

Univerza v Ljubljani

Fakulteta za elektrotehniko

Grega Jezeršek

**Lokalizacija oddajnika v zaprtem prostoru
z uporabo inercialnega navigacijskega
sistema**

Magistrsko delo

Mentor: prof. dr. Igor Škrjanc, univ. dipl. inž. el.

Somentor: as. –raz. dr. Simon Tomažič, univ. dipl. inž. el.

Ljubljana, 2018

Zahvala

Zahvaljujem se mentorju g. Igorju Škrjancu za mentorstvo in pomoč pri določevanju teme magistrskega dela.

Zahvaljujem se tudi somentorju g. Simonu Tomažiču za vso strokovno pomoč, koristne nasvete in spodbudo pri izdelavi tega magistrskega dela.

Hvala obema!

Vsebina

1 Uvod	17
2 Teoretični uvod	19
2.1 Inercialni navigacijski sistem	19
2.1.1 Senzorji	20
2.1.2 Digitalni kompas	22
2.1.3 Pedometrija	23
2.1.4 Detekcija korakov	24
2.1.5 Ocenjevanje dolžine in smeri koraka	28
2.2 Globalna lokalizacija v prostoru	31
2.2.1 Trilateracija	33
2.3 Bluetooth	35
2.3.1 Bluetooth Low Energy	37
2.3.2 Model BLE oddajnika	39
2.4 Iskanje položaja oddajnika	43
2.4.1 Metoda Levenberg-Marquardt	44
2.4.2 Določevanje optimalne poti	46
3 Eksperiment 1: Iskanje oddajnika v prostoru	49
3.1 Opis naloge	50
3.2 Postopek razvoja algoritma	50
3.3 Funkcijski opis programa	51
3.4 Rezultati in končni izgled	54

4 Eksperiment 2: Določanje položaja oddajnikov vzdolž stene	57
4.1 Opis naloge	58
4.2 Postopek razvoja algoritma	58
4.3 Funkcijski opis programa	59
4.4 Rezultati.....	61
5 Zaključek	63
6 Literatura	65

Kazalo slik

Slika 1: Žiroskop z vrtljivo maso	21
Slika 2: Shematski prikaz pospeškometra z odklonsko maso	21
Slika 3: Predstavitev Eulerjevih kotov (levo) in njihova singularnost (desno).....	23
Slika 4: Primerjava filtriranega in nefiltriranega signala	25
Slika 5: Pospešek v okolici mirovne lege z omejenim območjem.....	26
Slika 6: Tritočkovni signal z zaznanimi koraki.....	27
Slika 7: Potovanje signala skozi okno: levo sta prikazana dva koraka v oknu, desno samo še en	28
Slika 8: Primerjava položajev določenih z INS v primerjavi z referenčno hojo; dve hoji v različnih smereh po enaki referenčni poti.....	31
Slika 9: Rezultat idealne trilateracije (levo) in realne trilateracije (desno).....	34
Slika 10: Rezultat realne trilateracije brez presečišč.....	34
Slika 11: Oddajnik iBeacon podjetja Kontakt.io.....	40
Slika 12: Shematski prikaz postavitve merjenja relacije med jakostjo signala in oddaljenostjo	40
Slika 13: Prileganje obeh modelov z meritvami	42
Slika 14: Primer lokacije oddajnika in optimalne poti okoli njega.....	47
Slika 15: Spreminjanje razmerja ploščine v odvisnosti od kota	48
Slika 16: Izgled programskega okolja Android Studio	51
Slika 17: Shematski prikaz poteka algoritma.....	53
Slika 18: Zaslonec med zajemom meritev na mobilnem telefonu.....	54
Slika 19: Prikaz na zaslonu med hojo proti novi merilni točki	55
Slika 20: Prikaz na zaslonu med sledenjem končni lokaciji	55
Slika 21: Grafičen prikaz končnega rezultata z ocejeno lokacijo oddajnika in ocenjenimi merilnimi točkami	56
Slika 22: Izgled programskega okolja Matlab	59
Slika 23: Primerjava filtriranega prevzorčenega signala in surovega signala.....	60
Slika 24: Prikaz zajema vrednosti BLE signala v času korakov	60
Slika 25: Grafični prikaz ujemanja izmerjenih in ocenjenih lokacij oddajnikov.....	61

Kazalo tabel

Tabela 1: Seznam enot in kratic v magistrskem delu	9
Tabela 2: Razredi Bluetooth naprav	36
Tabela 3: Močnostni razredi BLE oddajnika iBeacon.....	38
Tabela 4: Prikaz meritev na različnih oddaljenostih.....	41
Tabela 5: Koeficienti modelov in vrednost vsote absolutnih napak.....	42
Tabela 6: Numerična primerjava rezultatov	62

Seznam uporabljenih simbolov

Spodnja tabela predstavlja enote in kratice, ki se pojavljajo v magistrskem delu.

Enote		Kratice	
Ime	Simbol	Kratica	Pomen
decibel miliwat	dBm	BLE	Bluetooth Low Energy
Hertz	Hz	csv	Comma separetev value
Mega bit na sekundo	Mbit/s	GLONASS	Globalnaja Navigacionnaja Sputnikovaja Sistema
meter	m	GFSK	Gaussian frequency-shift keying
mikro Tesla	μ T	GPS	Global Positioning System
		IAE	Integral Absolute Error
		IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
		INS	Inercialni navigacijski sistem
		IoT	Internet of Things
		JRE	Java Runtime Environment
		LM	Levenberg-Marquardt
		MAC	Media Access Control address
		MEMS	Mikro elektro-mehanski sistem
		SIG	Special Interest Group
		WLAN	Wireless Local Area Network

Tabela 1: Seznam enot in kratic v magistrskem delu

Vektorji in matrike so zapisani z odebeljeno pisavo. Pomen kratic je opisan tudi v besedilu ob prvem pojavu kratice.

Povzetek

V magistrskem delu smo se osredotočili na avtomatizirano iskanje Bluetooth Low Energy oddajnikov v prostoru z uporabo inercialne navigacije. Za zajem podatkov smo uporabili pametni telefon z vsemi potrebnimi merilniki. Predstavili smo uporabo notranjih globalizacijskih sistemov in način združevanja le teh v avtomatiziran sistem za iskanje oddajnika. V prvem delu smo iskali izgubljeni oddajnik v prostoru, v drugem delu pa smo avtomatizirano določili položaj oddajnikov, razporejenih vzdolž stene s preprostim sprehodom vzdolž stene.

Ključne besede: Inercialni navigacijski sistem, Bluetooth Low Energy, pametni mobilni telefon, iskanje oddajnikov iBeacon

Abstract

Within this dissertation we focused on automated search of Bluetooth Low Energy beacons within an area by means of inertial navigation. Smartphone was used as a data acquisition device which already includes all the necessary measuring devices. We demonstrated the use of inertial navigation systems and merging of these instruments into automated system for locating beacons. In the first part we were searching for a lost beacon within a room while in the second part, we presented an automated way of locating beacons placed along the wall by simply walking along it.

Key words: Inertial navigation system, Bluetooth Low Energy, smart mobile phone, beacons iBeacon search

1 Uvod

Z razvojem interneta stvari (angl. *Internet of Things – IoT*) se vedno pogosteje uporabljajo vse manjši in varčnejši merilniki. Tako so se razvili tudi Bluetooth Low Energy oddajniki, ki preko Bluetoothu podobnemu protokolu pošiljajo zbrane podatke, merjene vrednosti ali samo svojo identifikacijsko številko. Oddajniki so lahko postavljeni stacionarno na stenah zgradb, ali pa so vgrajeni v majhne predmete (obeske). Slednji se uporabljajo za pomoč pri iskanju predmetov (npr. ključev), kadar jih založimo. Oddajniki, postavljeni v zgradbah, se lahko uporabljajo tudi za notranjo navigacijo po prostoru, vendar je potrebno predhodno natančno določiti njihov položaj glede na referenčno točko. Zaradi velikega števila oddajnikov je takšno delo običajno zelo zamudno.

V magistrskem delu smo se osredotočili na avtomatizirano iskanje omenjenih oddajnikov v prostoru z uporabo inercialne navigacije. Za zajem podatkov smo uporabili pametni telefon z vsemi potrebnimi merilnimi napravami za uspešno iskanje oddajnika. Hkrati je pametni mobilni telefon postal nepogrešljiv pripomoček skoraj vsakega posameznika. To omogoča dobro dostopnost tovrstnih aplikacij in povečuje njihovo uporabnost.

Predstavili smo delovanje notranjih lokalizacijskih sistemov in način združevanja le teh v avtomatiziran sistem za iskanje posameznega oddajnika v prostoru ali več oddajnikov postavljenih vzdolž stene. Predstavili smo zgradbo in delovanje inercialnega navigacijskega sistema ter pripadajoče merilnike. Preverili smo njegovo delovanje ter prikazali način detektiranja korakov, njihovo dolžino in določevanje njihove smeri. Vse to smo uporabili, rekonstruirali prehojeno pot in primerjali z referenčno potjo. Prav tako smo zgradili matematični model oddajnika, ki z zadovoljivo točnostjo opisuje relacijo med oddaljenostjo oddajnika in jakostjo prejetega signala. Izbor poti, ki jo prehodimo v okolici oddajnikov med iskanjem oz. določanjem položaja, občutno vpliva na končni rezultat. Zato smo predstavili predloge in nasvete za izbiro optimalne poti z najbolj točnimi rezultati. Za določanje lokacije oddajnikov smo uporabili optimizacijsko metodo Levenberg-Marquardt.

Magistrsko delo smo predstavili preko dveh eksperimentov. V prvem smo implementirali algoritem za iskanje izgubljenega oddajnika v prostoru. Jakost njegovega oddanega signala, ki smo ga prepoznali po MAC naslovu, smo izmerili s pametnim mobilnim telefonom.

V drugem eksperimentu smo razvili algoritem, ki omogoča avtomatizirano določanje položajev oddajnikov vzdolž stene. Podatke smo zajeli s preprostim sprehodom vzdolž stene in v rokah držali pametni mobilni telefon.

2 Teoretični uvod

2.1 Inercialni navigacijski sistem

Inercialni navigacijski sistem (INS) je navigacijski sistem, ki z uporabo senzorjev znotraj naprave ocenjuje položaj in lokacijo naprave glede na začetno referenčno točko. Razvijati so jih začeli že pred koncem druge svetovne vojne. Najpogosteje so se uporabljali v raketnih sistemih [1].

INS poleg lastnega položaja ocenjuje tudi zasuk in hitrost naprave. Običajno so sestavljeni iz treh ortogonalnih žiroskopov in treh ortogonalnih merilcev pospeška. Z njimi se meri kotne in linearne pospeške iz katerih se nato z obdelavo signalov oceni položaj in orientacijo v prostoru [1].

Za določitev položaja in orientacije potrebujemo začetno točko in začetno orientacijo. Z integriranjem kotnega pospeška po času lahko določimo zasuk in z integracijo linearnega pospeška premike naprave. Z uporabo kinematičnih enačb za dani sistem je nato možno izračunati novo oceno položaja in orientacije. Običajno se taki preračuni izvajajo v realnem času, kar je ena izmed prednosti INS. Takšen način navigacije se imenuje navigacija na slepo (angl. *Dead reckoning*).

Kadar se navigacija na slepo izvaja pri pešcih, se premike izračunava glede na dolžino koraka in smer, v katero so bili narejeni. Vsak korak hkrati predstavlja nov položaj pešca [2].

Enačba (2.1) predstavlja kinematični model diferencialnega pogona; tj. vozilo z dvema kolesoma vpetima na straneh. Ista enačba natančno opisuje tudi hojo človeka, če se oseba ne premika vstran. V enačbi x in y predstavljata položaj v danem trenutku k , zasuk je označen s θ . Sprememba zasuka je označena kot $\Delta\theta$ in predstavlja razliko v zasuku med trenutkoma $k-1$ in k . Na spremembo položaja vpliva tudi dolžina koraka (oz. hitrost diferencialnega pogona), kar je v enačbi označeno z d [3].

$$\begin{bmatrix} x_k \\ y_k \\ \theta_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{k-1} + d_k \cos(\theta_k) \\ y_{k-1} + d_k \sin(\theta_k) \\ \theta_{k-1} + \Delta\theta_k \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Slabost inercialnih navigacijskih sistemov je velika podvrženost majhnim merilnim odstopanjem, ki v nadaljevanju zaradi integracije po času rezultirajo v večjih odstopanjih. Izvor takih napak je napačna ocena hitrosti, ki se s časom povečuje. Ker se nov položaj merilne naprave izračuna na podlagi prejšnjega položaja in ocene hitrosti, se napaka akumulira približno proporcionalno s časom. Bolj točne meritve napako zmanjšajo, vendar se nikoli dokončno ne odpravi. Za odpravo napake je potrebno v sistem dodati novo referenčno točko. Najpogosteje se uporablja podatke s satelitskega navigacijskega sistema, ki se nato preko različnih digitalnih filtrov združujejo v sistem. Najbolj pogosto se uporabljata filter delcev (angl. *Particle filter*) in Kalmanov filter [1].

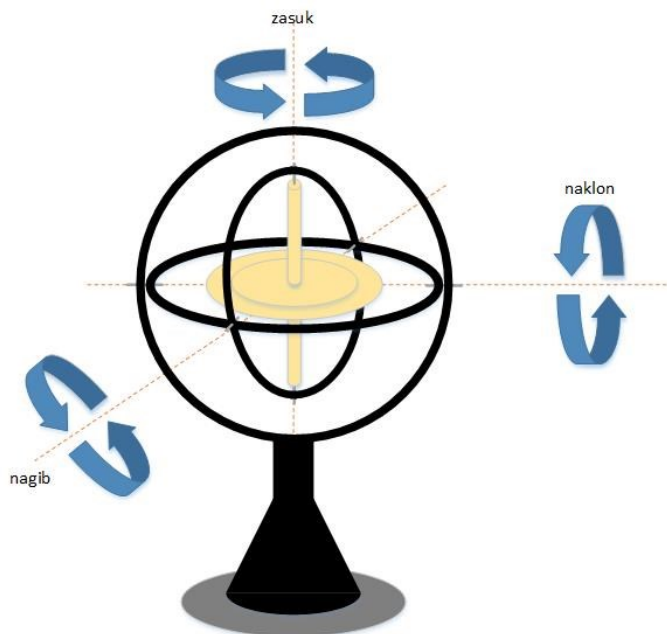
Prednost inercialnega navigacijskega sistema je, da po začetni inicializaciji ne potrebuje nobenega zunanega merilnika položaja in orientacije za določevanje lastnega položaja ter orientacije. Poleg tega so neodvisni od zunanjih vplivov in motenj ter lahko enako dobro delujejo v različnih težkih pogojih (pod vodo, v vesolju, itd.) [1].

Danes so zelo pogosti v mnogih transportnih sistemih, ne samo v letalih, ampak tudi v ladjah in vedno več tudi v avtomobilih. Njihova uporaba se povečuje predvsem zaradi dokaj enostavne integracije v obstoječe sisteme. Z razvojem mikro elektromehanskih sistemov (MEMS) so postali sistemi izjemno majhni, cenovno ugodnejši in enostavnejši za izdelavo [1].

2.1.1 Senzorji

Za delovanje INS je v sistemu potrebno imeti notranje senzorje. Največkrat so to merilniki pospeškov in žiroskopi. V zadnjem času se vedno bolj pogosto dodajajo tudi merilniki magnetnega polja.

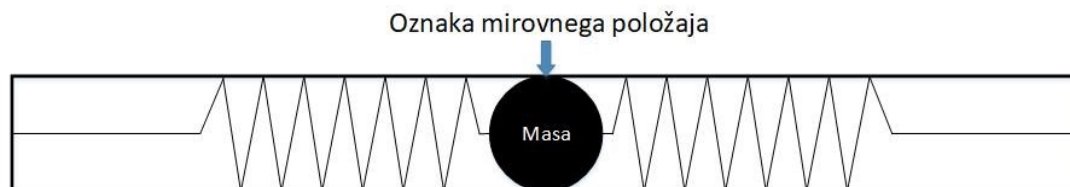
Žiroskop je merilnik zasuka oz. kotnega pospeška, na katerega linearni pospešek nima vpliva. Najpogostejše izvedbe žiroskopov so žiroskopi z vrtljivo maso (Slika 1) ali vibrirajoči (MEMS) žiroskopi. V principu je žiroskop sestavljen iz vrtljive mase, ki se vrti znotraj okvirja. Okvir je sestavljen iz treh struktur. Vsaka izmed njih se lahko vrti v svoji smeri. Vrteča masa zaradi svoje vrtilne količine preprečuje, da bi se zavrtela pod zunanjim navorom in vzdržuje prvotno orientacijo. Ker je masa vpeta v vrtljivo strukturo, bo po zasuku os vrtenja obdržala prvotno smer, vrtljiv okvir pa se bo zavrtel. Ta zasuk z merilno napravo zaznamo in izmerimo [4].



