendustega.

3.2 Rakendused toorandmete kogumiseks

GNSS toorandmete kätte saamiseks on arendatud erinevaid rakendusi. Antud töö raames katsetati andmete kogumistel nii GPSTest kui ka GnssLogger rakendust. Järgnevates lõikudes on välja toodud mõlema rakenduse põhilised tehnilised omadused ning rakenduste võrdlus.

3.2.1 GPSTest ja GnssLogger tehnilised omadused

Rakendused on avatud lähtekoodiga tarkvarad, mida on kasutatud mitmetes uurimustes GNSS toorandmete kogumiseks [23] [24]. Rakendustes on võimalik saada reaalajas infot satelliitide kohta, mis on telefoni vaateväljas. Vaikimisi on logimine GPSTestis välja lülitatud ning see tuleb enne katsetusi sisselülitada seadete alt [23]. Rakendused toetavad paljusid satelliitsüsteeme nagu GPS, GLONASS, QZSS, BeiDou, Galileo ja IRNSS. Satelliitide infot on võimalik logida CSV või GPSTesti puhul ka JSON faili [25].

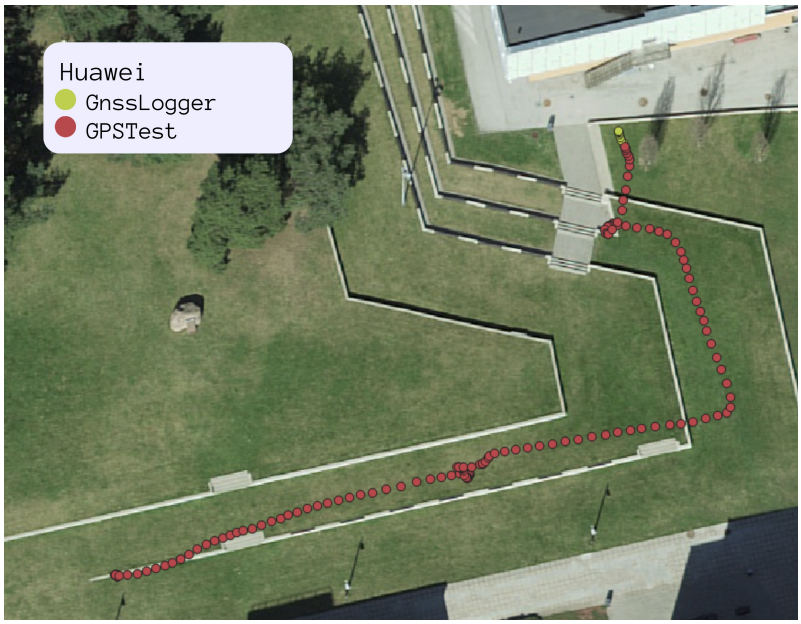
Antud lõputöös kasutati logimiseks CSV vormingut, kus igal real on eesliitega kindlaks määratud, mis andmetüübiga on tegu [25]:

- Raw - GNSS toorandmed
- Fix - Telefonis arvutatud fikseeritud asukoha informatsioon
- Nav - Navigatsiooni sõnum
- NMEA - NMEA laused
- GnssAntennaInfo - Seadme antenni omadused
- Status - GNSS staatus signaali kohta
- OrientationDeg - Orientatsiooniandur andmed

3.2.2 Rakenduste võrdlus

Selleks et mõista, kas GPSTest ja GnssLogger annavad erinevaid andmeid tehti katse, kus mõõdeti mõlema rakendusega samal ajaperioodil. GPSTesti ja GnssLoggeri poolt saadud toorandmeid võrreldi ning leiti, et päise ülesehitus erineb ainult kommentaaride osas ning Raw, Nav, Fix, OrientationDeg ja Statuse andmeridade parameetrid on täpselt samad. Eelmõõtmiste käigus selgus ka, et Huawei seadmetega GPSTest rakendust kasutatades pole võimalik määrata, kas vastuvõetud sateliitide signaalid on kahe-sageduslikud. Seetõttu soovitab ka Huawei andmeid logida GnssLoggeriga [26].

Lisaks toorandmetele võrreldi ka Fix andmetest koordinaate, mis on telefonis arvutatud (vaata jooniselt 5). Logide ega Fix koordinaatide põhjal ei tulnud välja suuri erisusi kahe rakenduse logides, mistõttu valiti logimiseks GnssLogger rakendus, mis toetab ka Huawei seadmeid ning mida kasutati ka *Google Decimeter Challenge* mõõtmistes.



Joonis 5. GPSTesti ja GnssLoggeri toorandmete võrdlus.

3.3 Google Smartphone Decimeter Challenge

Google Smartphone Decimeter Challenge (GSDC) on Google' korraldatud andmeteadusvõistlus, mille eesmärgiks oli Android-nutitelefonide abil telefoni asukoht võimalikult täpselt määrata. Esimene GSDC võistlus toimus 2021 aastal [27] ning võistlust korraldati ka teist korda 2022 aastal [6]. Selleks olid osalejatele kättesaadavad erinevad andmed: näiteks GNSS sensori toorandmed, kiirendusanduri ja güroskoobi andmed jne [6].

Võrreldes *Google Smartphone Decimeter Challenge*'i 2022 aasta avalikke lahendusi valisid

lõputöö autorid Tim Everetti (kasutajanimega RTKLIBexplorer) lahenduse, mille arendamist alustati 2021 aasta lahenduse raames ning mida arendati edasi 2022 aasta väljakutse skoobis. Tim Everetti lahendus oli põhjalikult dokumenteeritud nii Kaggle keskkonnas[1] kui ka Tim Everetti kodulehel[2]. Antud lahendus on ka avatud lähtekoodiga, mis sai üheks määravaks põhjuseks lahenduse valimisel [6].

Lahenduse autor RTKLIBexplorer on kasutanud põhilise tööriistana oma lahenduses RTKLIB teegist RTKPOSTi, millega on võimalik toorandmetele teha järeltöötlust kasutades baasjaamade parandite andmeid [28].

Google'i pakutavad andmed sisaldasid nii GnssLoggeri poolt kogutud toorandmeid kui ka samu andmeid RINEX vormingus. RINEX vorming küll ühildub RTKLIB-iga, kuid telefoni toorandmete RINEX-iks teisendamiseks kasutatud meetodit ja parameetreid ei esitatud võistluse osalejatele täielikult Google'i poolt [29].

Seetõttu kasutas lahenduse autor GSDC korraldajate antud GnssLoggeri toorandmeid .txt vormingus, mis ta hiljem android_rinex teeki kasutades teisendas ümber RINEX vormingusse [29].

[1]Tim Everetti Google Decimeter Challenge lahenduse kirjeldus. Pöördutud 26.02.2023. https://www.kaggle.com/competitions/smartphone-decimeter-2022/discussion/341226

[2]Google Decimeter Challenge'i lahenduse kirjeldus Tim Everetti veebilehel. Pöördutud 26.02.2023. https://rtklibexplorer.wordpress.com/2022/01/10/google-smartphone-decimeter-challenge

4 GNSS parandid ja nende kasutamine

Selleks, et toorandmeid täpsustada on vaja neid töödelda kas reaalajas või järeltöötluse käigus. Android toorandmetel on oma vorming, mis pole standardvorming ehk nende kasutamiseks tuleb toorandmed mitmetes programmides kasutamiseks tõlkida muudesse vormingutesse. Standardvormingusse, mida kasutatakse GNSS andmete töötlusel, on NMEA, RINEX ja RTCM [30]. Antud töö raames tegeleti peamiselt RINEX vorminguga, et toorandmeid oleks võimalik järeltöödelda RTKPOST programmis baasjaama paranditega.

4.1 RINEX

RINEX fail ehk *Receiver Independent Exchange Format* on standardiseeritud vorming globaalsete navigatsiooni satelliitsüsteemide (GNSS) vastuvõtjate poolt kogutud andmete töötlemiseks ja analüüsimiseks. See vorming võimaldab andmete jagamist ja töötlemist erinevate GNSS-vastuvõtjate ja tarkvarade vahel, sõltumata konkreetse seadme tootjast või mudelist [31].

RINEX faili vormingusse konverteerimine on vajalik järeltöötluseks RTKPOST programmiga. Konverteerimiseks kasutati avatud lähtekoodiga pythoni teeki android_rinex[1]. Android_rinex koodi oli vaja korrigeerida meie andmetele vastavaks. Nimelt tuli lisada NAVIC satelliidisüsteem, mis esines toorandmetes, kuid puudus antud koodis. RTKLibi tarkvaral eksisteerib ka RINEX vormingusse konverteerimise API, kuid antud toorandmeid, mis GnssLoggerist saadi tekstifailides, RTKCONV ei aktsepteeri.

4.1.1 RINEX versioon 3 vaatlusfailid

RINEX versioon 3 faili päisesse lisatakse globaalne info kogu faili kohta ning see asetseb dokumendi alguses. Päise igal real on veergudes 61-80 kohustuslik silt rea sisu kohta. Faili andmete osa ülesehitust kirjedab päise rida "SYS / # / OBS TYPES", mis tähistab andmetes olevaid süsteemist sõltuvaid vaatluskoodide listi. SYS tähistab sateliidisüsteemi (G/R/E/J/C/I/S), # näitab selle sateliidisüsteemi vaatlustüüpide arvu ja OBS TYPES tähistab antud süsteemi vaatluskoode. Vaatluskoodid on kujul tna, kus [32]:

[1]Android_rinex lähtekood. Pöördutud 1.05.2023. `https://github.com/rokubun/android_rinex`.

- t - vaatlustüüp (C = pseudokaugus, L = kandefaas, D = doppler ja S = signaali tugevus)
- n - ribalaius/sagedus
- a - tracking mode/channel

GNSS System	Freq. Band /Frequency	Channel or Code	Observation Codes			
			Pseudo Range	Carrier Phase	Doppler	Signal Strength
GPS	L1/1575.42	C/A	C1C	L1C	D1C	S1C
		L1C (D)	C1S	L1S	D1S	S1S
		L1C (P)	C1L	L1L	D1L	S1L
		L1C (D+P)	C1X	L1X	D1X	S1X
		P (AS off)	C1P	L1P	D1P	S1P
		Z-tracking and similar (AS on)	C1W	L1W	D1W	S1W
		Y	C1Y	L1Y	D1Y	S1Y
		M	C1M	L1M	D1M	S1M
		codeless		L1N	D1N	S1N
	L2/1227.60	C/A	C2C	L2C	D2C	S2C
		L1(C/A)+(P2-P1) (semi-codeless)	C2D	L2D	D2D	S2D
		L2C (M)	C2S	L2S	D2S	S2S
		L2C (L)	C2L	L2L	D2L	S2L
		L2C (M+L)	C2X	L2X	D2X	S2X
		P (AS off)	C2P	L2P	D2P	S2P
		Z-tracking and similar (AS on)	C2W	L2W	D2W	S2W
		Y	C2Y	L2Y	D2Y	S2Y
		M	C2M	L2M	D2M	S2M
		codeless		L2N	D2N	S2N
	L5/1176.45	I	C5I	L5I	D5I	S5I
		Q	C5Q	L5Q	D5Q	S5Q
		I+Q	C5X	L5X	D5X	S5X

Joonis 6. RINEX versioon 3.04 GPS vaatluskoodid [32].

GNSS System	Freq. Band /Frequency	Channel or Code	Observation Codes			
			Pseudo Range	Carrier Phase	Doppler	Signal Strength
GLONASS	G1/ 1602+k*9/16 k= -7….+12	C/A	C1C	L1C	D1C	S1C
		P	C1P	L1P	D1P	S1P
	G1a/ 1600.995	L1OCd	C4A	L4A	D4A	S4A
		L1OCp	C4B	L4B	D4B	S4B
		L1OCd+ L1OCp	C4X	L4X	D4X	S4X
	G2/ 1246+k*7/16	C/A (GLONASS M)	C2C	L2C	D2C	S2C
		P	C2P	L2P	D2P	S2P
	G2a/ 1248.06	L2CSI	C6A	L6A	D6A	S6A
		L2OCp	C6B	L6B	D6B	S6B
		L2CSI+ L2OCp	C6X	L6X	D6X	S6X
	G3 / 1202.025	I	C3I	L3I	D3I	S3I
		Q	C3Q	L3Q	D3Q	S3Q
		I+Q	C3X	L3X	D3X	S3X

Joonis 7. RINEX versioon 3.04 GLONASS vaatluskoodid [32].

GNSS System	Freq. Band /Frequency	Channel or Code	Observation Codes			
			Pseudo Range	Carrier Phase	Doppler	Signal Strength
Galileo	E1 / 1575.42	A PRS	C1A	L1A	D1A	S1A
		B I/NAV OS/CS/SoL	C1B	L1B	D1B	S1B
		C no data	C1C	L1C	D1C	S1C
		B+C	C1X	L1X	D1X	S1X
		A+B+C	C1Z	L1Z	D1Z	S1Z
	E5a / 1176.45	I F/NAV OS	C5I	L5I	D5I	S5I
		Q no data	C5Q	L5Q	D5Q	S5Q
		I+Q	C5X	L5X	D5X	S5X
	E5b / 1207.140	I I/NAV OS/CS/SoL	C7I	L7I	D7I	S7I
		Q no data	C7Q	L7Q	D7Q	S7Q
		I+Q	C7X	L7X	D7X	S7X
	E5(E5a+E5b) / 1191.795	I	C8I	L8I	D8I	S8I
		Q	C8Q	L8Q	D8Q	S8Q
		I+Q	C8X	L8X	D8X	S8X
	E6 / 1278.75	A PRS	C6A	L6A	D6A	S6A
		B C/NAV CS	C6B	L6B	D6B	S6B
		C no data	C6C	L6C	D6C	S6C
		B+C	C6X	L6X	D6X	S6X
		A+B+C	C6Z	L6Z	D6Z	S6Z

Joonis 8. RINEX versioon 3.04 Galileo vaatluskoodid [32].

