

TARTU ÜLIKOOL
Arvutiteaduse instituut
Informaatika õppekava

Siim Turban

**Siseruumide positsioneerimissüsteem IN100
BLE nanomajakatega**

Bakalaureusetöö (9 EAP)

Juhendaja:
Alo Peets

Tartu 2025

Siseruumide positsioneerimissüsteem IN100 BLE nanomajakatega

Lühikokkuvõte:

Töös hinnati madala energiatarbega Bluetooth-protokolli (BLE) ja spetsiaalsete IN100 BLE NanoBeacon majakate sobivust siseruumide positsioneerimiseks, testides lahendust iOS-platvormil. Positsioneerimine saavutati RSSI-põhise trilateratsiooni ja nutitelefonil inertsaalsensoritel põhineva PDR algoritmi abil, ühendades tulemused erinevaid usaldusklasside kasutades. Rakenduse väljundiks on interaktiivne kaart, mis funktsionaalsuselt sarnaneb tänapäevastele kaardirakendustele. Süsteemi testiti Tartu Ülikooli Delta hoones ja koduses keskkonnas. Lisaks hinnati süsteemi rakendamiseks vajalikke tingimusi, nagu majakate paigutuse tihedust, signaalitaset ja hooldusvajadust ning analüüsiti lahenduse kulukust, arvestades majakate riistvarakulu ning paigaldus- ja seadistusaega. Tulemused kinnitasid, et BLE-majakatel põhinev võrgustik on tehniliselt sobiv ning kuluefektiivne alternatiiv Wi-Fi-põhistele süsteemidele.

Võtmesõnad:

BLE, mobiilirakendus, iOS, trilateratsioon, PDR, siseruumide positsioneerimine

CERCS:

P170, Arvutiteadus, arvutusmeetodid, süsteemid, juhtimine

T180, Telekommunikatsioonitehnoloogia

Indoor Positioning System Using IN100 BLE NanoBeacons

Abstract:

This thesis evaluates the suitability of the Bluetooth Low Energy (BLE) protocol and dedicated IN100 BLE NanoBeacons for indoor positioning, implementing and testing the solution on the iOS platform. Position estimates are produced by fusing an RSSI-based trilateration method with a smartphone inertial-sensor based Pedestrian Dead Reckoning (PDR) algorithm. The results are weighted through dynamic confidence classes. The application presents the result on an interactive map, where its functionality is comparable to modern navigation apps. The system was tested both in the University of Tartu's Delta building and in a home environment. Examined deployment parameters were beacon-density, signal strength and maintenance, also a cost analysis of the covered hardware, installation and configuration effort. The findings confirm that a BLE-beacon network is a technically viable and cost-effective alternative to Wi-Fi-based indoor positioning systems.

Keywords:

Bluetooth low energy, mobile app, iOS, trilateration, dead reckoning, indoor positioning

CERCS:

P170, Computer science, numerical analysis, systems, control

T180, Telecommunication engineering

Sisukord

Sissejuhatus	5
1 Taustainfo	6
1.1 BLE ja Wi-Fi positsioneerimine	6
1.1.1 Positsioneerimiseks kasutatavad sagedusalad	6
1.1.2 Positsioneerimiseks kasutatavad andmed	6
1.1.3 Wi-Fi ja BLE ühendamine	7
1.2 Positsioneerimise algoritmid	7
1.2.1 Lihtsad algoritmid	7
1.2.2 Trilateratsiooni kasutamine	8
1.2.3 Inertsiaalse navigeerimise kasutamine	10
1.2.4 Algoritmide kombineerimine	11
1.3 IN100 nanomajakate kasutamine positsioneerimisel	11
1.3.1 Majakatena valitud arendusplaatide ülevaade	11
1.3.2 IN100 nanomajakate tehniline ülevaade	13
1.3.3 IN100 majaka antenni ja sensorite valik positsioneerimise kontekstis	13
1.3.4 IN100 majakate seadistamine	14
1.4 Delta hoones olemas olevad seadmed ja varasemad tööd	14
1.4.1 G. Illuse loodud Wi-Fi positsioneerimissüsteem Delta hoones	14
1.4.2 A. Slavini loodud Wi-Fi positsioneerimise süsteem	14
1.4.3 N. Bahhiri loodud Wiggle'i põhjal töötav positsioneerimise mobiilirakendus	14
1.5 Käesoleva töö uuenduslikkus ja arendusvõimalused	15
2 Valminud lahenduse kirjeldus	16
2.1 BLE majakate ettevalmistus ja seadistamine	16
2.2 iOS rakenduse arendus positsioneerimissüsteemi kasutamiseks	18
2.2.1 Rakenduse arhitektuur	18
2.2.2 Kaardi ja positsiooni kuvamine rakenduses	20
2.2.3 Majakate ja PDR andmete reaajas lugemine	21
2.3 Positsioneerimisalgoritmide praktiline rakendamine	21
2.3.1 Trilateratsiooni algoritmide kasutamine	21
2.3.2 Inertsiaalse navigeerimise rakendamine	22
2.3.3 Kombineeritud algoritmide rakendamine ja tulemuslikkuse hindamine	22
3 Tulemused	24
3.1 Eksperimentide läbiviimine ja andmekogumine	24
3.1.1 Korterite katsed	24

3.1.2	Delta hoone katsed	24
3.1.3	Andmekogumine ja mõõtmiste kirjeldus	25
3.1.4	Apple Watch'i test	25
3.2	Tulemuste analüüsimine ja järeldused	25
3.2.1	BLE vs PDR meetodi täpsus	25
3.2.2	Kombineeritud lähenemise tulemused	27
3.2.3	Rakenduse töökindlus ja jõudlus	28
3.2.4	Ebatäpsuste peamised põhjused	28
3.2.5	Kuluarvestus ja süsteemi praktilisus	29
3.2.6	Edasised arendusideed	29
	Kokkuvõte	31
	Viidatud kirjandus	32
	Lisad	35
	Lisa 1 Rakenduse osaline töövoog diagramm	35
	Lisa 2 Rakenduse jõudluse analüüs	36
	Lisa 2.1 Energiatarbe analüüs	36
	Lisa 2.2 Mälukasutuse analüüs	36
	Lisa 2.3 Protsessori kasutuse analüüs	36
	Litsents	37

Sissejuhatus

Inimesed veedavad hinnanguliselt umbes 80% oma ajast siseruumides (Simões et al., 2020). Seetõttu on ruumisisesed positsioneerimislahendused muutumas üha olulisemaks erinevates valdkondades, alates kaubanduskeskustes navigeerimisest kuni tööstuslike rakendusteni, nt laohoonete vara jälgimine. Traditsiooniline globaalne satelliitnavigatsioon (nt GPS) ei toimi hoonetes usaldusväärselt, sest hoonete seinad ja ehitus nõrgendavad oluliselt satelliitsignaale. Tekib vajadus alternatiivsete siseruumide positsioneerimissüsteemide järele, mis suudaksid pakkuda piisavat täpsust ja töökindlust kohtades, kus GPS-signaal on puudulik.

Siseruumide positsioneerimiseks on välja töötatud mitmeid tehnoloogiaid ja meetodeid. Levinumateks on Wi-Fi-põhised lahendused, *Bluetooth Low Energy* (BLE) majakate põhised lahendused, ultra-lairiba (UWB) signaalid, samuti teised lähenemised nagu siseruumide geomagnetism, optilised süsteemid ja inertsiaalsed andurid. Igal neist on omad tugevused ja nõrkused, nagu Leitch, jt (2023) on uurinud, et näiteks Wi-Fi on atraktiivne, kuna Wi-Fi tugipunkte leidub juba hoonetes rohkesti, kuid täpse positsioneerimise saavutamiseks võib vaja minna keerukamat seadistamist (nt sõrmejälgede ehk signaali kaartide loomist). UWB pakub väga kõrget täpsust, isegi kuni mõne sentimeetriini, kuid nõuab eraldi riistvara paigaldust ja seetõttu on kulukam ning vähem levinud. BLE põhised lahendused on viimasel kümnendil kiiresti populaarsust kogunud, sest kõik kaasaegsed nutiseadmed toetavad BLE-d ning majakad on odavad ja energiasäästlikud. BLE majakad on väikesed patareitoitel seadmed, mis perioodiliselt levitavad raadiosignaale, mille järgi saab vastuvõtja, nt nutitelefon, oma asukohta hinnata (Leitch et al., 2023). BLE tehnoloogia eeliseks on lisaks madalale maksumusele väga väike energiatarve, mis võimaldab teatud olukordades patareitoitel majakatel töötada mitu aastat järjest (InPlay, 2022b). See muudab BLE majakad sobivaks laialdaseks kasutamiseks siseruumide positsioneerimisel.

Antud bakalaureusetöö keskendub BLE majakate rakendamisele siseruumide positsioneerimissüsteemis, kasutades InPlay NanoBeacon IN100 ning testida seda Tartu Ülikooli Delta hoone näitel.

Töö eesmärkideks on:

- Sobivuse hindamine, ehk hinnata ja testida, kuidas sobivad IN100 BLE nanomajakad siseruumide positsioneerimissüsteemi loomiseks võrreldes seniste lahendustega. Eelkõige tuvastada BLE majakate kasutamise eelised ja puudused analüüsides positsioneerimise täpsust ning vaadeldes lahenduse paindlikust ja kuluefektiivsust.
- Interaktiivne iOS-rakendus, ehk valmis saada nutitelefonil töötav rakendus, mis kasutab BLE majakate signaale ja telefoni sisemisi andureid kasutaja asukoha määramiseks ning visualiseerib tulemused kaardil. Seejärel hinnata lahenduse kasutajasõbralikkust, jõudlust ja praktilist sobivust siseruumides positsioneerimisel.
- Tingimuste ja kulukuse hindamine, ehk selgitada, millised on süsteemi toimimiseks vajalikud tingimused (nt majakate tihedus, signaali tugevus, majakate hooldus, jne) ning hinnata lahenduse kulukust, kus kulukuse all peetakse silmas nii majakate riistvarakulu (17 majakat), kui nende paigaldamise ja seadistamise ajakulu. Eesmärgiks on mõista, kas BLE majakate võrgustik on rahaliselt ja operatiivselt otstarbekas võrreldes alternatiividega.

1 Taustainfo

Siseruumides täpne positsioneerimine muutub järjest vajalikumaks, näiteks navigeerimine suurmajades või tootelogistikas. Kuna välist satelliitnavigatsiooni süsteemi, näiteks GPS-i, siseruumides täpselt kasutada ei saa, tuleb uurida juba siseruumides kasutusel olevaid protokolle nagu Wi-Fi ja BLE, analüüsides nende eeliseid ja puuduseid. Töö käsitleb põhjalikumalt IN100 BLE nanomajakaid, mis annavad efektiivse lahenduse siseruumide positsioneerimiseks. Lisaks kirjeldatakse positsioneerimisalgoritme ning meetodeid majakate optimaalseks paigutamiseks. Lõpuks analüüsitakse Delta majas varasemalt teostatud positsioneerimisprojekte, et tuvastada nende tugevused ja puudujäägid.

1.1 BLE ja Wi-Fi positsioneerimine

Siseruumide positsioneerimises kasutatakse tihti Wi-Fi-t või BLE-d, sest Wi-Fi taristu on laialdaselt kasutusel ning BLE pakub energiasäästlikku ning efektiivset lahendust. Mõlemad tehnoloogiad kasutavad 2,4GHz sagedusala, mis võimaldab neid omavahel kombineerida hübriidsüsteemide loomiseks (Leitch et al., 2023). Wi-Fi positsioneerimine kasutab pääsupunktide saadetud pakette, mis sisaldavad RSSI-d (signaali tugevuse näitaja), SSID-d (võrgu nimi), BSSID (unikaalne identifikaator) ja signaali saatmise aega (Ferro & Potorti, 2005). BLE majakad edastavad lihtsamaid pakette, mis sisaldavad ainult RSSI-d ja saatmise aega.

1.1.1 Positsioneerimiseks kasutatavad sagedusalad

Ferro ja Potorti (2005) järgi on sagedusala 2,4GHz litsentseerimata ja lubatud juhtmevabaks kommunikatsiooniks. Wi-Fi ja Bluetooth tehnoloogiad kasutavad seda sagedust, sest see annab hea tasakaalu signaali ulatuse ja kiiruse vahel. Nende sõnul on Wi-Fi jaoks olemas veel teine 5GHz sagedusala, mis pakub paremat andmeedastuskiirust, aga väiksemat leviala ulatust (Ferro & Potorti, 2005).

Lisaks Wi-Fi ja BLE tehnoloogiale kasutatakse positsioneerimiseks UWB-d ehk ülilairibatehnoloogiat, mis võimaldab suuremat leviala ja kuni 10cm ulatuses täpsust (Dabove et al., 2018). UWB on maailmas küllaltki levinud, sest Apple-i seadmed ja AirTag tehnoloogia põhineb osaliselt sellel. Siiski ei ole UWB-d populaarne kasutada eraldatud positsioneerimise süsteemides, sest Apple ei toeta ettevõtteväliseid lahendusi. Lisaks on UWB tehnoloogial põhineva süsteemi ise üles seadmine keerukas, tänu seadmete kõrgemale hinnale ja piiratud UWB toele, mida pakuvad ainult uuemad Android- ja iPhone-seadmed (Coppens et al., 2022).

1.1.2 Positsioneerimiseks kasutatavad andmed

Wi-Fi ja BLE positsioneerimine kasutab pääsupunktide ja majakate edastatud andmeid. Kõige tähtsam neist on RSSI ehk vastuvõetud signaali tugevuse indikaator, mis näitab meile signaali tugevust või umbkaudset kaugust. See on vastuvõetud signaalil alati arvutatav, aga ei ole alati täpne, sest paksud seinad ja samal sagedusel liikuvad signaalid segavad RSSI väärtuseid märgatavalt (Janczak et al., 2022).

Zhuang, jt on leidnud, et keerulisemate positsiooniarvutuste jaoks kasutatakse RTT-d (*round trip time*) ja ToF-i (*time of flight*). RTT on aeg mis kulub signaali saatmiseks ja vastuse vastuvõtmiseks. ToF mõõdab signaali liikumise aega ühes suunas. See on võimalik, kui pääsupunkt edastab andmetega täpse aja, millal signaal saadeti. Nende järgi on ToF protokollil praktiline rakendamine keeruline, sest nõuab seadmete vahel väga täpselt sünkroonitud kellasid (Zhuang et al., 2016).

Wi-Fi andmepakette kasutades on oluline pääsupunkti eristamine teistest. Selle jaoks tuleb andmete pakettis kaasata SSID (*service set identifier*) ja BSSID (*basic service set identifier*).

SSID on võrgu nimi ja BSSID on pääsupunkti unikaalne identifikaator (Ferro & Potorti, 2005). BLE majakatel just neid väärtuseid ei ole, kuid kaasatakse seadme unikaalne identifikaator ja välja saadetavad reklaampaketid on vastavalt vajadusele kohandatavad (Janczak et al., 2022).

1.1.3 Wi-Fi ja BLE ühendamise

Järgnev peatükk tugineb Leitchi, jt kirjutatud artiklile. Wi-Fi ja BLE tehnoloogia samaaegne kasutamine lisab positsioneerimise süsteemidele täpsust ja töökindlust. Wi-Fi pakub siseruumide süsteemile hea aluse, sest Wi-Fi pääsupunkte on majas palju. Nõrkusteks on signaali segunemine ja halvem levi mõnes maja osas, näiteks nurkades. Nõrkuste parandamiseks on võimalik katmata jäänud kohtadesse paigutada BLE majakad, mis täpsustaksid seadme asukohta (Leitch et al., 2023).

Kasutatud protokollide ühendamiseks saame kasutada andmete sidumist (ingl. k. *Data Fusion*). See võimaldab süsteemil vähendada tundlikust RSSI väärtuste kõikumise suhtes ja parandada süsteemi töökindlust siseruumides. Üks andmete sidumise viis on hübriidsidumine, kus kasutame ära Wi-Fi vastuvõetud pakettide abil tehtud robustse paigutuse ja moondame selle kätte saadud BLE pakettide põhjal täpsemaks (Leitch et al., 2023).