Slika 1: Žiroskop z vrtljivo maso [4]

Merilnik pospeška meri linearni pospešek v smeri lastne orientacije. Zaradi tega bo na podlagi mirujoč merilnik izmeril gravitacijski pospešek (približno $9,81 \text{ m/s}^2$), medtem ko bo prosto padajoči merilnik izmeril pospešek 0 m/s^2 . Poleg merjenja pospeška se uporablja tudi za merjenje vibracij.

Konceptualno so merilniki pospeška zgrajeni iz mase vpete na vzmet. Ko je merilnik izpostavljen pospešku, se masa odmakne iz ravnovesne lege. Velikost odklona je sorazmerna pospešku, ki je povzročil odklon. Slika 2 prikazuje shematski prikaz takšnega merilnika. Novejši MEMS merilniki so narejeni z utežjo pripeto na prosto nihajoči ročici. Ko je merilnik izpostavljen pospešku se masa odkloni, kar povzroči spremembo v merjeni veličini (običajno sta to kapacitivnost ali upornost). Sprememba merjene veličine je sorazmerna s pospeškom, ki je povzročil odklon [5].



Slika 2: Shematski prikaz pospeškometra z odklonsko maso [7]

Merilnik magnetnega polja oz. magnetometer lahko meri skupno magnetno polje ali polje v treh različnih smereh. Magnetometer se poleg določevanja jakosti magnetnega polja uporabljajo tudi za določevanje smeri v globalnem koordinatnem

sistemu. Bolj pogosti tipi magnetometrov delujejo na principu indukcije in Hallovega efekta. Hallov efekt se pojavi, kadar je vodnik, skozi katerega teče tok, postavljen v magnetno polje. Na elektrone, ki tečejo skozi vodnik, zaradi premikanja deluje magnetna sila, ki jih odrine na rob vodnika. Tako se med stenami vodnika pojavi električna napetost. Jakost magnetnega polja se izračuna iz jakosti toka skozi vodnik in napetosti med stenama vodnika [6].

2.1.2 Digitalni kompas

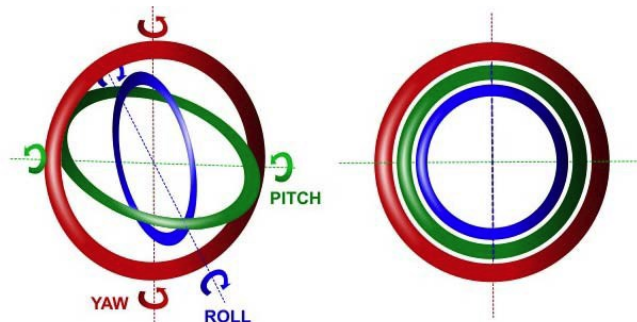
Digitalni kompas se, tako kot klasični kompas z magnetno iglo, uporablja za določevanje smeri neba glede na globalni koordinatni sistem. Za razliko od navadnega kompasa je digitalni kompas zgrajen iz skupine merilnikov znotraj naprave. Zaradi stalno prisotnega Zemljinega magnetnega polja (velikosti približno $25 \mu\text{T}$) in približno konstante smeri, se lahko z uporabo magnetometra določi približno orientacijo naprave. Za točno določitev se uporablja merilnik pospeška, s katerim se lahko določi Z os svetovnega koordinatnega sistema (ki je vzporedna z gravitacijskim pospeškom). Tako lahko določimo vse osi globalnega koordinatnega sistema. Merilnik pospeška določi smer Z in magnetometer določi smer Y. Manjkajočo smer X izračunamo z vektorskim produktom osi Y in Z [8].

Zaradi svoje majhne dimenzije in enostavnosti delovanja so pogosti predvsem v mobilnih napravah. Vseeno je magnetometer zelo občutljiv na bližnjo okolico, saj lahko ti preusmerjajo in absorbirajo magnetno polje. To napako lahko eliminiramo z implementacijo žiroskopa, ki ima zaradi svoje višje frekvenco vzorčenja tudi boljšo odzivnost.

Digitalni kompas je tako fuzija treh merilnikov; pospeškometra, magnetometra in žiroskopa. Vsak omenjen merilnik se samostojno zelo redko uporablja. Glavno pomanjkljivost, predvsem žiroskopa, predstavlja pristranskost (angl. *bias*) in lezenje (angl. *drift*), ki se s časom povečujeta. Merilniki so običajno skupaj združeni preko Kalmanovega filtra, kar zmanjša nastale napake. Problem se lahko pojavi, kadar Kalmanov filter nima optimalno nastavljenih faktorjev zaupanja in ima določen senzor večji vpliv na skupni rezultat, četudi je napačen. Na natančno delovanje digitalnega kompasa zelo vpliva kvaliteta MEMS vezij, s katerim so realizirani posamezni merilniki [8].

Mobilni telefoni imajo združene vse tri merilnike preko Kalmanovega filtra v interni virtualni merilnik. V operacijskem sistemu Android se imenuje »rotacijski vektor« (angl. *rotation vector*). Uporabili smo ga v prvem delu naloge. Rezultat virtualnega merilnika je kvaternion (angl. *quaternion*), ki opisuje orientacijo naprave.

Kvaternion (enačba 2.2) je matematični zapis v kompleksnem prostoru. Uporablja se za opis orientacije in rotacije predmeta v prostoru. Za razliko od Eulerjevih kotov (nagib, naklon in odklon, angl. *roll*, *pitch* in *yaw*) zapis s kvaternionom nima singularne točke (Slika 3) in se zaradi svoje preproste notacije pogosto uporablja v računalništvu, robotiki, itd.



Slika 3: Predstavitev Eulerjevih kotov (levo) in njihova singularnost (desno) [3]

V enačbi (2.2) so a, b, c in d realne konstante. Oznake i, j in k predstavljajo smerne enotske vektorje [3].

$$\mathbf{q} = a + b\mathbf{i} + c\mathbf{j} + d\mathbf{k} \quad (2.2)$$

Iz kvaterniona rotacijskega vektorja se lahko s preprostimi formulami izračuna iskane Eulerjeve kote [3].

$$\begin{bmatrix} \text{nagib} \\ \text{naklon} \\ \text{odklon} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \arctan\left(\frac{2(ab+cd)}{a^2-b^2-c^2+d^2}\right) \\ -\arcsin(2(bc-ad)) \\ \arctan\left(\frac{2(ad+bc)}{a^2+b^2-c^2-d^2}\right) \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

2.1.3 Pedometrija

Inercialni navigacijski sistem zaradi integracije pospeškov prinaša veliko napak v oceno položaja. To se hitro pozna predvsem pri pešcih. Pomagamo si lahko s števcem korakov, tj. pedometrom. Prednost je v približno konstantni povprečni dolžini koraka zato se napake počasneje akumulirajo [8].

Pedometer je naprava, ki na podlagi premikanja zaznava uporabnikove korake. Te lahko hkrati tudi sešteva in določi celotno prehojeno pot. Kot samostojno napravo jo največkrat uporabljajo športniki. Danes namesto namenskih naprav pedometre

najdemo večinoma znotraj mobilnih telefonov, ker predstavljajo praktičen vir mnogih vrst merilnikov [9].

Pedometrija je postopek, pri katerem z analizo signalov ocenimo časovni trenutek koraka in njegovo dolžino. V preteklosti so namenske naprave vsebovale mehanski števec v kombinaciji z nihalom, ki je ob enakomerni hoji premikal števec. Sedaj je večina realizacij pedometrov izvedena z MEMS senzorji, saj se cenovno ugodnejši, manjši in lažji [9].

Pedometrija temelji na uporabi merilnika pospeška. Z njim se lahko oceni lastnosti koraka uporabnih za inercialno navigacijo. Zaradi boljših rezultatov smo v našem primeru uporabili še žiroskop in magnetometer, saj zato orientacija naprave ni bila pomembna pri določanju magnitude pospeška [8].

Največ informacij o hoji nosi pospešek v smeri gravitacijskega pospeška. Tako se lahko iz pospeška izračuna in določi, kdaj uporabnik stopi na tla. Prav tako se lažje določi horizontalni pospešek za oceno hitrosti hoje, preko katere se določi dolžina koraka.

V našem primeru smo za določevanje smeri hoje uporabljali tako smerni rotacijski vektor (Eksperiment 1), kot tudi izračun smeri samo z uporabo žiroskopa (Eksperiment 2).

2.1.4 Detekcija korakov

Analiza pospeška je v obeh eksperimentih enaka. Razlika je bila v delovanju: v prvem primeru je bila »online« (analiza v realnem času oz. sprotna analiza) in v drugem »offline« (analiza posnetka celotnega signala oz. nesprotna analiza). Namen analize je bila ocena časovnih trenutkov koraka, celotno število korakov ter ocena njihove dolžine. Pri izračunu detekcije korakov smo upoštevali, da je os Z koordinatnega sistema naprave poravnana z osjo globalnega (Zemljinega) koordinatnega sistema. Na ta način smo držali napravo med izvajanjem meritev. Če bi upoštevali še žiroskop in magnetometer, bi lahko z uporabo rotacijskega vektorja izračunali pospešek v Z smeri globalnega koordinatnega sistema ne glede na orientacijo naprave.

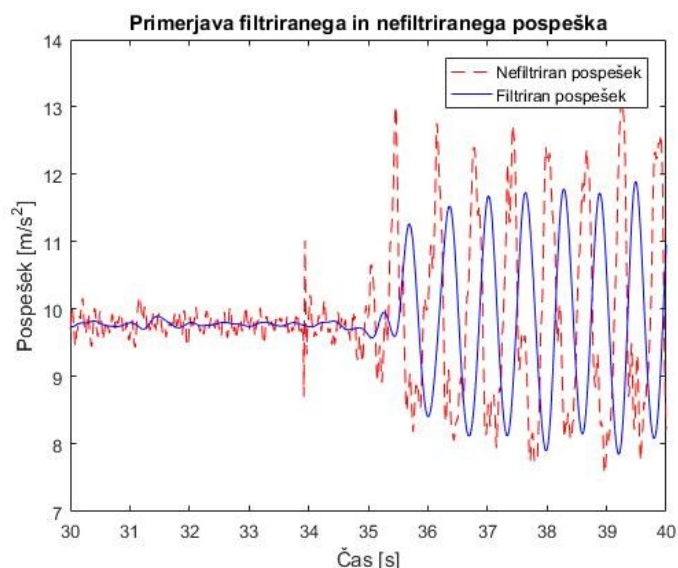
Kot prvo bomo opisali nesprotno analizo. Pri analizi smo upoštevali magnitudo pospeška v vseh smereh, ki jo izračunamo kot [10]:

$$\mathbf{a}_{mag} = \sqrt{\mathbf{a}_x^2 + \mathbf{a}_y^2 + \mathbf{a}_z^2} \quad (2.4)$$

kjer so \mathbf{a}_x , \mathbf{a}_y in \mathbf{a}_z izmerjeni pospeški v danih smereh koordinatnega sistema naprave, \mathbf{a}_{mag} predstavlja magnitudo pospeška potrebnega za analizo. Na ta način določena magnituda se nato v prvem koraku filtrira preko Butterworth filtra četrtega reda, kateremu smo mejno frekvenco (angl. *Cut-off frequency*) nastavili na 2 Hz in čas vzorčenja (angl. *Sampling Rate*) na 100 Hz. Tako se je frekvenca vzorčenja ujemala s frekvenco vzorčenja naprave. S filtrom smo zmanjšali vpliv šuma merilnika, ki nam bi lahko pokvaril oz. oteževal analizo [10].

Maksimalna frekvenca vzorčenja internih merilnikov znaša 200 Hz, vendar smo jo zaradi lažje analize namensko znižali na 100 Hz. To smo naredili tako, da smo vzeli vsak drugi vzorec posnetega signala.

Slika 4 prikazuje razliko med filtriranim in nefiltriranim signalom. Na obeh grafih se vidi ponavljajoče nihanje magnitud, kar že nakazuje na ponavljajoče korake.

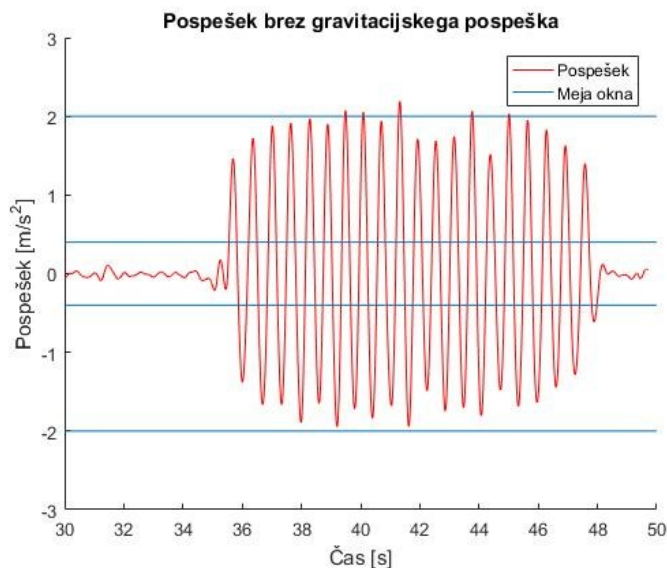


Slika 4: Primerjava filtriranega in nefiltriranega signala

Opazno je, da je na začetku, ko uporabnik še miruje, naprava že izmerila majhno vrednost pospeška. To je prispevek pospeška v smeri Z (ki je poravnana z globalno smerjo Z), ki je prisotna zaradi izvedbe merilnika. Če merilnik miruje, dobimo meritev gravitacijskega pospeška. Kadar bi naprava prosto padala, bi merilnik izmeril približno 0 m/s^2 . Zato v tem delu analize magnitudi odštejemo gravitacijski pospešek konstantne vrednosti $g=9,8 \text{ m/s}^2$.

Meritve pospeška sedaj analiziramo kot odstopanje od točke mirovanja. V tej točki z uporabo okna omejimo detekcijo koraka. Tako se izognemo napačnim detekcijam, ki bi se lahko pojavile zaradi držanja naprave (npr. dihanje, premiki rok, itd.). Sprememba pospeška mora biti na območju med $0,4$ in $2,0 \text{ m/s}^2$. Slika 5 prikazuje

signal in meje okna. Meji okna sta bili določeni eksperimentalno in sta izkazovali primerno delovanje [10].



Slika 5: Pospešek v okolici mirovne lege z omejenim območjem

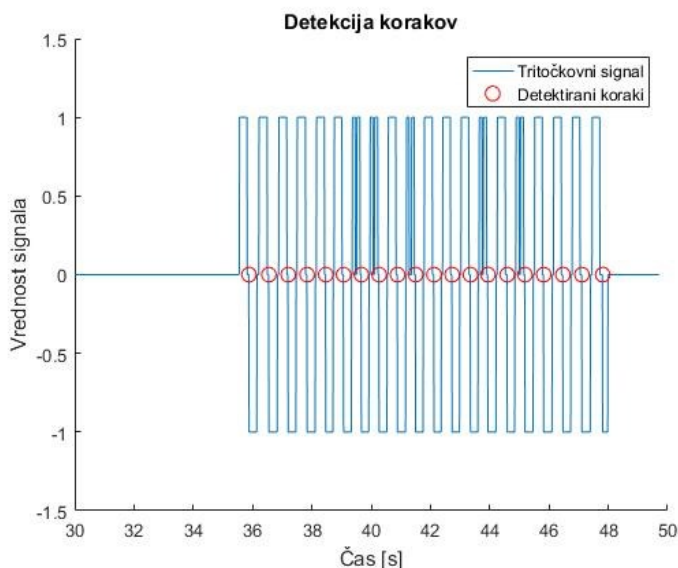
Ko smo določili vse točke analize, smo signal pretvorili v tritočkovni signal, kjer lahko zajema samo vrednosti: -1, 0 in 1. Pretvorba je enostavna preslikava odstopanj omejenih z oknom in je prikazana na enačbi (2.5). Slika 6 prikazuje rezultat takšne pretvorbe.

$$g(t) = \begin{cases} -1; & -2,0 < f(t) < -0,4 \\ 0; & -0,4 < f(t) < 0,4 \vee f(t) < -2,0 \quad \vee f(t) > 2,0 \\ 1; & 0,4 < f(t) < 2,0 \end{cases} \quad (2.5)$$

V enačbi (2.5) je $g(t)$ vrednost tritočkovnega signala v časovnem trenutku t , $f(t)$ pa je vrednost pospeška brez gravitacijskega pospeška v časovnem trenutku t .

