



Rytis KLIMOVICH

NAVIGACIJOS PASTATO VIDUJE TAIKOMIEJI TYRIMAI

APPLIED RESEARCH OF METHODS OF INDOOR NAVIGATION

Baigiamasis magistro darbas

Informacinių elektroninių sistemų studijų programa, valstybinis kodas 6211BX015

Dirbtinio intelekto sistemų specializacija

Informatikos inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2024

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
ELEKTRONINIŲ SISTEMŲ KATEDRA

Rytis KLIMOVICH

NAVIGACIJOS PASTATO VIDUJE TAIKOMIEJI TYRIMAI
APPLIED RESEARCH OF METHODS OF INDOOR NAVIGATION

Baigiamasis magistro darbas

Informacinių elektroninių sistemų studijų programa, valstybinis kodas 6211BX015

Dirbtinio intelekto sistemų specializacija

Informatikos inžinerijos studijų kryptis

Vadovas

doc. dr. Andrius Katkevičius

(pedag. vardas, moksl. laipsnis, vardas, pavardė) (parašas) (data)

Lietuvių kalbos konsultantas

dr. A. Žemienė

(pedag. vardas, moksl. laipsnis, vardas, pavardė) (parašas) (data)

Vilnius, 2024

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

	Rytis Klimovič, 20172246	
	(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)	
	Elektronikos fakultetas	
	(Fakultetas)	
	Informacinės elektroninės sistemos, DISfm-22	
	(Studijų programa, akademinė grupė)	

BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO)
SĄŽININGUMO DEKLARACIJA

2024 m. gegužės 24 d.

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas tema „Navigacijos pastato viduje taikomieji tyrimai“ yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Mano darbo vadovas docentas daktaras Andrius Katkevičius.

Kitų asmenų indėlio į parengtą baigiamąjį darbą nėra. Jokių įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs (-usi).

			Rytis Klimovič
	(Parašas)		(Vardas ir pavardė)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
ELEKTRONINIŲ SISTEMŲ KATEDRA

Studijų kryptis: Informatikos inžinerija

Studijų programa: Informacinės elektroninės sistemos , valstybinis kodas 6211BX015

Specializacija: Dirbtinio intelekto sistemos

TVIRTINU
Katedros vedėjas
Artūras Serackis
2023-01-24

MAGISTRO BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS

Nr. DISfm-22–1822

Vilnius

Studentas (-ė): Rytis Klimovič

Baigiamojo darbo tema: Navigacijos pastato viduje taikomieji tyrimai

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas pagal numatytą studijų kalendorinį grafiką.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

Darbo apibūdinimas. Darbo tikslas: Ištirti technologijas ir signalų apdorojimo metodus, taikomus navigacijai pastato viduje ir įvertinti jų praktines panaudojimo galimybes.

Darbo apibūdinimas. Darbo uždaviniai:

1. Atlikti navigacijos pastato viduje galimų taikyti technologijų ir signalų apdorojimo metodų mokslinę literatūros analizę.
2. Paruošti navigacijos pastato viduje tyrimams reikalingą aparatinę ir programinę įrangą.
3. Pateikti eksperimentinius navigacijos pastato viduje tyrimo rezultatus.

Aiškinamojo rašto turinys. II pakopa:

1. Įvadas
 - 1.1. Darbo aktualumas ir tikslas
 - 1.2. Darbo uždaviniai
 - 1.3. Naudoti tyrimo ir analizės metodai
 - 1.4. Darbo naujumas ir praktinė nauda
 - 1.5. Darbo struktūra
2. Navigacijai pastato viduje taikomų technologijų analitinė apžvalga
3. Navigacijai pastato viduje surenkamų duomenų apdorojimo metodų analizė
4. Navigacijai pastato viduje reikalingų duomenų atranka
5. Navigacijos pastato viduje tyrimo rezultatai
6. Apibendrinimas. Išvados

Literatūra

Priedai

Vadovas docentas Andrius Katkevičius

<table border="1"> <tr> <td>Vilniaus Gedimino technikos universitetas</td> </tr> <tr> <td>Elektronikos fakultetas</td> </tr> <tr> <td>Elektroninių sistemų katedra</td> </tr> </table>		Vilniaus Gedimino technikos universitetas	Elektronikos fakultetas	Elektroninių sistemų katedra	<table border="1"> <tr> <td>ISBN</td> <td>ISSN</td> </tr> <tr> <td>Egz. sk.</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Data*</td> <td></td> </tr> </table>		ISBN	ISSN	Egz. sk.		Data*	
Vilniaus Gedimino technikos universitetas												
Elektronikos fakultetas												
Elektroninių sistemų katedra												
ISBN	ISSN											
Egz. sk.												
Data*												
Antrosios pakopos studijų Informacinių elektroninių sistemų programos magistro baigiamasis darbas												
Pavadinimas		Navigacijos pastato viduje taikomieji tyrimai										
Autorius		Rytis Klimovič										
Vadovas		Andrius Katkevičius										
		<table border="1"> <tr> <td>Kalba: lietuvių</td> </tr> </table>		Kalba: lietuvių								
Kalba: lietuvių												
Anotacija Baigiamojo darbo tikslas – ištirti technologijas ir metodus, leidžiančius nustatyti padėtį pastato viduje, remiantis pradine užfiksuota padėtimi. Darbo metu atlikta navigacijos pastato viduje galimų taikyti metodų mokslinė literatūros analizė, suprojektuota tyrimams reikalinga programinė įranga nRF5340DK maketams. Eksperimentiniu būdu buvo tiriama BLE (angl. Bluetooth Low Energy) technologija taikant MCPD (angl. Multi-carrier phase difference) metodą. Duomenų analizei, gautų rezultatų įvertinimui ir vietos nustatymui buvo naudojami dirbtinių neuronų tinklai. Apdorojus gautus rezultatus gauta 1,24 m vidutinė atstumo matavimo paklaida. Darbo apimtis – 54 p. teksto be priedų, 35 iliustr., 8 lent., 27 bibliografiniai šaltiniai.												
Prasminiai žodžiai: Bluetooth Low Energy, Multi-carrier phase difference, vietos nustatymas pastato viduje, navigacija pastato viduje, dirbtiniai neuronų tinklai.												

<table border="1"> <tr><td>Vilnius Gediminas Technical University</td></tr> <tr><td>Faculty of Electronics</td></tr> <tr><td>Department of Electronic Systems</td></tr> </table>		Vilnius Gediminas Technical University	Faculty of Electronics	Department of Electronic Systems	<table border="1"> <tr> <td>ISBN</td> <td>ISSN</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Copies No.</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Date*.....*.....</td> </tr> </table>		ISBN	ISSN	Copies No.		Date*.....*.....								
Vilnius Gediminas Technical University																			
Faculty of Electronics																			
Department of Electronic Systems																			
ISBN	ISSN																		
Copies No.																			
Date*.....*.....																			
<table border="1"> <tr> <td colspan="4">Master Degree Studies Information Electronics Systems study programme Master Graduation Thesis</td> </tr> <tr> <td>Title</td> <td colspan="3">Applied Research of Methods of Indoor Navigation</td> </tr> <tr> <td>Author</td> <td colspan="3">Rytis Klimovič</td> </tr> <tr> <td>Academic supervisor</td> <td colspan="3">Andrius Katkevičius</td> </tr> </table>				Master Degree Studies Information Electronics Systems study programme Master Graduation Thesis				Title	Applied Research of Methods of Indoor Navigation			Author	Rytis Klimovič			Academic supervisor	Andrius Katkevičius		
Master Degree Studies Information Electronics Systems study programme Master Graduation Thesis																			
Title	Applied Research of Methods of Indoor Navigation																		
Author	Rytis Klimovič																		
Academic supervisor	Andrius Katkevičius																		
			Thesis language: Lithuanian																
Annotation The thesis aims to investigate technologies and methods that allow determining the position inside a building based on the initially captured position. During the work, a scientific literature analysis of possible methods for indoor navigation was performed, and software for nRF5340DK prototypes necessary for the research was designed. The BLE (Bluetooth Low Energy) technology was experimentally investigated using the MCPD (Multi-carrier phase difference) method. Artificial neural networks were used for data analysis, evaluation of the obtained results, and location determination. After processing the results, an average distance measurement error of 1.24 m was obtained. The thesis consists of: 54 p. text without appendices, 35 pictures, 8 tables, 27 bibliographic entries.																			
Keywords: Bluetooth Low Energy, Multi-carrier phase difference, Indoor positioning, Indoor navigation, Artificial neural networks.																			