Andmete sidumiseks kasutatakse Kalman filtrit, mis on matemaatiline algoritm hindamaks süsteemi umbkaudset asukohta, kui saadaval on ainult häiritud või poolikud mõõtetulemused. Algoritmi töö käigus toimub pidev andmete kogumine ning nende põhjal seadme uue asukoha ennustamine, uute andmete vastuvõtt ja positsiooni korrigeerimine (Leitch et al., 2023).

1.2 Positsioneerimise algoritmid

Positsioneerimise süsteemi täpsus sõltub andmete töötlemiseks kasutatud algoritmidest. Lihtsamad algoritmid muudavad (näiteks RSSI või ToF) väärtused umbkaudseteks asukohtadeks. Keerulisemaid algoritme on vaja, et arvestada pakette segavaid signaale või seinte mõju. Lisaks on algoritmid nagu trilateratsioon ja triangulatsioon, mis kasutavad kauguse ja nurga mõõtmisi mitmest pääsupunktist või majakast, et määrata täpne asukoht (Lee et al., 2014). Järgnevalt antakse ülevaade erinevatest algoritmidest alates lihtsatest meetoditest kuni keerukamate geomeetriliste ja inertsiaalsetel anduritel põhinevate lahendusteni.

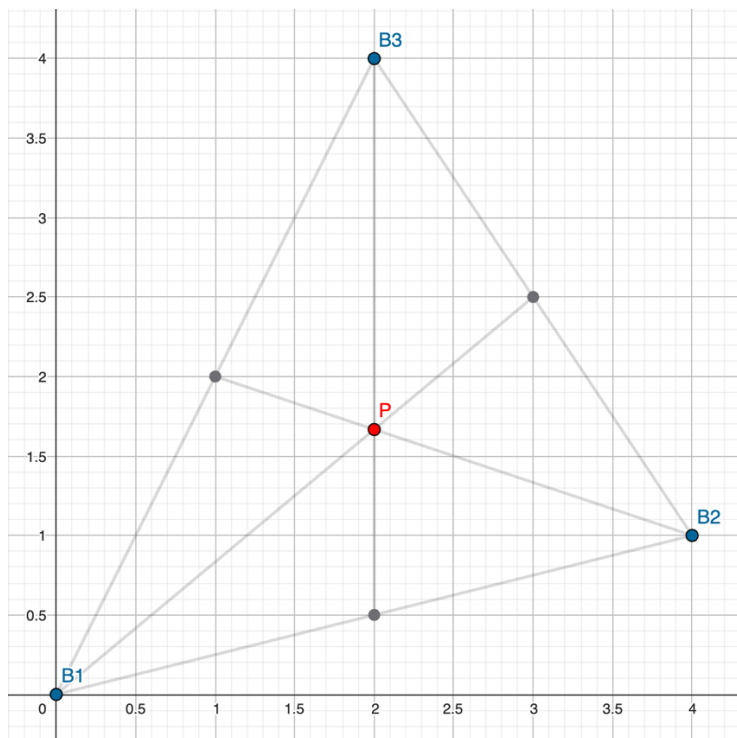
1.2.1 Lihtsad algoritmid

Lihtsaim positsioneerimisele lähenemine on läheduspõhine meetod (ingl. *proximity method*), mis eeldab, et kui vastuvõtja kuuleb mõnda saatjat, peab ta asuma selle lähedal (Simões et al., 2020). Praktikast tähendab see, et mobiilseadme asukoht hinnatakse lihtsalt lähima tuvastatud majaka või pääsupunkti asukohaks. Kui korraga on kuuldav mitu signaali, valitakse tugevaim signaal ja seega oletatakse asukoht vastava saatja juures (Simões et al., 2020). Näiteks kui seade kuuleb majakat S1 tugevamalt kui teisi, siis järeldatakse, et kasutaja asub majaka S1 vahetus läheduses. See meetod on väga kiire ja lihtne, kuid annab vaid väga üldise tulemuse, ehk täpsus on piiratud saatja leviala ulatusega. Mida suurem on majaka või pääsupunkti katvusala, seda suurem on võimalik viga, kuna kasutaja võib asuda selle piirkonna suvalises punktis (Simões et al., 2020). Täpsuse parandamiseks tuleks katvusalasid vähendada, mis tähendab rohkemate majakate paigaldust.

Teine lihtne lähenemine on tsentroidmeetod. Kui seade kuuleb mitut lähikonnas asuvat majakat, võib tema asukoha hinnata nende majakate koordinaatide keskmisena: näiteks kui korraga on levi kolme majakaga, arvutatakse kasutaja asukoha koordinaadid nende majakate positsioonide geomeetrilise keskmikuna (Yan et al., 2024). Selline lähenemine arvestab mitme signaali olemasolu, kuid ei kasuta otseselt kaugusmõõtmisi, eeldatakse lihtsalt, et kasutaja asub

kusagil kuuluvusala ühisosas. See on lihtne arvutus, kuid ta võib ebatäpseks osutuda, kui signaalide tugevused on väga erinevad või majakad paiknevad ebahühtlaselt (Yan et al., 2024).

Joonis 1 illustreerib tsentroidmeetodi põhimõtet: kolm BLE-majakat (B1, B2, B3) paiknevad tasapinnal fikseeritud koordinaatidel. Nende majakate geomeetriline keskpunkt P on kujutatud punase märgiga ning tähistab kasutaja hinnangulist asukohta. Kuna meetod ei kasuta kaugusraadiuseid, piisab majakate asukohtade teadmisest. Joonisel on näha, et kui majakad paiknevad suhteliselt sümmeetriliselt, jääb keskpunkt tõenäoliselt tegelikule asukohale lähedale. Juhul aga, kui majakate asetused on ebakorrapärased või signaalitugevused erinevad, siis kaldub keskpunkt eemale kasutaja tegelikust asukohast, mis toob välja meetodi lihtsuse kõrval selle täpsuspiirangud.



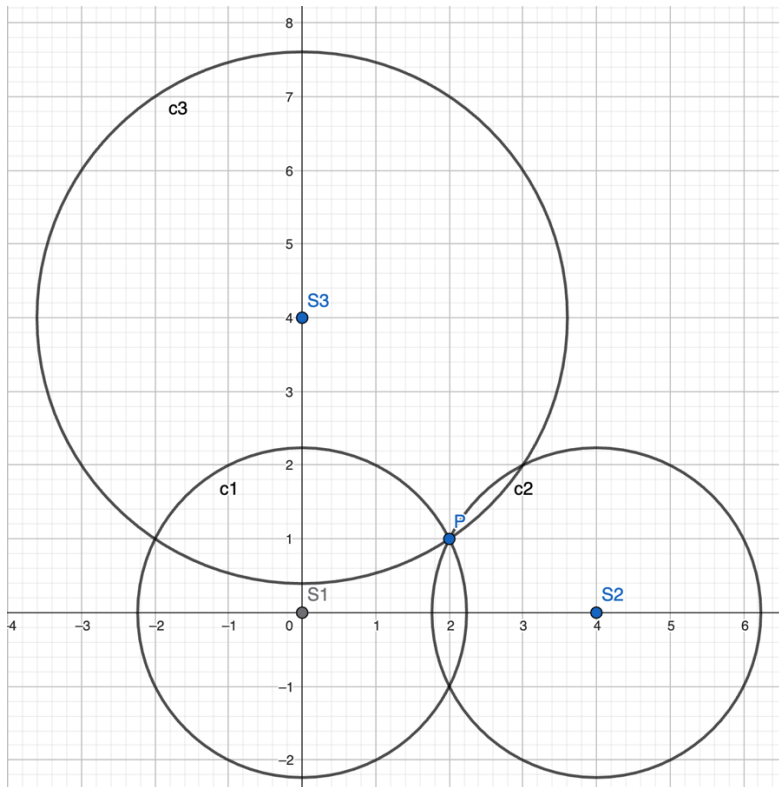
Joonis 1. Tsentroidmeetodi põhimõtte ja arvutusjooned. Kolme majaka (B1, B2, B3) koordinaatide keskpunkt (P) annab vastuvõtja ligikaudse asukoha.

Lihtsate algoritmide eelis on nende kiirus ja väike nõudlikkus, mis tähendab, et neid saab jooksutada piiratud võimsusega seadmetes ning need sobivad hästi suure kasutajate arvu korral (Simões et al., 2020). Samas on nende täpsus madalam, näiteks ainult tugevaima signaali alusel positioneerides võib viga olla suur, eriti kui saatjate levialad on laiad. Seetõttu kasutatakse lihtsaid meetodeid eelinfo andmiseks või kombineeritakse neid keerukamate lähenemistega, mis korrigeerivad esialgset hinnangut.

1.2.2 Trilateratsiooni kasutamine

Trilateratsioon on geomeetriline meetod, mida kasutatakse asukoha leidmiseks teadaolevate tugipunktide kaugusmõõtmiste abil. Kui on teada kaugus vähemalt kolmelt fikseeritud asukohaga saatjalt (nt BLE-majakalt), saab vastuvõtja positsiooni leida kui nende kaugusringide lõikepunkti (Yan et al., 2024). Tasapinnalises ruumis on ideaalis kolmelt majakalt mõõdetud kauguste põhjal kaks võimalikku lõikepunkti, praktikas saab ühe neist välistada (nt asukoht hoone sees vs väljas). Joonis 2 illustreerib trilateratsiooni põhimõtet: kolm majakat (S1, S2, S3) paiknevad teadaolevatel positsioonidel ning iga majaka ümber on

kujutatud ring, mille raadius võrdub hinnangulise kaugusega vastuvõtjani. Kõigi kolme ringi ühiseks lõikepunktiks on positsioon P, mis vastab kasutaja hinnangulisele asukohale.



Joonis 2. Trilateratsiooni geomeetiline põhimõte. Kolme majaka (S1, S2, S3) signaalide leviala ringide lõikepunkt (P) annab vastuvõtja eeldatava asukoha.

Trilateratsiooni arvutamiseks kasutatakse kaugusmõõtmisi, mis saadakse näiteks RSSI põhjal. Matemaatiliselt võib selle väljendada võrrandisüsteemina: kui (x, y) on tundmatu asukoht ning majakate koordinaadid on (x_i, y_i) ja kaugushinnangud d_i (kus $i = 1,2,3$), siis peavad kehtima võrdused:

$$(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 = d_i^2, \quad i = 1,2,3$$

Reaalsetes oludes sisaldab d_i veamarginaali, mistõttu ranget lõikepunkti tavaliselt ei leidu, selle asemel leitakse punkt, mis minimeerib vigade ruutude summa (väikseimate ruutude meetod) (Yan et al., 2024). Kolme majaka korral saab lahendi leida arvutuslikult kahe ringvõrrandi lahutamise teel ning kolmanda abil kontrollida tulemust, suurema majakate arvu puhul rakendatakse numbrilist optimeerimist, et leida parim sobivus.

Trilateratsiooni eelised võrreldes lihtsate meetoditega on märksa parem täpsus olukorras, kus kaugushinnangud on usaldusväärsed ja see, et meetod arvestab mitme tugipunkti infot üheaegselt ning suudab seetõttu asukoha määrata seal, kus üksikud majakad ei kata kogu piirkonda. Samas sõltub trilateratsiooni täpsus otseselt kaugushinnangute kvaliteedist. RSSI põhised kaugusarvutused on sageli ebatäpsed, kuna raadiosignaali tugevus kõigub keskkonnatingimuste tõttu. Seintes, põrandates ja inimkehades neeldumine ning peegeldused tekitavad olukorra, kus signaali tugevuse ja tegeliku vahemaa suhe on müra tõttu moonutatud (Simões et al., 2020). Sellest tulenevalt võib trilateratsiooni tulemus eksida mitu meetrit, kui ei kasutata täiendavaid parandusi või keskkonnamudeleid.

Trilateratsiooni rakendamine nõuab, et majakate ja vastuvõtja kõrguste erinevus oleks kas teada või ebaoluline, see tähendab sisetingimustes eeldamist, et kõik seadmed asuvad ligikaudu samal korrusel. Kui kõrguste vahe on oluline, tuleks kasutada ruumilist trilateratsiooni nelja

või enama tugipunktiga, mis on oluliselt keerukam. BLE majakatega süsteemis see väga suur probleem ei ole, sest signaali levik läbi põrandate jääb ebatäpseks, ehk teistel korrustel olevate majakate signaale tuleks ignoreerida.

1.2.3 Inertsiaalse navigeerimise kasutamine

Dead reckoning ehk liikumise integreerimine on meetod, kus hetkeline asukoht arvutatakse varasemast asukohast lähtudes, liites juurde vahepealsed liikumisvektorid nagu suund, kiirus ja aeg. Teisisõnu, kui kasutaja algpositsioon on teada, siis igal sammul uuendatakse tema asukohta läbitud vahemaa ja liikumissuunaga. Nutiseadmete kontekstis tähendab see, et telefoni sisemisi inertsiaalandureid, nagu kiirenduse mõõtjat, güroskoopi ja magnetomeetrit kasutades hinnatakse iga sammu pikkust ning suunda ning summeeritakse need, et saada uus positsioon. Seda lähenemist kutsutakse PDR-meetodiks (ingl. *Pedestrian Dead Reckoning*).

PDR'i suurim probleem on vigade akumulatsioon ajas (Simões et al., 2020). Iga väiksema viga sammu pikkuse hinnangus või suuna määramises koguneb järgmiste sammudega, põhjustades aja jooksul üha suureneva positsioonihälbe. Näiteks kui iga sammu suuna määramisel on vaid mõne kraadine viga, võib mõnekümne sammuga koguneda mitme meetrine kõrvalekalle tegelikust trajektoorist (Simões et al., 2020). Ilma parandusteta võib PDR meetodiga positsioon triivida, mistõttu üksinda ei taga see pika aja vältel usaldusväärset tulemust.

Dead reckoning'u praktiliseks kasutamiseks kombineeritakse seda tihti mõne absoluutse positsioneerimismeetodiga, mis aeg-ajalt vigu korrigeerib. Siseruumides võib PDR'i kombineerida BLE-majakate positsioneerimisega: majakatelt saadud asukohainfo annab perioodiliselt ankurpunkti, mille abil PDR arvutust lähtestada või korrigeerida. Sellist lahendust uurivad mitmed kaasaegsed tööd, kus on näidatud, et inertsiaalandurite ja BLE andmete ühildamine suudab oluliselt parandada positsioneerimise täpsust (Pan et al., 2025). Näiteks Pan jt. (2025) teatasid, et kombineerides nutitelefoniga PDR-algoritmi BLE-majakate abil arvutatud positsioonidega ja rakendades liitmiseks spetsiaalset filtrit, saavutati keskmine veapiir ~1,2 meetrit, mis on ~28% parem kui ainult ühe meetodi kasutamisel (Pan et al., 2025).

Pan jt. on matemaatiliselt kirjeldanud *Dead Reckoning*'ut sammude kaupa uueneva summana. Kui (x_{k-1}, y_{k-1}) on eelmine asukoht, Δs_k on hinnatud sammupikkus ja ψ_k on liikumissuund k -ndal sammul, siis uus asukoht (x_k, y_k) saadakse:

$$x_k = x_{k-1} + \Delta s_k \cos \psi_k, \quad y_k = y_{k-1} + \Delta s_k \sin \psi_k$$

Seega koguneb viga igal sammul, kui Δs_k või ψ_k hinnang on vigane. Inertsiaalandurite müra ja triiv põhjustavad olukorra, kus ilma välisloeta positsioon aja jooksul triivib (Pan et al., 2025).