Iz tako pretvorjenega signala lahko določimo število korakov in njihove časovne trenutke. Korak se pojavi ob prehodu preko izhodišča (vrednosti 0). Za detekcijo smo izbrali prehod v negativno smer, torej od vrednosti 1 proti -1, zaradi lažje zaznave prvega in zadnjega koraka [10].

Tako je zaključena nesprotna analiza pospeška za detekcijo korakov. Slika 6 prikazuje rezultat detekcije korakov. Opazimo, da so koraki zelo enakomerno razporejeni. Prav tako nam meritve, ki so presegle naše okno, ne pokvarijo detekcije korakov.



Slika 6: Tritočkovni signal z zaznamimi koraki

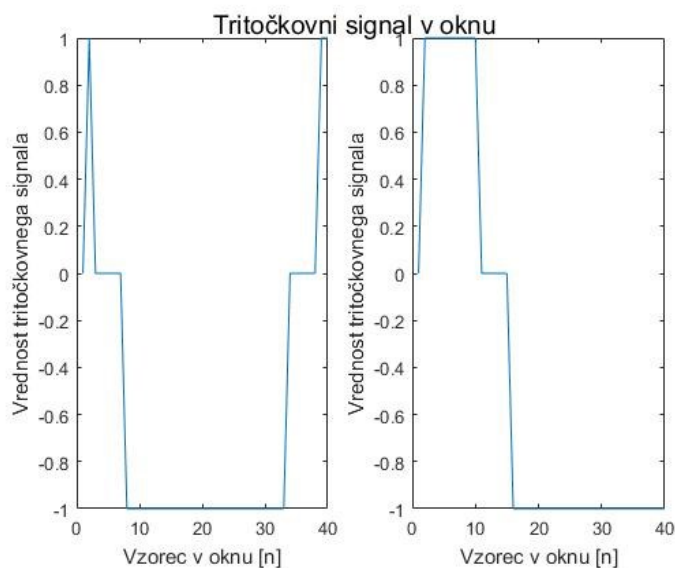
Sprotna analiza pospeška je zelo podobna zgoraj opisani analizi. Deluje po enakem principu kot nesprotna, vendar na krajšem časovnem odseku.

Magnituda pospeška se filtrira z enakim filtrom nastavljenim na delovanje v realnem času in se uporabi ob zajemu meritve pospeška. Tako je rezultat filtriranega signala enak kot pri nesprotni analizi.

Filtriran signal se nato ciklično vpisuje v spomin, ki vsebuje 40 vzorcev. Ob začetku meritve so ti vzorci nastavljeni na gravitacijsko konstantno. V nasprotnem primeru bi takoj ob začetku meritve lahko zaznali neobstoječi korak.

Vzorci znotraj okna so nato podvrženi analizi opisani pri nesprotni analizi (brez Butterworth filtra, ker smo ga uporabili že ob zajemu pospeška). Zaradi cikličnega vpisovanja meritev v okno signal koraka skozi okno potuje dlje časa (Slika 7). Novi vzorci se vpišejo na začetek okna, stari pa se prestavijo za eno mesto naprej. Na robu okna tako vzorci odpadejo iz okna.

Z vnosom novega podatka v okno se hkrati izvede tudi analiza za detekcijo koraka. Ker je korak v oknu viden dlje časa, bi tako določili preveč korakov. Ob vsaki detekciji koraka je zato vgrajen začasen izklop analize. Analiza se takrat ustavi za 53 vzorcev. Kljub temu se vzorci še vedno ciklično vpisujejo v okno. Tako prejšnji korak že zapusti okno, hkrati pa novega težje zgrešimo, ker lovimo korake med normalno hojo. Velikost okna (40 vzorcev) in časovni zamik (53 vzorcev) sta bila določena eksperimentalno in izkazujeta zadovoljivo delovanje.



Slika 7: Potovanje signala skozi okno: levo sta prikazana dva koraka v oknu, desno samo še en

2.1.5 Ocenjevanje dolžine in smeri koraka

Poleg časovnih trenutkov korakov in njihovega števila je za uspešno integracijo pedometra v INS potrebno poznati tudi dolžino koraka. Dolžina koraka se spreminja glede na velikost človeka ter način in hitrost hoje. Hitrejša kot je hoja, daljši so koraki. Najbolj izstopajo začetni koraki, ko hoja še ni enakomerna. Za določevanje dolžine koraka D smo uporabljali model, ki upošteva razliko med maksimalno in minimalno magnitudo pospeška [10]:

$$D = K^4 \sqrt{a_{max} - a_{min}}, \quad (2.6)$$

kjer sta a_{max} in a_{min} maksimalna in minimalna vrednost magnitude pospeška med trenutnim in prejšnjim korakom. Konstanta » K « je odvisna od uporabnika in je eksperimentalno določena. Določi se lahko z obratom zgornje formule, kjer izmerimo povprečno dolžino korakov, iz česar nato izračunamo konstanto K . V obeh naših eksperimentih smo uporabljali vrednost $K=0,68$.

V prvem eksperimentu smo smer hoje ocenjevali z uporabo vgrajenega rotacijskega vektorja znotraj naprave (delovanje je opisano v poglavju 2.1.2 Digitalni kompas). Opazili smo, da ima vgrajen digitalni kompas nastavljeno veliko zaupanje v magnetometer, kar lahko povzroči težave. Najbolj opazne so magnetne motnje. Kljub hoji v ravni črti, rotacijski vektor prikazuje odklanjanje od začetne smeri. Ob koncu hoje se nato vrne nazaj v približno isto začetno vrednost. V analizi to pomeni zavijanje med hojo. Tako pride do odstopanja v ocenjeni in realni končni legi.

V drugem eksperimentu smo smer hoje ocenjevali z uporabo žiroskopa. Delovanje je podobno, vendar smo ga ročno implementirali brez uporabe magnetometra in ga bomo zato v nadaljevanju tudi opisali.

Zaradi napak v žiroskopu moramo v začetku to napako izmeriti. Izmerimo jo tako, da nekaj časa (v našem primeru 30 s) držimo napravo pri miru, nato začnemo s hojo. V začetnem času lahko ocenimo napako žiroskopa in jo odštejemo končnim meritvam med hojo. Potem je potrebno določiti začetno orientacijo naprave. To lahko izračunamo iz meritev pospeška v vseh treh smereh. Če izračunamo povprečno vrednost pospeška v vsaki smeri, lahko ocenimo začetni nagib in naklon s preprostim izračunom (enačbi (2.7) in (2.8)). Ker začetnega zasuka samo iz pospeška ne moremo izračunati, ga postavimo na 0 (enačba (2.9)). Izračun ni mogoč, ker smer gravitacijskega pospeška sovпада z osjo vrtenja zasuka [10].

$$\varphi_0 = \tan^{-1} \left(\frac{\bar{a}_y}{\bar{a}_z} \right) \quad (2.7)$$

$$\theta_0 = -\tan^{-1} \left(\frac{\bar{a}_x}{\sqrt{\bar{a}_y^2 + \bar{a}_z^2}} \right) \quad (2.8)$$

$$\psi_0 = 0 \quad (2.9)$$

V zgornjih enačbah oznaka \bar{a}_y predstavlja povprečno vrednost signala v smeri y, \bar{a}_x povprečno vrednost signala v smeri x in \bar{a}_z povprečno vrednost signala v smeri z. Ker je meritev magnitude pospeška med hojo zelo podobna sinusnemu nihanju, lahko povprečje izračunamo preko celotnega območja meritev, saj so odkloni od mirovne lege praktično konstanti (odklon v pozitivno smer ima približno pripadajoči velik odklon v negativno smer) [10].

Določitev začetnih kotov definira transformacijske matrike, ki določajo pretvorbo iz koordinatnega sistema naprave v globalni koordinatni sistem. Sedaj se lahko določi prvo rotacijsko matriko (2.10) v globalnem koordinatnem sistemu,

$$\mathbf{R}_0 = \mathbf{R}_z * \mathbf{R}_y * \mathbf{R}_x \quad (2.10)$$

kjer so komponente rotacijske matrike izračunane po enačbah (2.11), (2.12) in (2.13). Matrike \mathbf{R}_z , \mathbf{R}_y in \mathbf{R}_x so rotacijske matrike okoli dane osi [3].

$$\mathbf{R}_z = \begin{bmatrix} \cos \psi_0 & -\sin \psi_0 & 0 \\ \sin \psi_0 & \cos \psi_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

$$\mathbf{R}_y = \begin{bmatrix} \cos \theta_0 & 0 & \sin \theta_0 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_0 & 0 & \cos \theta_0 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

$$\mathbf{R}_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi_0 & -\sin \varphi_0 \\ 0 & \sin \varphi_0 & \cos \varphi_0 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

S pomočjo rekurzivne enačbe (2.14) in meritev na žiroskopu lahko sedaj ocenimo spreminjanje naklona, zasuka in nagiba naprave glede na globalni koordinatni sistem preko celotnega časa zajema meritev [10].

$$\mathbf{R}_i = \mathbf{R}_{i-1} e^{\mathbf{G}(i)} \quad (2.14)$$

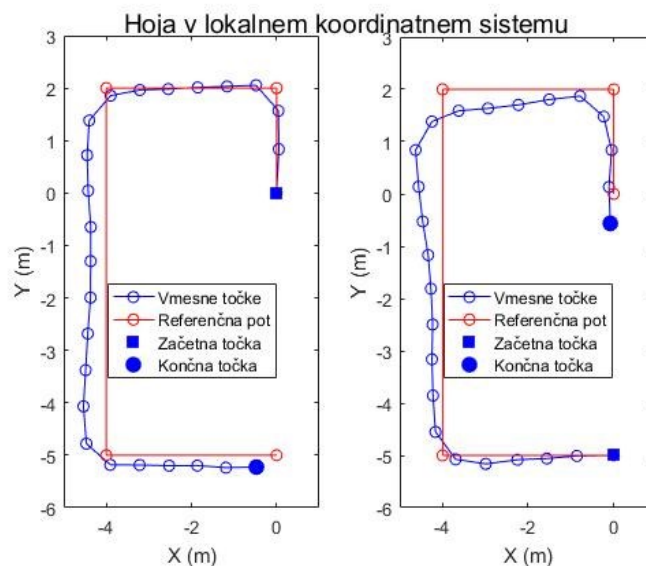
V zgornji enačbi je \mathbf{G} matrika meritev z žiroskopa. Matrika je zapisana v enačbi (2.15), kjer so g_x , g_y in g_z vrednost z žiroskopa v časovnem trenutku i , za smeri x, y in z [10]:

$$\mathbf{G}(i) = \begin{bmatrix} 0 & -g_z(i) & g_y(i) \\ g_z(i) & 0 & -g_x(i) \\ -g_y(i) & g_x(i) & 0 \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Za ocenjevanje smeri hoje moramo sedaj samo še vedeti, v katerih časovnih trenutkih je bil narejen določen korak. V teh časovnih trenutkih lahko iz rotacijske matrike razberemo iskani Eulerjev kot [10].

Za uspešno integracijo inercialnega sistema je potreben preizkus delovanja. Z napravo v roki smo se odpravili po naši referenčni poti. Spremembo položaja smo ocenili po modelu (2.1), kjer smo dolžino koraka ocenili s prej opisanim modelom (2.6). Zasuk smo ocenili po zgoraj opisanem postopku. Slika 8 prikazuje rezultat ocenjenih lokacij in smeri hoje. Prikazani sta dve rekonstrukciji hoje, pri katerih začetni in končni točki dovolj točno sovpadata. Opazimo lahko, da je integriran

inercialni navigacijski sistem relativno točen. Vidimo, da je največji problem dane navigacije v ocenjevanju dolžine in smeri koraka.



Slika 8: Primerjava položajev določenih z INS v primerjavi z referenčno hojo; dve hoji v različnih smereh po enaki referenčni poti

Razlog je v tem, da ljudje v svoji hoji ne delamo konstantnih korakov, kar je najbolj opazno pri zavojih. Ti so lahko ostri, kar vpliva na INS in ta zato napačno oceni dolžino koraka. Določevanje smeri z uporabo žiroskopa, kot lahko vidimo, je zelo zadovoljivo, saj nam je dovolj natančno ocenil vse tri ostre zavoje.

2.2 Globalna lokalizacija v prostoru

Globalna lokalizacija je postopek, pri katerem je glavni cilj določitev položajev uporabnika v danem prostoru. Najbolj pogost sistem za globalno lokalizacijo je satelitski sistem navigacije (ameriški GPS, ruski GLONASS, evropski Galileo, itd.), ki deluje po principu trilateracije (opisana v poglavju 2.2.1 Trilateracija). Ti sistemi so postali izjemno zanesljivi v zunanosti, vendar pa je njihova uporabnost v notranosti zgradb omejena oz. nemogoča. Lokalizacija v notranjih prostorih je nemogoča zaradi nedostopnosti signala znotraj zgradb, ki je posledica načina gradnje in materialov iz katerih so zgrajene stavbe. Njihova slabost je, da s postopkom trilateracije ne morejo oceniti orientacije objekta v prostoru [11].

Za lokalizacijo v notranjih prostorih se vedno pogosteje uporabljajo inercialni navigacijski sistemi, ki so preko digitalnih filtrov združeni z zunanjimi oddajniki. To so Bluetooth Low Energy oddajniki ali WLAN postaje. Te lahko v realnem času

sledijo napravam ali jim zgolj občasno določajo položaj ter s tem korigirajo akumulirano napako, ki jo povzroča INS. Bluetooth v osnovi ni namenjen točnemu določanju položaja v prostoru, temveč določanju oddaljenosti od oddajnika. Vseeno se uporablja pri kartografiranju notranjih prostorov, zaradi česar se vedno bolj uporablja tudi za navigacijo v notranjih prostorih. Pogosto se za določanje oddaljenosti uporabljajo drugo namenske stacionarne Bluetooth naprave, npr. zvočniki [11].

Alternativna možnost lokalizacije je tudi tehnika sledenja (angl. *Tracking*), ki temelji na v naprej znanih lokacijah, na katerih z različnimi detektorji zaznamo objekt in mu priredimo to novo območje nahajanja. Ker so prehodi med temi področji zelo diskretni, se z uporabo statističnih funkcij prehod zgladi, s čimer se lahko določi lokacijo merilnega objekta (oz. osebe) v prostoru.

Poleg zgoraj omenjenih načinov navigacije v notranjih prostorih obstajajo tudi drugačni načini brez uporabe radijskih signalov zunanjih oddajnikov. V nadaljevanju jih bomo našteali in na kratko opisali [11]:

- Magnetno pozicioniranje (angl. *Magnetic positioning*) je postopek določevanja uporabnika znotraj zgradbe z merjenjem magnetnega polja znotraj stavbe. Zaradi železnih konstrukcij zgradb se Zemljino magnetno polje lokalno ukrivi, kar se lahko posname v zemljevid. Uporabnik nato lokalno izmeri polje na svoji lokaciji in s primerjavo s posnetim zemljevidom določi položaj uporabnika v zgradbi. Prednost te metode je, da ne potrebuje nobene nove strojne opreme, ne za zajem podatkov, ne za lokalizacijo.
- Pozicioniranje z uporabo vidnih značk (angl. *Markers*) uporablja v naprej definirane značke, ki jih uporabnik zajema s kamero. Vsem značkam so v naprej določene lokacije v prostoru. Zapis njenega položaja je vgrajen v sam zapis na znački (npr. s QR kodo). Ta zapis poleg položaja v prostoru nosi tudi višino značke od tal. Preko kamere naprava izračuna vidni kot do te značke in s podatki o znački izračuna položaj uporabnika.
- Pozicioniranje na osnovi znanih vidnih lastnosti temelji na osnovi zaporednih slik, ki se uporabijo kot referenca za vizualno primerjavo. Vsaka slika ima določene koordinate njenega zajetja. S primerjavo slik in slike zajete s kamero uporabnika nato preko baze določi lokacijo uporabnika v prostoru.

Poleg do sedaj omenjenih načinov določanja položaja z uporabo radijskih valov bomo v nadaljevanju opisali še nekaj drugih [11].

- Koncept mreže (angl. *Grid concept*) temelji na velikem številu oddajnikov v prostoru z zelo kratkim dosegom. Na ta način je uporabnik viden samo najbližjim oddajnikom, s čimer se lahko identificira, katerim je najbližji. Tako se določi njegov položaj.