4.2 Parandid ja baasjaama andmed

Mõõtmisandmete järeltöötluseks RTKLIBis on lisaks toorandmetele vaja ka baasjaamade navigatsiooni- (.nav failid) ja vaatlusandmeid (.obs failid). Baasjaamade andmete kättesaamiseks on erinevaid võimalusi. Kõige lihtsam, kuid ka kõige kallim lahendus on endal koduse baasjaama ülesseadmine. Seda varianti on kasutanud [33] piirdekaablita töötavad robotniidukid, kus on kasutusel täpse asukoha määramise operatsioonisüsteem EPOS, mille statsionaarne jaam edastab korrektsiooniandmed niidukile. Taolised Husqvarna niidukid jäävad 4000-5000 euro hinnaklassi [33]. Teiseks variandiks on võrgu RTK või PPP lahendused nagu RTK2go, ESTPOS ja HAS, kus üle interneti parandite edastamiseks kasutatakse NTRIP protokolli.

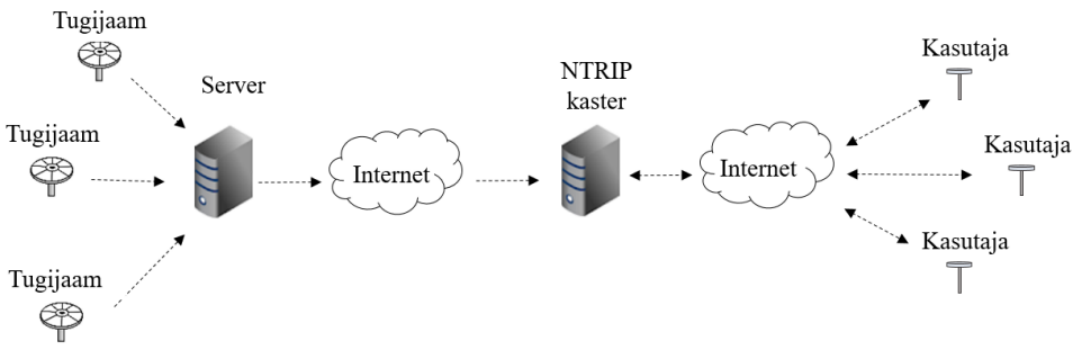
4.2.1 NTRIP protokoll

NTRIP (Networked Transport of RTCM via Internet Protocol) on andmevahetuse protokoll, mis toetab GNSS andmete pidevat jagamist üle interneti ning põhineb HTTP protokollil. NTRIP on disainitud levitama diferentsiaalkorrektsiooni andmeid (*differential correction data*) või mõnda muud tüüpi GNSS andmete voogedastust statsionaarsetele või mobiilsetele kasutajatele üle interneti [34].

Statsionaarne GNSS vastuvõtja teab, kus satelliidid asuvad igal aja hetkel ning ka ise enda täpset asukohta. Selle põhjal saab vastuvõtja arvutada teoreetilise kauguse ja signaali liikumise ajad enda ja iga satelliidi vahel. Teoreetilisi väärtusi võrreldakse päris vaatlustega, kus erinevused tähistavad vigu vastuvõetud signaalides, millest tuletatakse RTCM parandused [34].

NTRIP koosneb kolmest süsteemitarkvara komponendist: NTRIP kliendid, NTRIP server and NTRIP kasterid, kus NTRIP kaster on HTTP server ning NTRIP klient ja NTRIP server käituvad HTTP klientidena. NTRIPi süsteem koosneb järgnevates elementidest [34]:

- NTRIP allikad (baasjaamad), mis loovad andmevoo täpselt määratud asukohas
- NTRIP serverid, mis edastavad andmevood allikast NTRIP kasterisse
- NTRIP kaster on süsteemi peamine komponent, mille kaudu on klientidel võimalik saada ligi NTRIP ühenduspunktidele
- NTRIP kliendid, kes saavad lõpuks ligi soovitud NTRIP allikate andmevoogudele NTRIP kasterist



Joonis 9. NTRIP voogedastuse süsteem [11].

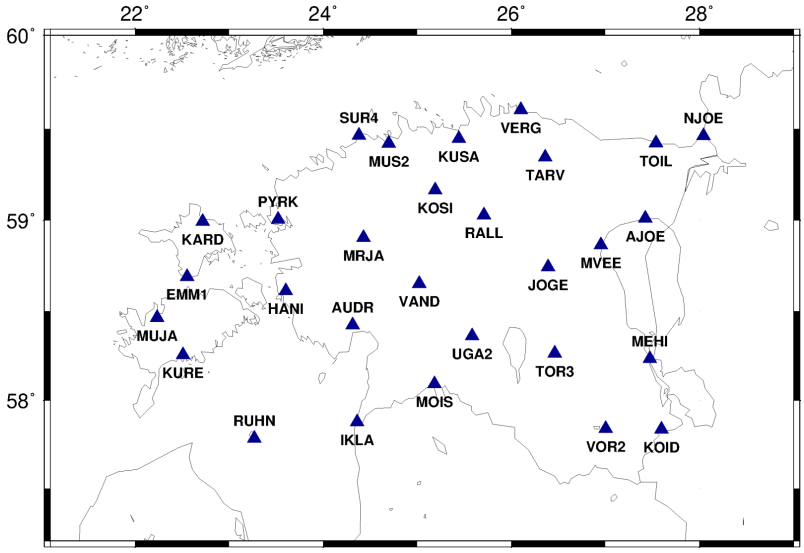
Iga striimitud NTRIP allika kohta defineeritakse allika ID, mida kutsutakse *mountpoint*'iks ehk ühenduspunktiks. Pärides allikat läbi ühenduspunkti on võimalik NTRIP kasteris mitmetel kasutajal saada samal ajal ligipääs soovitud allika andmetele. NTRIP kasteri adiministraator organiseerib kõik saadaval olevad NTRIP allikad ning defineerib ühenduspunktid [34].

Saates NMEA vormingus andmeid antakse NTRIP kasterile teada NTRIP kliendi asukoht, sest NMEA vormingus antakse kaasa kasutaja koordinaadid. NTRIP kasteri poolelt on soovitatav klienti informeerida eelneva privaatsusprobleemi osas [34].

4.2.2 ESTPOS

Püsijaamade andmete kogumiseks kasutati Maa-ameti ESTPOS GNSS-püsijaamade võrgustikku. ESTPOSi võrku kuulub 29 GNSS-püsijaama, mis katavad ühtlaselt Eesti riigi territooriumi [7]. Ligipääs ESTPOS andmetele oli tagatud läbi kasutajakonto, kasutajakontoga seonduvad andmed saadi Maa-ametist. Saadud litsentsidega oli võimalik ESTPOSis andmetele pääseda ligi läbi ESTPOSi kasutajaportaali ning NTRIP protokolli. ESTPOSi teenuseid on võimalik kasutada kõigil riigiasutustel ja teaduslikel eesmärkidel ning hetkel

pole plaanitud avalikuks kasutamiseks (K. Kollo, personaalne suhtlus, 12.05.2023).



Joonis 10. ESTPOS GNSS-püsijaamade võrk [7].

Järeltöötlusel laaditi alla püsijaamade vaatlusandmed, mis koosnesid neljast failist: GPS, GLONASS ja GALILEO konstellatsioonide GNSS navigatsiooni andmed (.nav) ning kombineeritud vaatlusandmed (.obs) RINEX vormingus .23O (2023 aasta kohta). Andmeid saab alla laadida määratud ajavahemiku kaupa.

Vaatlusandmete fail sisaldab infot GNSS vaatlusandmete kohta, st koodivaatluste pseudokaugused, faasivaatluste pseudokaugused, Doppleri nihke määramiseks andmestik jne, vastavalt RINEX faili päises esitatud vaatlusandmete loetelule. Navigatsioonifailid sisaldavad infot Kepleri elementide kohta, aga iga satelliitnavigatsioonisüsteemi kohta eraldi (K. Kollo, personaalne suhtlus, 31.03.2023). ESTPOS veebirakenduses saab teha ka arvutusi tundmatu punkti koordinaatide määramiseks, milleks on vaja üles laadida vaatlusandmete fail, mis vastab RINEX standardile. Vastavalt kasutaja poolt sisestatud andmetele valib ESTPOS arvutusteenus GNSS-tugijaamad, mida kasutatakse lähtejaamadena (Karin Kollo 31.03.2023).

ESTPOSil on 21 ühenduspunkti, kust on võimalik saada reaalajas parandeid kasutades NTRIP protokolli. Tabelis 3 on toodud välja kõik ESTPOSi ühenduspunktid, mis satelliidisüsteemide infot nende parandid sisaldavad ning kas töö autoritel oli ligipääs ühenduspunktidele olemas.

Tabel 3. ESTPOSi ühenduspunktid.

ESTPOSi ühenduspunktid	Ligipääs	Sateliidisüsteemid
Nearest-CMR+	ei	GPS+GLO
Nearest-CMR	ei	GPS+GLO
VRS-CMR	ei	GPS+GLO
VRS-CMR+	ei	GPS+GLO
iMAX-RTCM23X	ei	GPS+GLO
iMAX-RTCM3X	jah	GPS+GLO
VRS-RTCM3X	jah	GPS+GLO
VRS-RTCM23X	ei	GPS+GLO
Nearest-RTCM3X	jah	GPS+GLO
Nearest-RTCM23X	ei	GPS+GLO
FKP-RTCM3X	ei	GPS+GLO
RTK-DGNSS	ei	GPS+GLO
RTK-VRS	ei	GPS+GLO
RTK-Nearest	ei	GPS+GLO
iMAX-MSM4	jah	GPS+GLO+GAL
VRS-MSM4	jah	GPS+GLO+GAL
RTK-NearestG	ei	GPS+GLO+GAL
Nearest-MSM4X	jah	GPS+GLO+GAL
VRS-MSM5	jah	GPS+GLO+GAL
iMAX-MSM5	jah	GPS+GLO+GAL
Nearest-MSM5X	jah	GPS+GLO+GAL

Kõik parandid kasutavad RTCM sõnumite vormingut ning parandite leidmiseks kasutatakse olenevalt ühenduspunktidst erinevaid võrgu-RTK meetodeid (vaata lisaks peatükki 2.3.1) nagu iMax, VRS, Nearest ja FKP-d. Kuid kui liikuvjaam asub vähem kui 2 km kaugusel baasjaamast, siis lülitub liikuvjaam automaatselt "nearest" parandile, st parand saadetakse liikuvjaamale lähimast jaamast (K. Kollo, personaalne suhtlus, 31.03.2023). Osa ühenduspunktidest annavad parandid GPS, Galileo ja GLONASS satelliidisüsteemide pseudokaugustele ning ülejäänud annavad parandid ainult GPSi ja GLONASSi satelliidisüsteemide pseudokaugustele.

4.2.3 RTK2go

RTK2go on avalik NTRIP kaster, mis on loodud selleks, et igaüks saaks avaldada oma GNSS parandusvooge, mida saavad kõik kasutada enda NTRIP kliendiga. RTK2go-s on

pidevalt saadaval enam kui 500 tasuta baasjaama üle maailma, registreerituid baasjaamu on 5000 ning seda kasutab üle 50 000 kasutaja maailmas [35].

RTK2go baasjaamade info jagamiseks kasutatakse NTRIP protokolli, millele ligipääsemiseks on vaja toimivat emaili aadressi [35]. Eestis ei ole 10.04.2023 seisuga ühtegi RTK2go baasjaama, kuid lähim asub Soomes (vt joonis 11) [36]. Baasjaamu soovitatakse valida nii, et lähim baasjaam asuks maksimaalselt 50 km kaugusel ning sellel põhjusel ei kasutata antud lõputöös RTK2go lahendust [37]. Selle asemel kasutatakse baasjaama andmetena antud töös ESTPOSi, mille baasjaamad katavad Eesti territooriumit ühtlaselt [7].

Joonis 11. RTK2go baasjaamad Eesti läheduses 10.04.2023 seisuga [36].

4.2.4 HAS

Galileo kõrgtäpne teenus (*Galileo High Accuracy Service* ehk HAS) on Euroopa Globaalse Navigatsioonisatelliit Süsteemi (GNSS) osa, mille on välja töötanud Euroopa Liit ja Euroopa Kosmoseagentuur (ESA) asukoha, navigatsiooni ja aja teenuste pakkumiseks. Galileo kõrgtäpne teenus (HAS) on avatud juurdepääsuga ja tasuta teenus, mis pakub täpseid parandeid valitud Galileo satelliitidelt Galileo E6 signaali kaudu ning neid saab ka interneti kaudu alla laadida. Erinevalt RTK-st, mis tugineb kohalikule baasjaamale, pakub HAS täiustatud andmeid otse kasutaja vastuvõtjale, mis muudab Galileo HASi globaalsemaks süsteemiks [8].