Dead reckoning'u eelis on selle autonoomsus, mis tähendab see toimib ilma ühegi välise signaalita ning positsiooni saab pidevalt uuendada kõrge sagedusega (Qian et al., 2015). Sisetingimustes on see väärtuslik omadus, näiteks liftis või signaalivarjuga alal liikumisel. Siiski peab arvestama, et usaldusväärse tulemuse saab lühiajaliselt, pikemaks jälgimiseks on vaja kombinatsiooni mõne teise meetodiga. Nutitelefonide puhul kasutatakse PDR-i tihti koos Wi-Fi või BLE positsioneerimisega, samuti on uuritud PDR-i ühendamist näiteks sisekaardirakendustega, kus kaardiga kattuvuse kontrollimise meetod piirab triivi lubatud teede või koridoridega (Pan et al., 2025). Üldiselt on PDR – tänu parematele anduritele ja nutikamale algoritmidele (nt masinõppe abil kohandatakse sammudetektorit iga kasutaja kõnnakule) – muutumas aina täpsemaks; kuid selle toetumine suhtelisele liikumisele tähendab, et täpsuse tagamiseks on vaja ankurdatud lähtepunkte (Pan et al., 2025; Qian et al., 2015).

1.2.4 Algoritmide kombineerimine

Siseruumides asukoha määramisel alustatakse sageli lihtsatest signaalipõhistest meetoditest, nagu lähima majaka asukohast lähtumine või tsentroidmeetod, mis on kiired ja arvutuslikult kerged, kuid ei paku parimat täpsust (Simões et al., 2020). Geomeetrilised algoritmid, näiteks RSSI-põhine trilateratsioon, lisavad arvutusse mitme ankrupunkti info ja parandavad täpsust, kuid nende tulemus sõltub otseselt signaali kvaliteedist ja müra modelleerimisest (Simões et al., 2020). Inertsiaalanduritel põhinev PDR suudab pidevalt arvestada kasutaja liikumist alates teadaolevast lähteasukohest. Meetodi tugevus on sõltumatus välistest allikatest ja sujuv positsiooniuuendus, kuid nõrkus on vigade kuhjumine, ehk ilma korrektsioonita triivib arvutatud asukoht aja jooksul märkimisväärselt kõrvale (Qian et al., 2015).

Praktilised süsteemid ühendavad neid lähenemisi, näiteks BLE majakad annavad perioodilisi ankrupunkte, millega PDR-trajektoor korrigeeritakse, või kasutatakse RSSI-müra mõju vähendamiseks sõrmejälgede meetodit. Uuemates töödes (nt Pan jt., 2025) seotakse BLE, PDR ja korruseplaani piirangud erinevates filtrites, saavutades keskmiseks veapiiriks ~1 m (Pan et al., 2025). Sellised hübriidlahendused tasakaalustavad eri meetodite tugevused ja nõrkused, kuid tõstavad süsteemi keerukust ning nõuavad täiendavat kalibreerimist ja nutikaid filtreid usaldusväärsuse saavutamiseks.

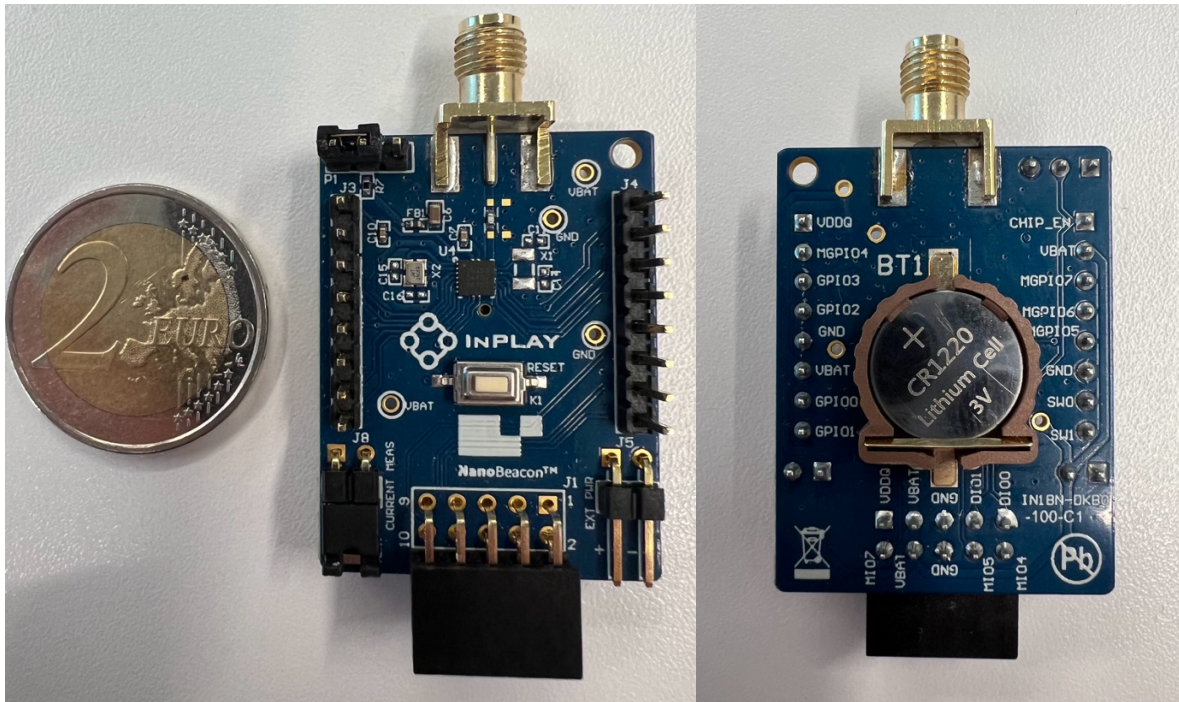
1.3 IN100 nanomajakate kasutamine positsioneerimisel

IN100 NanoBeacon on *Bluetooth Low Energy* 5.3 standardile vastav nanomajaka kiip, mille on välja töötanud ettevõtte InPlay Inc (InPlay, 2022b). See seade on modernne BLE majakas, mis on loodud spetsiaalselt asjade interneti (IoT) ja reaalsajas jälgimissüsteemide (RTLS) jaoks (InPlay, 2022b). IN100 eripäraks on programmeerimisvaba disain, mis tähendab, et kiibil on tootja poolt integreeritud spetsiaalne protokoll, mida saab konfigurida ilma traditsioonilise mikrokontrolleri programmeerimiseta (InPlay, 2022b).

1.3.1 Majakatena valitud arendusplaatide ülevaade

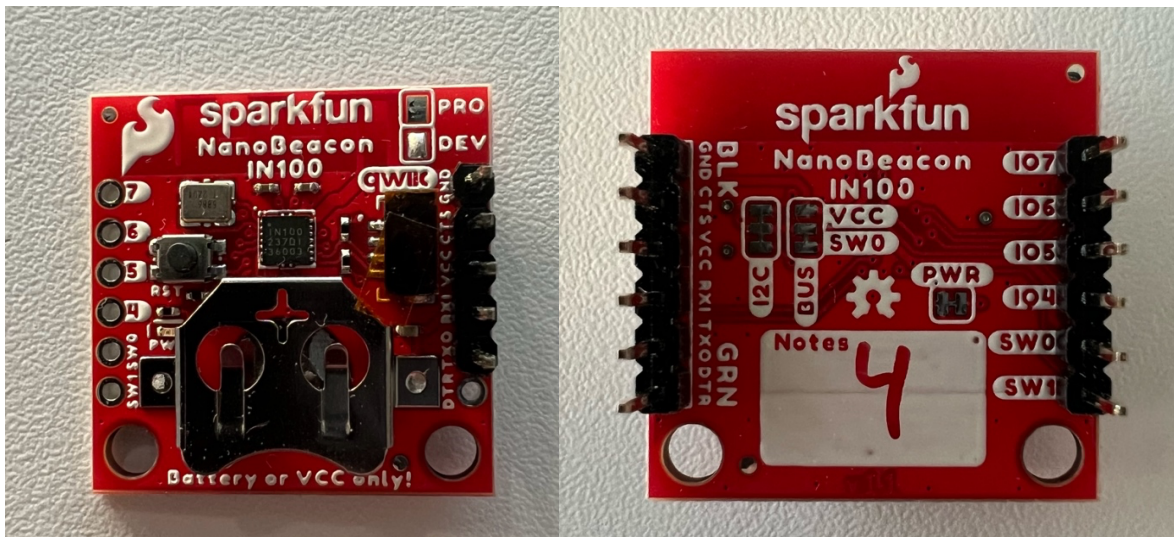
Töös kasutatud majakate arendusplaate oli kahte tüüpi: InPlay IN100 DevKit (Joonis 3) ja SparkFun NanoBeacon Lite (Joonis 4). Mõlemad põhinevad samal IN100 *Bluetooth Low Energy* SoC-il, aga neil on mõningad erinevused, näiteks vormitegur, antennilahendused ja I/O mugavus.

DevKiti arendusplaat on mõeldud laborikatseteks ning sellel on trükkplaadile joonistatud *meander*-antenn, mida saab soovi korral asendada SMA-liidesega välisantenniga. Plaadil on CR1220 nõõppatarei pesa, süsteemivoolu mõõtmise pesa ja algseadete taastamise lüliti, mis on vajalik majaka konfiguratsiooni muutmiseks. Kõik IN100 GPIO-d on välja toodud kahe viigu kaudu, et oleks võimalik ühendada sensoreid. Võrdlus 2 € mündiga Joonisel 3 näitab, et kogu trükkplaat ei ole palju suurem kui üks münt ning IN100 on 3 × 3mm must kiip arendusplaadi keskosas.



Joonis 3: Vasakul on InPlay DevKit arendusplaadi pealmine külg ja selle kõrval 2€ münt. Paremäl on InPlay DevKit arendusplaadi tagumine külg.

SparkFuni lahendus on veelgi kompaktsem ning suunatud otse prototüüpimiseks. Siin kasutab tootja keraamilist chip-antenni, mis säästab plaadipinda ja võimaldab vertikaalset paigutust. Toiteallikaks on CR1225 pesa, lisaks on plaadil Qwiic JST-liides andurite kiirühenduseks, UART päiserida konfiguratsiooniks ning toite-LED ja *reset*-nupp visuaalseks olekuks.



Joonis 4: Vasakul on SparkFun NanoBeacon Lite arendusplaadi pealmine külg ja paremal sama plaadi tagumine külg.

Võrdlevad tähelepanekud

- DevKiti suurem PCB ja SMA-valmidus võimaldavad antenniekspimente (nt erinevad polarisatsioonid ja suunavõimendused), mida kasutatakse peatükis 1.3.3 RSSI-analüüsi juures.
- SparkFun Lite versioon demonstreerib, millistesse mõõtmetesse IN100 saab realses IoT-lahenduses mahtuda.

Kokkuvõttes katavad need kaks arendusplaati nii labori-täpsusmõõtmise kui lõpp-rakenduse prototüübi vajadused, pakkudes töö käigus väärtuslikku võrdlusbaasi antennide ja toiteskeemide mõjude analüüsimiseks.

1.3.2 IN100 nanomajakate tehniline ülevaade

Tehniliselt on IN100 väga väikese vormiteguriga SoC (*System on Chip*) ning on saadaval pisikeses DFN8 või QFN18 pakendis, mõõtetega vastavalt 2,5×2,5 mm või 3×3 mm, mis sisaldab 4 kB SRAM ja 4 kb OTP (*One-Time Programmable*) mälu (InPlay, 2022b).

IN100 järgib Bluetooth 5.3 spetsifikatsiooni, mis tähendab, et ta toetab kõiki uuemaid BLE funktsioone, nt mitme reklaamikanali kasutamine, kohandatavad reklaamipaketid, potentsiaalselt BLE 5.1 suunafunktsionaalsus, kuigi kaasa tulev antennikonfiguratsioon seda kiibil endal ei võimalda (InPlay, 2022b). Seade töötab 2,4 GHz ISM alas ning lisaks toetab MedRadio 2,36 GHz kanalit, mis on kitsam erisagedusala ja viitab võimalusele kasutada meditsiiniliste sensorite ribasidet (de Francisco & Pandharipande, 2010).

Tootja andmetel võib NanoBeacon saavutada kuni "mitusada meetrit" leviulatust avatud tingimustes (InPlay, 2022b). See on oluliselt rohkem kui tüüpilised nutitelefonide BLE signaalid (mille klass on tavaliselt ~50 m). Suur leviala on saavutatud optimeeritud raadiokujunduse ja võimalusega saata signaali suurema võimsusega (InPlay, 2022b).

BLE kiibid on mõeldud töötama pikalt ilma hoolduseta. Unerežiimis on voolutarve ~650 nA ja perioodilise signaaliedastuse korral on keskmine võimsustarve piisavalt madal, et CR2032 tüüpi nööppatarei võib vastu pidada mitu aastat (InPlay, 2022b). Aktiivsete positsioneerimissüsteemide puhul on vastupidavus lühem, sest tihedamad signaaliedastused tähendavad suuremat voolutarvet. Majaka riistvaraline protokoll, erineb tavalisest BLE moodulist, sest operatsioonisüsteemis, ei jookse ühtegi taustaprotsessi, vaid majakas ärkab ainult paketi edastamiseks ning lülitub siis unerežiimi (InPlay, 2022b).

Seade töötab toitepingel 1,1V kuni 3,6V, mis tähendab, et seda saab otse toita ühest 1,5V leelispatareist või 3V liitiumpatareist (InPlay, 2022b). Näiteks InPlay enda müüdavatel arenduskomplektide majakatel on CR1220 nööppatarei pesad ja SparkFun arendusplaadil on CR1225 pesad. Samuti toetab kiip madalamat pinget, mis võimaldab teatud olukordades kasutada näiteks superkondensaatorit, mis langeb kuni ~1,1 V (InPlay, 2022b).

IN100 toetab protokolle nagu iBeacon ja Eddystone (InPlay, 2022b). Seega saab ta jäljendada Apple'i iBeacon majakat, mida iOS ja Android seadmed suudavad sisse ehitatud teekide abil tuvastada. See lihtsustab rakenduste loomist, sest tarvis pole defineerida täiesti oma protokolle, vaid piisab näiteks kõigi majakate seadistamisest sama UUID-ga iBeaconiteks ning rakendus saab neid tavapäraselt käsitleda.

1.3.3 IN100 majaka antenni ja sensorite valik positsioneerimise kontekstis

Järgnev lõik põhineb InPlay 2024 IN100 andmelehe andmetel. Siseringide positsioneerimisel mängib olulist rolli antenni valik ja ühendus kiibiga, sest sellest sõltub signaali kvaliteet ja mõõtmistäpsus. IN100 BLE nanomajakal on integreeritud RF-sobitusvõrk, mis võimaldab otse ühendada 50 Ω antenni ilma täiendavate komponentideta. Lisaks toetab IN100 sensorite ühendamist läbi GPIO sisendite ja sisseehitatud 11-bitise ADC, mis võimaldab majakasse lisada keskkonnaandureid, näiteks õhu rõhu või valgusintensiivsuse mõõtmiseks. Need andmed saab majakas lisada reklaamipakettidesse ning neid on võimalik kasutada täiendava infona ruumi eristamiseks ja positsioneerimistäpsuse parandamiseks. Energiasäästu eesmärgil on majakas varustatud kahe madalalekke-lülitiga, mis aktiveerivad ühendatud andurid ainult mõõtmise ajaks, pikendades sellega märkimisväärselt patarei tööiga ja vähendades hooldusvajadust ka suuremates majakavõrkudes (InPlay, 2024).

1.3.4 IN100 majakate seadistamine

IN100 majakate seadistamise jaoks saab arendaja kasutada graafilist töölaarakendust (NanoBeacon Config Tool), et seada majaka käitumise parameetrid (näiteks reklaami intervall, edastatavad andmed, kasutatav protokoll iBeacon/Eddystone, jne) ning salvestada need seaded majaka püsivmällu (InPlay, 2022a). See muudab IN100 majakate kasutuse lihtsamaks, sest inimesed kellel puudub varasem programmeerimiskogemus saavad majakad tööle seada, keskendudes rakenduse loogikale, mitte püsivara (*embedded-firmware*) kirjutamisele (InPlay, 2022a).

1.4 Delta hoones olemas olevad seadmed ja varasemad tööd

Tartu Ülikooli Delta hoone on olnud varemgi sisepositsioneerimise katsete ja uurimistööde objektiks. Enne käesolevat tööd on Delta hoones läbi viidud vähemalt kaks bakalaureusetööd, mis käsitlesid siseruumide positsioneerimist Wi-Fi võrgustiku abil.