- Vpadni kot signala (angl. *Angle of Arrival*) je metoda, pri kateri se položaj določa glede na vpadni kot signala in se običajno določa preko časovne razlike med večjim številom senzorjev. Sistem je implementiran skupaj s triangulacijo, s katero se, ob znanih lokacijah oddajnikov, določi položaj merilne naprave.
- Čas prihoda (angl. *Time of arrival*) je način pozicioniranja, pri kateri se meri časovna razlika med časom oddaje signala in časom sprejema. Ker je hitrost signala konstantna, se z enostavnim izračunom določi oddaljenost merilnika od oddajnika. Slabost takih sistemov je časovna usklajenost naprav, predvsem tistih v merilnikih. Poleg tega so ti sistemi podvrženi napakam zaradi prečkanja ovir, odbojev in spreminjanja hitrosti potovanja signala zaradi prehodov skozi različne medije. Ta način uporablja tudi najpogostejši globalni lokalizacijski sistem, GPS (oz. njeni drugi ekvivalenti). Z določenimi oddaljenostmi od oddajnikov se nato z uporabo trilateracije določi položaj sprejemnika v prostoru. Več o trilateraciji v poglavju 2.2.1 Trilateracija.
- Moč sprejemnega signala (angl. *Received signal strength indication*, RSSI) [12] [13] je metoda, pri kateri merimo moč sprejetega signala. Temelji na dejstvu, da moč radijskega signala upada s kvadratom razdalje, zaradi česar se pri znani oddajni moči oceni razdalja med oddajnikom in sprejemnikom. Položaj merilnika se nato določi z uporabo trilateracije. Metoda je močno podvržena napakam, ki se pojavljajo zaradi odbojev signala v prostoru (npr. sten, ljudi, opreme, itd.). Metoda ne zagotavlja, da sprejemnik sprejme signale oddajnikov v istem vrstnem redu, kot so jih oni oddali, saj so nekateri signali prepotovali daljšo pot. Rezultat je napačna ocena oddaljenosti. To je metoda, ki smo jo uporabljali v naših dveh eksperimentih. Za izvor signalov smo uporabljali Bluetooth Low Energy oddajnike »iBeacon« podjetja Kontakt.io.

2.2.1 Trilateracija

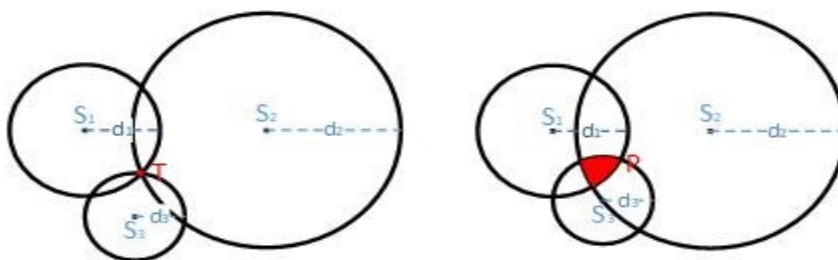
Trilateracija je geometrijska metoda določevanja položaja točke pri poznavanju njene oddaljenost od znanih točk. Zelo pogosto se zamenjuje s terminom triangulacija, ki za razliko od trilateracije temelji na merjenju kotov, preko katerih se na koncu vseeno določi položaj merilnika v prostoru. Trilateracija se zelo pogosto uporablja pri določevanju položaj pri različnih metodah globalne navigacije, najpogostejša je pri globalnem satelitskem navigacijskem sistemu.

Princip trilateracije je uporaben v eno, dve ali tri dimenzijskem prostoru. Razlika je v minimalnem številu točk potrebnih za določitev iskane točke. Z večanjem števila točk lahko zmanjšamo vpliv šuma, ki je pogosto vzrok napak pri določanju položaja s trilateracijo. Koncept je v vseh primerih enak. Potrebno je določiti oddaljenost iskane

točke do vseh znanih točk v prostoru. Naše eksperimente bi lahko predstavili z uporabo dvo-dimenzijskega prostora, zato bomo princip opisali na poenostavljenem primeru [14].

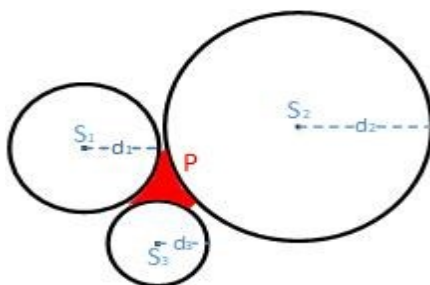
Meritev oddaljenosti je v našem primeru določena preko moči sprejemnega signala in matematičnega modela oddajnika. Možne lokacije sprejemnika, na tej oddaljenosti, predstavljajo množico točk v prostoru (krožnico). Z dodatkom še ene znane točke in oddaljenosti oddajnika od nje, dobimo dve krožnici, ki se sekata v dveh točkah. Presečišči predstavljata možni točki, kjer se nahaja naš merilnik. Z dodatkom tretje točke se zaradi nove krožnice točk eno izmed presečišč eliminira in s tem je lokacija sprejemnika točno določena [14][8].

V realnosti so meritve oddaljenosti zelo podvržene merilnim napakam in šumom, zato se tri krožnice ne sekajo v eni točki. Rezultat trilateracije je tako presek treh krožnic, pri katerih se ena izmed točk določi kot lokacija sprejemnika. Izbor ni naključen, ampak je rezultat optimizacijske metode, ki določi najboljše virtualno presečišče vseh treh krožnic. Slika 9 - levo prikazuje idealno določeno trilateracijo. Slika 9 - desno prikazuje realno trilateracijo, kjer se krožnice sekajo v več kot eni točki [8].



Slika 9: Rezultat idealne trilateracije (levo) in realne trilateracije (desno)

Obstaja tudi možnost da se tri krožnice ne sekajo. To se zgodi takrat, ko so realne razdalje do iskane točke večje od izmerjenih. Meritve zaradi šuma in napak lahko prikazujejo krajšo ali daljšo razdaljo od realne. Rešitev zato leži zunaj vseh treh krožnic. Slika 10 prikazuje takšen primer.



Slika 10: Rezultat realne trilateracije brez presečišč

2.3 Bluetooth

Bluetooth je protokol za brezžično komunikacijo med različnimi napravami na krajše razdalje z nizko energijsko porabo. Prvič ga je predstavilo telekomunikacijsko podjetje Ericsson leta 1994. Razvit je bil kot brezžična alternativa serijski RS-232 povezavi. Inštitut inženirjev elektrotehnike in elektrotehnike (angl. *IEEE*) ga je standardiziral kot IEEE 802.15.1, vendar ga sedaj ne posodablajo več. Za protokol sedaj skrbi posebej oblikovana združba Bluetooth SIG (*Special Interest Group*), ki vključuje preko 30000 podjetij po svetu. Skrbijo za vzdrževanje, razvoj in varovanje znamke (angl. *trademark*) [15].

Bluetooth deluje na principu UHF (angl. *Ultra High Frequency*) valov v frekvenčnem razponu med 2,4 GHz in 2,485 GHz, kar omogoča 79 hkratnih kanalov za komunikacijo. Vsak komunikacijski kanal ima frekvenčno širino 1 MHz. Območje vsebuje tudi zaščitni frekvenčni pas (angl. *guard band*), ki obsega širino 2 MHz na spodnji in 3,5 MHz na zgornji meji frekvenčnega območja. Uporabljajo se za preprečevanje interference pri prenosu. Poleg tega se za preprečevanje interference uporablja radio-telekomunikacijska metoda adaptivnega frekvenčnega skakanja (angl. *adaptive frequency hopping*). To je postopek, pri katerem se po identifikaciji neprimernih frekvenčnih prostorov le-ta za določen časovni interval ne uporablja za komunikacijo. Med prenosom zato prihaja do hitrih preklpov med kanali, običajno tudi do 800-krat na sekundo [15].

Protokol Bluetooth je paketni protokol, ki deluje po principu »*Master/Slave*«. Vsak »*master*« lahko hkrati aktivno komunicira z do 7 napravami (»*slave*«). Neaktivnih je lahko do 255, s katerimi lahko »*master*« kadarkoli, če še nima 7 aktivnih povezav, začne komunicirati. Vsi paketi so označeni s časom, ki ga določa »*master*« in se posreduje vsem komunikacijskim partnerjem. Pri komunikaciji med dvema napravama se lahko vloga »*master/slave*« po vzpostavitvi komunikacije tudi zamenja. Tako telefon pošlje slušalkam zahtevo za vzpostavitev povezave, nato pa sam postane »*slave*« [8].

Bluetooth naprave se delijo v štiri razrede glede na najvišjo moč oddajanja signala, kar direktno vpliva na domet signala. Tabela 2 prikazuje, kako se spreminjata moč in domet signala v odvisnosti od razreda naprave [8].

Razred	Domet [m]	Najvišja oddajna moč [dBm]
1	~100	20
2	~10	4
3	~1	0
4	~0,5	-3

Tabela 2: Razredi Bluetooth naprav

Najpogosteje se pojavljajo naprave drugega razreda (mobilni telefoni, večina baterijsko napajanih Bluetooth naprav), medtem ko so naprave prvega razreda uporabljajo v industrijske namene.

Komunikacijski signal je zelo podvržen zunanjim vplivom, kot so odboji signalov od ovir (stene, ljudje, predmeti, itd.) in motnje (interferenca z drugimi radijskimi valovi). Vse to lahko občutno spremeni dejanski domet signala ter kvaliteto prenosa.

Preko protokola Bluetooth se podatke prenaša na dva načina. Prvi način je »*master/slave*« (direkten prenos podatkov, pretakanje glasbe), za kar je potrebno naprave v naprej seznaniti (angl. *pairing*). Drugi način prenosa je po sistemu oddajanja signala v okolico (angl. *broadcast*). Takšen način je enosmerna komunikacija, kjer združevanje ni potrebno. Uporablja se pri različnih merilnih senzorjih. Takšne senzorje smo uporabili v obeh eksperimentih [15].

Zaradi vse večje razširjenosti interneta stvari (angl. *IoT - Internet of Things*) oz. Industrije 4.0, kjer so vse bolj pogosto uporablja brezžične merilnike (temperatura, lokacija, biometrični merilniki, itd.), se je kot boljša alternativa protokolu Bluetooth izkazal Bluetooth Low Energy. Od takih merilnikov se navadno pričakuje dolgo avtonomijo, kljub temu da neprestano oddajo svoj izmerjeni signal. Prav tako zaradi nizke porabe ne potrebujejo velikih baterij, kar občutno zmanjša njihovo velikost. Hkrati je tudi kompatibilen z novjšimi verzijami Bluetooth-a, ki lahko obratujejo v dvojnem načinu (angl. *dual mode*) in sprejema signal z obeh naprav (npr. Bluetooth signal z računalnika in Bluetooth Low Energy s temperaturnega merilnika) [15].

Protokol Bluetooth omogoča povezovanje mnogih naprav na različne načine in za različno uporabo. Spodaj so naštetih nekateri [15]:

- Povezava med telefonom/računalnikom in slušalko (prostoročno telefoniranje, multimedijske vsebine, itd.),
- Povezava med telefonom in vozilom za prenos glasbe, telefonskih klicev, navigacijskih podatkov, itd.,

- Prenos podatkov biometričnih podatkov na centralno napravo (npr. telefon),
- Prenos datotek med dvema napravama,
- Nadomestilo RS-232 povezave v raznih naprava (medicina, bralniki črtnih kod, itd.),
- Brežžična povezava med dvema omrežjema (npr. industrijski ethernet),
- »Dial-up« internetna povezava, kot pri brezžičnem modemu.

Najnovejša različica protokola, sedaj verzija 5, je izšla leta 2016 in se pojavlja v večini modernih mobilnih telefonih višjega razreda. Za razliko od prejšnje verzije 4.0, ki je minimalna za povezljivost z Bluetooth Low Energy, lahko verzija 5 začasno pohitri prenos podatkov tudi do 2 Mbit/s, kar se najbolj uporablja v IoT napravah. Slabost takšne pohitritve prenosa je v zmanjšanem dosegu signala [15].

2.3.1 Bluetooth Low Energy

Bluetooth Low Energy (BLE) se je razvil kot del protokola Bluetooth 4.0 v letu 2010. Tako kot Bluetooth je tudi tega razvila skupina SIG. V začetku se je imenoval Bluetooth Smart, saj je bilo njegovo prvotno področje uporabe v prenosnih nizko energetske biometričnih merilnikih za medicino in šport. Namen je prenos majhnih količin podatkov na enaki razdalji kot običajni protokol Bluetooth ob nizki porabi energije. BLE naprave so baterijsko napajane in imajo zato bolj omejen čas delovanja od stalno priklopljenih naprav [16].

BLE uporablja isti frekvenčni prostor kot običajni Bluetooth (2,4 GHz). S tem omogoča napravam, da uporablja isto anteno za hkratno delovanje obeh protokolov. Da med komunikacijama ne prihaja do interferenc, BLE uporablja drugačne kanale. Za razliko od Bluetooth-ovih 79 kanalov, BLE uporablja samo 40 kanalov z dvojno frekvenčno širino, torej 2 MHz. Znotraj kanala se podatki prenašajo z GFSK (Gaussian frequency-shift keying). Modulacijski indeks je nastavljen na 0,5. GFSK je metoda spreminjanja kanalov, kjer se prehodne podatke filtrira z Gaussovimi filtrom, da prehodi niso tako sunkoviti. Tako se zmanjša interferenca s sosednjimi kanali, kar omogoča večji doseg signala in zmanjša količino napak. Kljub velikim podobnostim med protokoloma BLE in Bluetooth ima BLE drugačen sklad, kar onemogoča kompatibilnost protokolov [16].

BLE omogoča hitrost prenosa podatkov do 2 Mbit/s (ver. 5). V praksi je hitrost okoli 0,3 Mbit/s. Hitrost prenosa je povezana z nastavljenjo močjo oddajanja, ki hkrati direktno vpliva na doseg signala in avtonomijo merilnika [16].

Velika razlika BLE protokola proti Bluetooth je v drugačnem načinu delovanja, kjer BLE naprava oddaja enosmerno (angl. *Broadcasting*) informacije v okolico. Za

branje teh podatkov ni potrebnega vzpostavljanja povezave, kot to zahteva Bluetooth. Ker je to enosmerna komunikacija, lahko BLE naprava hkrati pošilja večjemu številu uporabnikov ob enaki porabi energije. Vseeno BLE naprave omogočajo spoznavanje in združevanje naprav, kot smo to opisali v poglavju 2.3 Bluetooth. Običajno se uporablja za konfiguracijo BLE naprave (posodobitve, konfiguracija parametrov, ...) ali za prenos večje količine podatkov. Ker so BLE naprave bolj vidne naključnim uporabnikom, je dostop do njih omejen z geslom [16].

Za razliko od Bluetooth naprav, ki uporabljajo štiri močnostne razrede, ima BLE osem močnostnih razredov, ki vplivajo na izhodno moč in maksimalen doseg. Na maksimalen doseg signala močno vplivajo ovire med oddajnikom in sprejemnikom.

Ker so BLE naprave baterijsko napajane, je pomembno, da se moč oddajanja nastavi glede na dano aplikacijo. S pravilno izbiro področja delovanja in potrebnega dosega signala lahko občutno izboljšamo avtonomijo BLE naprave. Pri razdaljah manjših od 15 m je dovolj že nizka izhodna moč, to je med -30 dBm in -12 dBm. Za doseganje srednjih razdalj, okoli 20 m, je izhodna moč med -8 dBm in 4 dBm. Teoretični maksimalni doseg 300m lahko dosežemo pri maksimalni moči 10 dBm. Opazimo lahko, da ima BLE v primerjavi z običajnim Bluetooth protokolom občutno večji doseg signala. Tabela 3 prikazuje močnostne razrede, kot jih ima definiran BLE oddajnik, ki smo ga uporabljali v naših eksperimentih (proizvajalca Kontakt.io) [8].

Močnostni razred	Doseg [m]	Maksimalna izhodna moč [dBm]
0	2	-30
1	4	-20
2	10	-16
3	20	-12
4	30	-8
5	40	-4
6	60	0
7	70	4

Tabela 3: Močnostni razredi BLE oddajnika iBeacon

Ne glede na izbrano delavno moč lahko BLE naprava deluje na 4 različne načine [8]:

- način oddajanja,
- opazovalni način,
- centralni način,
- periferni način.

Pri prvih dveh načinih seznanitev ni potrebna, saj naprava samo oddaja oz. sprejema informacije. Komunikacija je enosmerna. Pri centralnem oz. perifernem načinu je seznanitev potrebna za delovanje, ker je to dvosmerna komunikacija. V tem primeru lahko opazimo analogijo s klasičnim Bluetooth protokolom.