Turinys

IVADAS	10
1. NAVIGACIJAI PASTATO VIDUJE TAIKOMŲ TECHNOLOGIJŲ ANALITINĖ APŽVALGA	13
1.1. Navigacija pastato viduje naudojant 5G ryšio technologiją.....	13
1.2. Navigacija pastato viduje naudojant <i>Bluetooth Low Energy</i>	15
1.3. Papildytos realybės panaudojimas navigacijai pastato viduje	18
1.4. Wi-Fi pagrindu veikiančių sistemų panaudojimas navigacijai pastato viduje	20
1.5. Skyriaus apibendrinimas.....	24
2. PASTATO VIDUJE SURENKAMŲ NAVIGACIJOS DUOMENŲ APDOROJIMO METODŲ ANALIZĖ	26
2.1. BLE protokolo pagrindai	26
2.2. Matematinis kelių nešlių fazės skirtumo (MCPD) modelis	29
2.3. BLE protokolo taikymas MCPD metodui įgyvendinti	31
2.4. Skyriaus apibendrinimas.....	33
3. NAVIGACIJAI PASTATO VIDUJE REIKALINGŲ DUOMENŲ ATRANKA.....	34
3.1. NRF5340DK maketų paruošimas eksperimentams	34
3.2. Patalpos paruošimas eksperimentams.....	38
3.3. Atstumo duomenų rinkimas	42
3.4. Skyriaus apibendrinimas.....	44
4. NAVIGACIJOS PASTATO VIDUJE TYRIMO REZULTATAI.....	45
4.1. Eksperimento rezultatai	45
4.2. Eksperimento rezultatų apdorojimas taikant intelektualiuosius metodus	49
4.3. Skyriaus apibendrinimas.....	51
APIBENDRINIMAS. IŠVADOS	52
LITERATŪROS ŠALTINIAI	54
PRIEDAI.....	57
1 priedas.....	57

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1 pav. PDR veikimo principo schema [9].....	14
2 pav. Navigacijos pastato viduje sistemos veikimo schema [9].....	15
3 pav. Sujungimo po tris imtuvus architektūros schema [5].....	17
4 pav. BLE siųstuvų išdėstymo bibliotekoje planas [12].....	18
5 pav. AR ir semantinio web tinklo integravimo schema [11]	19
6 pav. Realizuotos ar sistemos vartotojo sąsaja [11]	20
7 pav. <i>Network simulator 2</i> sistemos veikimo diagrama [15].....	21
8 pav. Trijų prieigos taškų signalų susikirtimo taško diagrama [15]	21
9 pav. Trijų prieigos taškų signalo stiprumo matavimo tyrimo rezultatai [15].....	22
10 pav. Duomenų, apdorotų naudojant KNN, matavimų rezultatai [16].....	23
11 pav. Signalų stiprumo prognozavimo rezultatai [17].....	24
12 pav. Ryšio kanalai naudojami ble protokole [19]	26
13 pav. Skelbimo paketo struktūra [19].....	27
14 pav. PDU struktūra [19].....	27
15 pav. PDU antraštės struktūra [19].....	28
16 pav. PDU duomenų struktūra [19].....	28
17 pav. Fazių skirtumų matavimas naudojant kelių nešlių modelį [21].....	30
18 pav. MCPD, kai įrenginiai veikia <i>connection-orientated</i> režimu [21].....	32
19 pav. MCPD, kai įrenginiai veikia <i>connectionless</i> režimu [21]	32
20 pav. NRF5340dk maketo spausdintinės plokštės elementų išdėstymas iš viršaus [24]	35
21 pav. Programinio kodo veikimo blokinė diagrama.....	36
22 pav. Programinio kodo rezultato pavyzdys.....	37
23 pav. Įrenginių kalibravimo algoritmo UML sekų diagrama [26].....	38
24 pav. Patalpos nuotrauka	39
25 pav. Pasirinktos patalpos planas su matavimo stotelių vietomis.....	39
26 pav. Eksperimento patalpos planas (9 matavimo taškai)	40
27 pav. Eksperimento patalpos planas (24 matavimo taškai)	41
28 pav. Duomenų rinkimo darbo eiga	44
29 pav. Matavimo paklaidos ir realaus atstumo (24 zonos) priklausomybės grafikas.....	47
30 pav. Vidutinės matavimo paklaidos kiekviename taške (24 zonos) grafikas.....	47
31 pav. Matavimo paklaidos ir realaus atstumo (9 zonos) priklausomybės grafikas.....	48
32 pav. Vidutinės matavimo paklaidos kiekviename taške (9 zonos) grafikas.....	48
33 pav. Duomenų rinkinio fragmento nuotrauka.....	49
34 pav. Dirbtinių neuronų tinklo architektūra.....	50
35 pav. Dirbtinių neuronų tinklo testavimo rezultatų fragmentas.....	51

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1 lentelė. NRF5340dk techninė specifikacija [23].....	34
2 lentelė. Realūs atstumai tarp matavimo taškų ir stotelių.....	41
3 lentelė. Vieno matavimo rezultatų struktūra.....	42
4 lentelė. Duomenų rinkinio struktūra vietos nustatymo eksperimentui.....	43
5 lentelė. Atstumo paklaidos, kai patalpa padalinta į 9 zonas.....	45
6 lentelė. Atstumo paklaidos, kai patalpa padalinta į 24 zonas.....	46
7 lentelė. Kiekvienos stotelės vidutinė atstumo paklaida	46
8 lentelė. Duomenų rinkinio struktūra	49

IVADAS

Navigacijos pastato viduje problemai spręsti gali būti naudojama daug skirtingų metodų. Didžioji dalis metodų iš pažiūros yra panašūs – sudaromas siųstuvų ir imtuvų tinklas, pagal gautus duomenis atliekami skaičiavimai ir remiantis gautais rezultatais skaičiuojama vieta pastato viduje. Navigacijos pastato viduje uždavinio sprendimą galima padalinti į dvi dalis, kurios sprendžiamos panašiais metodais:

- navigacija pastato viduje;
- vietos pastato viduje nustatymas.

Šios dvi problemos iš esmės yra identiškos – abi reikalauja nustatyti, kurioje pastato vietoje yra vartotojas arba objektas. Šio tyrimo metu bus apžvelgti ir praktiškai išbandyti metodai, kuriuos galima taikyti abiem problemoms išspręsti.

Navigacija pastato viduje gali būti panaudota daugelyje praktinių scenarijų. Pirmiausia, tokia technologija gali būti naudojama padedant paprastam vartotojui arba klientui naviguoti dideliuose pastatų kompleksuose, pvz., prekybos centruose ir ligoninėse. Tokios technologijos panaudojimas galėtų ne tik taupyti žmonių laiką, tačiau padėtų ir infrastruktūros savininkams nustatyti dažniausiai lankomas vietas, taip pat padėtų rasti efektyvesnius žmonių judėjimo būdus. Prekybos centrų atveju, pagal vietos duomenis būtų galima pateikti suasmenintus pasiūlymus kiekvienam pirkėjui atskirai. Navigacijos pastato viduje metodai gali būti apjungti su kitais, jau naudojamais sprendimais, pvz.: ligoninių eilių sistemos. Tokiu atveju pacientas ne tik tiksliai žino kada ir į kokį kabinetą jis turi eiti, tačiau naudodamas technologiją, jis gali pamatyti kaip nueiti iki reikalingo kabineto.

Navigacijos pastato viduje technologijos gali būti naudingos ne tik vietos, bet ir tam tikrų daiktų suradimui. Taikant įvairius metodus atsiranda galimybė sekti turimą įmonės inventorių, bei sekti sandėlių veiklą. Taip palengvinama turto apskaita ir palengvinamas sandėliuose turimo inventoriaus radimas.