1.4.1 G. Illuse loodud Wi-Fi positsioneerimissüsteem Delta hoones

G. Illus (2021) uuris siseruumide positsioneerimist Wi-Fi signaalide abil, luues Tartu Ülikooli Delta hoone jaoks ulatusliku Wi-Fi sõrmejälgede andmebaasi. Ta arendas selleks spetsiaalse Pythonis kirjutatud tarkvara, mis kogus Wi-Fi tugijaamade signaalitugevuse andmeid erinevatest asukohtadest hoones, et seejärel nende abil inimeste asukohta määrata. Selline sõrmejälgede meetod võimaldab täpseid asukohahinnanguid, kuid selle peamiseks puuduseks on suur eeltöö ja pidev vajadus uuendada andmebaasi juhul, kui tugipunktide asukohad või hoone struktuur muutuvad. Antud lähenemine haakub minu tööga, sest kasutan samuti RSSI põhiseid mõõtmisi, kuid minu lahendus erineb selle poolest, et kasutan spetsiaalselt BLE-nanomajakaid, mis võimaldavad paindlikumat paigaldust kui traditsioonilised Wi-Fi tugipunktid (Illus, 2021).

1.4.2 A. Slavini loodud Wi-Fi positsioneerimise süsteem

A. Slavin (2022) keskendus Wi-Fi ruuterite signaalide kasutamisele Delta hoones positsioneerimiseks. Selles töös analüüsiti erinevaid siselahendusi ning lõplahendusena implementeeriti Pythonis rakendus, mis kasutas hoone korrusteplaanid ning ruuterite asukohti, et kuvada kasutaja asukoht kaardil. Slavini töö uuendus seisnes kaalutud keskmise RSSI ja trilateratsiooni algoritmide ning interaktiivses graafilises liideses. Ta märkis, et kuigi Delta hoone jaoks oli varasemaid lahendusi, polnud keegi varem kasutanud just sedalaadi algoritmikombinatsiooni ega loonud täisfunktsionaalset kaardirakendust. Slavini tulemused näitasid, et kasutades Delta hoone ruuterite andmeid, kus ruuterite asukohad olid teada ja signaalide tugevused mõõdeti, oli võimalik saavutada “piisav täpsus”, ehk positsioneerimisviga jäi mõne meetri piiresse, mis lubas kasutaja üldise asukoha hoones tuvastada. Ta soovitas edasistes töodes uurida täpsemate meetodite rakendamist ning viitas vajadusele proovida alternatiivseid tehnoloogiaid (Slavin, 2022).

1.4.3 N. Bahhri loodud Wiggle'i põhjal töötav positsioneerimise mobiilirakendus

N. Bahhir (2024) käsitles oma lõputöös Wi-Fi-põhist positsioneerimist välistingimustes, keskendudes alternatiividele olukordades, kus GPS-i täpsus on madal, näiteks tihedas linnakeskkonnas või halbades ilmastikuoludes. Töö käigus loodi Androidi rakendus, mis kasutas WiGLE andmebaasi Wi-Fi tugipunktide positsioneerimiseks trilateratsiooni põhimõttel. Bahhri tulemused näitasid, et Wi-Fi-põhine lähenemine võib teatud tingimustes pakkuda GPS-ist täpsemat tulemust, kuigi üldine täpsus jäi GPS-le siiski alla. Minu töö seisukohalt on oluline, et Bahhir näitas trilateratsiooni praktilist rakendatavust ja tõi välja Wi-Fi signaalide tugevuspõhiste meetodite piirangud, mida BLE nanomajakate kasutamisel saab

osaliselt ületada, kuna BLE seadmed on kergemini hallatavad ja nende signaal on optimeeritud siseruumides kasutamiseks (Bahhir, 2024).

1.5 Käesoleva töö uuenduslikkus ja arendusvõimalused

Käesolev töö pakub sisepositsioneerimise valdkonnas mitmeid uuenduslikke lahendusi võrreldes varasemate Delta hoones läbiviidud Wi-Fi-põhiste projektidega. Esiteks kasutatakse Wi-Fi ruuterite asemel spetsiaalseid *Bluetooth Low Energy* (BLE) majakaid, mis võimaldavad asukohamääramist sõltumatult olemasolevast võrgutaristust. Varasemates Wi-Fi lahendustes piiras positsioneerimist ruuterite paiknemine (mis on eeskätt määratud võrgu katvuse, mitte positsioneerimise järgi), kuid BLE majakate puhul saab need paigutada strateegiliselt optimaalse katvuse saavutamiseks. BLE-majakate eelis katvuse osas seisneb selles, et neid on võimalik lisada täpselt sinna, kus on vaja signaali, tagades ühtlasema levi keerukama planeeringuga ruumides.

Teiseks on BLE-majakate lahendus kuluefektiivsem ja energiasäästlikum: väikesed patareitoitel majakad on oluliselt odavamad kui professionaalsed Wi-Fi pääsupunktid ning töötavad väga väikese energiakuluga (InPlay, 2022b). See tähendab, et süsteemi laiendamine on soodsam ning majakad saab vajadusel hõlpsasti ringi paigutada või juurde lisada.

Kolmandaks on käesolev lahendus loodud iOS platvormile, mis eristab seda varasematest Wi-Fi-l põhinenud süsteemidest. Apple'i mobiilseadmetes on kolmandate osapoolte rakendustel keelatud Wi-Fi võrkude passiivne skaneerimine turvakaalutlustel, mistõttu pole iOS-i jaoks praktiline ehitada positsioneerimist Wi-Fi signaalide abil (Apple Inc., 2025). BLE-majakad seevastu on iOS-is toetatud. Apple on loonud iBeaconi protokollid ja pakub vastavaid rakendusliideseid BLE signaalide avastamiseks. Seega käesolev lahendus võimaldab iPhone'i kasutajatel siseruumide positsioneerimissüsteemi kasutada, ületades platvormipiirangu.

Neljandaks seisneb töö uuenduslikkus hübriidalgoritmi rakendamises, ehk positsioneerimisel kombineeritakse BLE majakate arvutatud trilateratsiooni tulemus inertsaalandureil põhineva liikumisjärgimisega ehk PDR'iga. Varasemates Delta hoone sisepositsioneerimise töödes kasutati valdavalt ainult raadiovõrgu signaale, kuid käesolevas töös integreeritakse paralleelselt nutitelefoni sisemisi liikumisandmeid. Selline lähenemine suurendab süsteemi sujuvust ning töökindlust olukordades, kus üksik meetod võib ebatäpsusi anda, näiteks aitab PDR lühiajaliselt ületada BLE signaalide müra ning majakad korrigeerivad omakorda PDR-i pikemaajalisemat triivi.

Töö arendusvõimalused on samuti mitmekülgsed. Väljatöötatud lahendust saab rakendada laiemalt, näiteks laiendades süsteemi kogu Delta hoonele või teistele hoonetele, paigaldades sinna piisava hulga BLE-majakaid täpse katvuse saavutamiseks. Edaspidi on võimalik täiendada algoritme: näiteks rakendada täpsemat filtreerimist ja müratasandust BLE signaalidele või kasutada keerukamat sensorfusiooni meetodit, et PDR-i ja majakate andmeid veelgi sujuvamalt ühendada. Teiseks arendusvõimaluseks on kasutajaliidese edasiarendus, tulevikus võiks rakendus kuvada kasutajale juhiseid hoones liikumiseks või integreerida hoone plaanid detailsemalt. Samuti võimaldab BLE-majakate lahendus lisada süsteemi kontekstiteadlikkust (näiteks erinevate ruumide tuvastamine majaka ID alusel) ning laiendada platvormide valikut, näiteks Android-seadmetele, kus saab kasutada nii Wi-Fi kui BLE andmeid.

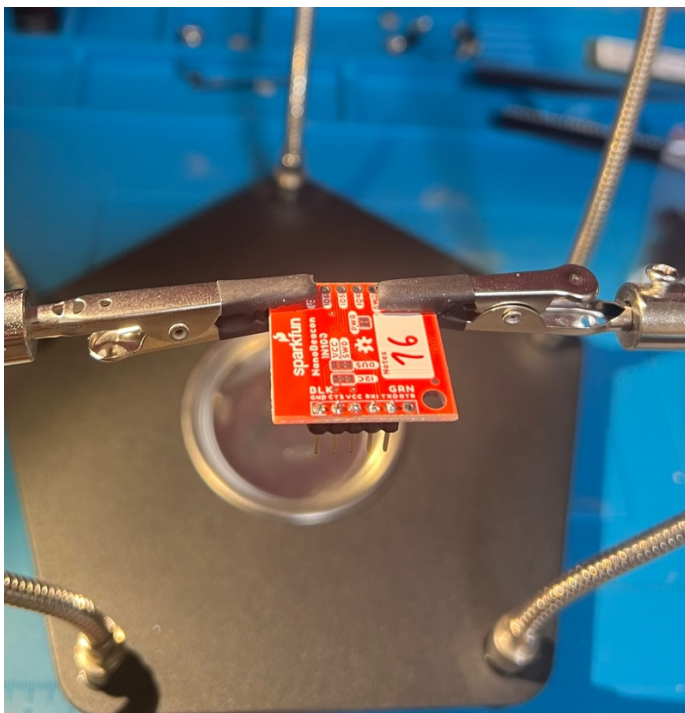
2 Valminud lahenduse kirjeldus

Peatükis kirjeldatakse põhjalikult BLE-põhise siseruumide positsioneerimissüsteemi väljatöötamise protsessi. Esmalt antakse ülevaade BLE IN100 majakate seadistamisest ja parameetrite optimeerimisest, mis hõlmab kristallosillaatori (XO) häälestust ning iBeacon-protokolli parameetrite kohandamist usaldusväärse signaali edastamiseks. Seejärel keskendutakse iOS-rakenduse loomisele, mis kasutab CoreBluetoothi, CoreLocationi ja CoreMotioni teeki kasutaja asukoha tuvastamiseks kaardi abil ning liikumise jälgimiseks. Järgnev alapeatükk käsitleb RSSI signaalide töötlemist ja filtreerimist reaalajas, et vähendada müra ja parandada kaugushinnangute stabiilsust. Seejärel rakendatakse praktiliselt positsioneerimisalgoritmid, nagu BLE trilateratsioon ning PDR ning töötatakse välja nende usaldusklassidel põhinev ühendamine täpsema tulemuse saamiseks.

2.1 BLE majakate ettevalmistus ja seadistamine

Käesoleva töö eksperimentaalse osa tarbeks hangiti kokku 17 IN100 NanoBeacon BLE majakat. Need hangiti kahest allikast: 3 majakat pärinesid InPlay arenduskomplektist, nimega IN100 Evaluation Kit ning 14 täiendavat seadet soetati SparkFun'i NanoBeacon tooteperekonnast. SparkFun pakub IN100 kiibil põhinevaid valmisplaatide kahes versioonis: NanoBeacon Board (kasutusse minev versioon) ja NanoBeacon Lite Board (arendusversioon) (SparkFun, 2023). Hangitud komplekt sisaldas mõlemat tüüpi plaate, nimelt 13 lite plaati ja 1 tavaline. Arendusversioonil on lisaks integreeritud LED ja *reset*-nupp, mis hõlbustab seadistamise faasi, ning pistik UART ühenduseks (SparkFun, 2023).

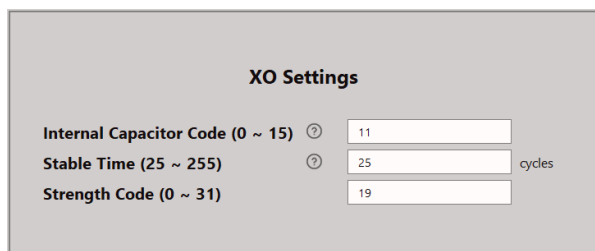
Riistvaraliselt majakad suurt ettevalmistust ei vajanud. Kolm IN100 arenduskomplektis olevat majakat olid valmis kasutamiseks. SparkFun'i majakatele tuli ise külge joota UART ühenduseks vajalikud pesad (vt joonis 5), milleks oli maandus (GND), toide (VCC), andmete vastuvõtt (RX1) ja andmete saatmine (TX0).



Joonis 5. Pilt SparkFun NanoBeacon Lite Board'ist, millele on vajalikud UART ühendid külge joodetud.

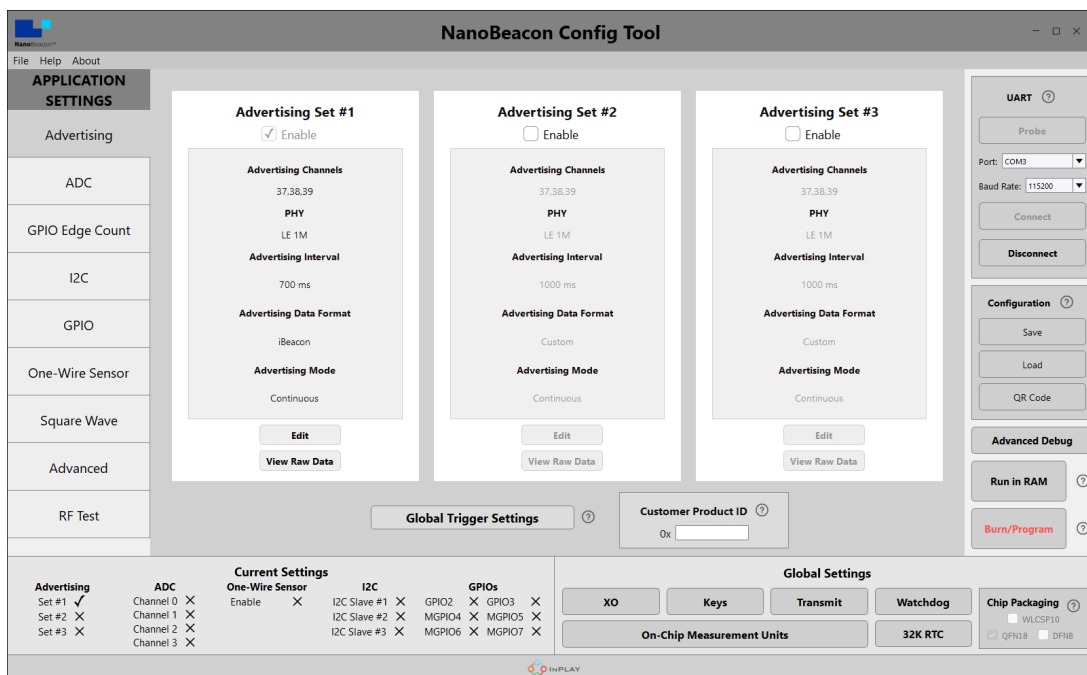
Programeerimisplaadi külge ühendades tuli tähele panna, et VCC tuleb ühendada 1.1-3.6V toite külge ja ei tohi ühendada kui plaadi küljes on juba muu toide, näiteks patarei. RX ja TX tuleb ühendada risti, ehk majaka RX1 läheb programeerimisplaadi TX ühendusse ja TX0 läheb RX ühendusse.

Majakate programmeerimiseks kasutati NanoBeacon Config Tool'i (InPlay, 2022a). Kõigepealt seadistati XO-seadete lehel sobivad väärtused (vt joonis 6). Sisekondensaatori koodi suurendati 8 pF-lt 11 pF-ni, mis tõstis majaka signaali tugevust ligikaudu 5–10 dB. Stabiilse laadimise aega vähendati 36 μ s-lt 25 μ s-ni, et tagada stabiilne töö. Samuti suurendati tugevuse koodi 16-lt 19-ni, et kompenseerida suuremat sisekondensaatori koodi väärtust ja parandada üldist väljundvõimsust.



Joonis 6. XO seadete alamleht NanoBeacon Config Tool rakenduses.

Reklaamparametrites määrati reklaamintervalliks 700ms ja lubati kõik kolm BLE-reklaamikanalit (37, 38, 39) (vt joonis 7). Juhusliku reklaamimise funktsioon jäeti 0-10ms peale, sest see vähendab erinevate signaalide kattuvuse võimalust. Sellise seadistusega edastab majakas umbes iga 0,7 sekundi järel paketi ühel kanalil, liikudes kanalilt kanalile suurenevas järjekorras. Bluetooth-aadressiks valisin rakenduse genereeritud staatilise aadressi.