Galileo HAS kasutab paralleelselt mitmeid tehnikaid, nagu näiteks täiustatud atmosfääri modelleerimine, sageduskorrigeerimised ja täppisefemeriide[2]. Need võimaldavad

[2]Mõiste efemeriid pärineb astronoomiast ning tegu on tabeliga, kuhu on kantud erinevate taevakehade näivad asendid taevas kindal ajahetkel Maa teatud punktis. Sama põhimõte on kasutusele võetud ka

kompenseerida erinevaid mõjutegureid, mis võivad mõjutada signaali täpsust ja kättesaadavust [38].

Galileo HAS-i korrektsioonid koosnevad PPP-korrektsioonidest, mis on rakendatavad Galileo ja GPS-i tugisõnumitele ning vahemõõtmistele. HAS-i korrektsioonid sisaldavad orbiidi- ja kella-korrektsioone ning koodi süstemaatilisi nihkeid (*code biases*) ning neid saab rakendada järgmiste Galileo ja GPS-i navigatsioonisõnumite ja signaalide puhul [8]:

- Galileo I/NAV navigatsioonisõnum ja Galileo E1/E5a/E5b/E6 signaalid,
- GPS LNAV navigatsioonisõnum ja GPS L1/L2C signaalid.

Töö kirjutamise ajal oli HASi avalikult kättesaadav teenus esimeses faasis. Algne teenus pakub globaalseid PPP-parandusi nii Galileo kui ka GPS-ile ja eesmärgiks on saavutada koordinaadi koondumisaeg alla 5 minuti. Mõlemas faasis on täpsus horisontaalselt 20 cm ja vertikaalselt 40 cm [39]. HASi teenuste omadused esimeses ja teises faasis on toodud välja tabelis 4.

Tabel 4. HASi omadused [39].

HASi omadused	Faas 1	Faas 2
Katvus	Globaalne	Euroopa
Parandite tüübid	PPP - orbiidiparandid, kellaparandid ning koodi- ja faasinihked	PPP - orbiidiparandid, kellaparandid ning koodi- ja faasinihked, mis sisaldavad atmosfääri korrektsioone
Parandite vorming	Compact-SSR	Compact-SSR
Andmeedastusviis	Galileo E6b signaal/ üle interneti	Galileo E6b signaal/ üle interneti
Toetatud satelliidisüsteemid	Galileo, GPS	Galileo, GPS
Toetatud sagedused	E1/E5a/E5b/E6; E5 AltBOC L1/L5; L2C	E1/E5a/E5b/E6; E5 AltBOC L1/L5; L2C
Horsiontaalne täpsus 95%	vähem kui 20 cm	vähem kui 20 cm
Vertikaalne täpsus 95%	vähem kui 40 cm	vähem kui 40 cm
Koonduvusaeg	vähem kui 300 s	vähem kui 100 s
Kättesaadavus	99%	99%
Kasutajatugi	24/7	24/7

satelliitide orbiitide kirjeldamiseks koordinaatidena. Eristatakse otseedastatud efemeriide ja täpseid ehk täppisefemeriide [11].

HAS teenuse esimese faasi testimise ja analüüsi eesmärgil kirjutas Oliver Horst magistritöö "Implementation of an Open-Source Software Suite for the Galileo High Accuracy Service". Töö tulemusena sooviti suurendada HAS-i ligipääsetavust ja muuta teenus hõlpsamini kasutatavaks alates selle avalikkusele kättesaadavaks muutumisest. Autorite oluliseim tulem oli eraldiseisev Pythoni teek HASlib Decoder[3], mis viib kodeeritud edastusandmed vormingusse, mis on kasutusel laialdaselt kasutatud Precise Point Positioning (PPP) tööriistades [40].

HASile said ligipääsu autorid alles 14.04.2023 ja ajapiirangu tõttu ei jõutud HASiga katseid sooritada. Horsti töös valiti HAS Decoderiga koos töötavaks PPP töötlemise teegiks PPP Wizardi, mis on ehitatud RTKLIBi 2.4.2 versiooni peale. Välja toodud teegi avatud lähtekoodiga arendus on aga lõpetatud, ning autorid sellele ligi enam ei saanud.

4.3 RTKLIB

Andmetöötluseks kasutati RTKLIBi tarkvara versiooni demo5_b34b[4] , mis on avatud lähtekoodiga programm täpseks positsioneerimiseks GNSSiga. RTKLIB koosneb porditavast (*portable*) programmiteegist ja mitmest AP-st (*Application Program*), mis kasutavad seda teeki [41]. RTKLIBI erinevad programmid on välja toodud tabelis 5.

Tabel 5. RTKLIBi programmid [41]

Funktsioon	GUI AP	CUI AP
AP käivitaja	RTKLAUNCH (3.1)	-
Reaalajas positsioneerimine	RTKNAVI (3.2, 3.3, 3.5)	RTKRCV (3.11, A.1)
Sideserver	STRSVR (3.3)	STR2STR (3.11, A.5)
Järeltöötluse analüüs	RTKPOST (3.4, 3.5)	RNX2RTKP (3.11, A.2)
RINEX konverter	RTKCONV (3.6)	CONVBIN (3.11, A.4)
Lahenduste ja vaatlusandmete visualiseerimine	RTKPOLT (3.7, 3.8)	-

Jätkub...

[3]HASlib Decoder'i lähtekood, vaadatud 10.04.2023 `https://github.com/nlsfi/HASlib`
[4]RTKLIB'i tarkvara versioon demo5_b34b lähtekood, vaadatud 09.02.2023 `https://github.com/rtklibexplorer/RTKLIB`

Tabel 5 – *Jätkub...*

Funktsioon	GUI AP	CUI AP
GNSS toodete ja andmete allalaadija	RTKGET (3.9)	-
NTRIP brauser	SRCTBLBROWS (3.10)	-

Võrreldes RTKLIB algversiooniga (versioon 2.4.3) fokusseerib demo5 haru madala hinnaklassi vastuvõtjatele, samal ajal olles algse koodi uuendustega sünkroonis. Mõlemaid versioone on hästi dokumenteeritud ja nende dokumentide kokkulangevus on suur. Lisaks ametlikule dokumendile on demo5 haru haldaja loonud mitmeid juhendeid, näiteid ja toonud välja võimalike eksimiskohti tema versiooni kasutusest. Eelmainitud põhjustel kasutati RTKLIBi tarkvara versioon demo5_b34b-d.

RTKLIBi olulisemad funktsionaalsused, mida autorid kasutasid [41]:

- toetab standartseid ja täpseid positsioneerimisalgoritme GPSi, GLONASSi, Galileo ja teisi satelliitsüsteeme, mida antud projektis ei kasutatud (QZSSi, BeiDou ja SBAS),
- RTKLIB toetab erinevaid GNSSi positsioneerimismudeleid reaalajas ja järeltöötlusel. Autorid kasutasid kinemaatilist ja PPP-kinemaatilist mudelit,
- toetab mitmeid standardvorminge ja protokolle: RINEX versioone 2.10, 2.11, 2.12 OBS/NAV/GNAV/HNAV/LNAV/QNAV, RINEX versioone 3.00, 3.01, 3.02 OBS/-NAV.

Algsete mõõtmistulemuste saamiseks kasutati RTKPOST programmi, mis sooritab järeltöötlust. Positsioneerimise programm RTKPOST võtab sisendiks GNSS vastuvõtja toorandmed, baasjaamade vaatlusandmeid ning korrektsiooniandmed. Väljundiks genereeritakse .pos lahenduse fail, mis koosneb täpsustatud koordinaatidest ja erinevatest täpsuse hinnangutest (Quality Flag). Lahenduse analüüsimiseks kasutasid autorid *Time* välja, mis näitab vastuvõtja tegelikku signaali vastuvõtu aega ja *Receiver Position* välja, kus on telefoni vastuvõtja antenni hinnanguline asukoht, mis on vastavalt positsioneerimisvalikule välja arvutatud. Samuti näeb lahendfailis *Quality Flag* välja, mis jääb vahemikku 1-5 ja näitab lahenduse kvaliteeti, kus 1 on kõige täpsem ja 5 kõige madalama täpsusega [41].

4.3.1 Kalmani filter

RTKLIB kasutab täpsustatud koordinaatide ennustamiseks *laiendatud Kalman Filtrit* [41]. Kalmani filter töötab eeldusel, et mõõtmisandmed on normaaljaotusega. Filtreerimine on iteratiivne protsess, mis koosneb kahest etapist: ennustamine ja uuendamine [42].

Esimeses etapis ennustab Kalmani filter vastuvõtja asukohta vaadeldava ajahetke mõõtmiste jaoks, võttes aluseks eelmise ajahetke mõõtmistele tugineva vastuvõtja asukohta, eelmisest mõõtmisest möödunud aega ja vastuvõtja teadaolevat liikumise dünaamikat. Samuti antakse hinnang tulemuste usaldusväärsusele. Esimeses etapis saadud väärtuseid nimetatakse prognoositud väärtuseks ja esitatakse olekuvektorina. Teises etapis uuendatakse arvutatud ennustusi vastuvõtja mõõtmiste põhjal [42].

Teises etapis võetakse arvesse vastuvõtja tegelikku mõõtmist ja seda nimetatakse mõõdetud väärtuseks. Siin arvutatakse prognoositud väärtuse ja mõõdetud väärtuse erinevus ning seejärel otsustatakse, millist väärtust säilitada, kasutades arvutatud Kalmani juurdekasvu (*Kalman Gain*). Kalmani juurdekasv (edaspidi K) on parameeter, mis otsustab, kui palju kaalu tuleks anda prognoositud väärtusele ja mõõdetud väärtusele. K väärtus on vahemikus 0 kuni 1. Kui mõõtmisel on suur viga, on K väärtus lähemal 0-le. See tähendab, et prognoositud väärtus on tegelikule väärtusele lähedane. Kui ennustuses on suur viga, on K lähemal 1-le, siis mõõdetud väärtus on tegelikule väärtusele lähemal [43].

Kalmani filtril on kaks põhilist eeldust: mõõdetav müra on normaaljaotusega ning dünaamika on esitatav lineaarsete funktsioonidega. Reaalsuses osutub piiravaks dünaamika lineaarsuse eeldus. Seetõttu on RTKPOST rakenduses realiseeritud laiendatud Kalmani filter, mis kasutab mittelineaarse dünaamika lineariseerimist. [44].

RTKPOSTi kontekstis koosneb seisundi vektor üheksast olekust: kolm vastuvõtja asukoha olekut (x, y, z), kolm vastuvõtja kiiruse jaoks (x, y, z) ja kolm kiirenduse jaoks. Seejärel kasutab Kalmani filter neid hinnanguid vastuvõtja kiiruse ja kiirenduse kohta, ennustades järgmisel ajahetkel vastuvõtja asukohta. Nende asukohahinnangute usaldusväärsust värskendatakse ka järgmise punktini kuluva aja ja konfiguratsioonifaili sisendparameetritega määratud vastuvõtja kiirendusomaduste põhjal [42]. RTKPOSTis on hulk sätteid, mis mõjutavad Kalmani filtri tööd. Esiteks saab määrata liikuvjaama kiirenduse [m/s^2] standardhälbe nii horisontaalsel kui ka vertikaalsel teljel (stats-prnaccelh, stats-prnaccelv), mille järgi arvutab filter punktide usaldusväärsust. Samuti saab muuta Kalmani filtris iga punkti kohta sooritatud iteratsioonide arvu (2-armaxiter) [41].

5 Mõõtmised ja andmetõõtlus

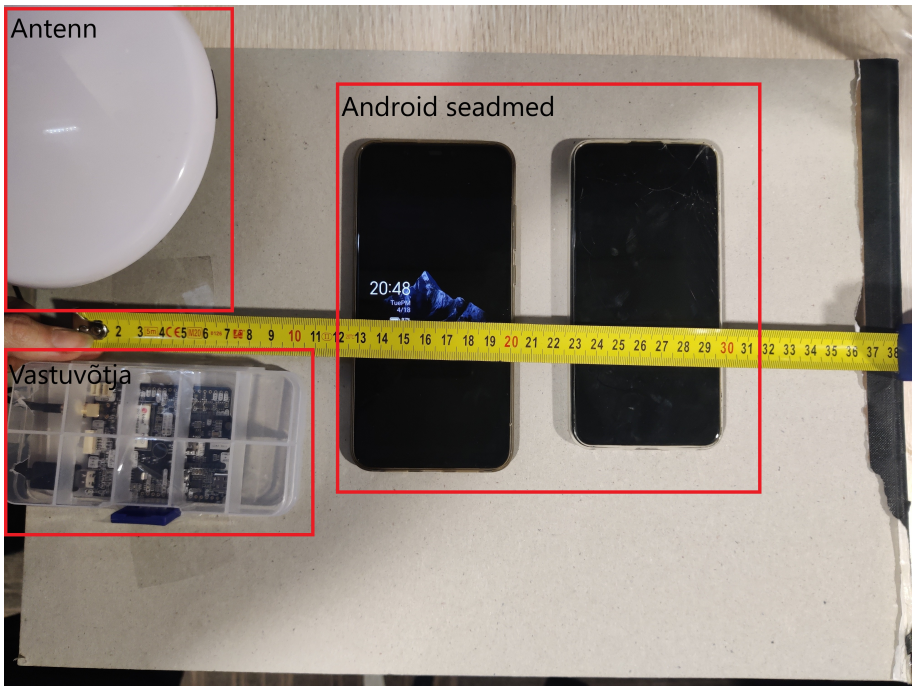
Mõõtmised jagunevad eelmõõtmisteks ja eksperimentideks. Eelmõõtmise eesmärgiks oli eri tehnoloogiatest arusaamine ja saadud info analüüs. Eksperimentide eesmärgiks oli teha täpseid mõõtmisi, kus koguti ka referentsiandmeid, mille põhjal oli võimalik mõõtmiste tulemuste täpsust hinnata.