Šiuo metu rinkoje nėra globaliai paplitusio centralizuoto navigacijos pastato viduje sprendimo. Egzistuoja sprendimai, kurie yra pritaikomi būtent tam tikro pastato poreikiams [1, 2, 3]. Tačiau, kuriant universalų sprendimą susiduriama su daug skirtingų iššūkių – visi pastatai yra individualūs, skiriasi jų struktūra ir technologinė infrastruktūra (*Wi-Fi*, *BLE* taškų prieinamumas, kitų jutiklių įrengimo galimybės). Taip pat, reikalingas universalus modelis, kuris pastato struktūrą galėtų perkelti į informacinę sistemą. Kol nebus sprendimo, kuris padėtų sudaryti pastatų žemėlapius, tinkamus universaliai navigacijai, tol joks

globalus sprendimas negali būti taikomas. Kaip vienas iš iššūkių sprendžiant šį uždavinį yra navigacijos prieiga vartotojui – tobulu atveju šis funkcionalumas turėtų būti integruotas ir prieinamas kartu su turima fizine ir programine įranga, pvz.: išmanusis telefonas ir *Google Maps* programinė įranga [3]. Plačiai naudojamas sprendimas neturėtų reikalauti rankiniu būdu nuskaityti aplink esančių prieigos taškų, rankiniu būdu parodyti pradžios tašką ar reikalauti, kokios nors papildomos vartotojo informacijos. Turėtų užtekti suvesti vartotojo kelionės tikslą.

Navigacijos pastato viduje metodus galima pradėti skirstyti nuo būdų, kaip informacija yra pateikiama vartotojui, tai yra ar sistema realiu laiku rodo vartotojui kaip nueiti iki tikslo, ar esant tam tikrame taške parodomas nuorodos iki tikslo. Pastarąją problemą gali padėti išspręsti stacionarūs žemėlapių stendai, kuriuose nurodomas tikslas ir pagal iš anksto nustatytas taisykles įrenginys pavaizduoja maršrutą į nurodytą tikslą. Toks problemos sprendimas yra technologiškai paprasčiausias, tačiau ne visai adaptyvus ir lankstus.

Toliau navigacijos pastato viduje sprendimo metodus galima skirstyti pagal naudojamas technologijas. Apžvelgiant įvairius mokslinės literatūros šaltinius galima paminėti kelias skirtingas technologijas, kurių pagrindu bandoma nustatyti vietą pastato viduje:

- | | |
|-------------------------------|---------------------|
| ● <i>Ultra-Wideband</i> | ● <i>Lidar</i> |
| ● <i>GPS</i> | ● QR kodai |
| ● <i>Bluetooth low-energy</i> | ● Judesio davikliai |
| ● <i>Wi-Fi</i> | ● <i>Li-Fi</i> |
| ● <i>ZigBee</i> | ● <i>RFID</i> |

Žvelgiant į mokslinius straipsnius, dažnu atveju technologijos yra apjungiamos tarpusavyje, pavyzdžiui.: *Wi-Fi* ir *Ultra-Wideband* [4]. Tai duoda geresnį rezultatą nei technologijų naudojimas atskirai.

Taip pat ankščiau minėtų technologijų gauti duomenys būna naudojami dirbtinių neuronų tinklams mokyti [4, 5]. Sprendimai, kuriuose panaudojami intelektualieji metodai dažnai yra adaptyvesni.

Norint korektiškai įvertinti skirtingus problemos sprendimo būdus, svarbu nustatyti vertinimo kriterijus, kurie parodo metodo naudą. Pagal [4], parametras skirtingų technologijų palyginimui – kokių tikslumu arba su kokia paklaida nustatoma pozicija pastato viduje.

Šio tiriamojo darbo tikslas – ištirti technologijas ir signalų apdorojimo metodus, taikomus navigacijos pastato viduje tikslu ir įvertinti jų praktines panaudojimo galimybes.

Tyrimo metu bus sprendžiami trys uždaviniai:

1. Atlikti mokslinės literatūros apie technologijas ir signalų apdorojimo metodus, taikomus navigacijos pastato viduje tikslu, analizę.

2. Paruošti navigacijos pastato viduje tyrimams reikalingą aparatinę ir programinę įrangą.

3. Pateikti eksperimentinius navigacijos pastato viduje tyrimo rezultatus.

Prieš sprendžiant paminėtus uždavinius, iškeliamą hipotezę, susijusi su pagrindiniu ieškomu rezultatų vertinimo kriterijumi: naudojant BLE (angl. *Bluetooth Low-Energy*) technologiją ir taikant MCPD (angl. *Multi-carrier phase difference*) metodus realiomis sąlygomis galima nustatyti objekto vietą su mažesne nei 1,5 m paklaida.

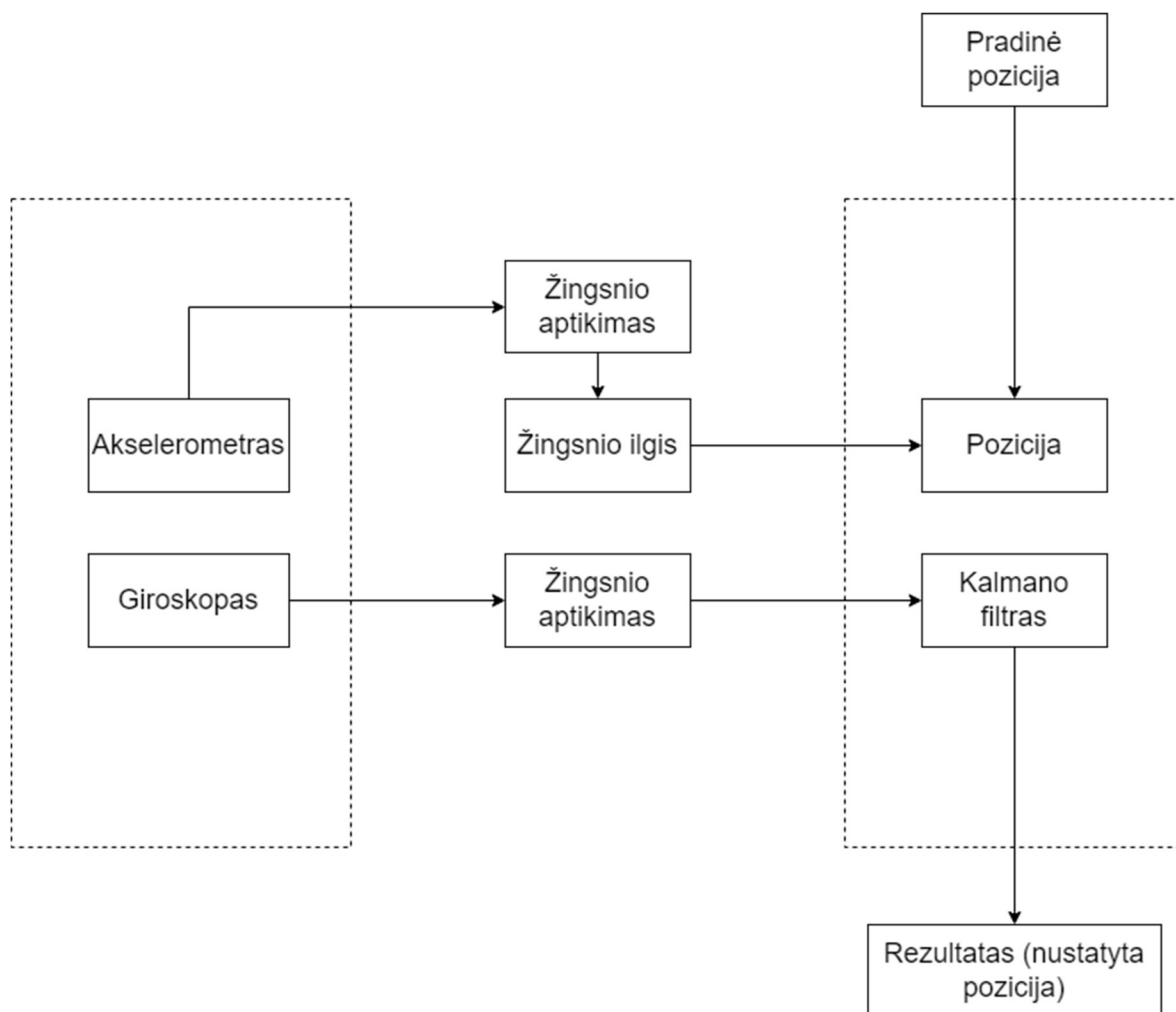
1. NAVIGACIJAI PASTATO VIDUJE TAIKOMŲ TECHNOLOGIJŲ ANALITINĖ APŽVALGA

Šiame skyriuje bus pateikiami navigacijos ir vietos nustatymo pastato viduje metodai, kuriuos naudojo kitų mokslinių darbų autoriai. Atliekant analitinę apžvalgą siekiama parodyti, kaip įvairios paminėtos technologijos gali padėti išspręsti iškeltus uždavinius. Ši apžvalga padės nustatyti, kokių matavimo paklaidų galima tikėtis, naudojant atitinkamus metodus. Taip pat analizuojant galima nustatyti, kokie metodai yra galutinai ištirti realiomis sąlygomis.