Joonis 7. NanoBeacon Config Tool, kus on valitud kõik kasutatud seaded.

Reklaamandmete jaoks kasutati iBeacon-protokolli, mis eeldab UUID, major- ja minor-väärtuste ning mõõdetud TX-võimsuse seadistamist. Kõigil majakatel jäid UUID ja major samaks, minor klassi kasutati majakate eristamiseks vahemikus 0001–0017. TX-võimsus mõõdeti telefoniga, võttes kõikide majakate keskmise RSSI väärtuse umbes 1m kauguselt, milleks oli -75dBm.

Valitud parameetrite salvestamiseks kasutati nuppu „Run in RAM“. Alternatiivina saab andmed sisse põletada (nupuga „Burn/Program“), kuid seda ainult üks kord. Sisse põletatud väärtused säilivad pärast toitekaotust, samas kui mälus jooksutamise korral tuleb need patarei vahetamisel uuesti kirjutada. Andmete sisse põletamist ei valitud seepärast, et majakad oleksid töö käigus ümber seadistatavad, kuna võib ilmnedu paremaid seadistamise variante. Samuti jäävad siis majakad kasutatavaks mujal.

2.2 iOS rakenduse arendus positsioneerimissüsteemi kasutamiseks

Rakenduse arendamiseks valiti keel Swift¹, kuna see pakub Apple ökosüsteemis otsest tuge kõigile vajalikele riistvaralistele ja süsteemiliidestele (Core Bluetooth, Core Location, Core Motion), võimaldades lühema koodiga kõrget jõudlust ja turvalisust. Alternatiivina oleks saanud kasutada Objective-C-d, aga Swift võimaldas kiiremini keskenduda rakenduse loogikale, vähendades aluskoodi kirjutamist. Rakenduse kood on saadaval GitHub'i repositooriumis: <https://github.com/Siim303/BLERoomPositioning>.

Arenduse ja testimise käigus kasutati Xcode 16 emulaatorit (iPhone 16 Pro simulatsioon) ning testiti rakendust füüsilisel iPhone 13 Pro seadmél, et oleks võimalik kasutada telefoni sensoreid ning hinnata rakenduse tegelikku jõudlust.

2.2.1 Rakenduse arhitektuur

Välja arendatud iOS rakendus koosneb mitmest koostööd tegevast moodulist, mis ühiselt võimaldavad reaajas kasutaja asukohta määrata ja kaardile kuvada. Rakenduse töövoodiagramm on välja toodud joonisena (vt lisa 1). Süsteemi arhitektuuri võib jagada järgnevalt: andmete kogumine, positsiooni arvutus ning tulemuse esitamine. Andmete kogumise plokis toimub BLE-majakate signaalide vastuvõtt ja inertsiaalanduritelt (kiirendusmõõtur, güroskoop, magnetomeeter) liikumisandmete kogumine. Rakendus kasutab Apple Core Location² ja Core Bluetooth³ raamistikke majakate tuvastamiseks. See tähendab, et rakendus skaneerib pidevalt raadiosagedusel 2,4 GHz reklaamipakette ning filtreerib välja just need, mis vastavad seadistatud majakate identifikaatoritele. Iga tuvastatud majaka kohta saadakse signaali tugevuse näit (RSSI) ning majaka ID, mille põhjal leitakse majaka koordinaadid süsteemi sisemises andmebaasis. Paralleelselt kogutakse nutitelefoni andureist teavet kasutaja liikumise kohta: näiteks kiirendusmõõturi andmetest tuletatakse sammude astumine ning güroskoobist ja magnetomeetrist liikumissuund.

Positsiooni arvutamise plokk ühendab need kaks infoallikat. Rakenduse algoritmiline pool koosneb kahest põhikomponendist: BLE trilateratsiooni moodulist ja PDR moodulist. Trilateratsiooni moodul võtab sisendiks mitu RSSI mõõtmist erinevatelt majakadelt ning arvutab nende põhjal kasutaja absoluutasukoha (st koordinaadid hoone kaardil). PDR moodul samal ajal arvutab kasutaja suhtelist liikumist tema viimasest teadaolevast asendist, integreerides samm-sammult inertsiaalandurite põhjal läbitud teekonna. Süsteemi arhitektuuris on keskne fusioonimoodul, mis ühendab trilateratsiooni ja PDR tulemused üheks lõplikuks asukoha hinnanguks. See ühildamine põhineb usaldusklassi lähenemisel, mis hindab kummagi meetodi hetkeusaldusväärsust ning otsustab, kuidas neid andmeid parasjagu kaaluda (vt lähemalt peatükis 2.3.3).

Tulemuse esitamise plokk tegeleb kasutajaliidese ja andmete visualiseerimisega. Rakendusel on sisseehitatud hooneplaan või testkeskkonna kaart, millele kantakse nii hetkel kättesaadavate majakate kui kasutaja asukohad (vt joonis 8). Iga majakas on kaardil tähistatud lilla täpiga,

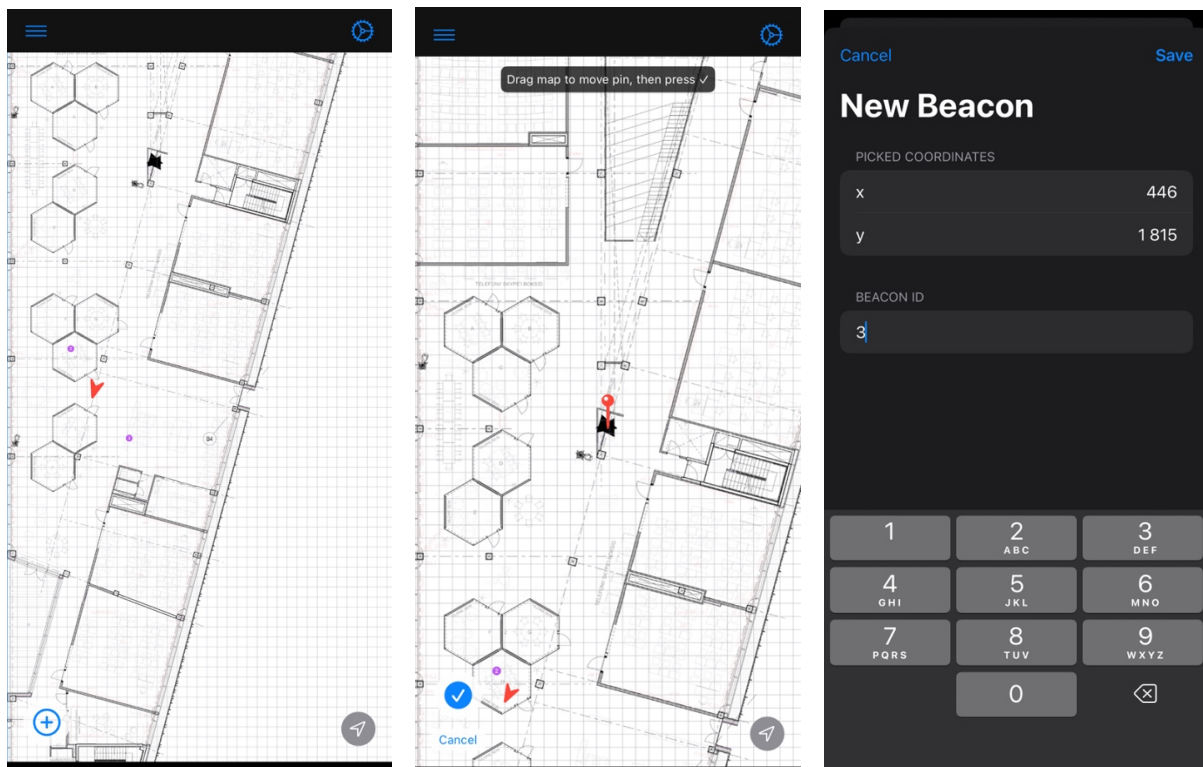
¹ Swift keel: <https://www.swift.org/>

² Apple Core Location: <https://developer.apple.com/documentation/corelocation>

³ Apple Core Bluetooth: <https://developer.apple.com/documentation/corebluetooth>

mille sisse on kirjutatud antud majaka number (1-17) ning kasutaja positsiooni kuvatakse liikuva punase noolega. Kasutajaliides värskendab pilti reaajas iga kord, kui positsiooniaarvutusest laekub uus asukohta hinnang. Samuti sisaldab rakendus loogikat andmete logimiseks: näiteks saab salvestada arvutatud trajektoori analüüsi tarbeks. Süsteemi ülesehitus on modulaarne, võimaldades edaspidi hõlpsasti asendada või täiendada üksikuid komponente, näiteks uuendada PDR algoritmi või lisada täiendav andmeallikas (nt baromeeter korruse tuvastamiseks).

Rakenduse vasakul alumises nurgas on nupp, mille abil on võimalik muuta rakenduses salvestatud majakate koordinaate (vt joonis 8). Plus-nupu vajutamisel ilmub ekraani keskele punane nõõpnõel, mille asukohta saab muuta kaarti lohistades. Kui asukoht on valitud, saab vajutada uuesti all vasakul linnukesele, mis avab ekraanil parempoolse kuvatõmmisega sarnase vaate. Vaates näidatakse uusi valitud majaka koordinaate ja saab valida, mis number majaka asukohta soovitakse muuta. Lõpuks tuleb vajutada paremalt ülevalt salvestamise nuppu.



Joonis 8. Kuvatõmmised rakenduse välimusest ja majakate lisamise funktsionaalsusest

Rakenduse vasakul üleval nurgas on menüünupp, millega saab valida aluskaardi: töös eristasin siin testalad: korteri ja Delta õppehoone.

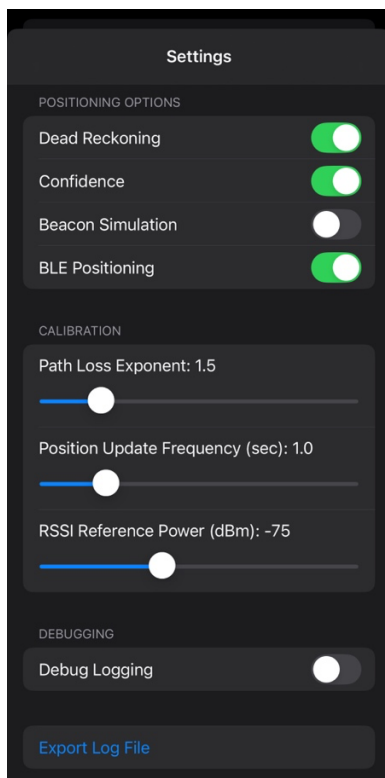
Paremas ülemises nurgas asuva seadete nupu alt avaneb seadete vaade (vt joonis 9). Seal saab peamiselt kohandada positsiooniaarvutuse seadeid:

- PDR-andmete kasutamise sisse ja välja lülitamine.
- Usaldusklassidega filtri kasutamise sisse ja välja lülitamine.
- Majakate simulatsiooni sisse ja välja lülitamine, mille eesmärk on võimaldada rakenduse arendamine ilma reaalsete majakate vajaduseta.
- BLE-andmete kasutamise sisse ja välja lülitamine.

Kalibreerimise alammenüüs saab muuta rakenduse parameetreid:

- *Path Loss Exponent*, ehk levikukao astendaja, mis kirjeldab, kui kiiresti raadiosignaali tugevus väheneb kauguse suurenedes.
- *Position Update Frequency*, ehk positsiooni uuendamise sagedus, mis määrab siis rakenduse fusioonitsükli sageduse.
- *RSSI Reference Power*, ehk RSSI viitetugevus, mis on signaali tugevuse väärtus mõõdetud majakast 1 meetri kauguselt.

Järgmine lüliti on rakenduse logide salvestamiseks, mis lülitab sisse rakenduse logifaili andmete kirjutamise. Lüliti all paikneb nupp selle logifaili eksportimiseks.



Joonis 9. Kuvatõmmis rakenduse seadete alamlehest.

2.2.2 Kaardi ja positsiooni kuvamine rakenduses

Arendatud iOS rakenduse kasutajaliides on loodud selliselt, et kasutaja näeks reaalselt oma asukohta ning majakate paiknemist ülevaatlikul kujul. Peamiseks visuaalseks komponendiks on hooneplaan kaard, mis laaditakse rakendusse pildina. Delta õppehoone jaoks kasutati olemasolevaid korruseplaan, millele on peale lisatud $1m^2$ suuruste ruutudega koordinaatteljestik. Kaardid on kohandatud sobivasse koordinaatsüsteemi ehk meetritesse ning iga teadaoleva majaka koordinaat on kaardil markeeritud väikese ringi ja vastava numbriga. Kasutaja hetkepositsiooni kujutatakse noolekese ikoonina, mis näitab liikumissuunda, kus noole orientatsioon vastab telefoni suunale.

Kasutajaliides uuendab positsiooni indikatsiooni iga kord, kui fusioonimoodul annab uue asukohahinnangu. Selleks, et vähendada visuaalset hüppamist ja tagada sujuv liikumine, on rakenduses realiseeritud positsioonimarkeri liikumise interpoleerimine. Kui uue ja eelmise positsiooni vahel on väike vahe, liigutatakse markeri asukohta kaardil sujuva animatsiooniga, et kasutaja tajuks sujuvat liikumist. Juhul kui arvutatud positsioon hüppab (nt kiire korrektsioon majakatelt), tehakse animatsioon küll kiiremini, kuid siiski üritatakse vältida järske hüppeid otse kasutaja silme ees. See on tähtis, sest rakenduses on võimalik lukustada ennast rakenduse

keskele, mis tähendab, et liikumise ajal ei ole vaja kaarti nihutada vaid kaart liigub sinu all ja sina oled kuva keskmes.

2.2.3 Majakate ja PDR andmete reaajas lugemine

Reaajas positsioneerimise jaoks kogub rakendus paralleelselt andmeid nii BLE-majakate signaalidest kui telefoni inertsaalsetest anduritest. BLE-majakate tuvastamiseks kasutatakse iOS platvormi Core Location'i ja Core Bluetooth'i raamistikke. Rakendus skaneerib pidevalt 2,4 GHz sagedusalas edastatavaid reklaampakette ning filtreerib välja need signaalid, mille identifikaator vastab süsteemis registreeritud majakatele. Iga tuvastatud majaka kohta saadakse signaali tugevuse näit (RSSI) ja majaka ID, mille alusel leitakse rakenduse sisemises andmestruktuuris vastava majaka koordinaadid. PDR-andmete kogumiseks kasutatakse samaaegselt nutitelefoniga inertsaalandureid, kus kiirenduse sensorilt tuvastatakse sammude astumine ning güroskoobi ja magnetomeetri abil hinnatakse liikumissuunda. Nii majakatest saadud signaalid kui PDR liikumisandmed antakse edasi positsioneerimisalgoritmile, mis uuendab kasutaja asukohahinnangut reaajas.

Rakendus sisaldab lisaks reaajas andmete logimise funktsionaalsust. Iga positsiooniarvutuse tsükli kohta luuakse logi, mis sisaldab aega, arvutatud asukoha koordinaate ning kõigi sel hetkel tuvastatud majakate infot (identifikaator, RSSI ja hinnanguline kaugus). Need logid on hiljem CSV-vormingus eksporteeritavad, et hõlbustada tulemuste analüüsi ja positsioneerimisvea hindamist.

2.3 Positsioneerimisalgoritmide praktiline rakendamine

Selles osas kirjeldatakse kahte paralleelselt kasutatavat positsioneerimisviisi: BLE trilateratsiooni ja PDR-i ning nende tulemuste ühendamist sisepositsioneerimise täpsuse parandamiseks. BLE trilateratsioon realiseeriti tuginedes vähemalt kolme majaka signaalitugevuse mõõtmisele ning nende põhjal kauguste hindamisele: iga majaka RSSI teisendati kauguseks kalibreeritud levimudeli abil, arvestades eelnevalt mõõdetud signaalitugevusi referentskaugustel. Seejärel arvutati kasutaja asukoha ligikaudne koordinaat, leides punkti, kus kõigi vastavate raadiuste lõikeala on maksimaalse tõenäosusega (klassikaline trilateratsioonimeetod). Paralleelselt arvutas rakendus PDR-meetodil kasutaja suhtelist liikumist – loendades kiirendusandmete põhjal samme ja hinnates güroskoobi ning kompassi abil liikumissuunda. Kombineerimisstrateegia põhines usaldusklassidel: rakendus hindas nii BLE trilateratsiooni kui PDR-i hetkeseisundi usaldusväärsust (nt majakate signaalide arvu ja tugevuse, PDR-i triivi pikkuse põhjal) ning liitis need kaalutud tulemused, et saada lõplik positsioonihinnang.