2.3.2 Model BLE oddajnika

Z razvojem BLE protokola so mnoga podjetja začela izdelovati majhne merilne naprave. Pri tem se je BLE uporabljal za prenos telemetričnih in biometričnih podatkov (npr. temperatura, pulz, itd.). Kmalu se je ugotovilo, da se lahko take oddajnike uporablja tudi za notranjo lokalizacijo. Ker BLE oddajniki običajno delujejo v načinu oddajanja (angl. *Broadcasting*), lahko pošiljajo v okolico v naprej konfigurirane podatke ali pa zgolj svoj oglaševalski paket (angl. *Advertisement*). Ti paketi se v okolico pošiljajo ciklično v naprej določenem časovnem intervalu. Intervali so lahko različno dolgi, od 20 ms in do 10 s. Med tem časovnim intervalom je naprava v stanju pripravljenosti, zaradi česar porabi zelo malo energije (od koder tudi Bluetooth Low Energy). Ker uporabljajo gumbne baterije (angl. *Button cell*), so lahko taki oddajniki zelo majhni in imajo zaradi nizke porabe avtonomijo tudi do enega leta.

BLE specifikacija natančno definira strukturo oglaševalskega paketa, ki ima velikost 47 bytov. Z željo prenosa čim večjega števila informacij z oglaševalskimi paketi je bilo specificiranih več protokolov. Koristni podatki so tako v razdeljeni v več segmentov. Med bolj popularnimi protokoli sta Google-ov »Eddystone« in Apple-ov »iBeacon«. Oba sta kompatibilna z mobilnimi operacijskimi sistemi iOS in Android. Protokol »iBeacon« uporablja BLE oddajnik, ki smo ga uporabili pri obeh eksperimentih [8].

Poleg koristnih informacij se prejetemu signalu BLE lahko oceni tudi njegova sprejemna moč. Pri notranji lokalizaciji je to zelo koristna informacija, ker lahko z njo ocenimo oddaljenost od oddajnika. Ker moč ni premo sorazmerna z oddaljenostjo oddajnika, je potrebno zgraditi model, ki bo čim bolj točno opisoval iskano relacijo.

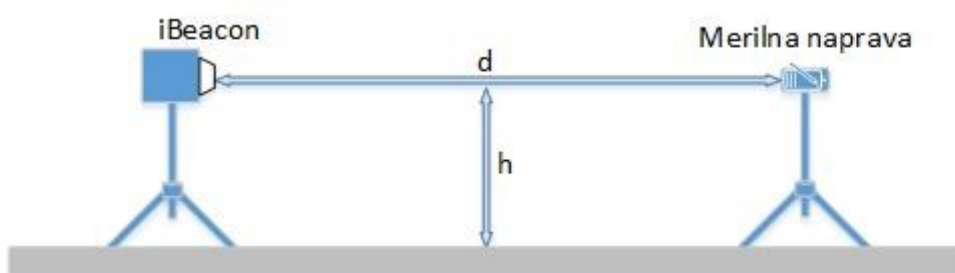
V obeh naših eksperimentih smo uporabljali BLE oddajnike podjetja Kontakt.io, ki delujejo po protokolu »iBeacon«. Slika 11 prikazuje izgled in velikost oddajnika.



Slika 11: Oddajnik iBeacon podjetja Kontakt.io

Za določitev modela je bilo potrebno izmeriti, kako z oddaljenostjo upada moč signala. Meritev smo izvajali na treh oddajnikih hkrati, vsi trije so bili nastavljeni na enako oddajno moč, tj. 4 dBm. Po specifikacijah proizvajalca to rezultira v moči signala -59 dBm pri oddaljenosti 1 m. Opazili smo, da če je oddajnik postavljen na tla, se meritev signala poslabša do te mere, da je določevanje modela in nadaljnja uporaba praktično nemogoča. V praksi bi to pomenilo, da je oddajnik obešen na steni, medtem, ko je merilna naprava postavljena ob steno. Razlog za odstopanje je, da se signal mnogokrat odbije od stene, zaradi česar naprava ne sprejme direktnih paketov, ampak tiste, ki so prišli do nje preko odboja. Ker so prepotovali daljšo razdaljo, jim izmerimo manjšo moč, s čimer predpostavimo napačno oddaljenost od oddajnika.

Za boljše rezultate smo merilno napravo in oddajnike postavili na podstavek, da so bili v isti višini. Prvič na višino $h=0,55$ m in drugič na višino $h=1,35$ m. Izvedli smo 30 meritev moči v odvisnosti od razdalje s korakom 1 m (Slika 12).



Slika 12: Shematski prikaz postavitve merjenja relacije med jakostjo signala in oddaljenostjo

Sistem je zelo podvržen napakam zaradi odboja ali absorpcije signala, zato smo za vsako meritev izračunali povprečje dvajsetih meritev na vsakem merilnem mestu. Hkrati smo merili tri oddajnike, da smo dobili čim večje število podatkov. V spodnji tabeli (Tabela 4) je prikazanih nekaj rezultatov za vse tri merilnike na dveh višinah.

Oddaljenost d [m]	Višina h [m]	Oddajnik 1 DB:3C:19 [dBm]	Oddajnik 2 FA:AF:38 [dBm]	Oddajnik 3 C6:58:91 [dBm]
1	0,55	-67,25	-67,73	-62,42
	1,35	-60,58	-61,95	-62,9
10	0,55	-84,14	-80,33	-81,39
	1,35	-84,04	-81,81	-89,43
20	0,55	-87,89	-89,04	-89,63
	1,35	-91,2	-89,65	-88,01
30	0,55	-91,72	-92,83	-92,62
	1,35	-90,02	-90,3	-90,82

Tabela 4: Prikaz meritev na različnih oddaljenostih

Opazimo lahko, da višina, večja od 0, nima vpliva na meritve in da so rezultati po pričakovanju. Pri oddaljenosti 1 m vidimo nekaj odstopanj glede na višino, vendar pri oddaljenosti enega metra ponastavimo sprejeto moč na -59 dBm, ki jo zagotavlja proizvajalec. Sklepamo lahko, da so vsi trije merilniki med seboj zelo podobni, saj so opazne podobnosti spreminjanja signala. Opazno je nelinearno padanje jakosti signala v odvisnosti od oddaljenosti od oddajnika.

Za izgradnjo matematičnega modela smo izbrali dve testni strukturi. Pri prvi smo predpostavili, da jakost signala pada s kvadratno funkcijo, medtem ko druga temelji na korenski funkciji [17]. Ker proizvajalec oddajnikov zagotavlja oddajno moč -59 dBm pri oddaljenosti 1 m, smo v optimizaciji tej vrednosti priredili večji faktor zaupanja, kljub temu da te vrednosti nismo izmerili. Oba modela sta razvidna na enačbi (2.16) in enačbi (2.17), kjer so K_1 , K_2 in K_3 iskani parametri in določajo potek modela, ki se najboljše ujema z meritvami. Oddaljenost merilne naprave od oddajnika je podana z d , $RSSI$ pa je jakost sprejeta signala.

$$RSSI = \left(\frac{K_1}{K_2 + d} \right)^2 + K_3 \quad (2.16)$$

$$RSSI = -59 * \left(\frac{d - K_3}{K_1} \right)^{\frac{1}{K_2}} \quad (2.17)$$

Vseh šest zbranih podatkov za dano merilno mesto smo združili in jih vnesli v optimizacijsko funkcijo, ki je priredila najboljši model glede na izbrano arhitekturo.

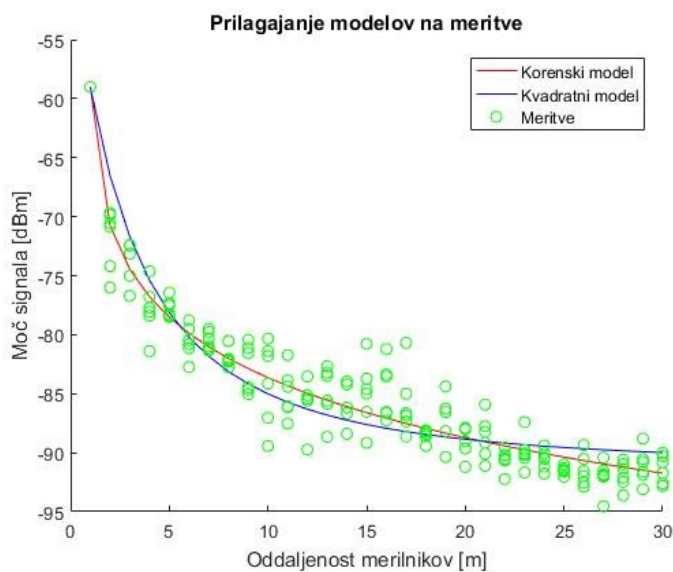
Uporabljali smo metodo nelinearnih najmanjših kvadratov Levenberg-Marquardt. Več o tej metodi v poglavju 2.4.1 Metoda Levenberg-Marquardt. Rezultat vrnjenih parametrov in ocena napake so prikazani v spodnji tabeli (Tabela 5).

	Parameter K1	Parameter K2	Parameter K3	Vrednost kriterijske funkcije IAE
Korenski model	0,1134	12,5685	0,8866	243,1516
Kvadratni model	1596,6	6,0	-91,2	336,4722

Tabela 5: Koeficienti modelov in vrednost vsote absolutnih napak

Glede na kriterijsko funkcijo je opazno, da sta oba modela dokaj točna in da vrneta zelo podoben rezultat.

Slika 13 prikazuje prileganje modelov z meritvami. Ker se je korenska funkcija izkazala za bolj ustrezno, tako po kriterijski funkciji, kot tudi po ujemanju v vseh točkah, smo v eksperimentih uporabljali slednjo.



Slika 13: Prileganje obeh modelov z meritvami

Sedaj lahko s preprostim obratom izračunamo (enačba (2.18)), kako jakost signala vpliva na oddaljenost od oddajnika.

$$d = K_3 + K_1 \left(\frac{RSSI}{-59} \right)^{K_2} \quad (2.18)$$

Ta model smo uporabili v obeh eksperimentih za določevanje oddaljenosti oddajnika od merilne naprave. Model se je izkazal za dovolj točnega za vse naše testne naprave. Za splošno delovanje modela bi morali izmeriti večje število merilnikov in prilagoditi parametre modela na vse merilnike. Idealno bi bilo, da bi vsak merilnik imel svoje lastne parametre in bi deloval s svojim modelom.

2.4 Iskanje položaja oddajnika

V naših eksperimentih smo uporabljali oddajnike podjetja Kontakt.io, ki delujejo po Bluetooth Low Energy protokolu »iBeacon«. V obeh eksperimentih smo oddajnike iskali z uporabo mobilnega telefona, Huawei P10 Lite z nameščenim Android 7.0 operacijskim sistemom, ki uporablja Bluetooth verzije 4.1 in je kompatibilen z BLE protokolom, ki ga oddajajo oddajniki.

Pri prvem eksperimentu smo oddajnik iskali v realnem času (angl. *online*) z uporabo sprotne analize. Prednost takega načina delovanja je, da uporabniku lahko sistem sproti svetuje, kako napredovati skozi iskanje. Slabost takih sistemov pa je, da je lahko izračun v realnem času počasen, zaradi česar aplikacije, ki zahtevajo veliko težkih izračunov, niso možne za izvajanje v realnem času. Prav tako lahko uporabnik naredi nenačrtovan neroden premik, ki ga sprotna analiza lahko zazna in s tem umetno oceni napačen položaj.

V drugem eksperimentu smo oddajnikom položaje določali z nesprotno (angl. *offline*) analizo. Prednost takega sistema je, da lahko odstranimo ali priredimo filtriranje tako, da analiza nehotenih premikov ne upošteva. Takšen način analize lahko obdela velike količine podatkov, ker ni časovno omejen. Slabost take analize je v tem, da je potrebno podatke zajeti in shraniti ter šele nato obdelati. To vodi v daljši čas analiziranja in onemogoča sprotno korekcijo delovanja algoritmov.

Ne glede na način iskanja oddajnika (sprotno ali nesprotno) je postopek določevanja oddajnika zelo podoben. Največjo razliko v postopku iskanja predstavlja neposredna vidnost oddajnika. Razlika v vidnosti pomeni razliko v optimalni poti, ki jo je potrebno prehoditi za določitev položaja oddajnika. Več o načinu določevanja optimalne poti v poglavju 2.4.2 Določevanje optimalne poti.

V prvem koraku določanja položaja oddajnika je potrebno določiti optimalno pot. Optimalna pot je pot, pri kateri dobimo najboljšo oceno položaja oddajnika. Po določitvi poti lahko začnemo z merjenjem signala. Merjenje signala lahko poteka na dva načina. Pri obeh načinih se položaj merilne naprave določa z uporabo inercialnega navigacijskega sistema.

Prvi način je merjenje signala hkrati z določanjem položaja. To pomeni, da vsakemu koraku priredimo tudi moč signala, ki jo preko modela oddajnika pretvorimo v oddaljenost od oddajnika. Ta način smo uporabljali v drugem eksperimentu, kjer smo s hojo ob steni merili signale vseh oddajnikov.

Drugi način, ki smo ga uporabljali pri prvem eksperimentu vključuje začasno prekinitev hoje po optimalni poti. Nekje se ustavimo in na tem mestu izvedemo povprečno meritev signala. Pri našem eksperimentu smo določili povprečje 20 meritev, kar sovpada s številom povprečnih meritev, ki smo jih uporabljali pri določevanju modela oddajnika. Na ta način zmanjšamo vpliv šuma na signal in dobimo boljši rezultat.

Razlika med zgornjima načinoma zajema podatkov je v tem, da pri drugem dobimo veliko manjše število meritev. Število meritev je enako številu merilnih mest, kjer smo se ustavili in izračunali povprečno jakost signala. V prvem primeru pa je število meritev enako številu korakov, ker se vsakemu koraku priredi oddaljenost od iskanega oddajnika. Funkcionalna razlika med načinoma je v tem, da je drugi način podrejen manjšim napakam zaradi šuma.

Ko smo na izbrani način in po izbrani optimalni poti zajeli vse meritve, je za določitev položaja oddajnika potrebno izvesti postopek trilateracije z zajetimi podatki. Ker smo oddaljenost oddajnika določali preko moči sprejemnega signala, ki je močno ošumljen, bo trilateracija daleč od idealne. Za čim boljšo določitev položaja oddajnika je potrebno izbrati primerno optimizacijsko metodo. Izbira optimizacijske metode je v principu prosta izbira razvijalca algoritma, ki se mora zavedati njihovih prednosti in slabosti. Nekatere globalne optimizacijske metode lahko pri velikem številu podatkov predstavljajo veliko računsko zahtevnost ali dolg čas izračuna. Pri nesprotni obdelavi podatkov to ne predstavlja ovir, medtem ko pri sistemih, ki uporabljajo sprotno analizo, to lahko onemogoča delovanje.

Pri našem eksperimentu smo izbrali lokalno nelinearno optimizacijsko metodo in sicer metodo nelinearnih najmanjših kvadratov, metodo Levenberg-Marquardt, ki jo bomo v nadaljevanju tudi podrobneje opisali.

2.4.1 Metoda Levenberg-Marquardt

Metoda Levenberg-Marquardt (LM) je lokalna nelinearna optimizacijska metoda. Za nelinearne probleme je značilno, da obstaja več lokalnih minimumov, ki jih lahko lokalna metoda odkrije, vendar ne hkrati. Da najdemo najboljšega, se običajno nelinearne probleme zaganja iz različnih začetnih točk (angl. *Multi start technique*). Za nelinearne probleme je značilno, da analitične rešitve ne obstajajo, saj lahko rešitve določimo samo iterativno [18].

Problem najmanjših kvadratov, ki se rešuje z metodo LM, so problemi, pri katerih želimo doseči čim boljše ujemanje med funkcijo in izmerjenim nizom podatkov, medtem ko prilagajamo funkcijske parametre. Kriterijska funkcija pri takih problemih se izračuna kot vsota kvadratov razlik med funkcijsko vrednostjo in izmerjeno vrednostjo. Kriterijska funkcija je zapisana v enačbi (2.19) [18],

$$I(\underline{\theta}) = \sum_{i=1}^N (y_i - f_i(\underline{\theta}))^2 \quad (2.19)$$

kjer je $\underline{\theta}$ vektor parametrov, I je vrednost kriterijske funkcije pri danih parametrih, y_i je izmerjena vrednost in f_i je vrednost funkcije, ki jo prilagajamo meritvam v časovnem trenutku i . N predstavlja število meritev oz. vzorcev.

Ker je uporabljen model (enačba 2.17) zaradi eksponenta nelinearen, naš problem spada med nelinearne probleme. Za metode, kot je LM, je značilno, da iterativno zmanjšujejo kriterijsko funkcijo s spreminjanjem parametrov v vsaki iteraciji [18].