1.1. Navigacija pastato viduje naudojant 5G ryšio technologiją

Apžvelgiant naujausių technologijų panaudojimą navigacijai pastato viduje, pirmiausia norėtusi aptarti 5G ryšio technologijos galimybes šiai problemai spręsti. Autoriai bandė sumodeliuoti ir įgyvendinti bandomąjį projektą paremtą 5G ryšio technologija [6]. Pirmasis iššūkis, su kuriuo susiduriama bandant įgyvendinti tokią sistemą, yra žemėlapių sudarymas – pastato planas turi būti skaitmeninis ir saugomas duomenų bazėje. Autoriai pasirinko BIM (angl. *Building Information Model*) suformuoti naudojant IFC (angl. *Industry Foundation Classes*) formatą [7]. DWG formato pastatų planus galima paversti į BIM. Pradinių duomenų gavimas yra nesudėtingas, nes dauguma naujai statomų pastatų turi skaitmenintus patalpų planus.

Rengiant skaitmenintus patalpų planus, sprendžiamas pozicijos nustatymo uždavinys. Jam spręsti naudojami PDR (angl. *Pedestrian dead reckoning*) metodai. Šio metodo panaudojami išmaniojo telefono viduje esantis akselerometras ir giroskopas. Taip pat iš anksto nustatomas vidutinis žingsnio ilgis ir fiksuojama judėjimo kryptis [8]. PDR veikimo principas pavaizduotas 1 pav. [9].



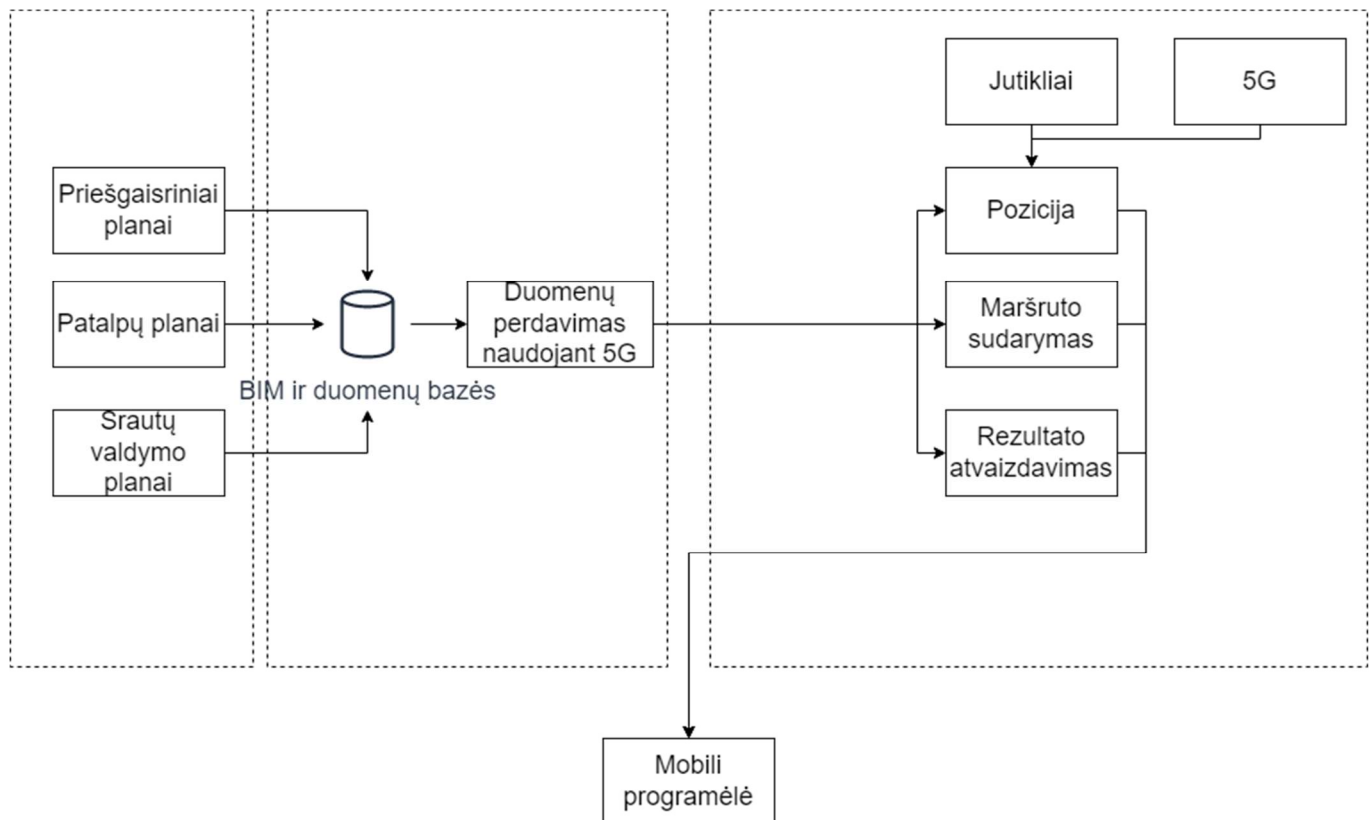
1 pav. PDR veikimo principo schema [9]

Toliau autoriai kelia kelias problemas tiksliai vietai pastato viduje nustatyti ir pateikia kelis jų sprendimo variantus:

- Pradinės pozicijos nustatymas. Apsvarstyti pradinės pozicijos nustatymo variantai naudojant Wi-Fi arba BLE RSSI (angl. *Received signal strength indication*) parametrus, tačiau šis metodas reikalautų vartotoją prisijungti prie vietinio tinklo. Buvo siūlomas GPS variantas, tačiau visi keliai galėtų pradėti tik pastato išorėje. Tyrėjai pasiūlė naudoti QR kodo nuskaitymą, kaip pradinio taško nustatymo būdą.
- Matavimų paklaidos mažinimas. Siūloma pozicijos nustatymus atlikti ne iš jutiklius turinčio įrenginio perspektyvos, tačiau traktuoti, kad matavimai atliekami iš vartotojo ūgio perspektyvos.

Šiems uždaviniams spręsti taip padės ir tankus 5G ryšio tinklas. Tyrėjai pasirinko PDR metodą pritaikytą 5G technologijai, kuris padės aptikti žingsnius, bei nustatyti judėjimo kryptį.

Iš esmės, visa kuriama sistema pavaizduota 2 pav. Sistemą sudaro 4 pagrindiniai komponentai: duomenų rinkiniai, duomenų bazė, duomenų apdorojimas ir vartotojo naudojama mobili programėlė.



2 pav. Navigacijos pastato viduje sistemos veikimo schema [9]

Įgyvendinus pavaizduotą sistemos modelį tyrėjai pastebėjo, jog sistema veikia 2-3 metrų tikslumų. Reikia pastebėti, jog sistema buvo įgyvendinta laboratorinėmis sąlygomis – buvo panaudoti aplink pastatą išdėstyti 5G siųstuvai. Sistema galėtų būti tikslesnės geriau skaitmeninius patalpų planus, bei sutankinus 5G ryšio tinklą. Taigi žvelgiant į ateitį, toks navigacijos pastato viduje įgyvendinimo būdas yra realus, tačiau turi būti išspręstos ryšio stiprumo, patalpų planų skaitmeninimo ir pradinio judėjimo taško problemos.