2.3.1 Trilateratsiooni algoritmide kasutamine

BLE-trilateratsiooni moodul arvutab kasutaja absoluutse asukoha majakatel saadud signaalide põhjal. Esmalt teisendatakse igalt majakalt mõõdetud RSSI väärtus ligikaudseks kauguseks. Selleks kasutatakse lihtsustatud raadiolainete leviku mudelit ja majakate kalibreeritud signaali tugevust teatud vahemaalt (nt RSSI 1 meetri kaugusel). Kuna keskkonnatingimused mõjutavad signaali nõrgenemist, on kaugushinnang ligikaudne. Siinkohal tugevam RSSI viitab väiksemale kaugusele ja nõrgem RSSI suuremale kaugusele, kuid seinad, peegeldused ja müra võivad seda seost moonutada.

Positsiooniarvutuses kasutatakse vähemalt kolme majaka kaugushinnanguid. Kui korruga on saadaval täpselt kolm majakat, leitakse kasutaja asukoht geomeetriliselt nende majakate ümber moodustuvate kaugusringide lõikepunktina. Ideaaltingimustel lõikuvad kolm ringi kahes punktis, millest üks saab praktilistel kaalutlustel välistatud (asukoht jääb hoone sisse). Kui majakaid on rohkem kui kolm, saab rakendus valida näiteks kolm tugevaimat signaali või

arvestada kõiki saadud kaugushinnanguid. Mitme majaka kasutamisel rakendatakse keskmistamist või vähimruutude meetodit, et leida punkt, mis sobib kõige paremini kõigi kauguspiirangutega. See aitab vähendada juhuslikest mõõteväärtustest tingitud viga. Esialgses realiseeringus arvutati positsioon eelkõige kolme tugevaima majaka signaali põhjal, mis andis stabiilse tulemuse juhul, kui need majakad paiknesid kasutaja suhtes soodsalt. Lõpuks saadakse trilateratsiooni tulemusena kasutaja koordinaadid hoone kaardil, mis edastatakse fusioonimoodulile edasiseks töötlemiseks.

2.3.2 Inertsiaalse navigeerimise rakendamine

Trilateratsioon üksnes raadiosignaali põhjal võib anda hüplevaid tulemusi või hetkeks katkeda. Seetõttu on süsteemi teiseks asukohahindajaks inertsiaalse navigeerimise meetod ehk *Pedestrian Dead Reckoning*. PDR meetodi teostus rakenduses hõlmab mitut sammu:

1. Sammude tuvastamine: Rakendus tuvastab, millal kasutaja astub sammu. Seda tehakse kiirendusanduri andmete põhjal: seal on nähtvad liikumised z-teljel ja sammude arv teatud ajavahemikus. Iga tuvastatud samm tõstab sammuloendurit ja annab signaali positsiooni uuendamiseks.
2. Liikumissuuna määramine: Igal liikumise tuvastamise juhul arvutatakse selle suund nutitelefonis orientatsioonisensorite abil. Kasutatakse güroskoopi ja magnetomeetrit ning iOS CoreMotion raamistiku deviceMotion andmeid, et leida telefoni horisontaalne suund magnetilise põhjakaardi suhtes. Rakenduse käivitamisel kalibreeritakse suund nii, et rakenduse kaardi koordinaatteljestik vastaks reaalsele ruumile. Iga liikumise ajal logitakse hetke suundnurk θ , mis väljendab, mis suunas kasutaja liikus.
3. Sammupikkuse hindamine: PDR arvutuse kolmas komponent on hinnang sammu pikkusele. Lihtsaimal juhul eeldatakse keskmist sammu pikkust (näiteks 0,7 meetrit tavalise inimese puhul) ning kasutatakse seda konstantse väärtusena. Käesolevas rakenduses on esialgu sammupikkus fikseeritud.
4. Positsiooni uuendamine: Kui samm on tuvastatud ja suund ning pikkus teada, arvutatakse uus positsiooni muutumine. Alguspunktiks on kas süsteemi alguses teada antud stardipositsioon või viimane positsioon, mis saadi mõne varasema meetodi (PDR või trilateratsiooni) kaudu. Uus positsioon arvutatakse eelmisele positsioonile sammuvektori liitmise teel: $\Delta x = L \sin \theta$, $\Delta y = L \cos \theta$, kus L on sammu pikkus. Need inkrementeeritakse eelmise koordinaadi juurde. Aja jooksul moodustub niimoodi jada positsioone ehk trajektor, mis kajastab kasutaja läbitud teekonda.

2.3.3 Kombineeritud algoritmide rakendamine ja tulemuslikkuse hindamine

Selleks, et saavutada võimalikult täpne ja stabiilne positsioneerimine, ühendatakse dünaamiliselt kaks eelkirjeldatud meetodit (BLE trilateratsioon ja PDR) sõltuvalt nende usaldusväärsusest. See lähenemine on realiseeritud niinimetatud usaldusklasside abil, kus süsteem hindab jooksvalt, kui „usaldusväärne” on parasjagu iga meetodi positsioonihinnang, ning määrab seejärel vastava kaalu lõplikus positsioonis.

Usaldusklasside määratlemiseks on rakenduses paika pandud mitmed heuristilised reeglid, mis arvestavad nii majakate signaalide kvaliteeti kui PDR andmete käitumist. Näiteks jagatakse olukorrad kolme klassi:

1. Kõrge usaldusväärsusega majakapositsioon: korraga on kuuldel rohkem kui 3 majakat ning muutus võrreldes eelneva positsiooniga ei ole liiga suur. Sellisel juhul loetakse raadiopõhine asukoht usaldusväärseks. Esimese usaldusklassi korral kasutatakse majakate arvutatud positsiooni peamise alusena ja PDR tulemust vaid väikeste korrigeerivate täiendustena sujuvuse tagamiseks.

2. Mõõduka usaldusväärusega positsioon: majakate signaale on nähtaval 2 või uus majakate põhjal arvatud positsioon on eelmisest väga kaugel. Sellel hetkel kombineeritakse positsioon ligikaudu võrdse kaaluga: PDR annab aimu liikumistrajektorist, kuid majakad tõmbavad arvatud asukohta tagasi üldjoontes õigesse piirkonda. Rakenduse tasemel realiseeritakse see Kalmani filtrilaadse lähenemisega, kus PDR prognoosib järgmist asukohta ja majakate mõõtmised toimivad sisendina, mida võrreldakse prognoosiga ning korrigeeritakse vastavalt.
3. Madal usaldusväärsus majakasignaalidel: saadaval on ainult 1 majakas, ehk BLE arvutusklass tagastab selle majaka koordinaadid ning rakendus toetub peaaegu täielikult PDR hinnangule, kuvades kasutaja liikumist inertsiaalandurite põhjal ning jälgides reeglit, et kasutaja ei saa olla teadaolevast majakast liiga kaugel.

Usaldusklasside meetodi üks olulisi aspekte on dünaamiline ajastus, sest mõlema meetodi andmeid uuendatakse vastavalt kättesaadavusele. Rakenduse fusioonimoodul hoiab viimast teadaolevat usaldusklassi ja positsiooni ning uuendab seda iga uue andmepunkti saabumisel. Kui näiteks viimati oli esimene klass (majakaid palju ja tugevad) ning kasutaja jäi seisma, kuid majakate signaalid kadusid ajutiselt, ei hakka süsteem kohe positsiooni "triivima" PDR-iga, sest ta eeldab lühiajaliselt, et kasutaja püsib kohal kuni signaal taastub või PDR tuvastab liikumise. Selline lähenemine hoiab ära suuremate hüpete ja müra võimendumise lõpptulemuses.

3 Tulemused

Tulemuste peatükis kirjeldatakse eksperimentide läbiviimist Tartu Ülikooli Delta hoones ja kodus keskkonnas ning analüüsitakse saadud tulemusi, võrreldes BLE ja PDR meetodite täpsust ning nende kombineerimise mõju. Lisaks analüüsitaks rakenduse jõudlust ja BLE süsteemide installeerimise kulu. Lõpuks tuuakse välja võimalikud edasiarendused.

3.1 Eksperimentide läbiviimine ja andmekogumine

Väljatöötatud süsteemi hindamiseks viidi läbi katsed kahes erinevas keskkonnas: Tartu Ülikooli Delta õppehoones ning korteris. Igas katses kandis kasutaja nutitelefoni töötava rakendusega ning liikus mööda etteantud trajektoori, samal ajal kui süsteem kogus positsioneerimisandmeid logifaili. Testide alguses kontrolliti üle, et kõikide majakate füüsilised asukohad oleksid vastavuses rakenduses märgitud majakate koordinaatidega. Seejärel alustati liikumist tavakäigu kiirusel, ning rakendus jälgis kasutaja asukohta reaajas kaardil. Iga katse lõppedes salvestati rakendusest eksporditud CSV-logifail, mis sisaldas kogu trajektoori punktide ajajärjestust koos majakasignaali andmetega.

3.1.1 Korteris katsed

Korterikeskkonnas läbiviidud test toimus umbes 50 m² suuruses kolmetoalises korteris. Katsepiirkonda paigutati 3 kuni 8 BLE-majakat, jaotades majakaid ühtlaselt, tagamaks, et kogu elamine oleks signaaliga kaetud. Majakate vahekaugus jäi selles keskkonnas väikeseks (3 kuni 6 meetrit), mis andis trilateratsioonile eeldatavalt paremad kaugushinnangud. Korteris seinad põhjustasid küll signaali nõrgenemist ruumide vahel, kuid segavaid raadiosignaale oli kodus keskkonnas oluliselt vähem kui Delta hoones. Testtrajektor kodus hõlmas liikumist toast tuppa ja ringi ümber mööbli, simuleerides igapäevast korteris liikumist (näiteks kööki ja tagasi elutuppa liikumine). Kuna distantsid olid lühikesed, eeldati, et PDR kumulatiivne viga jääb väikeseks ning majakasignaale on enamasti pidevalt piisavalt käepärast. Kodus testis viibis kasutaja samuti alguses teadaolevas lähtepunktis ja liikus katse lõpuks sinna tagasi.

3.1.2 Delta hoone katsed

Delta õppehoone testala paiknes ühel korrusel, kus oli eelnevalt paigaldatud 4 kuni 10 IN100 BLE-majakat. Majakad jaotati hoone koridorides ja ruumides nii, et katsealune liikumisteed oleks võimalikult ühtlaselt kaetud vähemalt kolme majaka signaaliga. Majakad asetati sobivalt mööbli peale või kinnitati seintele umbes paarikümne meetrise vahemaa tagant ning nende täpne asukoht märgiti rakenduses hooneplaani kaardile. Testtrajektor Delta hoones hõlmas liikumist piki pikka koridori, pöõretega kõrvalkoridoridesse ning tagasi alguspunkti suunas. See imiteeris tüüpilist siseruumides liikumist loengusaalist teise ruumi minnes. Delta keskkond oli positsioneerimissüsteemi jaoks nõudlik: avarad ruumid, betoonseinad ning rohked metallkonstruktsioonid tekitasid signaali peegeldusi, lisaks oli samal sagedusalal häireid (nt Wi-Fi võrgud ja kaasaskantavad seadmed). See tähendas, et majakate RSSI väärtused kõikusid Delta hoones märgatavalt sõltuvalt asukohast ja inimkehade varjest ning mõnes koridori lõigus võis korraks olla kasutusel alla kolme majaka. PDR komponent pidi sellistes tingimustes mõnda aega iseseisvalt kasutaja liikumist kandma. Iga Delta katse kestis orienteeruvalt 2 kuni 5 minutit, mille jooksul läbiti mitukümmend meetrit. Katse lõpus jõudis kasutaja tagasi lähtepositsiooni juurde, mis võimaldas hiljem hinnata süsteemi triivi. Ideaaljuhul peaks testide algus- ja lõpp-punkt kattuma.

3.1.3 Andmekogumine ja mõõtmiste kirjeldus

Iga katse järel loodud logifaili põhjal visualiseeriti rakenduse arvatud trajektoor joonisel. Nii Delta hoone korruseplaani kui korteri skeemi peale kanti tegelik liikumistee (määratud ruumide ja orientiiride järgi) ning sellele kanti võrdluseks rakenduse positsioneerimisest saadud punktid. See võimaldas visuaalselt hinnata, kui hästi kattub hinnanguline trajektoor tegelikuga, ning tuvastada lõigud, kus esines suuremaid kõrvalekaldeid. Kuna kvantitatiivset veahinnangut (nagu keskmine hälve meetrites) polnud esialgu arvatud, piirdus analüüs kvalitatiivse hindamisega, näiteks vaadeldi, kas rakenduse joonistatud teekond järgib koridori või tuba, kus kasutaja liikus, ning kui kaugele jäi lõpp-punkt tegelikust lõpp-punktist. Mõnes katses planeeriti trajektoor nii, et kasutaja naasis täpselt alguspunkti; selle abil sai lihtsalt hinnata PDR-i triivi ulatust (positsioneerimismärgi nihkumist alguskoha suhtes). Samuti märgiti üles kohad, kus positsioneerimine ajutiselt ebaõnnestus (näiteks kadus kasutajaliidesel positsioonimarker või hüppas ebatõenäoliselt kaugele), need juhtumid korreleeriti logifailist majakate signaalitugevuste ja PDR andmetega, et leida ebatäpsuste põhjuseid.

3.1.4 Apple Watch'i test

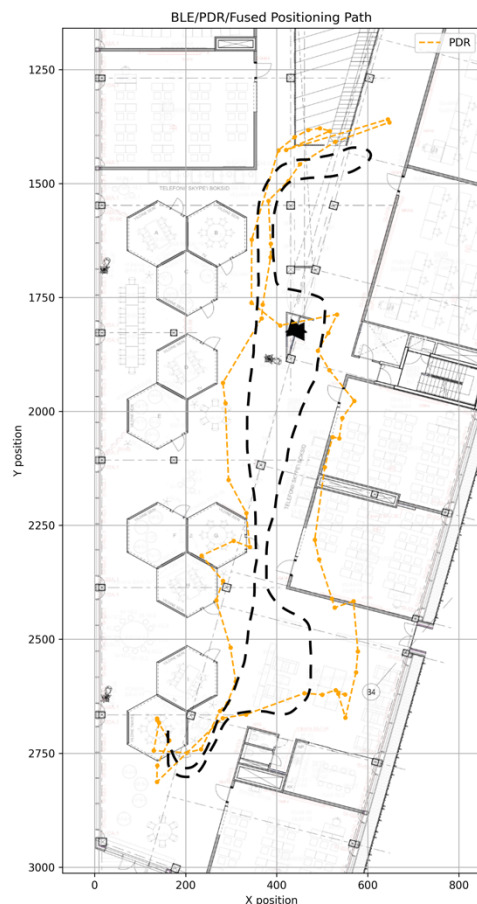
Täiendava eksperimendina kasutati kahes katses paralleelselt Apple Watch nutikellale installitavat kaasrakendust. Nutikella peal olevat rakendust ei ole seadme peal näha, aga nutitelefonil positsioneerimiskrakenduse käivitamisel hakkas kella peal olev rakendus edastama PDR infot fusiooni klassile. Kella peal mõõdetud PDR andmed peaksid olema palju täpsemad, kui telefoni omad, aga testides see ei väljendunud, sest kella pealt tulev info ei olnud piisavalt reaktiivne. Võimalus selle parandamiseks, oleks olnud kella jaoks treeningu režiimi alustamine, mis siis tõstab kella ja telefoni vahel toimuva informatsiooni vahetamise sagedust, aga see ei tundu väga hea lahendus, sest tavakasutaja ilmselt ei soovi, et iga kord kõndides salvestataks see treeninguna.