GNSS toorandmete kogumine erinevate rakendustega toimub reaalajas ning seetõttu on vaja andmete kogumiseks viia läbi mõõtmisi. Andmeid koguti GPSTest ja GnssLogger rakendustega. Kuna mõõtmisi on võimalik teostada Android seadmetega, millel on vähemalt Android 7.0 Nougat versioon, siis toorandmete kogumise jaoks kasutati seadmeid nagu Pixel 5, Samsung Galaxy S10, OnePlus Nord, HUAWEI P30 Pro ja Xiaomi MI 8. Telefoni spetsifikatsioonid kirjeldatud tabelis 6.

Tabel 6. Kasutatud seadmete spetsifikatsioonid.

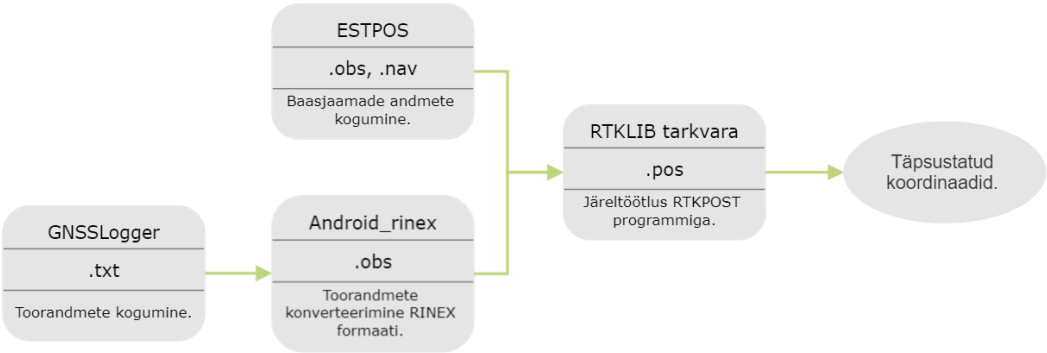
Seadme mudel	Pixel 5	Samsung Galaxy S10	OnePlus Nord	HUAWEI P30 Pr o	Xiaomi MI 8
Protsessor	Qualcomm Snap-dragon 765G	Samsung Exynos 9	Qualcomm SDM765G	HiSilicon Kirin 980	Qualcomm Snap-dragon 845
Operatsiooni-süsteemi versioon	Android version 14	Android version 12	Android version 12	EMUI ver-sion 12.0.0	Android version 10
GNSS API tase	33	31	31	29	29
GNSS riistvara aasta	2018	2016	2018	2018	2018
Kahesageduslike andmete logimine	Toetatud	Pole toetatud	Toetatud	Toetatud	Toetatud
Kandefaas	Olemas	Olemas	Puudub	Olemas	Olemas

Referentsandmete ehk standardandmete, mille suhtes mõõtmistulemusi hinnatakse, kogumiseks kasutati Budget Survey GNSS Multiband (IP66) antenni, simpleRTK2B Fusion ZED-F9R GNSS vastuvõtjat ja U-Center ver 22.07 tarkvara. Seadmete asetused mõõtmiste ajal on näha joonisel 12. Telefonid on asetatud selliselt, et nende ülemine äär on samal teljel antenni keskkohaga liikumise suunaga paralleelsel teljel.



Joonis 12. Seadmete asetus eksperimentide ajal.

Peale toorandmete kogumist konverteeriti need RINEX vormingusse, et saadud RINEX faili töödelda RTKPOSTis koos ESTPOSist saadud baasjaamade korrektsioonidega (vt joonis 13). Järeltöötlus toimus *Kinematic* meetodi seadistusega. Tulemuste visualiseerimiseks kasutati QGIS programmi, kuhu sisestati mõõtmistel telefonidelt saadud toorandmed, RTKPOSTist saadud järeltöödeldud asukoha andmeid ja eksperimentides ka referentsandmed, et neid omavahel võrrelda ning analüüsida.

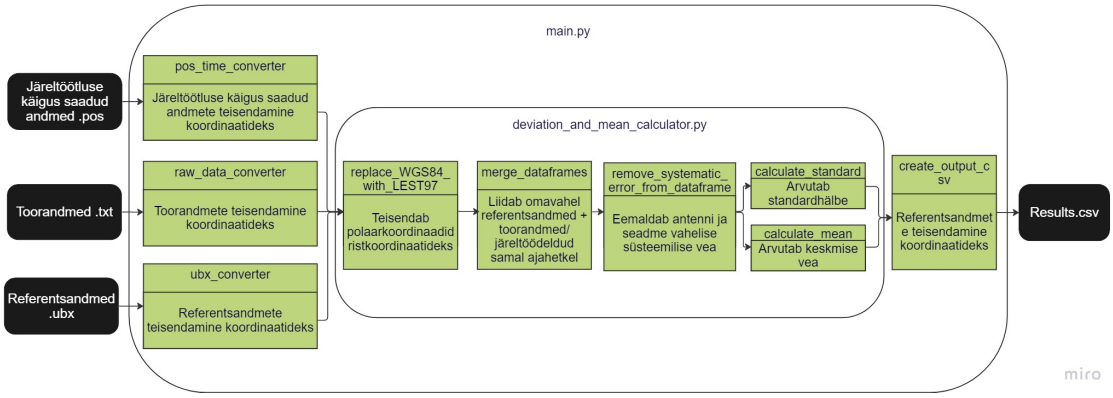


Joonis 13. Järeltöötluse protsess.

5.1 Skriptid

Lõputöö raames kirjutati andmete lihtsamaks analüüsiks kollektsioon pythoni skripte (vt joonis 14), mis konverteerivad andmeid ühelt vormingult standardiseeritud formaadile (autorite jaoks CSV formaat) ning arvutavad referentsandmete ning järeltöödeldud- ja toorandmete vahelise keskmise vea ja standardhälbe.

Skriptid on 17.05.2023 seisuga avatud lähtekoodiga kättesaadavad TalTechi Gitlabis[1].



Joonis 14. Skriptide ülevaade.

Oluline on märkida, et skriptides võrreldakse aegu sekundi täpsusega, mis mängib olulist rolli andmete analüüsil. Töö kirjutamise ajal oli ESTPOSist võimalik saada vaatlus- ja navigatsiooniandmeid sekundi täpsusega, mis seadis samad piirangud ka järeltöötluse käigus saadud andmetele. Telefoni toorandmeid ja referentsandmeid oli võimalik koguda suurema sagedusega (F9R seadmel kuni 30Hz), kuid lõputöö kirjutamise ajal seadis analüüsiks piiranguid baasjaama andmete sagedus.

5.1.1 Toorandmete konverteerimine

Skripti "raw_data_to_fix_coordinates_converter.py" eesmärk on töödelda Android seadmest saadud GNSS toorandmeid, et filtreerida välja Fix koordinaadid, mis on telefonis arvutatud koordinaadid. Lisaks arvutab skript igal ajahetkel seadme vaateväljas olevate satelliitide arvu ning jaotab need sateliitsüsteemide ja kanalite kaupa. Sisendiks on GNSS toorandmed, mida skript loeb rea haaval.

Kui skript leiab Fix tüüpi andmerea, kirjutab see laius- ja pikkuskraadi väljundfaili ja konverteerib ajahetke UnixTimeMillis vormingult DateTime vormingule, lisades selle väljundfaili. Raw tüüpi andmerea leidmisel tuvastab skript, millise satelliitsüsteemi (Galileo

[1]Lõputöö raames arendatud andmetöötlus skriptid `https://gitlab.cs.ttu.ee/gnss_sentimeeter/gnss_data_processing_scripts`

või GPS) antud satelliit kuulub ning millist sagedust signaal kasutab - kas ühe või kahe sageduslikku. See info lisatakse samuti väljundfaili.

Väljund on CSV fail, mis sisaldab ajahetke sekundi täpsusega, laius- ja pikkuskraadi ning erinevate sageduste (Galileo E1, Galileo E5, GPS L1 ja GPS L5) satelliitide arvu.Eksperimentidest saadud andmete sügavamaks analüüsiks otsustati, et väljundfail võiks sisaldada kahte lisaveergu: müra-võimsuse-tiheduse suhte väärtused (Cn0DbHz) ja pseudokaugused.

5.1.2 Järeltöödeldud andmete konverteerimine

Skripti "pos_time_converter.py" eesmärk on konverteerida järeltöötluse käigus saadud Android GNSS andmeid CSV formaati. Sisendiks on järeltöötluse käigus saadud Android GNSS andmed .pos formaadis. Programmi töö tulemusena genereeritakse CSV fail, milles on esitatud ajahetked sekundi täpsusega koos vastavate laius- ja pikkuskraadidega. Programm loeb rea haaval järeltöödeldud andmeid, kirjutab igal real olevad laius- ja pikkuskraadid väljundfaili ning konverteerib real asuva ajahetke GPS Time vormingust (nt. 2258 553708.434) DateTime vormingusse (nt. 09:48:10), mille järel kirjutab tulemuse väljundfaili.

5.1.3 Referentsandmete konverteerimine

Skripti "ubx_to_coordinates_converter.py" eesmärk on konverteerida u-blox F9R vastuvõtjast saadud referentsandmed CSV formaati. Skript loeb rea haaval andmeid ja kui leitakse GNRMC sõnum, kirjutatakse real olevad laius- ja pikkuskraadid ning ajahetk väljundfaili. Sisendiks on u-blox vastuvõtjast saadud referentsandmed ja väljundiks on CSV fail, mis sisaldab ajahetke sekundi täpsusega, laius- ja pikkuskraadi.

5.1.4 Keskmise vea ja standardhälbe arvutamine

Skripti "uncertainty_and_mean_calculator.py" eesmärk on arvutada koordinaatpunktide vahelise keskmine viga ja standardhälve, kasutades sisendandmeid, mis on saadud "raw_-data_to_fix_coordinates_converter.py", "pos_time_converter.py" ja "ubx_to_coordinates_-converter.py" skriptide väljunditest. Skript loeb sisendfailid ja loob nendest andmetabelid, teisendab WGS84 geodeetilised koordinaadid L_Est97 tasapinnalisteks ristkoordinaatideks, ja lisab referentsandmete andmetabelile uue veeru, mis näitab kaugust eelmisest koordinaatpunktist. Kui see kaugus on vähem kui 0.2 m, mis viitab sellele, et liikumine on olnud minimaalne või puudub, kustutatakse vastav rida andmetabelist. Selle eesmärgiks

on eemaldada arvutustest statsionaarsed andmete kogumised. Seejärel ühendatakse referentsandmete ja järeltöödeldud- ning toorandmete andmetabelid aja kaudu.

Arvutustest eemaldatakse süstemaatiline viga, mis tekib telefonide ja antenni omavahelisest kaugusest (näha joonisel 12). Telefonide ülemine serv on mõõtmistel asetatud sama horisontaalse telje peale, kus on antenni keskpunkt, sest telefoni sisesed antennid asetsevad seadme üleval ääres. Xiaomi Mi8 seadmel on süstemaatiliseks veaks 13.7 cm, mis tuleneb seadme antenni faasitsentri asukohast [45]. Google Pixel seadme jaoks ei leidnud autorid faasitsentri kauguse kohta infot avalikest allikatest. Erinevate tootjate antennide faasitsentrid on pisut erinevates kohtades ja neid ei avalikustata, seetõttu jäeti Pixeli süstemaatiliseks veaks 26 cm, mis annab lõpplahenduses +- 2 cm vea.

Skript arvutab liikuvjaama ja referentsandmete omavahelise kauguse iga ajahetke kohta ja lisab selle andmetabelisse, et tagastada need arvutatud väärtused raporti loomiseks. Lõplikuks väljundiks on neli arvutustulemust: toor- ja järeltöötlusandmete ning referentsandmete keskmine viga ja standardhälve.

5.1.5 Juhtprogramm

Juhtprogrammiks on "main.py", mille ülesanne on koostada Android GNSS toorandmetest, järeltöödeldud andmetest ja referentsandmetest tulemuste raport. Selleks kasutatakse konfiguratsiooni informatsiooni, mis sisaldab andmeid kasutatava seadme, mõõtmise asukoha, kuupäeva ja satelliidisüsteemi kohta. Programm kutsutakse välja "raw_data_to_fix_coordinates_converter.py", "pos_time_converter.py" ja "ubx_to_coordinates_converter.py" skriptid ning salvestatakse väljundid. Seejärel kasutatakse "deviation_and_mean_calculator.py" skriptist saadud tulemusi, et koostada lõplik raport. Juhtprogrammi väljundiks on raport, mis sisaldab tulemusi kõikidest eelnimetatud skriptidest.