1.2. Navigacija pastato viduje naudojant *Bluetooth Low Energy*

Didžioji dalis projektuojamų ir įgyvendinamų navigacijos pastato viduje sistemų veikia naudojant su radijo signalais susijusias UWB, Wi-Fi arba *Bluetooth* technologijas. Lyginant šias tris technologijas, BLE galima laikyti lengviausiai prieinamu ir pigiausiu šios problemos sprendimo metodu. BLE prieigos taškai yra pigesni nei Wi-Fi prieigos taškai, jie taip pat gali būti integruoti į jau turimus ryšio padengimo pastate sprendimus, pvz.: *Cisco* prieigos taškai savyje turi integruotus BLE modulius [10]. Nepaisant to, kad BLE signalas yra lengviau slopinamas, palyginti su UWB ar Wi-Fi, pastatą yra lengviau ir pigiau padengti mažo atstumo BLE prieigos taškais. Autoriai [5] pasiūlė naudoti BLE prieigos taškus pozicijos pastato viduje nustatyti, įvertinant RSSI ir kampinės moduliacijos reikšmes. Duomenims apdoroti ir

trajektorijai nustatyti buvo panaudoti mašininio mokymo algoritmai. Tyrimo metu buvo siekiama nustatyti taškų, esančių BLE tinkle, vietą. Taigi išplėtus tokį sprendimo modelį, būtų galimybė jį panaudoti, ne tik vietai nustatyti, bet ir navigacijai pastato viduje.

Matuojant atstumą naudojama RSSI matematinė išraiška, kurioje d – atstumas, $RSSI_{ref}$ – RSSI vertė per 1 metrą nuo imtuvo, n – slopinimo koeficientas:

$$d = 10^{\frac{RSSI_{ref} - RSSI}{10n}}. \quad (1)$$

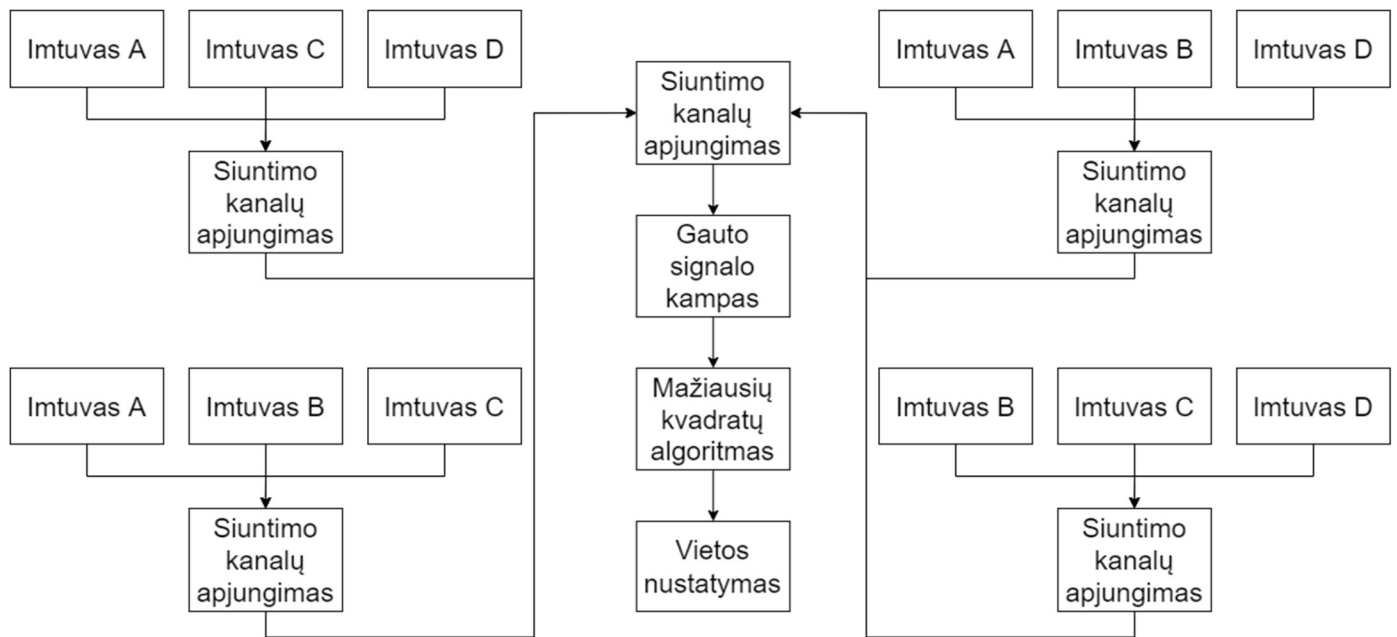
Taip pat [11] pateikiama matematinė formulė signalo kampui nustatyti, kurioje θ – signalo kampas, ψ – fazių skirtumas tarp dviejų sinusoidžių, λ – bangos ilgis, d – atstumas tarp skirtingų antenos elementų:

$$\theta = \cos^{-1}\left(\frac{\psi\lambda}{2\pi d}\right). \quad (2)$$

Naudojant šias matematines formules galima judėti surenkamų duomenų link apdorojimo vietai pastato viduje nustatyti. Tyrimo metu buvo apsvarstytos penkios skirtingos dirbtinių neuronų tinklų architektūros:

- atskirų prieigos taškų modelis;
- visiškai sujungtų prieigos taškų modelis;
- grupavimo po tris prieigos taškus modelis;
- grupavimo po du prieigos taškus modelis;
- sąsūka paremto prieigos taškų sujungimo modelis.

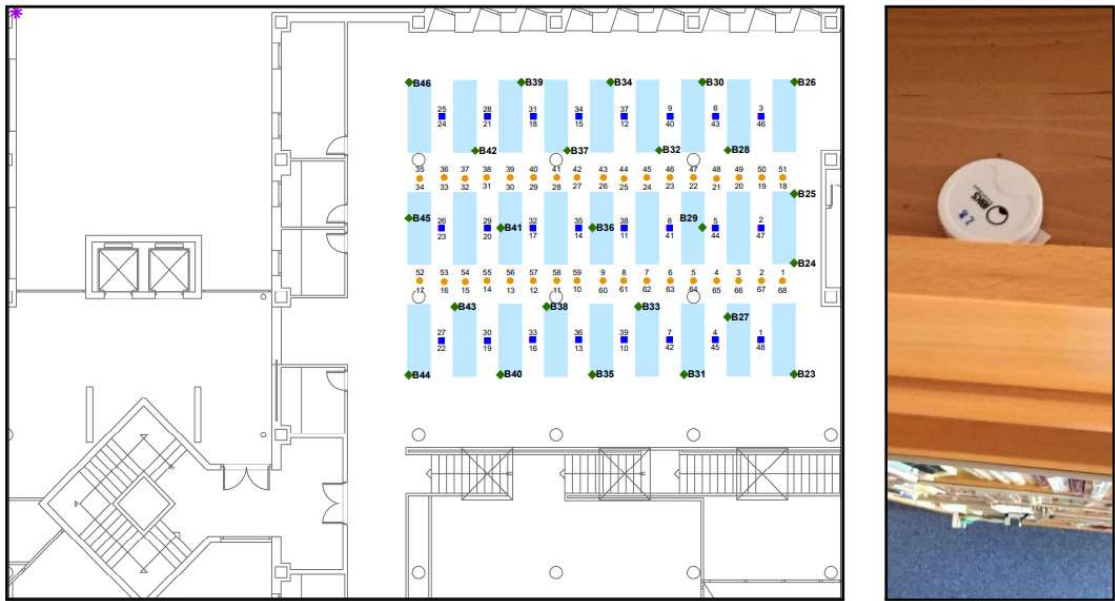
Eksperimentų metu buvo nustatyta, kad tiksliausi rezultatai gauti grupuojant po tris prieigos taškus. Tikslumas buvo įvertintas skaičiuojant vidutinę Euklido atstumo klaidą. Grupavimo po tris prieigos taškus architektūros schema pavaizduota 3 pav. Pavyzdyje naudojami 4 skirtingi BLE imtuvai, jų siunčiami signalai yra grupuojami po tris, jų reikšmės yra apjungiamos. Tuomet gaunamos signalo fazių kampų reikšmės, bei taikant mažiausių kvadratų matematinį aparatą, galima nustatyti taško buvimo vietą. Palyginti su kitais metodais, šis yra tiksliausias dėl plataus duomenų siuntimo spektro (įvertinamos visos imtuvų sujungimo kombinacijos).