Metoda LM je metoda, ki jo lahko uvrstimo tako v metode nelinearnih najmanjših kvadratov kot tudi med gradientne metode. Pri gradientnih metodah, kot je Newtonova metoda, ki je osnova LM metode, se kriterijsko funkcijo spreminja s parametri, ki se premikajo v smer največjega gradienta. Pri Gauss-Newtonovi metodi, ki jo metoda LM razširi, se kriterijski funkciji lokalno priredi kvadratno funkcijo. Parametri nato potujejo proti minimumu te kvadratne funkcije [19].

Metoda LM deluje kot skupek obeh metod. Ko je vrednost parametrov daleč od optimalnih vrednosti, se obnaša kot gradientna metoda. Ko parametri pridejo v bližino optimalne vrednosti, se metoda LM obnaša bolj kot metoda nelinearnih najmanjših kvadratov. Ker je to iterativna metoda, je potrebno podati začetne parametre funkcije. Metoda išče rešitve v okolici začetnih parametrov, zato primerna izbira začetnih parametrov močno vpliva na hitrost konvergence in končni rezultat. Zaradi svoje robustnosti lahko najde optimum, tudi če začetni pogoji ležijo zelo daleč od optimuma, vendar lahko traja nekoliko dlje. Če ima problem več lokalnih minimumom, bo metoda našla samo enega, ki ni nujno tudi globalni.

Metodo LM lahko tako predstavimo z enačbo (2.20) [19],

$$(\underline{J}^T \underline{J} + \alpha \underline{I}) \Delta \underline{\theta} = \underline{J}^T [\underline{y} - \underline{f}(\underline{\theta})] \quad (2.20)$$

kjer so:

- \underline{J} - Jacobijeva matrika,
- α - regularizacijski parameter,
- \underline{I} - enotska matrika,
- \underline{y} - vektor izmerjenih vrednosti,
- \underline{f} - vrednost izbrane funkcije pri parametrih Θ .

Z obratom enačbe lahko določimo iterativno spreminjanje parametrov Θ , kot je razvidno na enačbi (2.21). Gradient je v spodnji enačbi predstavljen z $\underline{J}_{k-1}^T \underline{f}_{k-1}$ [18].

$$\underline{\Theta}_k = \underline{\Theta}_{k-1} - \eta_{k-1} \left(\underline{J}_{k-1}^T \underline{J}_{k-1} + \alpha_{k-1} \underline{I} \right)^{-1} \underline{J}_{k-1}^T \underline{f}_{k-1} \quad (2.21)$$

Glavna razširitev metode LM je regularizacijski parameter α , ki rešuje slabo pogojenost aproksimirane Hessejeve matrike ($J^T J$). Pogojenost Hessejeve matrike je določena kot kvocient med njeno največjo in najmanjšo lastno vrednostjo. Večji kot je kvocient, slabše je pogojena. Slaba pogojenost rezultira v slabo ocenjenih parametrih modela. Vzrok slabe pogojenosti leži v slabem vzbujanju modela oz. v zelo ošumljenih podatkih, katerim prilagajamo model [18].

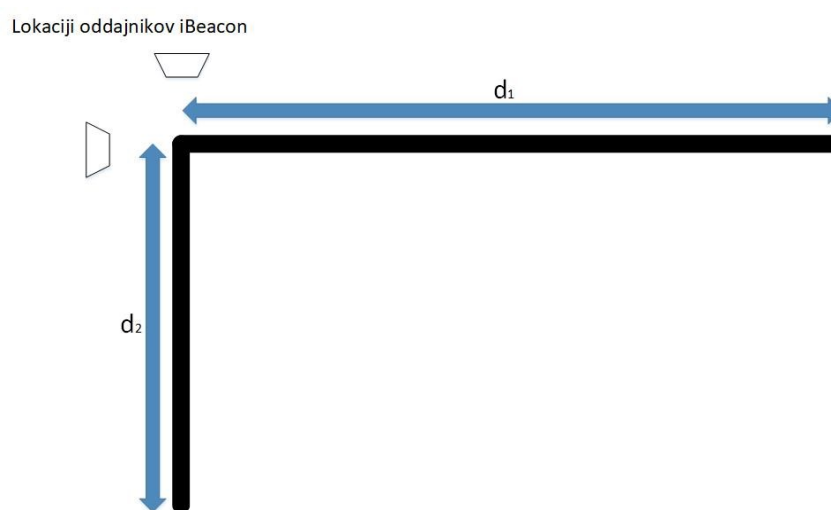
Regularizacija spreminja zgolj diagonalne člene aproksimacije Hessejeve matrike. To pomeni, da spreminja njene lastne vrednosti. Če so lastne vrednosti velike v primerjavi s parametrom α , ta nanje nima vpliva. Če so lastne vrednosti majhne, se te virtualno prestavijo na vrednost α . Tako lahko s parametrom α direktno vplivamo na pogojenost. Izbira parametra α , ki se med delovanjem spreminja, zato zelo vpliva na delovanje LM algoritma. Povečevanje parametra α povzroča manjše spremembe v kriterijski funkciji, saj zniža gradient in obratno. Spreminjanje parametra α je lahko konstantno. Spreminja se lahko tudi za konstanten faktor, vendar izbira faktorja direktno vpliva na konvergenco algoritma. Napačna izbira lahko povzroči prevelik gradient, zato bo konvergenca v okolici optimuma zelo počasna. V nasprotnem primeru je lahko konvergenca daleč od optimuma zelo počasna zaradi preplozega gradienta [18].

2.4.2 Določevanje optimalne poti

Optimalna pot, po kateri zajemamo meritve, je ključna za uspešno delovanje algoritma. Univerzalno uporabna optimalna pot ne obstaja, ampak se spreminja glede na reševani problem. Tako je optimalna pot, kot je bila v našem drugem eksperimentu, ravna črta. Ker smo iskali lokacijo oddajnikov vzdolž stene s sprehodom vzdolž stene, je to že optimalna pot. Pri iskanju izgubljenega oddajnika je taka pot praktično

neuporabna, ker ne izvemo dovolj o prostorskem spreminjanju signala, da bi lahko uspešno določili položaj oddajnika. Zato bomo v nadaljevanju predstavili postopek določanja optimalne poti za primer iskanja položaja vidnega oddajnika in na koncu še razširitev določanja optimalne poti za iskanje izgubljenega oddajnika.

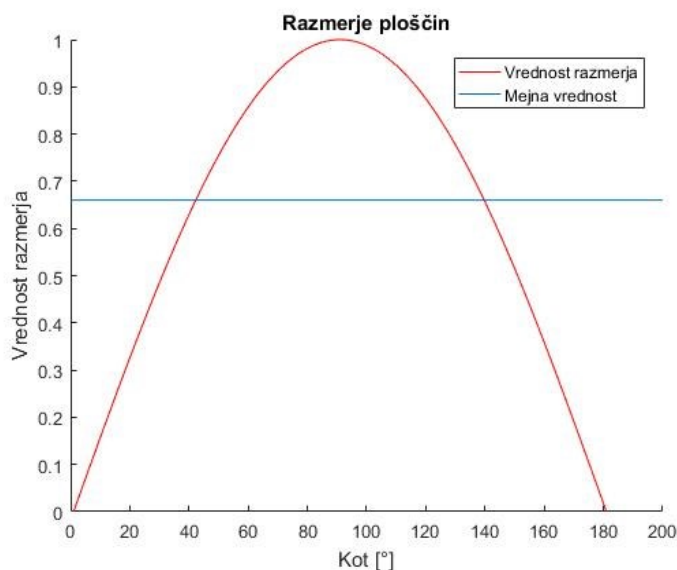
Za določitev čim bolj optimalne poti v prostoru, je potrebno signale posneti s čim boljšo prostorsko porazdelitvijo. Izbrani način naj prinese čim manj šuma v naše meritve. Prva optimalna pot, ki jo bomo opisali, bo uporabljena za iskanje oddajnika, ki je v našem vidnem polju na znani višinski razliki od merilne naprave. Tak problem lahko predstavimo v dvodimenzijskem prostoru. To pomeni, da z optimizacijskim algoritmom določamo dve komponenti položaja (x in y), kar zahteva dober zajem signala v obeh dimenzijah za pravilno in čim bolj točno delovanje. Najboljša pot je sestavljena iz dveh ravnih linij, ki sta med seboj čim bolj pravokotni. Točka preloma teh dveh linij naj bo čim bližje postavitvi oddajnika, tako da je največja moč signala v točki preloma. Na tak način dobimo meritve, ki se enakomerno spreminjajo z oddaljenostjo. Najboljša pot bi bila taka, kjer bi se istočasno spreminjala samo ena izmed iskanih koordinat. Tako dobimo najboljše razmerje med spremenjenim signalom in dano koordinato, kar nam lahko zelo natančno določi iskano koordinato. Kljub temu da je moč oddajnika primerna za zajem meritev na razdalji preko 30 m, naj bi optimizacijska pot potekala na oddaljenosti manjši od 10 m od oddajnika. Razlog je v šumu, ki zaradi nelinearnosti modela na večjih oddaljenostih predstavlja večjo napako meritve. Slika 14 prikazuje shematski prikaz optimalne poti.



Slika 14: Primer lokacije oddajnika in optimalne poti okoli njega

Občutljivost določanja lokacije oddajnika na odstopanje od poti ni veliko, vendar lahko s tem vnašamo v meritve nepotrebne lokacije meritev, ki niso nujno

pravilne, saj povzročajo akumulacijo šuma in s tem zmanjšajo točnost rezultata. Prav tako algoritem ugotovi, kako dobro smo izkoristili našo pot z računanjem ploščine trikotnika (začetek, točka preloma, konec). Trikotnik s konstantnima stranicama ima največjo ploščino, ko je med dvema stranicama pravi kot. Algoritem zato izračuna ploščino prehojenega trikotnika in če je ta manjša od določenega procenta optimalne ploščine, zahteva vnos še dodatne ciljne točke za hojo. V našem primeru je bila meja za ploščino 66 % optimalne ploščine. Slika 15 prikazuje spreminjanje razmerja ploščin glede na kot, ter mejno vrednost, ki jo uporablja algoritem.



Slika 15: Spreminjanje razmerja ploščine v odvisnosti od kota

Pri izgubljenem oddajniku na tak način ni mogoče določiti poti, ker ne vemo, kje se oddajnik nahaja. Zato se postopek iskanja izgubljenega oddajnika nekoliko spremeni. V prvem koraku naredimo enako pot, kot če bi poznali približno lokacijo oddajnika. V analizi upoštevamo, kako se spreminja signal skozi izbrana merilna mesta. Če je bila sprememba signala premajhna in se je spreminjala znotraj šuma, sistem zahteva nove ciljne točke, dokler ne najdemo mesta, kjer se jakost signala poveča. Optimizacijski algoritem sprejema samo mesta, kjer smo izmerili jakost signala višje od določene meje. Meritve, ki preko modela prikazujejo oddaljenost višjo od 10 m, so nezanesljive in jih zato izločimo. Ploščinski kriterij se pri iskanju izgubljenega oddajnika upošteva samo, če je pri prvih treh točkah jakost signala sprejemljiva in deluje po zgoraj opisanem načinu.

3 Eksperiment 1: Iskanje oddajnika v prostoru

Z razvojem BLE protokola se je razvila tudi alternativna uporaba le-teh. Zaradi majhnosti, cenovne ugodnosti in dobre avtonomije, se uporabljajo tudi za označevanje prostorov ter predmetov. Zelo uspešno se uporabljajo kot obeski za ključe, saj jih lahko preko signala lažje najdemo, potem ko smo jih založili.

Do sedaj razvite programske rešitve še ne omogočajo načinov iskanja oddajnika v prostoru. Trenutna rešitev je sledenje jakosti signala. Poskusimo se dovolj približati, da z iskalno napravo pošljemo signal oddajniku. Ta nato spusti zvočni signal, s katerim ga odkrijemo.

V prvem eksperimentu smo razširili postopek iskanja, ki bo omogočil uporabniku več podatkov, s čimer bo lahko hitreje odkril izgubljeni oddajnik (oz. predmet, na katerem je oddajnik). Rezultat postopka je ocenjena oddaljenost oddajnika od iskalne naprave, oz. mobilnega telefona. Mobilni telefon je izbran, ker je zelo razširjena naprava, ki hkrati vključuje številne senzorje in komunikacijske module. Poleg oddaljenosti dobimo tudi predlagano smer, v kateri se nahaja oddajnik. Tako lahko hitreje najdemo izgubljeni oddajnik.

Zaradi lažjega dela smo kot izgubljeni oddajnik uporabljali oddajnik podjetja Kontakt.io. Nastavili smo ga na največjo oddajno moč, s čimer je oddajal pakete vsakih 100 ms. Zaradi prej opisanih problemov, jih vseh nismo sprejeli. V povprečju smo sprejeli signal vsake pol sekunde.

3.1 Opis naloge

Zadano nalogo bi v eni povedi lahko opisali kot: »S hojo po prostoru, med katero držimo mobilni telefon, želimo oceniti smer in oddaljenost iskanega BLE oddajnika«. V razvitem algoritmu smo si postavili sledeče cilje:

- čim boljši matematični model BLE oddajnika,
- čim bolj točno sprotno ocenjevanje lokacije mobilnega telefona,
- ocenjevanje optimalnosti prehojene poti,
- določevanje smeri oddajnika ($\pm 45^\circ$) glede na trenutno lego merilne naprave,
- pomoč uporabniku pri iskanju po končanem iskalnem algoritmu s sledenjem njegovih premikov ter smeri,
- sprotno prikazovanje oddaljenosti uporabnika od oddajnika preko matematičnega modela.

Vsekakor naloga ni enostavna in je sestavljena iz večjega števila korakov, ki jih bomo opisali v nadaljevanju.

3.2 Postopek razvoja algoritma

Določevanje matematičnega modela BLE oddajnika je opisano v poglavju 2.3.2 Model BLE oddajnika, kjer je v celoti opisan postopek dela.

Sprotno ocenjevanje lokacije je opisano v poglavju 2.1 Inercialni navigacijski sistem. Spomnimo le, da smo tu uporabljali sprotno ocenjevanje lokacije. S tem smo lahko v realnem času sledili lokaciji mobilnega telefona.

Ocenjevanje optimalnosti prehojene poti je opisano v poglavju 2.4.2 Določevanje optimalne poti. Poudarimo, da pri iskanju izgubljenega oddajnika optimalna pot ni nujno trivialno določena. Oblika optimalne poti lahko predstavlja slabo spreminjanje jakosti signala, kar rezultira v slabi oceni lokacije oddajnika. To pomeni, da je potrebno iskalni algoritem pognati večkrat, preden lahko dobro določimo lokacijo oddajnika.

Smer oddajnika smo določili iz zbranih lokacij oddajnika in izmerjenimi vrednostmi jakosti merilnega signala v teh lokacijah. Uporabili smo optimizacijsko metodo, ki smo jo podrobno opisali že v poglavju 2.4.1 Metoda Levenberg-Marquardt. Z njeno pomočjo smo ocenili lokacijo oddajnika, smer oddajnika pa smo določili z enačbo (3.1). V enačbi y_{odd} predstavlja y pozicijo oddajnika y_{tr} pa trenutno y pozicijo merilne naprave. Enako velja tudi za položaj x .

$$\phi = \text{atan}\left(\frac{y_{\text{odd}} - y_{\text{tr}}}{x_{\text{odd}} - x_{\text{tr}}}\right) \quad (3.1)$$

Smer oddajnika se nato tudi grafično prikazuje na merilni napravi in se spreminja glede na smer naprave.

Ko je uporabnik zaključil iskalni algoritem in so na zaslonu prikazani rezultati, se s pomočjo sprotnega ocenjevanja korakov spreminja lokacijo mobilnega telefona. Tako lahko popravljamo smer, v kateri je oddajnik, da lahko uporabnik hodi v pravo smer. Sproti se prikazuje tudi oddaljenost oddajnika v metričnih enotah, ki se izračunava preko določenega matematičnega modela.

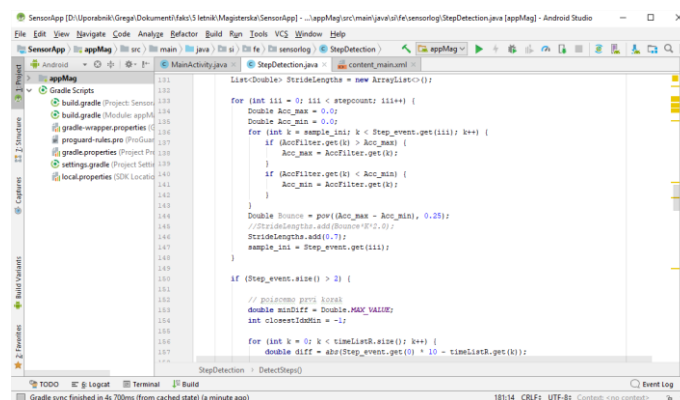
3.3 Funkcijski opis programa

V testne namene smo uporabljali mobilni telefon Huawei P10 Lite. Izbira mobilnega telefona je prosta, vendar veljajo določene zahteve, ki jih mora izpolniti:

- vsebovati mora digitalni kompas,
- podpirati mora Bluetooth 4.0 ali novejši.