5.2 Eelmõõtmised

Eksperimentidele eelnevalt tehti eelmõõtmisi, mille eesmärgiks oli välja selgitada parimad viisid, kuidas mõõtmisi teha. Mõõtmiseid teostati perioodil 28.01-18.04.2023 ning kokku tehti neid 9. Katsetati erinevaid Android GNSS toorandmete logimisrakendusi nagu GPSTest ja GnssLogger, uuriti erinevaid viise, kuidas mõõtmisi teostada, milliseid andmeid on võimalik saada kasutades erinevaid seadmeid ning kuidas mõjutavad erinevate satelliidisüsteemide andmed tulemusi.

Esimese kahe eelmõõtmise puhul hoiti seadmeid käes. Nendele järgnevatel eelmõõtmistel

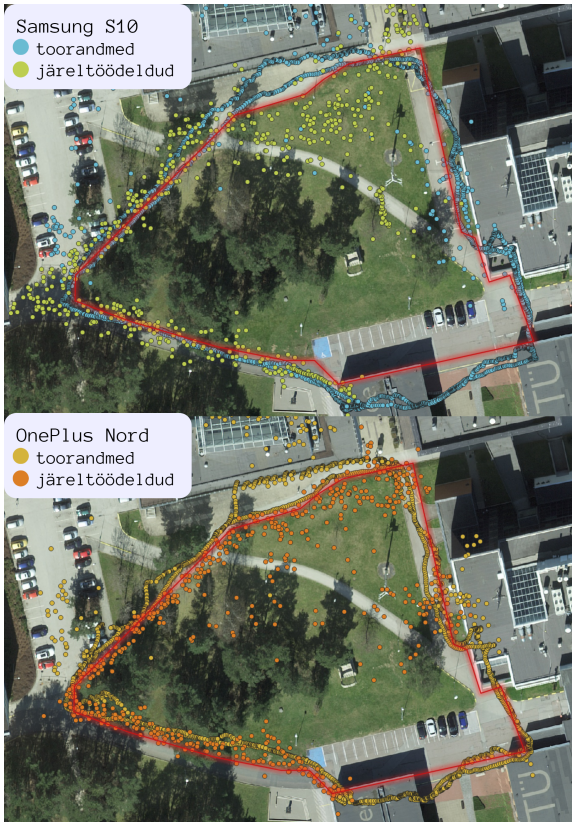
ja eksperimentidel olid seadmed asetatud mõõtmiste ajaks fikseeritud alusele (Joonis 15).

Joonis 15. Telefonide asetus eelmõõtmisel

5.2.1 Olulised järeldused eelmõõtmistest

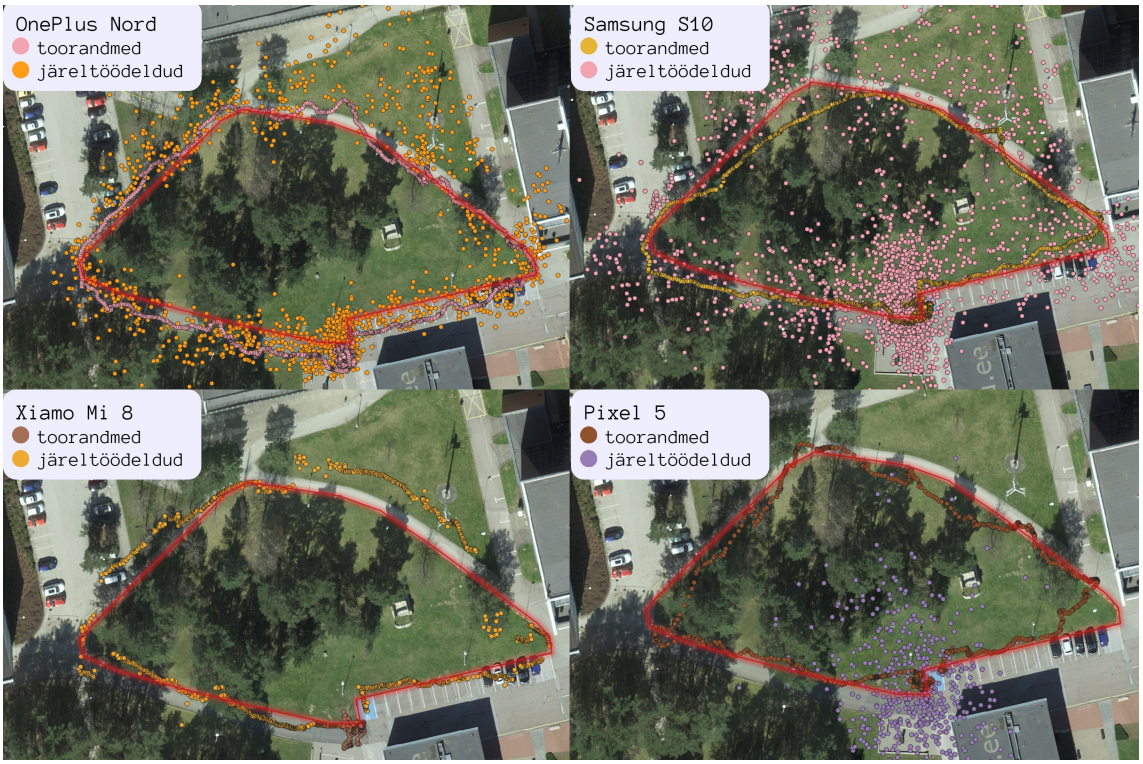
Esimestes katsetes oli eesmärkideks võrrelda GPSTesti ja GnssLoggeri saadud toorandmeid ning katsetada GSDC lahendust enda andmetega. Saadud andmetest järeldati, et toorandmed ei erine üksteisest märkimisväärselt ning ESTPOSi ja Tim Everetti GSDC lahenduses kasutavate baasjaamade andmed on küll erinevates RINEX versioonides, kuid sisaldasid samu parameetreid.

Samuti leiti, et järeltöötluseks on vaja teatud hulk statsionaarselt kogutud andmeid mõõtmise alguses. Joonisel 16 on näha ilma statsionaarse kogumiseta töödeldud andmeid, kus esimene kolmandik liikumistrajektoorist jäi töötlemata. Järgmistel katsetel seisti esimese 15 minuti jooksul kohapeal, et võimaldada seadmetel koguda infot algse asukoha kohta, mille abil on võimalik järeltöötluse käigus järgmiseid punkte täpsemalt arvutada (Joonis 17).



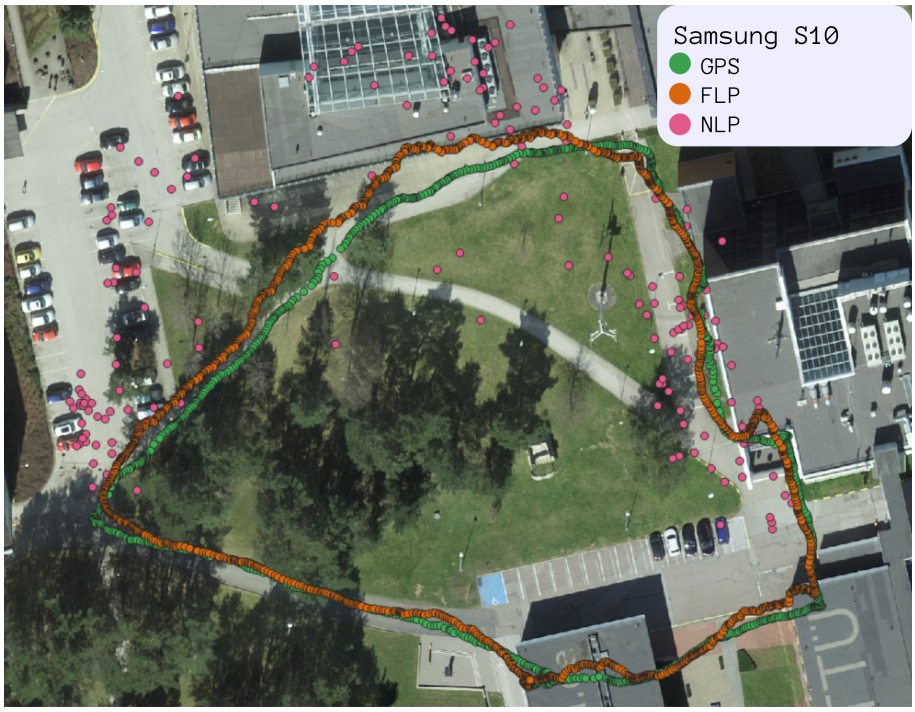
Joonis 16. Eelmõõtmise toorandmed ja järeltöödeldud koordinaadid telefonide kaupa ilma algse kalibreerimiseta.

Toorandmete Fix ridades olid ka GPS, NLP ja FLP andmed, millest viimased kaks kasutavad võrgupõhist positsioneerimist (vaata peatükki 3). Edaspidi NLP ja FLP andmeridu toorandmete võrdlusel ei kasutatud, sest QGISis kujutatud jooniselt 18 on näha, et need mõjuvad täpsusele negatiivselt.



Joonis 17. Eelmõõtmise toorandmed ja järeltöödeldud koordinaadid telefonide kaupa koos algse kalibreerimisega.

Analüüsides eelmõõtmistel kogutud infot GnssAnalysisApp rakendusega avastati, et satelliitide info on katkendlik. See on tingitud Android seadmete vaikesättest, mis lubab satelliitide infot koguda paari sekundilise intervalli tagant. Järgmistel mõõtmistel lülitati Android Developer seadetest sisse "Force full GNSS measurements" seadistus, mis on vaikimisi väljalülitatud, et telefoni akut hoida. Kui see seadistus pole sisse lülitatud, siis GNSS riistvara lülitub pidevalt sisse-välja mistõttu pole võimalik kasutada RTK-d ega kandefaasi andmeid [46]. Joonistel 19 ja 20 on näha, et järeltöötluse tulemusena saadud täpsustatud koordinaatpunktid on väiksema hajuvusega ja liikumistrajektoorile lähemal võrreldes eelmiste mõõtmiste järeltöötlusega saadud andmetega. Jooniste 19 ja 20 mõõtmiste erinevus ei tulene autorite poolt tehtud seadistuste muudatustest. Ainsaks erinevuseks oli ilmastikutingimused: mõõtmine kuupäevaga 26.03 toimus lumetormi ajal ja mõõtmine kuupäevaga 04.04 toimus selge taevaga. Siin kohal peab mainima, et ühe mõõtmise baasilt ei saa teha kindlaid järeldusi.

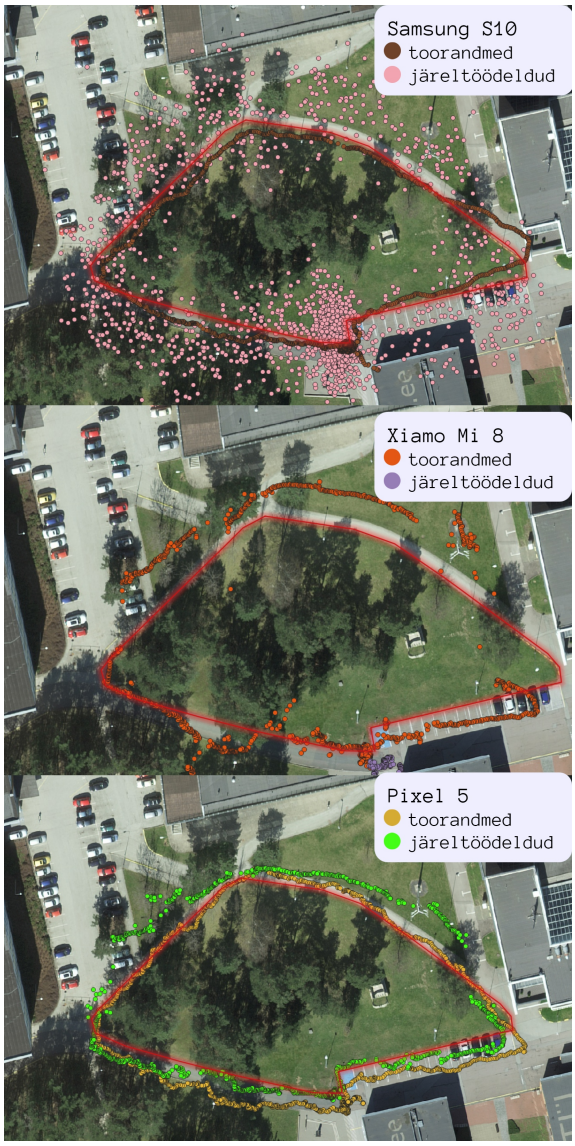


Joonis 18. Asukoha pakkujate võrdlus.