3 pav. Sujungimo po tris imtuvus architektūros schema [5]

Taikant būtent šį metodą, laboratorijos sąlygomis, pavyko nustatyti BLE taško buvimo vietą 70 centimetrų tikslumu. Siūloma taikyti architektūra gali būti pritaikoma įvairioms bandymų terpėms, todėl gali būti plačiau plėtojama ir taikoma didesnėse erdvėse. Taip pat naudojant siūlomą metodą galima apkrovas paskirstyti tarp skirtingų imtuvų, taip dar labiau sumažinant BLE imtuvų energijos sąnaudas.

Kito mokslinio tyrimo autoriai [12] pateikia viešai prieinamą duomenų bazę, kurioje yra virš 4700 BLE matavimo taškų. Matavimai buvo atliekami realiomis sąlygomis – bibliotekoje tarp knygų lentynų ir biuro patalpose, kuriose yra biurui įprastų baldų. Matavimams atlikti buvo naudojami trys išmanieji telefonai. Bibliotekoje BLE siųstuvai buvo nustatyti -12 dBm galingumu, o biuro patalpose buvo atlikti matavimai keičiant galią tarp -4 dBm, -12 dBm, -20 dBm. Tyrėjai pateikia siūlymus dėl jų gautų duomenų panaudojimo ir tolimesnių tyrimų, taip pat supažindina su aplinkos ir naudojamų matavimo įrenginių poveikiu RSS vertėms. Matavimų rezultatus taip pat gali įtakoti matavimo įrenginio matavimų delsa. Matavimų delsa gali priklausyti nuo įrenginio skaičiavimo pajėgumo. Pasak straipsnio autorių, tyrimams, kurie remiasi signalo stiprumo matavimu konkrečiuose taškuose, apdoroti naudotas *kNN* (angl. *k-Nearest Neighbors*) algoritmas. Apmokius tinklą, naudojant šį algoritmą galima nustatyti, kurioje patalpos vietoje yra matavimo įrenginys, remiantis artimiausiomis momentinio signalo vertėmis. BLE įrenginių išdėstymas ir matavimo taškai pavaizduoti 4 pav.



4 pav. BLE siųstuvų išdėstymo bibliotekoje planas [12]

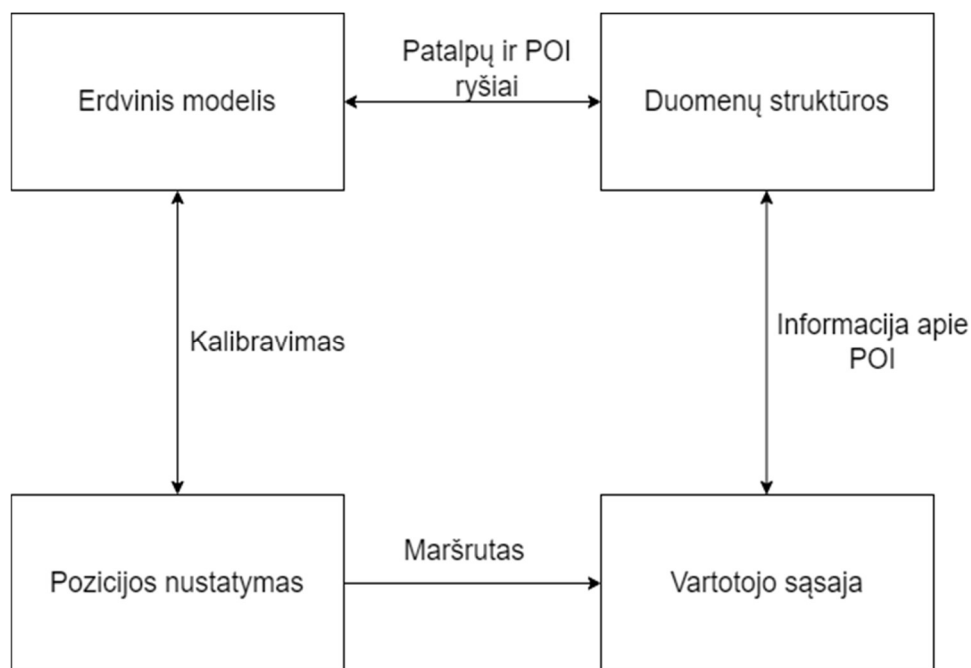
Taigi iš nagrinėtų pavyzdžių matoma, jog navigacijos pastato viduje problemą galima spręsti įvairiais BLE siųstuvų sujungimo metodais. Taip pat yra viešai prieinamų duomenų rinkinių, kuriuos būtų galima panaudoti projektuojant ir įgyvendinant tokio tipo sistemas. Atvirai prieinami duomenų rinkiniai galėtų būti apdoroti intelektualiais duomenų apdorojimo metodais, o jų rezultatai padėtų nustatyti tikslesnę vietą pastato viduje.

1.3. Papildytos realybės panaudojimas navigacijai pastato viduje

Sekančio straipsnio [11] autoriai navigacijos pastato viduje sprendimą naudojant AR (angl. *Augmented Reality*) ir semantinio WEB tinklo [13] technologijas. Pasak tyrėjų, papildytos realybės technologijos padeda nustatyti vartotojo buvimo vietą, bei suteikia daug interaktyvesnes patirtis ieškant kelio pastato viduje. Semantinis WEB tinklas suteikia dalinimosi informacija galimybę, bei padeda pasiimti viešą informaciją apie tam tikrus taškus iš interneto. Semantinis WEB tinklas laikomas nuo platformos nepriklausoma technologija, ji yra standartizuota ir laikoma WEB 3.0 papildiniu. Šių dviejų technologijų apjungimas leistų apjungti ėjimo kelius pastato viduje su informacija apie vietovę ir kelionės tikslus. Naudojant jų siūlomą metodiką jokia papildoma techninė įranga nėra reikalinga. Straipsnio autoriai pateikia apibendrintą sistemos schemą, kuri pavaizduota 5 pav. Projektuojamą sistemą sudaro keturios dalys:

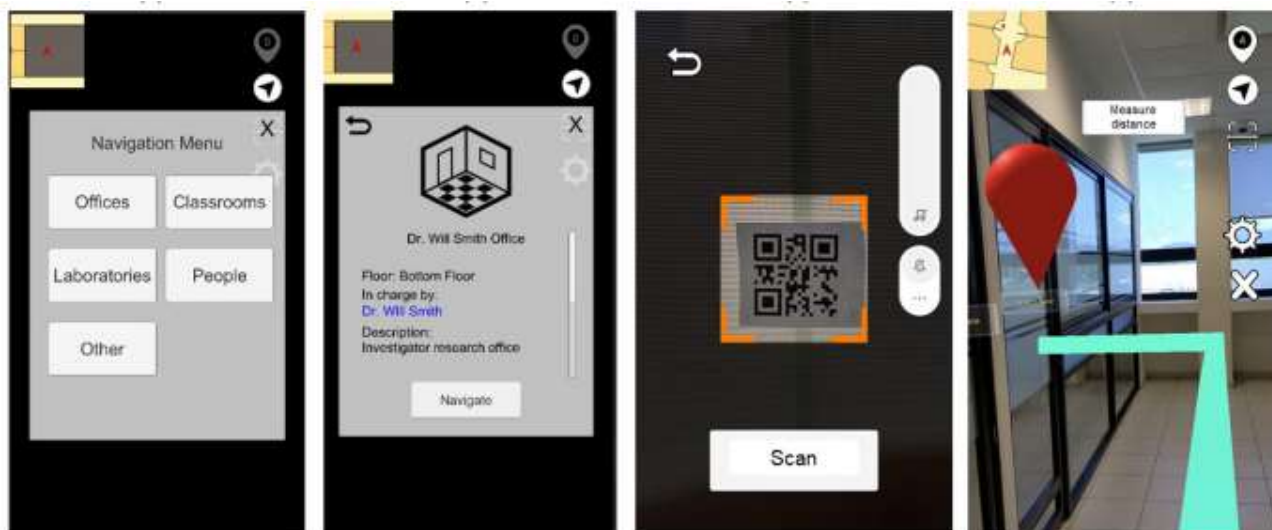
- Erdvinis modeliavimas;
- Duomenų valdymas ir struktūrizavimas;
- Vietos nustatymas ir navigacija;
- Duomenų pavaizdavimas.