Dodali bi lahko tudi zahtevo za operacijski sistem, vendar operacijski sistem vpliva zgolj na način programiranja in uporabljen programski jezik.

V našem primeru smo uporabljali operacijski sistem Android 7.0, ki smo ga programirali z uporabo programskega okolja Android Studio 3.1, ki uporablja Java Runtime Environment (JRE) 1.8.0. Podrobnosti o namestitvi, uporabi, načinu programiranju in prenašanju programa na mobilno napravo niso del tega magistrskega dela in ga zato ne bomo opisovali. Te informacije so prosto dostopne v priročnikih za uporabo Android Studia, ki so dostopni na spletu. V nadaljevanju bomo opisali postopek in obliko programa, ki smo ga sprogramirali v namen iskanja izgubljenega oddajnika. Slika 16 prikazuje njegov izgled.



Algoritem za določevanje smeri hoje uporablja rotacijski vektor, opisan v poglavju 2.1.2 Digitalni kompas. Ker ima vgrajeni rotacijski vektor nastavljeno veliko zaupanje v magnetometer, ki je zelo občutljiv na okoliške predmete (stene, ljudi, kovinski predmeti, itd.) je običajno, da ob vklopu kaže napačno smer. Ta se lahko spreminja oz. počasi leze proti pravilni vrednosti, kljub temu da merilna naprava ne spreminja orientacije. Prvi korak aplikacije je zato kalibracija rotacijskega vektorja. Postopek kalibracije je poenostavljen in od nas zahteva premikanje naprave v prostoru. Napravo premikamo in jo hkrati vrtimo tako, da po zraku »rišemo« številko 8. Večkrat, kot to ponovimo in bolj kot spreminjamo orientacijo dane osmice v prostoru, boljše bo delovanje digitalnega kompasa.

Po končani kalibraciji algoritem začne z zbiranjem podatkov. Trenutna lokacija je hkrati tudi prvi merilni položaj. Z izbiro na zaslonu lahko izberemo MAC naslov oddajnika, ki ga iščemo. Ker v vsaki merilni točki lahko vidimo različno število oddajnikov, se seznam možnih merilnikov vsakič znova naloži, zaradi česar je potrebno paziti na pravilno izbiro oddajnika. V dani merilni točki izmerimo povprečje 20 meritev. Po 20 meritvah se sistem avtomatsko preklopi na naslednji korak. Zajem 20 meritev lahko zaradi velike oddaljenosti, ovir med oddajnikom in merilno napravo ali počasnega oddajanja oddajnika traja več minut. Zato lahko uporabnik s pritiskom na tipko predčasno shrani izmerjeno povprečje signala in prestopi na naslednji korak algoritma. Za lažje spremljanje se število zajetih meritev prikazuje na zaslonu, kjer je prikazana zadnja meritev in trenutna vrednost izračunanega povprečja. Po potrebi se te vrednosti lahko ponastavi in meritev se začne znova.

V naslednjem koraku postopka se uporabnik sprehodi do nove merilne točke. Zaradi nihanj v magnetometru, ki direktno vpliva na rotacijski vektor, je priporočljiva hoja v čim bolj ravnih črtah. Med hojo se zajema podatke z inercialnim navigacijskim sistemom, iz katerih se oceni končna lokacija. Uporabnik končno lokacijo definira s pritiskom na tipko na zaslonu. Tako določi drugo merilno točko in algoritem se prestavi nazaj v način merjenja signala.

Postopek merjenja povprečja signala in hojo med merilnimi mesti se ponovi vsaj trikrat. Tako dobimo vsaj tri točke iz katerih smo izmerili povprečje signala. Povprečje signala uporabljamo za zmanjšanje vpliva šuma, ki bi pokvaril ocenjeno lokacijo oddajnika.

Ko imamo določene tri točke, algoritem najprej preveri optimalnost prehojene poti. Postopek ocene smo opisali v poglavju 2.4.2 Določevanje optimalne poti. Spomnimo le, da gre za razmerje med določenim trikotnikom, ki ga omejujejo naše tri točke, in trikotnikom z enako dolgima dvema stranicama in največjo ploščino. V

primeru, da kriterij ni dosežen, algoritem sam zahteva vnos dodatne točke. Po potrebi lahko uporabnik tudi sam vnese še eno dodatno točko. Število točk ni omejeno.

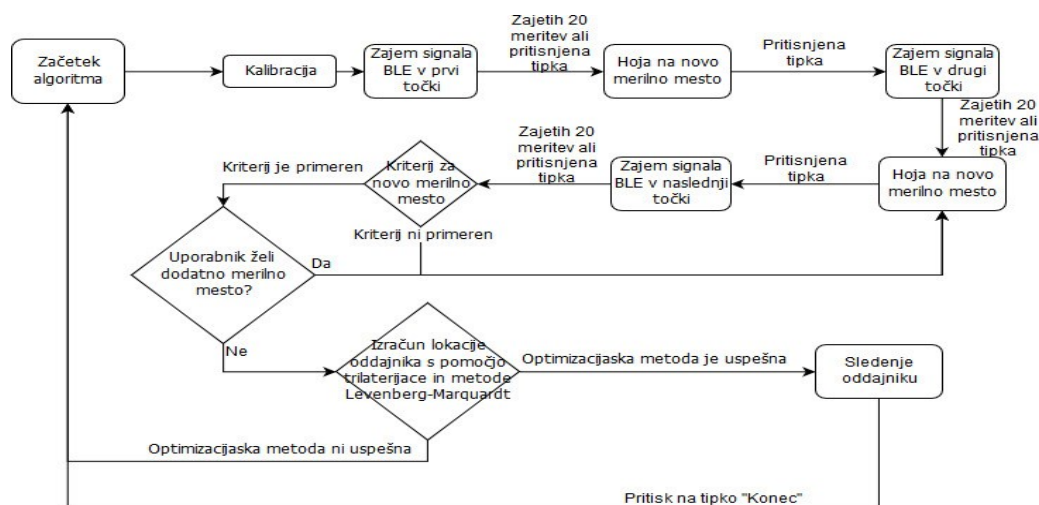
Ko so vnesene vse točke (zahtevane in dodatne s strani uporabnika), se izvede optimizacijski algoritem, ki iz zbranih podatkov oceni lokacijo oddajnika. Algoritem za določitev položaja uporablja metodo trilateracije. Ker podatki vsebujejo šum, trilateracija ni idealna. Položaj oddajnika je zato določen s pomočjo optimizacijske metode Levenberg-Marquardt.

Iz trenutne lokacije mobilnega telefona in ocenjene lokacije oddajnika se določi smer, v kateri se oddajnik nahaja. Na zaslonu se nato izriše krožni izsek, ki kaže v ocenjeno smer, kjer se nahaja izgubljeni oddajnik. Izsek se z vrtenjem naprave vrti tako, da vedno kaže v smer oddajnika. Hkrati se sprotno izračunava in prikazuje oddaljenost signala v metričnih enotah.

Ko je smer določena, lahko uporabnik hodi proti oddajniku. Med hojo bo sistem sprotno spreminjal lokacijo mobilne naprave ter tako pravilno prikazoval in spreminjal smer, v kateri se nahaja oddajnik. Optimizacijski algoritem se med hojo proti oddajniku ne zaganja več, tako da je oddaljenost do oddajnika določena preko modela.

S pritiskom na tipko, se postopek iskanja zaključi in naprava se vrne v prvotno stanje, kjer se lahko postopek znova začne. V primeru slabih podatkov, ko optimizacijski algoritem ne bi uspel določiti lokacije oddajnika, bi se postopek takoj zaključil, o čemer bi bil uporabnik obveščen. Ker je postopek cikličen, se lahko na zahtevo poljubno ponovi.

V vsakem koraku uporabnika spremljajo tudi kratka navodila, ki ga obveščajo o tem, kaj mora narediti in na kaj je potrebno paziti (npr. izbor oddajnika). Slika 17 prikazuje potek zgoraj opisanega algoritma.



Slika 17: Shematski prikaz poteka algoritma

3.4 Rezultati in končni izgled

Iskalni algoritem smo preizkusili na način, da smo najprej preverili njegovo opisano funkcionalnost, nato tudi kvaliteto delovanja. Delovanje je doseglo naše zastavljene cilje. V nadaljevanju bomo predstavili nekaj zaslonov aplikacije, ki prikazujejo izgled aplikacije med delovanjem.

Slika 18 prikazuje kako v aplikaciji izgleda zajem povprečja meritev, kjer uporabnik lahko iz izbirnega menija izbere MAC naslov oddajnika, ki ga išče. Ker se seznam posodobi na vsakem novem merilnem mestu, je zraven tudi opozorilo in prikaz dejansko izbranega merilnika. Med hojo proti novi točki, se nam zaslonska slika spremeni (Slika 19). Spodaj lahko vidimo navodilo, ki nam pove, do katere točke hodimo. Ob strani je tipka, ki zaključuje hojo in določi novo lokacijo.



Slika 18: Zaslona med zajemom meritev na mobilnem telefonu



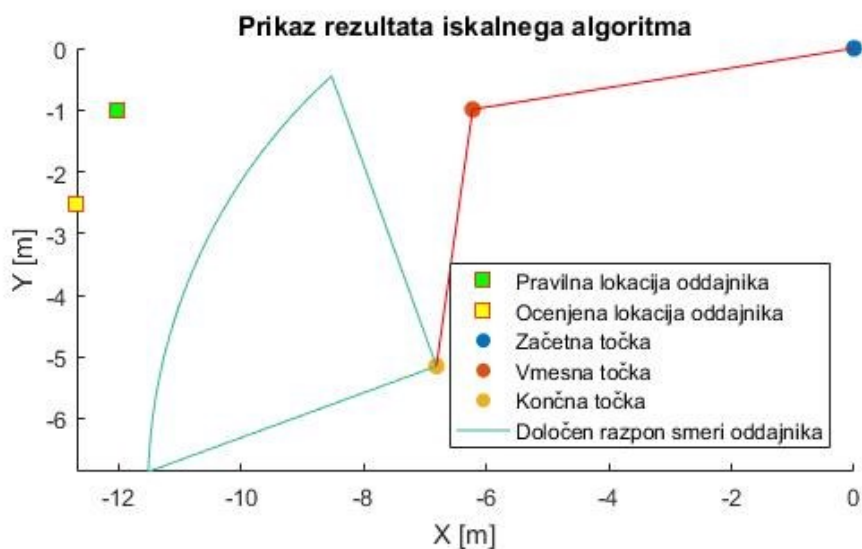
Slika 19: Prikaz na zaslonu med hojo proti novi merilni točki

Po vnosu zadnje točke, se zaslon prestavi v prikaz sledenja lokaciji oddajnika (Slika 20). Prikazan krožni izsek se vrti z vrtenjem naprave, tako da vedno kaže v smer proti oddajniku. Zraven vidimo prikaz ocene oddaljenosti oddajnika do mobilne naprave.



Slika 20: Prikaz na zaslonu med sledenjem končni lokaciji

Slika 21 prikazuje tri merilne lokacije, ki smo jih določili s hojo in dejansko lokacijo oddajnika. S svetlo modro je prikazan krožni izsek, kot ga prikazuje zaslon na mobilnem telefonu. Z rumeno je prikazana tudi ocenjena lokacija oddajnika, proti kateri kaže krožni izsek. Opazimo, da krožni izsek kaže proti realnemu položaju oddajnika. Tako smo dosegli tudi svoj cilj, da bomo oddajnik našli v razponu $\pm 45^\circ$.



Slika 21: Grafičen prikaz končnega rezultata z ocejeno lokacijo oddajnika in ocenjenimi merilnimi točkami

4 Eksperiment 2: Določanje položaja oddajnikov vzdolž stene

Uporaba BLE oddajnikov predstavlja možnost navigacije v notranjih prostorih, kjer satelitska navigacija ni več mogoča. Za dobro delovanje takšne notranje navigacije je potrebno poznati lokacijo vsakega oddajnika v prostoru, glede na izbrano skupno referenčno točko. Točnost določenega položaja oddajnika neposredno vpliva na točno delovanje notranje navigacije.

Določanje lokacij oddajnikov glede na referenčno točko je lahko zelo zamudno. Ker za navigacijo potrebujemo vsaj tri referenčne točke, bi v vsakem prostoru potrebovali vsaj tri oddajnike. V velikih prostorih (npr. nakupovalna središča) bi to pomenilo zelo veliko število oddajnikov. Vsem je potrebno čim bolj točno določiti lokacijo, da se lahko pravilno uporabljajo za navigacijo.

Pri drugem eksperimentu smo želeli ta proces avtomatizirati. BLE oddajnikom, ki so nameščeni vzdolž stene smo želeli določiti čim bolj točno lokacijo. Razvili smo algoritem, ki lokacijo oddajnika določi s hojo vzdolž stene. Tudi ta algoritem za svojo merilno napravo uporablja mobilni telefon z enakimi zahtevami, kot pri prvem eksperimentu.

Pri drugem eksperimentu smo uporabljali BLE oddajnike podjetja Kontakt.io, katerih namen je uporaba v notranji lokalizaciji. Nastavljeni so bili, kot v prvem delu naloge, na največjo oddajna moč in hitrost oddajanja signala vsakih 100 ms.

4.1 Opis naloge

Če želimo z eno povedjo opisati nalogo, bi jo lahko opisali kot: »Z uporabo mobilnega telefona je potrebno s hojo vzdolž stene določiti število oddajnikov in njihove lokacije, ki so nameščeni na tej steni.«

Kot pri prvem eksperimentu smo si tudi tukaj zadali nekaj ciljev:

- inercialni navigacijski sistem deluje dovolj točno,
- uporaba enega modela za vse oddajnike,
- pravilno ocenjeno število oddajnikov, ki so na steni,
- čim bolj točno določena lokacija oddajnika.

Za razliko od prvega eksperimenta je tu uporabljena nesprotna analiza in se izvede na računalniku. Telefon se uporablja samo kot merilna naprava za zajem podatkov.

4.2 Postopek razvoja algoritma

Delovanje inercialnega navigacijskega sistema smo opisali in preverili že v poglavju 2.1 Inercialni navigacijski sistem. Pri tem eksperimentu smo želeli doseči ravno hojo, ki jo tudi INS pravilno rekonstruira.

Razvoj skupnega modela oddajnika smo opisali v poglavju 2.3.2 Model BLE oddajnika, kjer se je njegova točnost izkazala za sprejemljivo. Ta isti model smo uporabljali tudi pri tem eksperimentu. Zaradi zadovoljivih rezultatov modela nismo prilagajali novemu, večjemu številu oddajnikov.

Število oddajnikov, ki se nahajajo na steni smo ocenili preko števila zajetih paketov. Pri predpostavki, da en paket ujamemo približno vsako sekundo, lahko iz časa merjenja izločimo merilnike, od katerih nismo prejeli dovolj paketov. Taki merilniki so lahko druge BLE naprave, ki se pojavijo na naši poti (npr. BLE obesek na ključih izvajalca meritev). Druge BLE merilnike, ki se nahajajo na drugih stenah in so v vidnem polju naše poti, je potrebno izločiti ročno preko MAC naslovov. Avtomatska detekcija takšnih oddajnikov je težja, saj od njih prejmemo skoraj enako število BLE paketov in bi jih lahko zamenjali z napačno lociranimi našimi oddajniki.

Lokacijo smo določevali samo v eni dimenziji, tj. dimenzija vzdolž stene. Ker smo hodili ob steni, je druga dimenzija konstantna (enaka oddaljenosti od stene). Višina je prav tako konstantna. Višinska razlika med merilno napravo in oddajnikom se pojavi, ker so oddajniki idealno nameščeni na višini približno 2 m, medtem ko je merilna naprava, zaradi držanja v roki, nekoliko nižje. V našem primeru je višinska

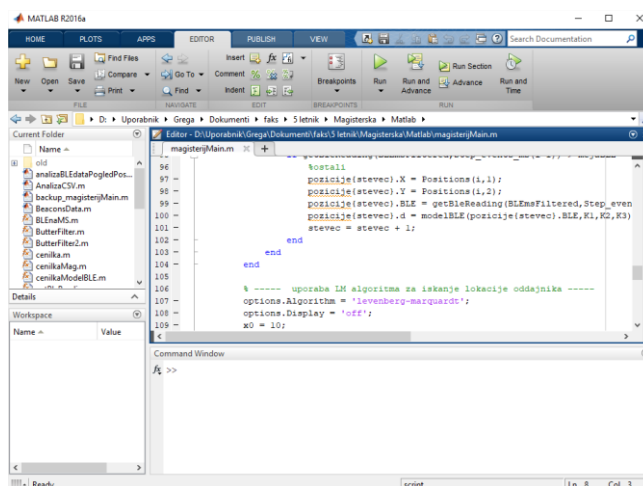
razlika znašala 0,65 m. Oddajniki so nameščeni v višini 2 m zato, da ljudje s hojo ne zakrivajo oddajnikov, kar bi oviralo signal.