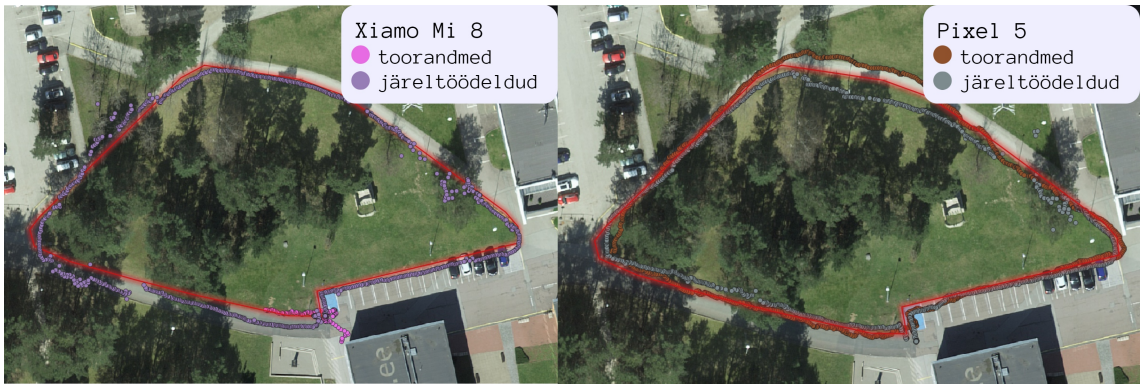
Eelmõõtmiste käigus tegid autorid telefonide spetsifikatsioonide põhjal seadmete kasutusega piiranguid. Võimalikuks täpsustamiseks on vajalik kandefaasi olemasolu, mis OnePlus Nord seadmel puudus ning ka kahesagedusliku andmekogumise toetamine, mis puudus Samsung S10 seadmel. Edaspidistes katsetes kasutati ainult Google Pixel 5 ja Xiaomi Mi 8 seadmeid.

Lisaks TalTechi STU hoone ja SOC hoone vahelisele alale, viidi mõõtmisi läbi ka keskkonnas, kus on vähem peegeldusi (joonis 21 ja joonis 22).

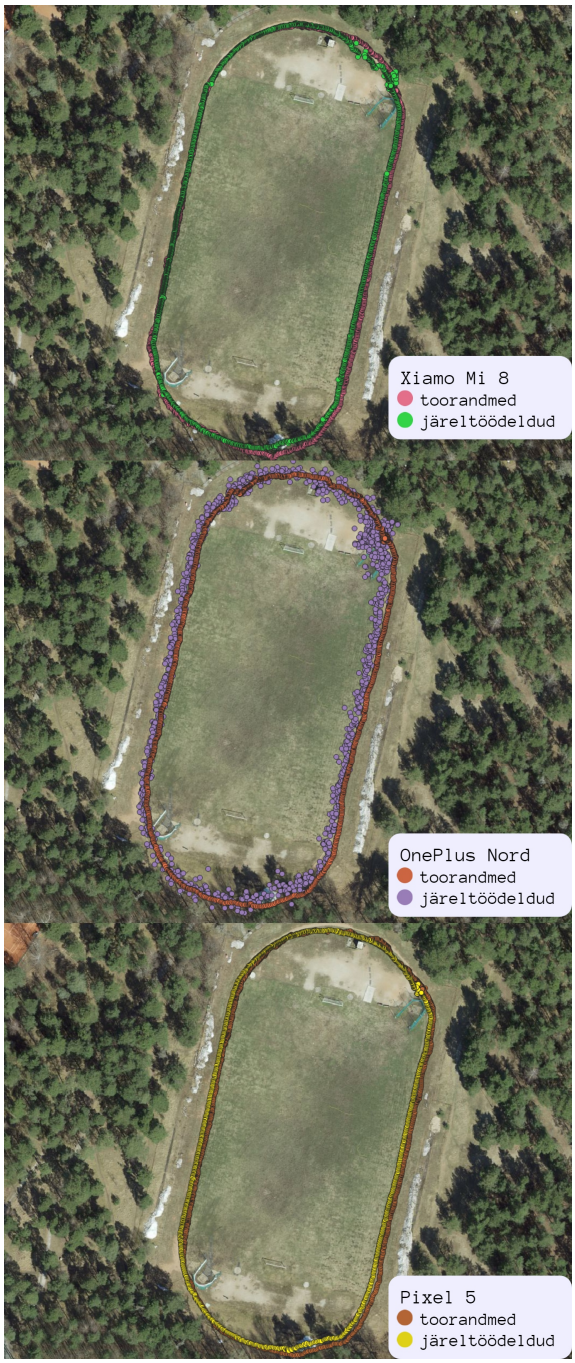
Autorid võrdlesid toorandmete järeltöötlust erinevate satelliidisüsteemide lõikes. Pixel 5 toorandmeid töödeldi kolmel erineval viisil: kasutades kõige kolme saitelliidisüsteemi andmeid (GPS, Galileo ja GLONASS), Galileo ja GPSi andmeid ning ainult Galileo andmeid (joonis 23). Visuaalselt kõige täpsemad tulemused saadi kasutades Galileo ja GPSi andmeid.



Joonis 19. 26.03 eelmõõtmise toorandmed ja täpsustatud koordinaadid telefonide kaupa lumetormi ajal.



Joonis 20. 04.04 eelmõõtmise toorandmed ja täpsustatud koordinaadid telefonide kaupa selge taevaga.

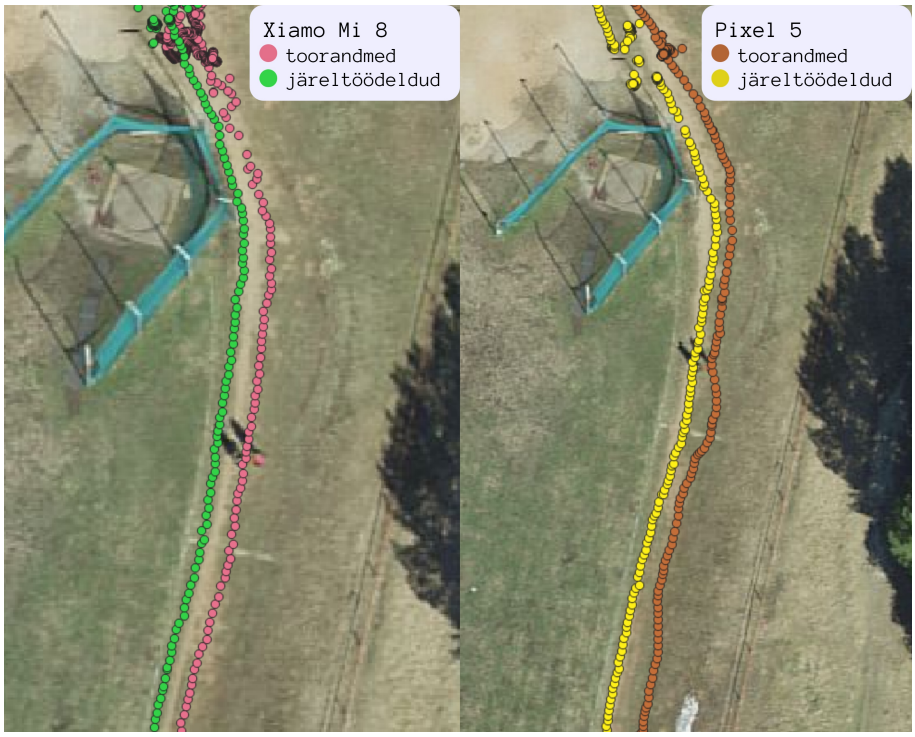


Joonis 21. 04.04 eelmõõtmise toorandmed ja järeltöödeldud koordinaadid telefonide kaupa.

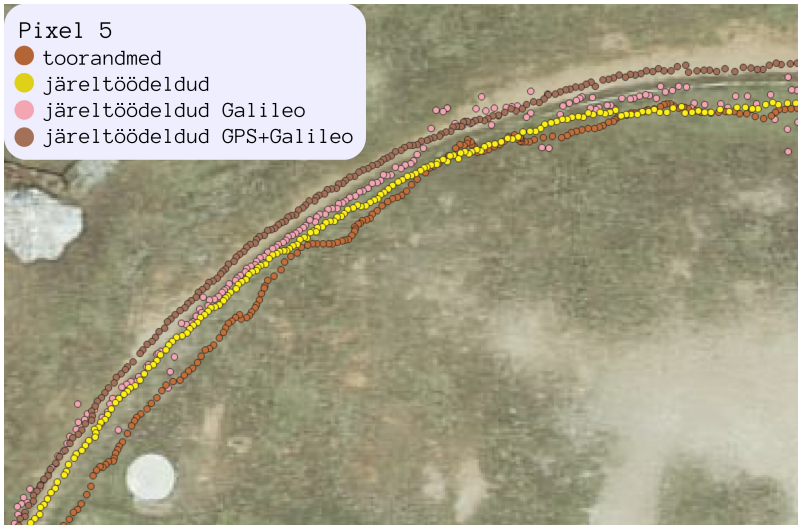
5.3 Eksperimendid

Eelmõõtmistelt saadud teadmiste põhjal viidi läbi 3 eksperimenti, mille käigus koguti lisaks toorandmetele ka referentsandmeid, et saaks arvutada:

- toorandmete standardhälvet,
- toorandmete ja referentsandmete vahelist keskmist viga
- järeltöötluse käigus saadud andmete standardhälvet



Joonis 22. 04.04 eelmõõtmise toorandmed ja järeltöödeldud koordinaadid telefonide kaupa lähemalt.



Joonis 23. 04.04 eelmõõtmise toorandmed ja järeltöödeldud andmed erinevate konstellatsioonide kaupa.

- järeltöötluse käigus saadud andmete ja referentsandmete vahelist keskmist viga.

Referentsandmete kogumiseks kasutati Budget Survey GNSS Multiband (IP66) antenni ja U-Blox F9R GNSS vastuvõtjat ning U-Center v23.03.54868 tarkvara (joonis 12). Toorandmete kogumiseks kasutati seadmeid Google Pixel 5 ja Xiaomi MI 8 peatükis 5.2.1 kirjeldatud põhjustel. Eksperimentide kirjeldused on toodud välja tabelis 7 ja tulemusi illustreeriti joonistel 24 ja 25.

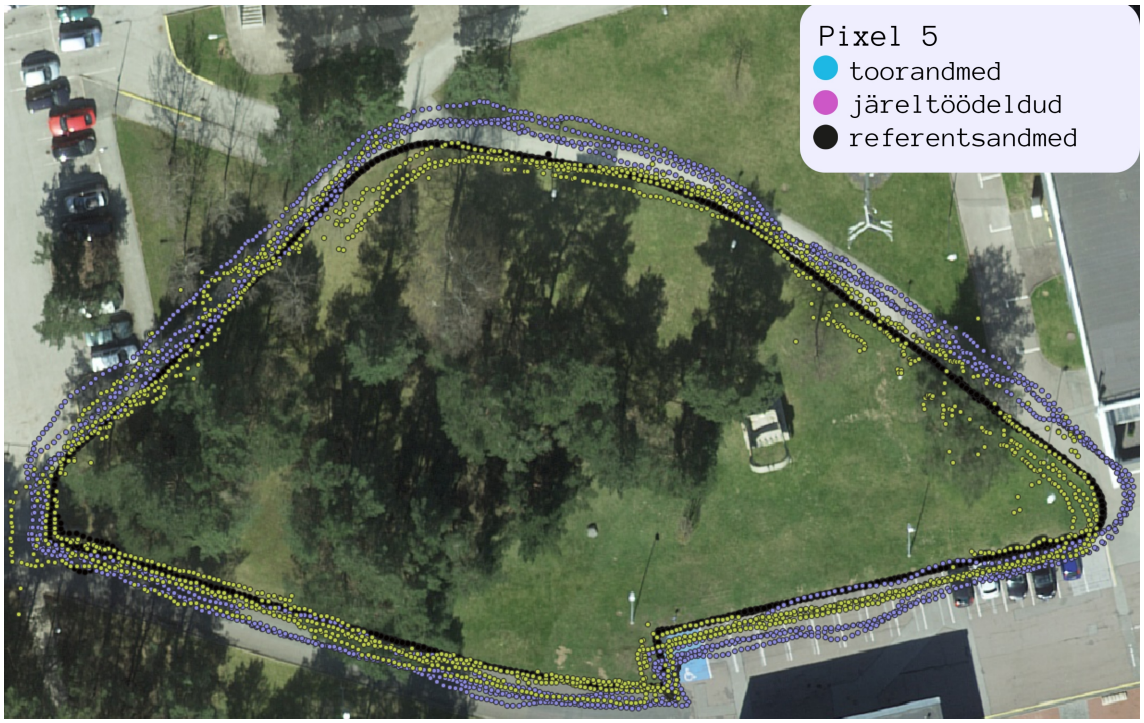
Tabel 7. Eksperimentide kirjeldus.

Kasutatud Android seadmed	Pixel 5, Xiaomi Mi8	Pixel 5, Xiaomi Mi8
Asukoht	Staadion	TalTechi Tudengimaja ja Majandusteaduskonna õppehoone vaheline ala
Kuupäev ja kellaaeg	21.04.2023 14.34-15.31, 13.05.2023 18.52-20.11	22.04.2023 09.48-10.40
Mõõtmiste pikkus	57 min, 79 min	52 min
Rakendused	GnssLogger, u-center ver 23.03.54868	GnssLogger, u-center ver 23.03.54868

Joonis 24. 21.04 eksperimendi tulemused TalTechi staadioni ühel lõigul.