Erdvinio modeliavimo dalis skirta pastato struktūros skaitmeninimui. Pastatas suskirstomas į koordinatų rinkinį $P = \{p_1, p_2, \dots, p_i\}$, taip pat iš šio rinkinio į atskirą rinkinį išrenkami POI (angl. *Points of interest*). Kiekvieną koordinatę sudaro trys taškai $p = (x, y, z)$. Semantinis tinklas saugo informaciją apie POI. Planų skaitmeninimui ir kelių vaizdavimui naudojama Unity3D programinė įranga. Pradinei vartotojo vietai nustatyti buvo naudojami QR kodai, kuriuose saugoma 3D koordinatžių informacija. Vartotojui pajudėjus, jo vieta sekama naudojant integruotus išmaniojo telefono jutiklius (akselerometrą ir giroskopą), o gauti duomenys apdorojami naudojant Unity bibliotekas (*AR Foundation Framework*). Keliam apskaičiuoti naudojamas Dijkstros grafų algoritmas [14].



5 pav. AR ir Semantinio WEB tinklo integravimo schema [11]

Igyvendintos sistemos vartotojo sąsają pavaizduota 6 pav. Vartotojui leidžiama pasirinkti tašką, kurį nori pasiekti, nuskaityti QR kodą kalibravimui ir ekrane pavaizduojamas kelias, kuriuo reikėtų eiti, norint pasiekti pasirinktą tikslą.



6 pav. Realizuotos AR sistemos vartotojo sąsaja [11]

Sistemos eksperimentų etape tyrėjai išskyrė penkis sistemos sėkmingo veikimo vertinimo kriterijus:

- Kaip sėkmingai nustatoma pradinė vartotojo vieta;
- Pozicijos tikslumas;
- Laiko skirtumas tarp tikslo radimo naudojant sistemą ir jos nenaudojant;
- AR vaizdavimo problemos;
- Vartotojų vertinimas.

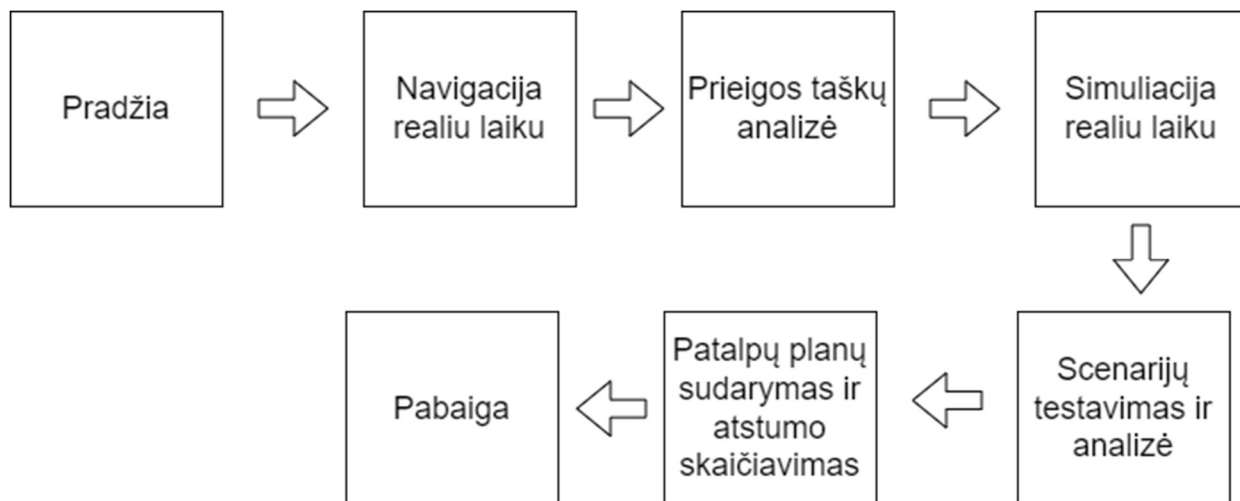
Kadangi didžiąją dalį nagrinėjamų straipsnių apjungia pozicijos tikslumo vertinimas, tai didžiausias dėmesys tam ir bus skirtas. Tyrėjai atliko eksperimentus dviejose skirtingose vietose ir gavo tikrai skirtingus rezultatus. Pirmuoju atveju pozicijos tikslumo didžiausia paklaida buvo 3,82 metro, o antruoju – 1,23 metro. Taigi galima pastebėti, jog būtent šią sistemą įtakoja vieta, kurioje ji išbandoma. Pasak autorių, tai įtakoja nukrypimas nuo maršruto, apšvietimas, koridorių plotis ir vartotojo veiksmai.

Sistemos tobulinimui siūloma vietai nustatyti nenaudoti vizualinių metodų, o pabandyti pritaikyti RSSI pagrindu paremtus skaičiavimus (*Wi-Fi* arba *Bluetooth Low Energy*). Taip galėtų būti pašalinta priklausomybė nuo aplinkos veiksnių, pvz.: prasto apšvietimo.

1.4. Wi-Fi pagrindu veikiančių sistemų panaudojimas navigacijai pastato viduje

Pasak straipsnio autorių [15] didžiojoje dalyje pastatų Wi-Fi tinklas yra toks išsivystęs, jog yra galimybė tokį stiprų signalo padengimą išnaudoti navigacijos pastato viduje sprendimui. Darbe pateikiamas atstumo matavimo algoritmas, kuris remiasi į trijų skirtingų žinomų taškų rodmenis ir kartu su ITU-R P.1238 modeliu įgyvendintas *Network Simulator 2* aplinkoje. Matuojant atstumą taip pat bus atsižvelgiama į RSSI parametą. Tokiu siūlomu

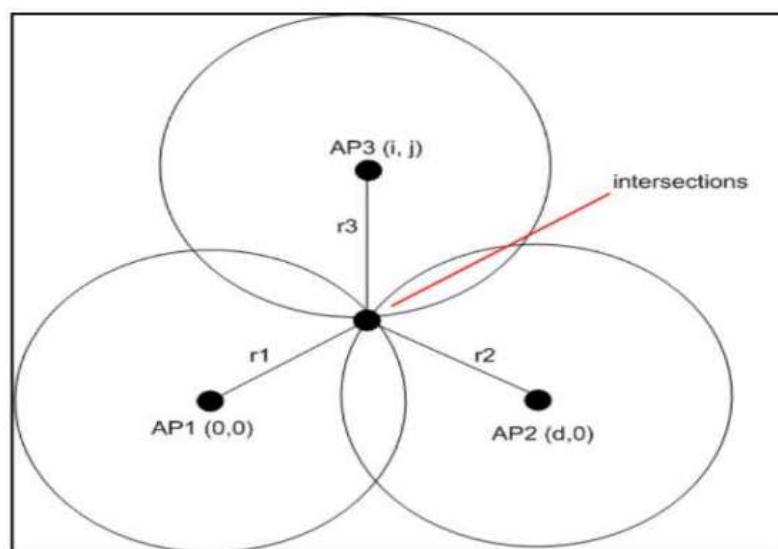
modeliu siekiama gauti geresnius rezultatus nei naudojant kažkurį iš metodų individualiai. Straipsnyje pateikiama sistemos, kuri bus įgyvendinta *Network Simulator 2*, diagrama pavaizduota 7 pav.