Določanje lokacije je potekalo s pomočjo zbranih položajev, ki nam jih določi INS ter pripadajočimi meritvami jakosti BLE signala v istih časovnih trenutkih. Podatke smo nato vpeljali v optimizacijsko metodo, ki smo jo opisali v poglavju 2.4.1 Metoda Levenberg-Marquardt. Razlika v delovanju optimizacijske metode, glede na prvi eksperiment, je bila v optimiziranju le v eno dimenzijo.

Rezultat algoritma je prikaz prehojene poti in grafičen prikaz vseh najdenih oddajnikov na steni. Identifikacija oddajnikov poteka preko MAC naslovov.

4.3 Funkcijski opis programa

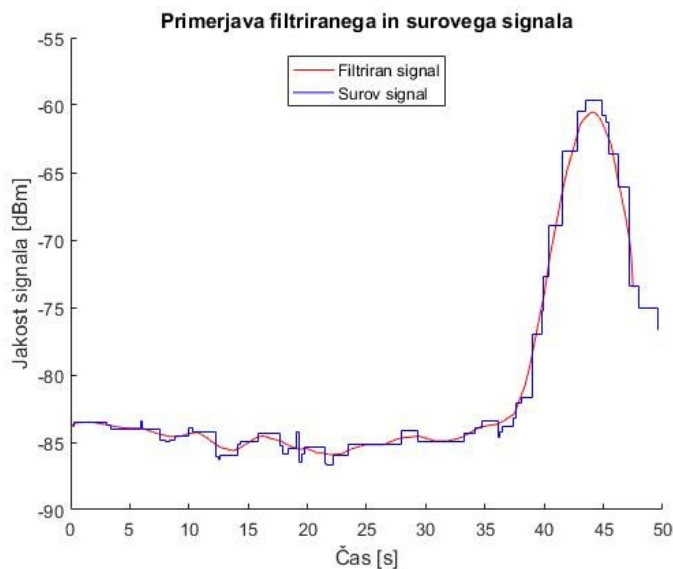
Merilna naprava v drugem eksperimentu je bila mobilni telefon Huawei P10 Lite z operacijskim sistemom Android 7.0. Programirali smo ga v enakem okolju kot pri prvem eksperimentu. Mobilni telefon je služil le za zajem merilnih podatkov, ki smo jih nato izvozili v formatu csv. Obdelava podatkov in izvedba samega algoritma poteka v okolju Matlab 2016a. Namestitev programa Matlab in njegova uporaba nista del tega magistrskega dela in ju zato ne bomo opisovali. Priročniki za namestitev in uporabo so dostopni na spletu. Slika 22 prikazuje izgled programskega okolja.



Slika 22: Izgled programskega okolja Matlab

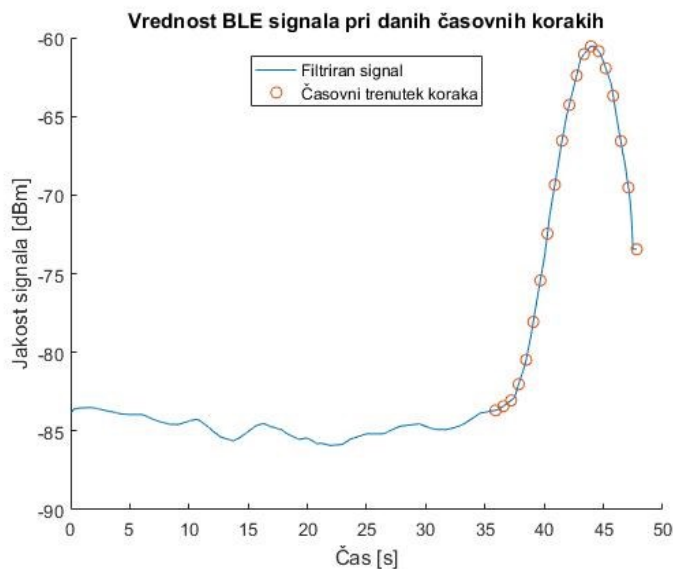
Algoritem začne z obdelavo csv datoteke, ki jo je ustvaril mobilni telefon. Podatke prenese v interni spomin, kjer jih lahko obdeluje. V prvem delu se izvede postopek detekcije korakov in ocenjevanje njihove dolžine in smeri. Podrobnosti teh postopkov smo opisali v poglavjih 2.1.4 Detekcija korakov in 2.1.5 Ocenjevanje dolžine in smeri koraka.

Jakost BLE signala je zelo diskretna, kar lahko povzroča nekaj težav pri obdelavi. Zato signal najprej prevzorčimo z enako frekvenco, kot je zajet signal z merilnika pospeška. Nato ga zgladimo s filtrom z drsečim povprečjem, da dobimo filtriran signal. Slika 23 prikazuje primerjavo med filtriranim in zajetim signalom:



Slika 23: Primerjava filtriranega prevzorčenega signala in surovega signala

Po obdelavi BLE signala lahko s časovnim ujemanjem vsakemu koraku priredimo tudi jakost BLE signala, ki jo preko matematičnega modela oddajnika pretvorimo v oddaljenost. Slika 24 prikazuje ujemanje časovnih trenutkov korakov in BLE signala.



Slika 24: Prikaz zajema vrednosti BLE signala v času korakov

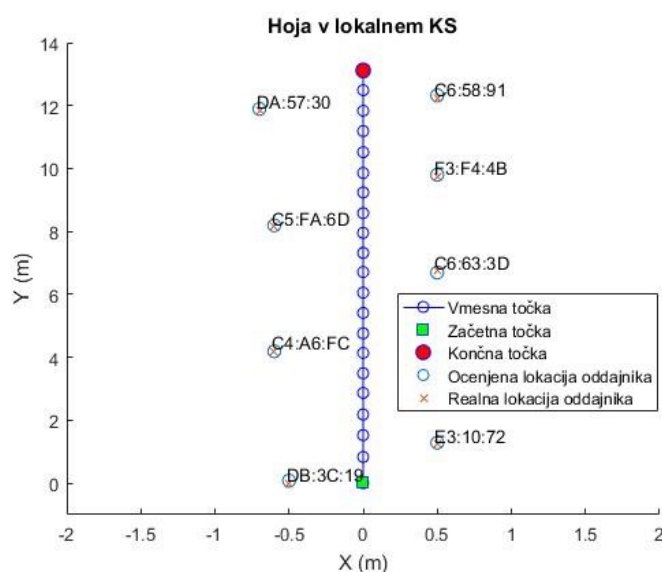
Opazimo, da se jakost signala očitno spreminja z oddaljenostjo od oddajnika in lahko že po število korakov ocenimo, kako daleč je oddajnik od izhodiščne točke. Opazimo lahko, da ob začetku hoje signal potrebuje nekaj korakov, preden se začne spreminjati. To lahko povzroči slabo detekcijo lokacije oddajnika ob premajhnem številu korakov.

Položaje in oddaljenosti se nato v zadnjem koraku vpelje v optimizacijsko metodo, ki določi lokacijo oddajnika na steni. Celoten postopek se ponovi za vsak oddajnik, ki ga je potrebno analizirati. Na koncu sledi grafična in numerična interpretacija rezultatov.

4.4 Rezultati

Algoritem smo preverili po ciljih. Najprej smo preizkusili delovanje zajema podatkov, nato smo analizo počasi vodili in preverjali rezultate. Zaradi zadovoljivega delovanja smo algoritem razširili na vse zajete oddajnike ter tako dobili algoritem, ki odkrije vse oddajnike na steni in določi njihove lokacije. V nadaljevanju bomo prikazali nekaj rezultatov delovanja.

Slika 25 ima prikazane rezultate zgoraj opisanega algoritma. Po sredini lahko vidimo ravno hojo, ki smo jo določili z našim INS. Ob strani so prikazani oddajniki. S križci so prikazane realne lokacije oddajnikov, ki so bile izmerjene z metrom v prostoru, s krogi pa so prikazani pripadajoči položaji, določene z razvitim algoritmom. Prikazani so tudi MAC naslovi, da smo lahko primerjali sovpadanje izmerjenih in določenih položajev.



Slika 25: Grafični prikaz ujemanja izmerjenih in ocenjenih lokacij oddajnikov

Slika 25 nam prikazuje, da se ocenjeni in realni položaji zelo natančno ujemajo. Po pričakovanjih je nekaj odstopanj, ki so rezultat šuma v meritvah. Numerična primerjava rezultatov je prikazana v spodnji tabeli (Tabela 6).

MAC naslov oddajnika	Ocenjena komponenta Y [m]	Realna komponenta Y [m]
C6:63:3D	6,69	6,75
DB:3C:19	0,08	0,00
C5:FA:6D	8,19	8,15
C6:58:91	12,32	12,25
DA:57:30	11,89	11,85
C4:A6:FC	4,19	4,20
E3:10:72	1,29	1,25
F3:F4:4B	9,80	9,75

Tabela 6: Numerična primerjava rezultatov

Opazimo, da algoritem za določevanje položaja deluje zelo natančno. Delovanje algoritma je direktno povezano z dobrim zajemom podatkov. V primeru, da lovimo podatke, ki vsebujejo veliko šuma, bo algoritem vrnil zelo netočne ocene rezultatov. To pomeni, da algoritem ne zagotavlja vračanja dobrih rezultatov po prvem poskusu. Z večjim številom ponovitev in združevanjem podatkov, bo rezultat konvergiral proti pravi vrednosti oddajnika.

5 Zaključek

Na kratko smo predstavili različne načine lokalizacije v zunanosti in notranjih prostorih. Posvetili smo se uporabi senzorjev znotraj mobilnega telefona za namen izdelave inercialnega navigacijskega sistema. Opazili smo velik vpliv motenj na vgrajenem rotacijskem vektorju. Motnje so rezultat prevelikega zaupanja magnetometru, ki je občutljiv na zunanjo okolico. Sklepamo, da ta primer ni omejen na izbrani pametni mobilni telefon ampak na operacijski sistem Android. Pokazali smo tudi možno implementacijo INS, kjer z uporabo žiroskopa zmanjšamo vpliv motenj na določitev smeri. Meritev ima zaradi narave INS še vedno prisotnega nekaj šuma. Vseeno sta oba načina določanja smeri hoje pokazala dovolj točne rezultate za implementacijo v algoritem.

Uporabljali smo tudi Bluetooth modul za branje moči signala BLE oddajnikov v prostoru. Začeli smo z izgradnjo matematičnega modela BLE oddajnika, ki opisuje relacijo med sprejeto močjo in oddaljenostjo oddajnika. Ugotovili smo, da je pri oddaljenosti večji od 10 m vpliv šuma prevelik za lokalizacijo in takšne meritve niso uporabne.

Pokazali smo neodvisnost oddaljenosti merilne naprave od stene, na kateri je pripet BLE oddajnik. Pomembno je le, da merilna naprava ni direktno ob steni. V nasprotnem primeru signal vsebuje preveč šuma, zaradi večjega števila signalov, ki se odbijajo od stene. Raziskali smo tudi vzroke šuma, ki motijo delovanje in strategije zmanjševanja njihovega vpliva na meritve.

Delovanje predstavljenih sistemov in postopkov smo preizkusili na dveh eksperimentih s ciljem določanja položaja in orientacije telefona v prostoru. Iz izmerjenih položajev smo z uporabo zgrajenega modela BLE oddajnika, trilateracije in optimizacije LM določili položaj oddajnika v prostoru. Ugotovili smo korelacijo med izbiro poti med zajemom podatkov in vplivom na končni rezultat. Napačna pot lahko onemogoči delovanje algoritma, na kar nas algoritem tudi opozori in s predlogom poskusi izboljšati postopek.

V prvem eksperimentu smo pokazali, da lahko z zgrajenim algoritmom najdemo oddajnik v prostoru. Določili smo pogoje za delovanje algoritma: v vseh merilnih točkah moramo imeti možnost izmeriti oddajnikov signal z ustrezno jakostjo. Med merilnimi točkami se mora jakost signala ustrezno spreminjati. Neizpolnjevanje pogojev se odraža v ustavitvi algoritma.

V drugem eksperimentu smo pokazali avtomatizirano določitev lokacije oddajnikov postavljenih na steni. Ugotovili smo, da je algoritem dovolj natančen za delovanje. Problem lahko predstavljajo slabi vhodni podatki, ki so lahko rezultat številnih ovir ob poti ali majhnih prostorov v katerem izvajamo meritev. V najslabšem primeru je potrebno eksperiment ponoviti.

Algoritma bi lahko nadgradili s sistemom za shranjevanje podatkov o oddaljenosti oddajnika in trenutnega položaja v podatkovno bazo, iz katere nato sprti optimiziramo parametre modela in izboljšamo delovanje. Vsakemu signalu lahko preko MAC naslova predpišemo pripadajoč oddajnik. Posledično lahko zgradimo model z unikatnimi parametri za posamezen oddajnik, kar bi izboljšalo iskanje.

Drugi algoritem bi lahko nagradili tako, da bi se podatki o oddaljenosti stalno vpisovali v bazo, tudi po zaključeni prvi določitvi položaja. Ti podatki se lahko vpisujejo tudi, ko se tak oddajnik že uporablja za notranjo lokalizacijo uporabnikov. Tako bi dobivali vedno večje število podatkov o lokaciji oddajnika, kar bi povzročilo konvergenco ocene lokacije. Tako bi še dodatno omejili vpliv šuma in sprti posodabljali oddajnikov položaj.

6 Literatura

- [1] Inercialni navigacijski sistemi:
https://en.wikipedia.org/wiki/Inertial_navigation_system [18.09.2018]
- [2] R. Harle. »A survey of indoor inertial positioning systems for pedestrians«. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 15(3), pp. 1281-1293, 2013.
- [3] G. Klančar: »Avtonomni mobilni sistemi«, Ljubljana, 2014
- [4] Žiroskop:
<https://en.wikipedia.org/wiki/Gyroscope> [18.09.2018]
- [5] Pospeškometer:
<https://en.wikipedia.org/wiki/Accelerometer> [18.09.2018]
- [6] Hallov pojav:
https://en.wikipedia.org/wiki/Hall_effect [26.11.2018]
- [7] Inercialni navigacijski sistem:
<https://www.oxts.com/what-is-inertial-navigation-guide/> [18.09.2018]
- [8] S. Tomažič: »Lokalizacija v notranjem okolju z uporabo pametnega telefona«, Doktorska disertacija, Ljubljana, 2016
- [9] Pedometrija:
<https://en.wikipedia.org/wiki/Pedometer> [22.09.2018]
- [10] J. Torres-Sospedra, A.R. Jiménez, et al. "The Smartphone-Based Offline Indoor Location Competition at IPIN 2016: Analysis and Future Work", Sensors 2017, 17(3), 557; <http://dx.doi.org/10.3390/s17030557>, ISSN: 1424-8220
- [11] Lokalizacija v prostoru:
https://en.wikipedia.org/wiki/Indoor_positioning_system [12.10.2018]
- [12] Y. Wang, X. Yang, Y. Zhao, Y. Liu, L. Cuthbert: »Bluetooth positioning using RSSI and triangulation methods«, In Consumer Communications and Networking Conference (CCNC), 2013 IEEE , pp. 837-842, 2013.
- [13] Z. Jianyong, C. Zili, L. Haiyong, L. Zhaohui: »RSSI based Bluetooth Low Energy Indoor Positioning«. IPIN 2014, 2014.

-
- [14] Triangulacija:
<https://gisgeography.com/trilateration-triangulation-gps/> [12.10.2018]
- [15] Bluetooth:
<https://www.controleng.com/articles/industrial-wireless-bluetooth-can-be-robust-easy-to-use/> [23.09.2018]
- [16] Bluetooth Low Energy:
https://en.wikipedia.org/wiki/Bluetooth_Low_Energy [10.10.2018]
- [17] S.Feldmann, K.Kyamakya, A. Zapater, Z. Lue: »An indoor Bluetooth-based positioning system: concept, Implementation and experimental evaluation«, Institute of Communications Engineering, Hannover, 2003
- [18] I. Škrjanc: »Inteligentni sistemi za podporo odločanju«, Ljubljana, 2016
- [19] H. P. Gavin: »The Levenberg-Marquardt method for nonlinear least squares curve-fitting problems«, Duke University, 2017