Referentsandmete usaldusväärsuse kontrollimiseks mõõdeti järjest sama trajektoori neli korda. Koordinaatpunktid langesid ringide vältel omavahel kokku (joonised 26). Tulemuste pealt järeldati, et kuna eraldi ringidel külgsuunalisi kõrvalekaldeid ei olnud ning telefonidega tehtud mõõtmiste kõikumised olid suurusjärgu võrra suuremad, olid referentsandmed antud ülesande jaoks sobiva täpsusega.

Kuupäevadega 21.04.2023 ja 22.04.2023 mõõtmistel sooritati järjest neli ringi välja valitud trajektooridel. Andmete analüüsimiseks võrreldi esiteks erinevate satelliidisüsteemide täpsust, erinevalt eelmõõtmistest saadi tänu referentsandmete olemasolule arvutada erinevate satelliitsüsteemidega töödeldud andmete keskmised vead. Arvutusi tehti GPS, Galileo ja Glonassi süsteemidega eraldi, GPS ja Galileo süsteemidega ning kõigi süsteemidega koos. Järeldused tehti TalTechi staadioni ning STU hoone ja SOC hoone vahelise ala kohta mõlema telefoniga (tabel 8). Antud tabelis on välja toodud andmed Pixel seadmega. Staadionil saadi parim tulemus, kui kasutati GPSi ja Galileo süsteemide kombinatsiooni. STU hoone juures saadi parim tulemus Galileo satelliidisüsteemi kasutades. Kui võrreldi Galileo süsteemi ja GPS+Galileo süsteemide kombinatsiooni tulemusi, oli viimase



Joonis 25. 22.04 eksperimendi tulemused TalTechi Tudengimaja ja Majandusteaduskonna õppehoone vahelisel alal.

täpsus 6 sentimeetrit parem. Staadionil oli GPS+Galileo süsteemide kombinatsioon aga 13 sentimeetrit täpsem, kui ainult Galileo süsteemi kasutades. Seega, vaatamata sellele, et mõõtmiste täpsuses oli erinevusi sõltuvalt asukohast, otsustasid uurimuse läbiviijad edaspidi kasutada GPS+Galileo süsteemide kombinatsiooni, kuna see andis üldiselt parema tulemuse.

Staadionil oli toorandmete ja referentsandmete keskmine viga 1,91 m ja toorandmete ja referentsandmete standardhälve 0,73 m ehk GPS ja Galileoga töödeldud andmed on keskmise vea poolest üle meetri paranenud (vt tabel 8). STU hoone juures oli toorandmete ja referentsandmete keskmine viga 2,22 m ja toorandmete ja referentsandmete standardhälve 0,89 m. Andmete töötluses paranes tulemus ainult Galileo satelliite kasutades 41 cm (vt tabel 9).

Tabel 8. Satelliidisüsteemide võrdlus TalTech staadionil 21.04.2023 Pixel 5 seadmega.

Satelliidisüsteemid	**Järeltöötlus andmete ja referentsandmete keskmine viga (meetrites)**	**Järeltöötlusandmete ja referentsandmete standardhälve (meetrites)**
GPS+Galileo+Glonass	0,95	0,56
GPS+Galileo	0,82	0,46

Jätkub...

Tabel 8 – *Jätkub...*

Satelliidisüsteemid	**Järeltöötlusandmete ja referentsandmete keskmine viga**	**Järeltöötlusandmete ja referentsandmete standardhälve**
GPS	1,08	0,62
Galileo	1,10	0,83
GLONASS	16,15	66,20

Tabel 9. Satelliidisüsteemide võrdlus STU hoone juures 22.04.2023 Pixel 5 seadmega.

Satelliidisüsteemid	**Järeltöötlusandmete ja referentsandmete keskmine viga (meetrites)**	**Järeltöötlus andmete ja referentsandmete standardhälve (meetrites)**
GPS+Galileo+Glonass	2,34	0,89
GPS+Galileo	2,28	1,44
GPS	5,29	4,48
Galileo	1,81	1,71
GLONASS	42,88	180,64

Kuupäeval 13.05.2023 tehtud mõõtmise eesmärgiks oli kontrollida hüpoteesi, et perioodiline statsionaarne andmete kogumine parandab lõpptulemuse täpsust. Selleks sooritati kahe ringi pikkune mõõtmine TalTech staadionil, kus igal staadioni ringi veerandil seisti 3 minutit. Nii Pixel kui ka Xiaomi seadme täpsus paranes eelmise eksperimendi suhtes 15 cm ja 61 cm vastavalt (vt tabel 10).

Tabel 10. Perioodiliste seismistega eksperiment staadionil.

Seade	**Satelliidisüsteem**	**Järeltöötlus andmete ja referentsandmete keskmine viga (meetrites)**	**Järeltöötlusandmete ja referentsandmete standardhälve (meetrites)**
Pixel	GPS+Galileo	0,67	0,43
Xiaomi	GPS+Galileo	1,01	0,46

Joonis 26. Referentsandmete usaldusväärsus.

6 Eksperimentide analüüs

Eksperimentide tulemused on antud meetrites ja nähtavad tabelites 11, 12 ja 13.

Tabel 11. 21.04.2023 eksperimendi tulemused.

Seade	Asukoht	Toorandmete ja referentsandmete keskmine viga (meetrites)	Järeltöötlus andmete ja referentsandmete keskmine viga (meetrites)	Toorandmete ja referentsandmete standardhälve (meetrites)	Järeltöötlus andmete ja referentsandmete standardhälve (meetrites)
Xiaomi MI 8	TalTechi staadion	-	0,711	-	0,364
Pixel 5	TalTechi staadion	1,91	0,82	0,73	0,46

Tabel 12. 22.04.2023 eksperimendi tulemused.

Seade	Asukoht	Toorandmete ja referentsandmete keskmine viga (meetrites)	Järeltöötlus andmete ja referentsandmete keskmine viga (meetrites)	Toorandmete ja referentsandmete standardhälve (meetrites)	Järeltöötlus andmete ja referentsandmete standardhälve (meetrites)
Xiaomi MI 8	STU hoone ja SOC hoone vaheline ala	-	5.29	-	3.92
Pixel 5	STU hoone ja SOC hoone vaheline ala	2,22	2,28	0,89	1,44

Tabel 13. 13.05.2023 eksperimendi tulemused.

Seade	Asukoht	Toorandmete ja referentsandmete keskmine viga (meetrites)	Järeltöötlus andmete ja referentsandmete keskmine viga (meetrites)	Toorandmete ja referentsandmete standardhälve (meetrites)	Järeltöötlus andmete ja referentsandmete standardhälve (meetrites)
Xiaomi MI 8	TalTechi staadion	-	1,01	-	0,46
Pixel 5	TalTechi staadion	1.79	0,67	0,86	0,43

Analüüsides tabelis toodud tulemusi võib järeldada, et Pixeli puhul paranes positsioneerimise täpsus järeltöötluse käigus. Pixeli positsioneerimise täpsus oli TalTechi staadionil parem kui STU hoone ja SOC hoone vahelisel alal. Lisaks sellele on Pixeli puhul toorandmete standardhälve suurem kui järeltöötlus andmete standardhälve, mis näitab, et järeltöötlus aitas vähendada andmete hajuvust ja parandas tulemuste ühtlustumist. Xiaomi puhul ei saa seda kindlaks määrata, kas tulemus paranes või mitte, kuna seadme poolt kogutud andmed ei sisalda piisavas koguses Fix ridu, mis annavad telefoni siseselt arvutatud toorandmete koordinaate.

Eksperimendi 13.05.2023 sisendandmetel sooritati erinevaid katsetusi RTKPOST seadistustega. Nagu mainiti jaotises 4.3.1 on RTKPOSTil Kalmani filtri tööd mõjutavaid filtreid. Kiirenduse standardhälbe vaikeseadistus horisontaalselt on 3 m/s^2 ja vertikaalselt 1 m/s^2. Autorid katsetasid mõlema väärtuse langetamist nii 1 kui ka 0.5 peale. Väärtusi langetati seepärast, et andmete kogumisel hoiti ühtlast kiirust ja punkte peaks sellele vastavalt

parandama. Tulemused nendest muudatustest ei paranenud. Samuti katsetati iteratsiooni sätte muutmist vaikimiselt 1lt 2 ja 3 peale. Pixel seadmel paranes 3 iteratsiooni sättel keskmine viga 3 cm. Xiaomi seadmel jäi keskmine viga samaks.

Järgneva analüüsi peamine eesmärk oli välja selgitada, mis parameetrid ja mis väärtusega annavad tulemuse, mis jääks töös sätestatud eesmärgi lähedusse.

Eksperimentide käigus on analüüsitud mitmeid parameetreid ja nende olulisust töödeldud tulemustes. Analüüsiks kasutati skriptidest (5.1) saadud väljundaili. Vaadates jooniseid 24 ja 25 on tulemused lõiguti väga erinevad. Lõikude analüüsiks segmenteeriti tulemustest järjestikused punktid, mille keskmine hälve jäi alla 0.5 m ja punktid, kus hälve ulatus üle meetri. Analüüsimiseks kasutati seadmete toorandmeid, mis sisaldavad infot signaalide tugevuste, müra, ajavahemike ja nähtud satelliitide kohta. Esiteks võrreldi lõikudes nähtud satelliitide arve ja üritati mõista, kas suurem hulk satelliite mõjutab tulemusi positiivselt või negatiivselt. Ainuüksi satelliitide arvu võrdlus autoritele järelduseks vajalikku infot ei andnud. Järgmiseks võrreldi satelliidisüsteeme ja nende sagedusi. Hüpoteesiks oli, et võib leiduda korrelatsioon erinevatel sagedustel saadud satelliitide signaalide arvu ja keskmiste vigade tulemuste vahel. Autorid ei leidnud märkimisväärset erinevust lõikude vahel.

Analüüsides 13.05 eksperimendi Pixel seadme väljundfaili leiti, et 15% punktidest jäävad alla 30 cm (kaasaarvatud), 25% jäävad 30 ja 50 cm vahemikku ja 60% on ülejäänud, ehk üle 50 cm.

Skriptidest saadud väljundfaili lisati ka müra-võimsuse-tiheduse suhte väärtused (Cn0DbHz) iga rea kohta. Keskkonnas ja vastuvõtjas tekkinud taustamüra ja satelliidilt vastuvõetud signaali võimsuse suhe on signaali tugevuse indikaator. Seda mõõdetakse kandelaine müra-võimsuse-tiheduse suhtega (*carrierto-noise-power-density ratio*), mida suurem on väärtus, seda tugevam signaal [11]. Samuti lisati pseudokauguste väärtused, kuid analüüsides ei leitud nende väärtustega korrelatsiooni saavutatud veaga.

Autorid on oma analüüsist järeldanud, et erinevaid parameetreid üksikult analüüsides ei saavutata mõõtmiste kvaliteedi üle otsustamiseks praegu piisavalt infot.

Kokkuvõtvalt näitavad tulemused, et järeltöötluse kasutamine aitab parandada positsioneerimise täpsust ja vähendada andmete hajuvust. Samuti võib välja tuua, et seadmete positsioneerimise täpsus varieerub erinevates asukohtades. Avatud taevalaoutusega staadionil saavad seadmed paremaid andmeid võrreldes TalTechi STU hoone ja SOC hoone vahelise alaga, mis on ümbritsetud hoonete ja kõrgete puudega.

7 Kokkuvõte

Bakalaureusetöö eesmärgiks oli kasutades Android seadme sensoreid saavutada positsioneerimise kesmiseks veaks umbes 30 cm. Selleks, et saavutada soovitud täpsust töödeldi telefonide toorandmeid järeltöötlusel.

Kirjanduse ülevaade annab ülevaate täpse positsioneerimise olemasolevatest lahenditest, olemasolevatest tarkvaradest ja eri meetoditest. Samuti on läbi viidud eelmõõtmisi ja eksperimente, kus on kasutatud väljavalituid rakendusi ja meetodeid. Saadud andmeid ja tulemusi on analüüsitud ning järeldused dokumenteeritud.

Eelmõõtmised ja eksperimendid sooritati Google Pixel 5, Xiaomi MI8, OnePlus Nord, Samsung Galaxy S10 ja Huawei P30 telefonidega. Eelmõõtmiste ja eksperimentide käigus leiti, et OnePlus Nord, Samsung S10 ja Huawei P30 ei võimaldanud täpseid positsioneerimistulemusi saavutada telefonide võimekuste tõttu.

Toorandmed töödeldi .txt vormingust RINEX vormingusse kasutades avatud lähtekoodiga android_rinex programmi. Järeltöötluseks kasutati RTKLIB teegist RTKPOST programmi, kuhu sisestati telefonidelt kogutud toorandmed RINEX vormingus ja ESTPOSi baasjaamast saadud navigatsiooni ja vaatlusandmed. Selleks, et hinnata toorandmeid ja järeltöödeldud andmeid koguti referentsandmeid kasutatades Budget Survey GNSS Multiband (IP66) antenni ja simpleRTK2B Fusion ZED-F9R GNSS vastuvõtjat. Lõputöö raames kirjutati andmete analüüsimiseks kollektsioon pythoni skripte, mille abil viidi kõik andmed samale vormingule ning arvutati keskmine viga ja standardhälve. Samuti väljastatakse analüüsimiseks fail, mis sisaldab igal sekundil mõõdetud toorandmete koordinaate, referentsandmete koordinaate, viga nende vahel, nähtud satelliitide arve ja signaali tugevust mõjutavaid parameetreid. Jooksvaks analüüsiks kasutati QGIS tarkvara, kus visualiseeriti toorandmed, järeltöödeldud andmed ja referentsandmed.