3.2 Tulemuste analüüsimine ja järeldused

Viimases alapeatükis kirjeldatakse läbi viidud katseid ning nende tulemuste analüüsi, mille abil hinnati väljatöötatud positsioneerimissüsteemi toimivust reaalses keskkonnas. Katsete käigus mõõdeti RSSI signaale erinevatel distantsidel ja olukordades: avatud alal tehti esmane mõõteseeria, et kinnitada kalibratsiooniväärtusi (näiteks ~ -75 dBm 1 meetri kauguselt), seejärel hinnati signaalikvaliteeti ja -levi reaalses hoonesituatsioonis (nt erinev majakate tihedus ruumis). Samuti testiti PDR-meetodi täpsust võrreldes tegeliku liikumistrajektooriga, et kvantifitseerida sammuloenduse ja suuna hindamise veamäär. Lõpuks viidi läbi integreeritud süsteemi katsetused, kus kasutaja liikus testkeskkonnas ning salvestati samaaegselt nii BLE trilateratsiooni kui PDR-i abil arvatud asukohad. Nende andmete põhjal hinnati kombineeritud lahenduse täpsust ning tuvastati võimalikud vead ja anomaaliad positsioneerimistulemustes.

3.2.1 BLE vs PDR meetodi täpsus

Läbiviidud katsete tulemused näitasid selgelt mõlema kasutatud positsioneerimismeetodi tugevaid ja nõrku külgi. PDR-meetod (inertsiaalse navigeerimise põhine) tagas sujuva ja katkematu liikumise jälgimise isegi siis, kui majakate signaalid ajutiselt puudusid, kuid samas hakkas see meetod pikema aja jooksul vältimatult vigu akumulerima (vt joonis 10). Ilma välise parandusteta tekkis PDR-il triiv, näiteks Delta hoone pikemal trajektooriga võis juba paarikümne sammuga koguneda mitme meetri suurune kõrvalekalle tegelikust asukohast. Mõõtmistest järeldus, et PDR arvutused saavad olla täpsed, kui alguspunkt määrata BLE abil õigesse kohta, siis keskmiselt oli PDR tulemuste täpsus 3 kuni 4 meetrit.



Joonis 10. PDR algoritmiga salvestatud teekond (oranž) ja tegelikult läbitud teekond (must)

BLE-trilateratsioon ei pakkunud minu testides väga head stabiilsust, sest kohati majakate signaalid olid häiritud (vt joonis 11). Hea leviga kohtadesse jõudes, aga muutis asukoha täpsemaks, kui triivitud PDR. Majakatele tugineva asukoha, nii tugevuseks, kui nõrkuseks on selle sõltumatus, ehk iga arvutus annab uue positsiooni, mis pole seotud eelmisega. Praktikas täheldati, et nõrkade või ebaühtlaste RSSI mõõtmiste korral võib trilateratsiooni tulemus „hüpata“ väga palju – see tähendab, et positsioon nihkub järsult, kui mõni sisendandmetest muutub. Näiteks Delta hoones esines olukordi, kus mõne piirkonna läbimisel oli korraga ainult 2 tugevat majakat kättesaadavad (kolmanda signaal väga nõrk), mille tõttu võis BLE arvatud asukoht olla hetkeks suure veaga või viibis positsiooni määramine.

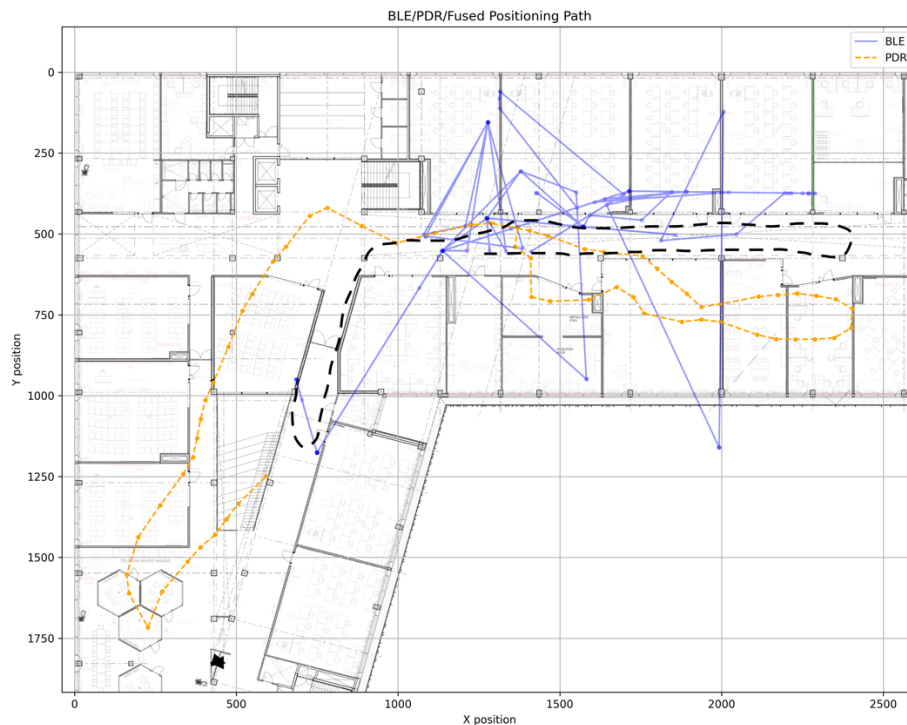
Mõõtmised näitasid, et BLE signaalide tulemused olid palju muutlikumad kui PDR'il, eriti kui signaali levialas oli vähem kui 4 majakat. Ühe või kahe majaka raadiuses oli BLE täpsuseks 7 kuni 15 meetrit, olenevalt majakate paigutusest. Kolme kuni nelja majakaga oli keskmine täpsus 3-6 meetrit. Rohkem kui nelja majaka signaalide kasutamine täpsusklassi eriti rohkem ei tõstnud, pigem oli kasulik arvutada 4 lähima majaka põhjal.



Joonis 11. BLE algoritmiga arvatud punktid samal teekonnal, mis joonis 10.

3.2.2 Kombineeritud lähenemise tulemused

Positsioneerimissüsteemi kombineeritud algoritm suutis mõlema meetodi eeliseid kasutades saavutada parema üldtulemuse. Eksperimentaalselt ilmnes, et fusioonimooduli abil jälgis süsteem kasutaja teekonda stabiilsemalt: PDR hoidis liikumise sujuvana hetkedel, kui majakate andmed olid ebaselged, ning niipea kui usaldusväärsed majakasignaalid taas saadaval olid, korrigeeris süsteem PDR-ist tekkinud võimaliku vea. Nii püsis trajektoor üldiselt õige kujuga ja lähedal tegelikule liikumisteele. Näiteks Delta hoone katsel, kui kasutaja liikus läbi ala, kus mitme majaka signaal nõrgenes, jätkas PDR sujuvat liikumisnäitu mõistlikus suunas; hiljem, tugevamate signaalidega piirkonda jõudes, kohandas fusioonimoodul positsiooni vastavusse hooneplaani tegeliku asukohaga (vt joonis 12).



Joonis 12. BLE ja PDR meetoditega arvatud teekonnad ja tegelik teekond

3.2.3 Rakenduse töökindlus ja jõudlus

Kasutajarakendus toimis testide jooksul stabiilselt ja vastupidavalt. Katsete perioodil ei esinenud rakenduse töös tõrkeid ega kokkujooksmisi. Positsiooniuuendused toimusid reaalajas ning kasutajaliidese reageering oli sujuv. Positsioonimarkeri animatsioon (vt peatükk 2.2.2) aitas vähendada võimalike hüpete visuaalset mõju, mistõttu kasutajakogemus jäi sujuvaks siis, kui taustal toimus fusioonimooduli järsk korrektsioon. Rakenduse pidev skaneerimine ja andmetöötlus tõstsid rakenduse energiatarvet (vt Lisa 2.1). Energiatarbe optimeerimiseks on võimalikult palju tegevusi tehtud ainult üks kord töösükli jooksul. Selleks, et püsivalt BLE signaale kätte saada peab kogu aeg toimuma võrgu skaneerimine. Mälu kasutus jäi tavaliselt 90 kuni 100MB vahele (vt Lisa 2.2), ehk modernse nutitelefoniga sobivasse vahemikku, testitud seadmel umbes 1,7% juurde, kogu seadme mälest. Rakenduse protsessori kasutus oli keskmiselt 45%, kui telefonil on kokku 600%, see tähendab, et seadmel on kokku 6 tuuma, millest rakendus kasutab umbes 0,75 tuuma (vt Lisa 2.3). Kokkuvõttes võib öelda, et prototüüprakendus oli töökindel ning suutis edukalt täita oma funktsiooni katsetingimustes.

3.2.4 Ebatäpsuste peamised põhjused

Katsete ja logianalüüsi käigus ilmnis mitu tegurit, mis põhjustasid positsioneerimistulemustes ebatäpsusi või kõikumust:

- Signaali levik ja müra: BLE-majakate RSSI väärtused kõikusid keskkonna mõjul. Raadiolainete peegeldumine pindadelt, signaali neeldumine (nt inimkehadesse) ja teiste seadmete häired põhjustasid seda, et hinnatud kaugused majakateni polnud alati täpsed.

See kajastus positsioonihinnangu ebatäpsuses, eriti siis, kui mõni majakas jäi mõne paksema seina taha.

- Majakate paigutus ja geomeetria: Positsioneerimise täpsus sõltub majakate võrgustiku tihedusest ja asukohast. Kui kasutaja sattus alale, kus läheduses oli vähem majakaid või need paiknesid kõik ühel pool kasutajat, suurenes arvutatud asukoha viga.
- Inertsiaalandurite triiv: PDR meetodi vead akumulēerusid aja jooksul. Iga väiksema ebatäpsus sammu pikkuse hindamisel või liikumissuuna määramisel liitus järgmiste sammudega. Kui majakate signaal puudus pikemalt, võis PDR-il koguneda märkimisväärne nihe.

3.2.5 Kuluarvestus ja süsteemi praktilisus

BLE-majakatele tugineva süsteemi üheks oluliseks tugevuseks on selle suhteliselt madal kulu võrreldes alternatiivsete lahendustega. Käesolevas töös kasutatud IN100 nanomajakate riistvara oli suhteliselt odav. Ühe majaka hinnaks tuli umbes 6€, näiteks SparkFun NanoBeacon Lite plaadi maksumus oli soetamise hetkel 5,65\$. Seetõttu on kümnete majakate paigaldus rahaliselt teostatav. Delta hoone testalas kasutatud 17 majakat tähendavad riistvarakuluna kokku umbes 100€. Majakate seadistamiseks kasutatud arendusplaat maksab juurde umbes 15€, selle asemel on võimalik kasutada ka mõnda teist UART ühendust pakkuvat seadet, näiteks Raspberry Pi või Arduino.

Paigaldusaeg ja seadistamine võtsid Delta hoone puhul aega mõned tunnid. Majakatele tuli valida sobivad positsioonid ja nad füüsiliselt kinnitada, seejärel tuli sisestada nende koordinaadid rakenduse andmebaasi. Korteris oli paigaldus kiirem, kuna majakaid oli vähem ja ruum lihtsam. Majakate hooldusvajadus oli testide põhjal minimaalne, sest ükski nööp-patarei tühjaks ei saanud. Püsivate lahenduste puhul tuleks arvestada majakate vooluvõrku ühendamisega või superkondensatorite lisamisega. Muu hooldus piirdub majakate võimaliku ümberkalibreerimise või ümberpaigutamise juhul, kui hoones tehakse muudatusi.

3.2.6 Edasised arendusideed

Arvestades töö prototüüpset olemust, on mitmeid võimalusi süsteemi täiendavaks parendamiseks ja täpsuse tõstmiseks. Olulisemad edasised arendussuunad on näiteks järgmised:

- Majakate reklaamsignaali ulatuse parandamiseks võiks kaaluda võimsamate antennide ja suuremate toiteallikate kasutamist. See võimaldaks suurendada signaalitugevust ning parandada levi ulatust ja kvaliteeti, mis omakorda suurendaks vastuvõetud andmete stabiilsust.
- Nutikam trajektoorigõrdlus ja kaartide kasutamine: Süsteemi täpsust võiks parandada trajektoori sobitamine teadaoleva põrandaplaaniga, näiteks võiks rakendus võrrelda arvutatud trajektoori hoone ruumilise paigutusega. Juhul, kui hinnanguline liikumistee kaldub väljapoole koridori või maja piirdeid, saaks seda kohandada realistlikumaks. Samuti võib nutikam trajektooriandmete analüüs tuvastada ebatõenäolisi hüppeid ning neid algoritmiliselt siluda.
- Majakate dūnaamiline valik: Tulevikus võiks positsioneerimisalgoritm valida dūnaamiliselt, milliste majakate andmeid parasjagu rohkem usaldada. Näiteks kui mõne majaka RSSI käitumine viitab peegeldusele või anomaaliale, saaks seda majakat hetkeks arvutustest välja jätta. Optimaalse signaalikombinatsiooni valimine, arvestades majakate paiknemist ja signaalide tugevust, vähendaks valede tulemuste ohtu ja võiks parandada trilateratsiooni stabiilsust.

Katsetulemused näitasid, et kombineerides BLE-majakate võrgu ja inertsiaalandurite andmed, on võimalik saavutada toimiv ja praktiline siseruumide positsioneerimissüsteem. Süsteem suutis edukalt määrata kasutaja asukohta nii liikumise ajal kui ka paigalolekus, arvestades majakate ja andurite hetkeseisundit. Ehkki esines piiranguid signaalitugevuse ja majakate paigutuse osas, viitavad tulemused sellele, et täienduste ja optimeerimisega on võimalik süsteemi täpsust ja töökindlust oluliselt parandada.

Kokkuvõte

Bakalaureusetöö eesmärk oli luua Bluetooth Low Energy (BLE) tehnoloogial ning InPlay IN100 NanoBeacon majakatel põhinev siseruumide positsioneerimissüsteem ja seda hinnata. Töö käigus töötati välja iOS-platvormil toimiv mobiilirakendus, mis kombineerib BLE-majakatelt saadud signaalide RSSI-põhise trilateratsiooni ning nutitelefone inertsiaalanduritel põhineva PDR-algoritmi. Väljatöötatud prototüüp kuvab kasutaja asukohta reaalajas interaktiivsel kaardil, sarnaselt levinud kaardirakendustele.

Autori jaoks peamine pingutus oli BLE majakasignaalidest saada piisavalt täpne positsioon ja siduda see sujuvalt PDR andmetega. Rohket katsetamist nõudis sobiva filtri häälestamine, et kahest mürrarikkast allikast tekiks ühtlane ja usaldusväärne tulemus. Keeruline oli ka PDR arvutuste kalibreerimine, näiteks täpne sammude tuvastus ning põhjasuuna vastavusse viimine korruseplaanide telgedega, et nool kaardil näitaks tegelikku liikumissuunda. Graafiline kiht (SwiftUI kaardi-vaated, ikoonid, animatsioonid) olid tehniliselt lihtsamad, kuid ajamahukad, sest vajasis rohkelt peenhäälestust, et saavutada sujuv kaardi interaktiivsus. Töö füüsilisest poolest oli vaja ette valmistada 17 IN100 majakat, kus joodeti majakate külge vajalikud UART-pesad ja konfigureeriti nad sobivasse iBeacon-protokollile. Lõpuks kinnitati majakad rakenduses märgitud koordinaatidele, et katsed toetuksid usaldusväärsele riistvarapõhjale.

Autor testis loodud lahendust Tartu Ülikooli Delta hoones ja kodus keskkonnas, analüüsides ühtlasi süsteemi rakendamise tingimusi: majakate paigutuse tihedust ja signaalitugevuse mõju täpsusele, seadmete hooldusvajadust ning lahenduse kulukust (riistvara hind ning paigaldus- ja seadistusaeg). Katsetulemused näitasid, et väljatöötatud BLE-majakate võrgustik suudab väiksemates ja avatud ruumides tagada rahuldava positsioneerimistäpsuse. Suurematel või keerukama sisekujundusega aladel võib signaali peegeldumise ja majakate asetuse tõttu täpsus mõnevõrra langeda. Valmis saanud rakendus osutus kasutajasõbralikuks ning kinnitas, et BLE-majakatel põhinev lahendus on tehniliselt teostatav ja kuluefektiivne alternatiiv Wi-Fi-põhistele sisepositsioneerimissüsteemidele.

Autor reflekteeris tööprotsessi raskustele ja kogemustele. Süsteemi arendamisel tuli ületada mitmeid väljakutseid, nagu RSSI signaalide kõikumisest tingitud positsiooni "hüplemine" ja PDR-meetodi vea kuhjumine pikemaajalisel kasutusel. Nende probleemide leevendamiseks rakendati kahe meetodi kombineeritud lähenemist ning algoritme kalibreeriti. Töö käigus saadud kogemus kinnitas BLE-põhise positsioneerimise lahenduste arendamise keerukust, kuid ka potentsiaali. Bakalaureusetöö lõpus pakutakse välja mitu edasist arendusvõimalust, sealhulgas majakate võimendamine võimsamate antennide ja toitega, arvutuslikult trajektoori sobitamine hoone põrandaplaaniga ning majakasignaalide dünaamiline filtreerimine ebatäpsuste vähendamiseks. Kokkuvõttes täideti töö algsed eesmärgid edukalt ning loodud lahendus ja tulemused loovad tugeva aluse positsioneerimissüsteemi edasiseks arendamiseks.

Viidatud kirjandus

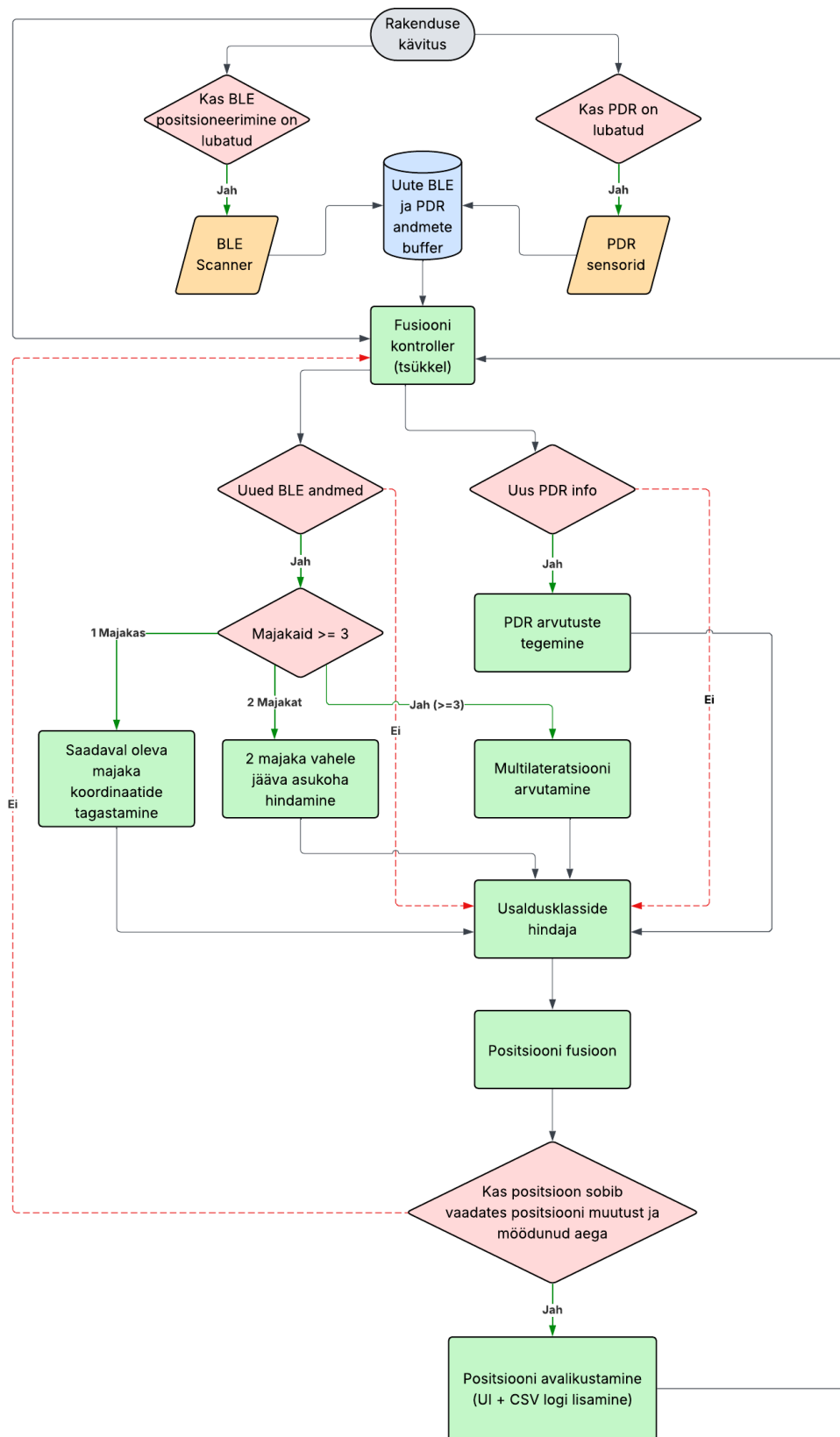
- Apple Inc. (2025). *Hotspot helper*. Apple Developer. <https://developer.apple.com/documentation/networkextension/hotspot-helper> (04.05.2025).
- Bahhir, N. (2024). *Positioning using WiFi* [Bachelor's thesis, UNIVERSITY OF TARTU]. <https://dspace.ut.ee/items/9010efc7-0ee9-4711-9d5b-c3d322fbafec>
- Coppens, D., Shahid, A., Lemey, S., Van Herbruggen, B., Marshall, C., & De Poorter, E. (2022). An Overview of UWB Standards and Organizations (IEEE 802.15.4, FiRa, Apple): Interoperability Aspects and Future Research Directions. *IEEE Access*, *10*, 70219–70241. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3187410>
- Dabove, P., Di Pietra, V., Piras, M., Jabbar, A. A., & Kazim, S. A. (2018). Indoor positioning using Ultra-wide band (UWB) technologies: Positioning accuracies and sensors' performances. *2018 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS)*, 175–184. <https://doi.org/10.1109/PLANS.2018.8373379>
- de Francisco, R., & Pandharipande, A. (2010). Spectrum occupancy in the 2.36–2.4 GHz band: Measurements and analysis. *2010 European Wireless Conference (EW)*, 231–237. <https://doi.org/10.1109/EW.2010.5483422>
- Ferro, E., & Potorti, F. (2005). Bluetooth and Wi-Fi wireless protocols: A survey and a comparison. *IEEE Wireless Communications*, *12*(1), 12–26. <https://doi.org/10.1109/MWC.2005.1404569>
- Illus, G. (2021). *Wi-Fi Positioning System* [Bachelor's thesis, Tartu Ülikool]. <https://dspace.ut.ee/items/86e38fa4-abc5-47ae-8c53-03079eb413c3>
- InPlay. (2022a). *NanoBeacon Config Tool*. InPlay-Tech. <https://inplay-tech.com/nanobeacon-config-tool> (28.04.25)

- InPlay. (2022b). *NanoBeacon Technology*. InPlay-Tech. <https://inplay-tech.com/in100> (28.04.25)
- InPlay. (2024). *IN100 Datasheet*. InPlay. https://inplay-tech.com/s/IN100-datasheet_Updated.pdf (28.04.25)
- Janczak, D., Walendziuk, W., Sadowski, M., Zankiewicz, A., Konopko, K., & Idzkowski, A. (2022). Accuracy Analysis of the Indoor Location System Based on Bluetooth Low-Energy RSSI Measurements. *Energies*, *15*(23). <https://doi.org/10.3390/en15238832>
- Lee, B., Woo, D.-M., Park, M.-K., & Kim, S. (2014). Development of self-localizer using collaboration of trilateration and triangulation. *2014 11th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD)*, 729–733. <https://doi.org/10.1109/FSKD.2014.6980926>
- Leitch, S. G., Ahmed, Q. Z., Abbas, W. B., Hafeez, M., Laziridis, P. I., Sureephong, P., & Alade, T. (2023). On Indoor Localization Using WiFi, BLE, UWB, and IMU Technologies. *Sensors*, *23*(20). <https://doi.org/10.3390/s23208598>
- Pan, W., Yang, Y., Chen, M., Wei, D., Guo, C., & Mao, S. (2025). Fusing Bluetooth with Pedestrian Dead Reckoning: A Floor Plan-Assisted Positioning Approach. *arXiv preprint arXiv:2504.09905*.
- Qian, J., Pei, L., Ma, J., Ying, R., & Liu, P. (2015). Vector Graph Assisted Pedestrian Dead Reckoning Using an Unconstrained Smartphone. *Sensors*, *15*(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/s150305032>
- Simões, W. C. S. S., Machado, G. S., Sales, A. M. A., de Lucena, M. M., Jazdi, N., & de Lucena, V. F. (2020). A Review of Technologies and Techniques for Indoor Navigation Systems for the Visually Impaired. *Sensors*, *20*(14), Article 14. <https://doi.org/10.3390/s20143935>

- Slavin, A. (2022). *Delta Wi-Fi Positioning System* [Bachelor's thesis, UNIVERSITY OF TARTU]. <https://dspace.ut.ee/items/3b9f72b2-8f94-44d6-8b07-8ebd51a1aa02>
- SparkFun. (2023). *SparkFun NanoBeacon Board IN100*. SparkFun. https://github.com/sparkfun/SparkFun_NanoBeacon_Board_-_IN100 (28.04.25)
- Zhuang, Y., Yang, J., Li, Y., Qi, L., & El-Sheimy, N. (2016). Smartphone-Based Indoor Localization with Bluetooth Low Energy Beacons. *Sensors*, *16*(5). <https://doi.org/10.3390/s16050596>
- Yan, J., Zhang, M., Yang, J., Mihaylova, L., Yuan, W., & Li, Y. (2024). WC-CP: A Bluetooth Low Energy Indoor Positioning Method Based on the Weighted Centroid of the Convex Polygon. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, *13*(10), Article 10. <https://doi.org/10.3390/ijgi13100354>

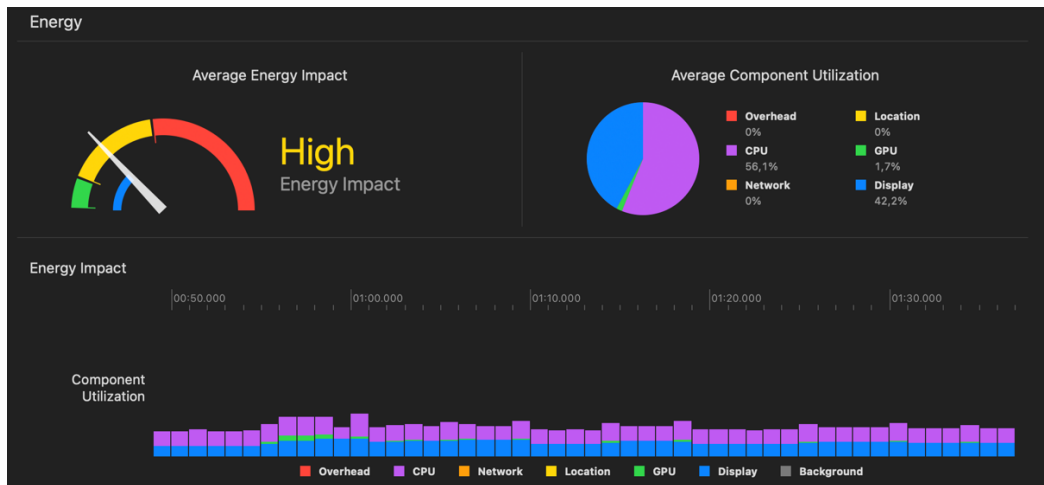
Lisad

Lisa 1 Rakenduse osaline töövo diagramm

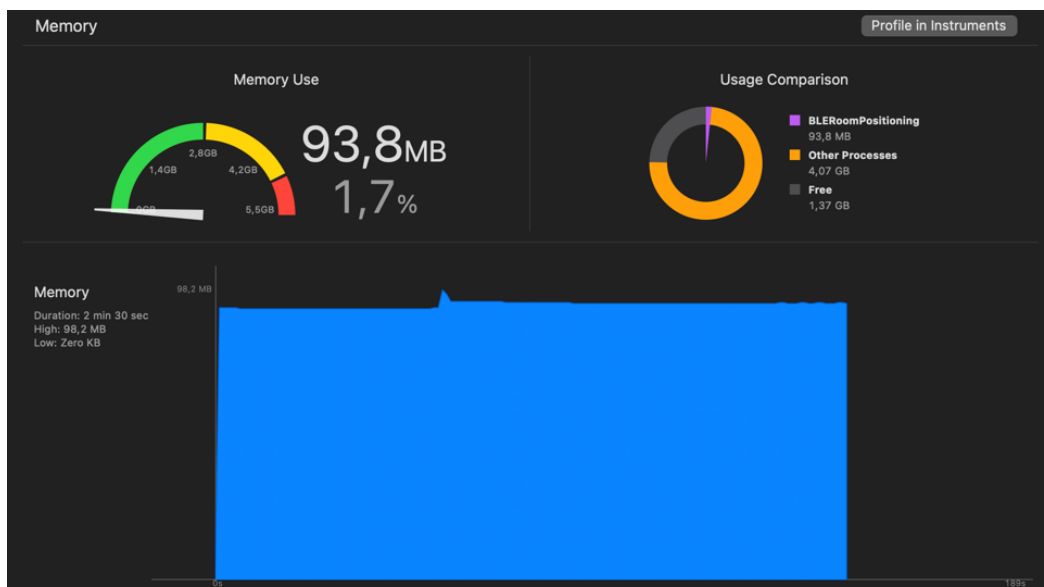


Lisa 2 Rakenduse jõudluse analüüs

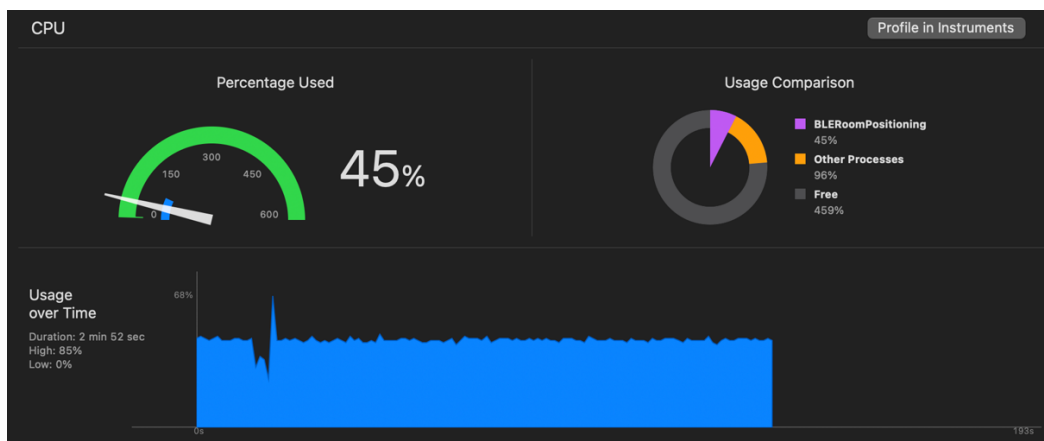
Lisa 2.1 Energiatarbe analüüs



Lisa 2.2 Mälukasutuse analüüs



Lisa 2.3 Protsessori kasutuse analüüs



Litsents

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Siim Turban ,
(*autori nimi*)

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose

Siseruumide positsioneerimissüsteem IN100 BLE nanomajakatega ,
(*lõputöö pealkiri*)

mille juhendaja(d) on Alo Peets ,
(*juhendaja nimi*)

reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada Tartu Ülikooli digitaalarhiivi kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni;

2. annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi kaudu Creative Commons litsentsiga CC BY NC ND 4.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni;
3. olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;
4. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Siim Turban

15.05.2025