Bakalaurusetöö esmast eesmarki saavutada keskmine viga alla 30 cm küll mõõtmistel tervikuna ei saavutatud. Parim tulem saavutati TalTechi staadionil Pixel seadmega, kus kogu eksperimendi keskmine viga oli 0,67 meetrit. Küll aga saavutati tulem lõiguti, kus kogu eksperimendist 15% punktidest langesid alla 30 cm. Edasise andmetöötlusega on võimalik määrata täpsust määravate parameetrite hinnangu.

Edaspidi on võimalik antud uuringu tulemuste põhjal sooritada põhjalikum andmeanalüüs

skriptist väljuva faili põhjal, et määrata erinevate parameetrite mõju mõõtmise tulemustele. Seejärel on võimalik arendada välja integreeritud rakendus, mis automatiseeriks reaalajas töötlusprotsessi ning väljastaks täpset asukohta robotmuruniidukile. Samuti soovitavad autorit lähemalt uurida Galileo HAS teenust, millega on võimalik positsioneerimise täpsust parandada.

Autorid soovivad omalt poolt tänada töö juhendajat Juhan-Peep Ernitsit, kes antud töö vältel oli tudengitele suureks toeks ja abiks järgmiste sammude planeerimisel. Lisaks tänavad autorid Maaameti Geodeesia osakonna juhatajat Karin Kollot, kes andis vajalikku informatsiooni ESTPOS teenuse ja GNSS põhitõdede kohta.

Kasutatud kirjandus

[1] Guenther Retscher and Till Weigert. “Assessment of a dual-frequency multi-GNSS smartphone for surveying applications”. In: *Applied Geomatics* 14.4 (2022), pp. 765–784. ISSN: 1866-928X. DOI: 10.1007/s12518-022-00467-7. URL: https://doi.org/10.1007/s12518-022-00467-7.

[2] Karl Hans Lorenz Ernits. “"Robotmuruniiduki disain kasutades tasakaaluliikuri komponente"”. Bakalaureusetöö. 2023. Loetud 13.04.2023.

[3] WEEE Foorum. *"International E-waste Day: Of 16 Billion Mobile Phones Possessed Worldwide, 5.3 Billion will Become Waste in 2022"*. URL: https://weee-forum.org/ws_news/of-16-billion-mobile-phones-possessed-worldwide-5-3-billion-will-become-waste-in-2022/. Loetud 02.05.2023.

[4] GSA. *Using GNSS Raw Measurements on Android Devices*. 2018. URL: https://galileognss.eu/wp-content/uploads/2018/05/Using-GNSS-Raw-Measurements-on-Android-devices.pdf. Loetud 20.11.2022.

[5] ABM Musa, Chris Baker, Emre Eftelioglu, and Amber Roy Chowdhury. “High-Accuracy GNSS Localization with Low-Cost”. In: *Proceedings of the 30th International Conference on Advances in Geographic Information Systems*. SIGSPATIAL ’22. Seattle, Washington: Association for Computing Machinery, 2022. ISBN: 9781450395298. DOI: 10.1145/3557915.3561031. URL: https://doi.org/10.1145/3557915.3561031.

[6] Addison Howard, Ashley Chow, Brian Julian, Dave Orendorff, Michael Fu, Mohammed Khider, Mohammed Khider, and Sohier Dane. *Google Smartphone Decimeter Challenge 2022*. 2022. URL: https://www.kaggle.com/competitions/smartphone-decimeter-2022. Loetud 26.02.2023.

[7] Maa-amet. *ESTPOS - riiklik GNSS satelliitandmete keskus*. 2022. URL: https://geoportaal.maaamet.ee/est/Ruumiandmed/ESTPOS-riiklik-GNSS-satelliitandmete-keskus-p838.html. Loetud 27.02.2023.

[8] GSC. *GALILEO HIGH ACCURACY SERVICE SERVICE DEFINITION DOCUMENT*. 2023. URL: https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Galileo-HAS-SDD_v1.0.pdf. Loetud 10.04.2023.

[9] EUSPA. *What is GNSS?* 2021. URL: https://www.euspa.europa.eu/european-space/eu-space-programme/what-gnss#:~:text=Global%20Navigation%20Satellite%20System%20. Loetud 12.04.2023.

[10] Hexagon. *What are Global Navigation Satellite Systems?* URL: https://novatel.com/tech-talk/an-introduction-to-gnss/what-are-global-navigation-satellite-systems-gnss. Loetud 11.04.2023.

[11] Artu Ellmann, Tarmo Kall, Karin Kollo, and Aive Liibusk. *GNSS - globaalne satelliitnavigatsioonisüsteem geodeetilise täpsusega asukohamääranguks*. 2022. URL: https://dspace.emu.ee/handle/10492/7902. Loetud 17.04.2023.

[12] Hexagon. *Precise Point Positioning (PPP)*. URL: https://novatel.com/an-introduction-to-gnss/resolving-errors/ppp. Loetud 1.05.2023.

[13] Hexagon. *Real-Time Kinematic (RTK)*. URL: https://novatel.com/an-introduction-to-gnss/resolving-errors/rtk. Loetud 11.04.2023.

[14] Zishen Li, Liang Wang, Ningbo Wang, Ran Li, and Ang Liu. "Real-time GNSS precise point positioning with smartphones for vehicle navigation". In: *Satellite Navigation* 3.1 (2022), p. 19. ISSN: 2662-1363. DOI: 10.1186/s43020-022-00079-x. URL: https://doi.org/10.1186/s43020-022-00079-x.

[15] J. Sanz Subirana, J.M. Juan Zornoza, and M. Hernández-Pajares. *Multipath*. 2011. URL: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Multipath. Loetud 13.04.2023.

[16] I.V.A. Leon. 2009. URL: https://www.ivaleon.ee/wp-content/pildid/erinevad-rtk-meetodid.pdf. Loetud 13.04.2023.

[17] *Multisystem real time precise-point-positioning*. 2011. URL: https://mycoordinates.org/multisystem-real-time-precise-point-positioning/. Loetud 17.04.2023.

[18] Hexagon. *Precise Point Positioning (PPP)*. URL: https://novatel.com/an-introduction-to-gnss/resolving-errors/ppp. Loetud 1.05.2023.

[19] Min Chen. *What is the PPP?* 2022. URL: https://www.tersus-gnss.com/tech_blog/what-is-the-ppp. Loetud 17.04.2023.

[20] Zishen Li, Liang Wang, Ningbo Wang, Ran Li, and Ang Liu. "Real-time GNSS precise point positioning with smartphones for vehicle navigation". In: *Satellite Navigation* 3.1 (2022), p. 19. ISSN: 2662-1363. DOI: 10.1186/s43020-022-00079-x. URL: https://doi.org/10.1186/s43020-022-00079-x.

[21] Farzaneh Zangenehnejad and Yang Gao. “GNSS smartphones positioning: advances, challenges, opportunities, and future perspectives”. In: *Satellite Navigation* 2.1 (2021), p. 24. ISSN: 2662-1363. DOI: 10.1186/s43020-021-00054-y. URL: https://doi.org/10.1186/s43020-021-00054-y.

[22] Sean Barbeau. *"Crowdsourcing GNSS features of Android devices"*. 2021. URL: https://barbeau.medium.com/crowdsourcing-gnss-capabilities-of-android-devices-d4228645cf25. Loetud 11.04.2023.

[23] Google. *GPSTest*. URL: https://github.com/barbeau/gpstest. Loetud 26.02.2023.

[24] Sean Barbeu. *GPS Measurement Tools*. URL: https://github.com/google/gps-measurement-tools. Loetud 26.02.2023.

[25] Sean Barbeau. *Data Output and Logging (GPSTest v4 and higher)*. 2023. URL: https://github.com/barbeau/gpstest/blob/master/LOGGING.md. Loetud 26.02.2023.

[26] Huawei. URL: https://consumer.huawei.com/en/support/content/en-us00687956/. Loetud 30.03.2023.

[27] Dave Orendorff, Frank van Diggelen, Julia Elliott, Michael Fu, Mohammed Khider, and Sohier Dane. *Google Smartphone Decimeter Challenge*. 2021. URL: https://www.kaggle.com/c/google-smartphone-decimeter-challenge. Loetud 26.02.2023.

[28] Tim Everett. *Google Smartphone Decimeter Challenge*. 2022. URL: https://rtklibexplorer.wordpress.com/2022/01/10/google-smartphone-decimeter-challenge. Loetud 26.02.2023.

[29] Tim Everett, Trey Taylor, Dong-Kyeong Lee, and Dennis M. Akos. “Optimizing the Use of RTKLIB for Smartphone-Based GNSS Measurements”. In: *Sensors* 22.10 (2022). ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s22103825. URL: https://www.mdpi.com/1424-8220/22/10/3825.

[30] Yong Heo, Thomas Yan, Samsung Lim, and Chris Rizos. “International standard GNSS real-time data formats and protocols”. In: *International Global Navigation Satellite Systems Society IGNSS Symposium 1–3 December 2009, Surfers Paradise, Qld, Australia*. 2009, pp. 1–17.

[31] GMV. *Interfaces and Protocols*. 2013. URL: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Interfaces_and_Protocols. Loetud 26.02.2023.

[32] IGS. *RINEX Version 3.04*. 2018. URL: http://acc.igs.org/misc/rinex304.pdf. Loetud 04.03.2023.

[33] Husqvarna. “Husqvarna EPOS”. In: (). URL: https://www.husqvarna.com/ee/uurige-ja-avastage/husqvarna-epos/. Loetud 19.04.2023.

[34] *Networked Transport of RTCM via Internet Protocol (Ntrip)*. URL: https://gssc.esa.int/wp-content/uploads/2018/07/NtripDocumentation.pdf. Loetud 10.04.2023.

[35] Rtk2go. *rtk2go*. URL: http://rtk2go.com/. Loetud 10.04.2023.

[36] Rtk2go. *NTRIP Caster Table*. URL: http://monitor.use-snip.com/?hostUrl=rtk2go.com&port=2101. Loetud 10.04.2023.

[37] Ardusimple. *Centimeter Precision GPS/GNSS - RTK Explained*. URL: https://www.ardusimple.com/rtk-explained/. Loetud 10.04.2023.

[38] EUSPA. *Galileo High Accuracy Service (HAS)*. URL: https://www.gsc-europa.eu/galileo/services/galileo-high-accuracy-service-has. Loetud 10.04.2023.

[39] GMV. *Galileo High Accuracy Service (HAS)*. 2011. URL: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Galileo_High_Accuracy_Service_(HAS). Loetud 10.04.2023.

[40] Oliver Horst. “Implementation of an Open-Source Software Suite for the Galileo High Accuracy Service”. English. Master’s thesis. Aalto University. School of Electrical Engineering, 2021, p. 1. URL: http://urn.fi/URN:NBN:fi:aalto-202202061786. Loetud 10.04.2023.

[41] Sean Barbeau. *RTKLIB Manual: Demo5 version*. 2021. URL: https://rtkexplorer.com/pdfs/manual_demo5.pdf. Loetud 09.02.2023.

[42] Tim Everett. *RTKLIB: Optimized Receiver Dynamics*. 2016. URL: https://rtklibexplorer.wordpress.com/2016/06/22/rtklib-optimized-receiver-dynamics/. Loetud 14.05.2023.

[43] Harveen Singh Chadha. *Kalman Filter Interview*. 2018. URL: https://towardsdatascience.com/kalman-filter-interview-bdc39f3e6cf3. Loetud 14.05.2023.

[44] Harveen Singh Chadha. *Extended Kalman Filter: Why do we need an Extended Version?* 2018. URL: https://towardsdatascience.com/extended-kalman-filter-43e52b16757d. Loetud 14.05.2023.

[45] Chaowalit Netthonglang, Thayathip Thongtan, and Chalermchon Satirapod. “GNSS Precise Positioning Determinations Using Smartphones”. In: *2019 IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems (APCCAS)*. 2019, pp. 401–404. DOI: 10.1109/APCCAS47518.2019.8953132.

[46] Sean Barbeau. *"GNSS, Interrupted: The hidden Android setting you need to know"*. 2021. URL: https://barbeau.medium.com/gnss-interrupted-the-hidden-android-setting-you-need-to-know-d812d28a3821. Loetud 25.03.2023.

Lisa 1 – Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks[1]

Meie (Liisi Nõojärv, Andero Raava, Stina Maria Tohver),

1. Anname Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose "Android seadme sisese GNSS sensoriga asukoha määramise täpsustamise püsijaamade andmetega", mille juhendaja on Juhan-Peep Ernits
   1.1. reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
   1.2. üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. Oleme teadlikud, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autoritele.
3. Kinnitame, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

22.05.2023

[1] Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingulise tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.