7 pav. *Network Simulator 2* sistemos veikimo diagrama [15]

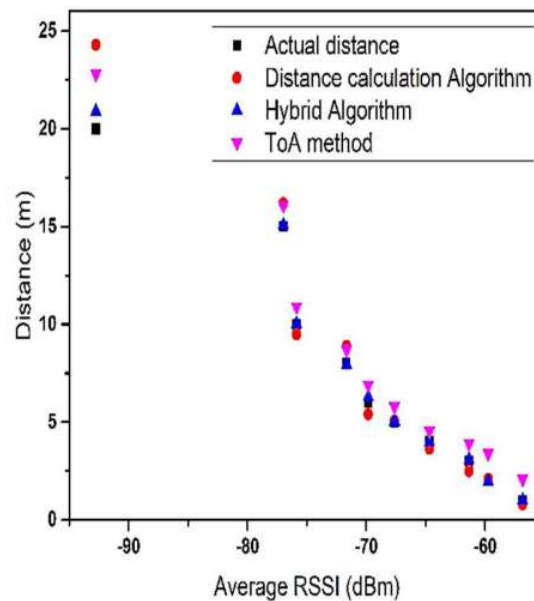
Visas autorių darbas yra paremtas teoriniu sistemos įgyvendinimu. Taigi realus žemėlapis nebuvo sudarytas. Tyrimo metu buvo nustatyti 39 statiniai taškai, kurie bus naudojami vietoje žemėlapiu. Straipsnyje paminima, prieš projektuojant sistemą, reikėtų išsimatuoti Wi-Fi signalo stiprumą ir pagal tai parinkti Wi-Fi prieigos taškų skaičių, tačiau kaip tai padaryti – nebuvo paminėta.

Vartotojo pozicijai nustatyti buvo panaudotas metodas, kuris naudojamas ir GPS technologijoje – atstumo matavimas remiantis į tris skirtingos Wi-Fi prieigos taškus. Vietą, kurioje susikerta trijų prieigos taškų signalai ir bus vieta, kurioje yra vartotojas (8 pav.). Paveiksle sprendžiama tiesinių lygčių sistema su dviem kintamaisiais.



8 pav. Trijų prieigos taškų signalų susikirtimo taško diagrama [15]

Taikant būtent trijų prieigos taškų signalo stiprumo matavimą, autoriai gavo rezultatus pavaizduotus 9 pav. Paveiksle parodoma, jog autorių taikytas atstumo ir pozicijos nustatymo hibridinis metodas yra tikslesnis, nei taikant metodus atskirai. Taip pat pavaizduojama atstumo matavimo tikslumo priklausomybė nuo signalo stiprumo. Iš gautų rezultatų matoma, jog esant silpnam signalui, autorių siūlomo metodo paklaida iki 1 metro. Tačiau esant realioms sąlygoms (įtraukiant signalą slopinančius aplinkos faktorius), tyrimo rezultatai gali būti prastesni.



9 pav. Trijų prieigos taškų signalo stiprumo matavimo tyrimo rezultatai [15]

Kito tyrimo autoriai [16] pateikia viešai prieinamą duomenų rinkinį, kuriame yra Wi-Fi prieigos taškų ir BLE siųstuvų RSS matavimų vertės. Šio tyrimo tikslas ir buvo sukurti duomenų rinkinį, kuris pasitelktų hibridinį Wi-Fi ir BLE technologijomis paremtą metodą. Matavimai buvo atlikti daugiaaukščiame pastate, su trimis skirtingais patalpų išdėstymo variantais. Pateiktas rinkinys turi 63 skirtingus požymius, kuriuos sudaro RSS vertės iš 42 BLE siųstuvų ir 17 Wi-Fi prieigos taškų, aukšto numeris ir koordinatės. Taip kaip ir [15] autoriai teigia, jog patalpos išdėstymas ir kiti išoriniai faktoriai įtakoja RSS signalų tikslumą. Autorių teigimu, naudojantis pateiktu duomenų rinkiniu būtų galima toliau vystyti navigacijos pastato viduje tyrimus. Gautų rezultatų apdorojimui buvo panaudoti keturi skirtingi algoritmai:

- kNN (angl. *K-Nearest Neighbours*);
- DT (angl. *Decision tree*);
- RF (angl. *Random forest*);
- Daugiasluoksnis perceptronas.

Duomenų rinkinys buvo suskirstytas į duomenis mokymui ir duomenis testavimui. Pasak autorių, nekeičiant patalpos išplanavimo, t.y. apmokius tinklą ir atlikus testavimus toje

pačioje patalpoje – aukštų nustatymo tikslumas yra 99 %. Kuomet patalpos išplanavimas pakeičiamas (pastatoma papildomų kliūčių), gaunama iki 5 m paklaida. Visi keturi duomenų apdorojimo metodai pateikia panašias paklaidas, tačiau galima išžvelgti, jog duomenų apdorojimas, naudojant kNN algoritmą davė geriausius rezultatus (10 pav.)

Training Dataset	Testing Dataset	K	Floor Accuracy	Average Positioning Error (m)
Layout 1	Layout 1	1	1.0	2.05
		5	1.0	2.11
		9	1.0	2.10
Layout 2	Layout 2	1	1.0	2.02
		5	1.0	2.06
		9	1.0	2.09
Layout 3	Layout 3	1	1.0	1.49
		5	1.0	1.68
		9	1.0	1.74
Layout 1	Layout 2	1	1.0	2.49
		5	1.0	2.37
		9	1.0	2.32
Layout 1	Layout 3	1	0.997	4.67
		5	0.996	4.39
		9	0.996	4.26
Layout 2	Layout 1	1	1.0	2.67
		5	1.0	2.54
		9	1.0	2.5
Layout 2	Layout 3	1	1.0	3.59
		5	1.0	3.42
		9	1.0	3.32
Layout 3	Layout 1	1	1.0	2.84
		5	1.0	2.72
		9	1.0	2.69
Layout 3	Layout 2	1	1.0	2.77
		5	1.0	2.69
		9	1.0	2.6

10 pav. Duomenų, apdorotų naudojant kNN, matavimų rezultatai [16]

Dar vienas RSS matavimų apdorojimo būdas galėtų būti sąsukos dirbtinių neuronų tinklai [17]. Tyrimo autoriai duomenų surinkimo ir apdorojimo procesą įgyvendino, naudodant skirtingus mikrovaldiklių modulius. Šiuo atveju buvo atsižvelgiama į tai, jog mikrovaldikliai neturi ypatingų skaičiavimų pajėgumų, lyginant su įprastais kompiuteriais. Tyrimas buvo atliktas laboratorinėje aplinkoje, todėl turi trūkumų. Nėra atsižvelgiama į realių patalpų išdėstymą ir jose esančias kliūtis, taigi skaičiavimo ir matavimo rezultatai gali būti kitokie. Tačiau pagrindinis tyrimo rezultatas – parodyti kaip naudojant CNN galima nuspėti kokia RSS reikšmė bus toliau. Tokio tipo duomenų apdorojimas galėtų padėti kurti adaptyvesnes sistemas. Siekiant įgyvendinti viso pastato navigacijos pastato viduje sistemą, labai svarbu nuspėti, kokia būtų RSS vertė tuose taškuose, kuriuose signalas yra silpnas – tokiu būdu neprarandamas tikslumas. Autorių gauti rezultatai atliekant skaičiavimus mikrovaldiklių moduluose pavaizduoti 11 pav.

Fig. 4.a. Original Series - BLE

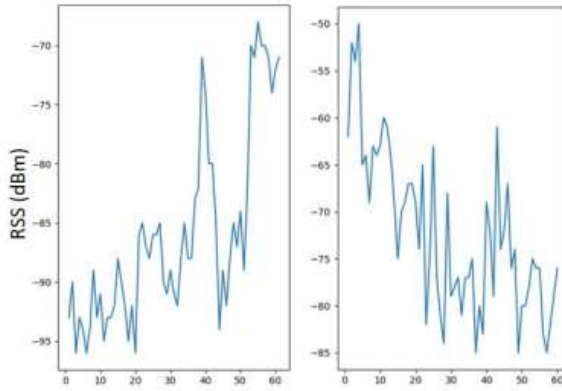


Fig. 4.b. Original Series - WiFi

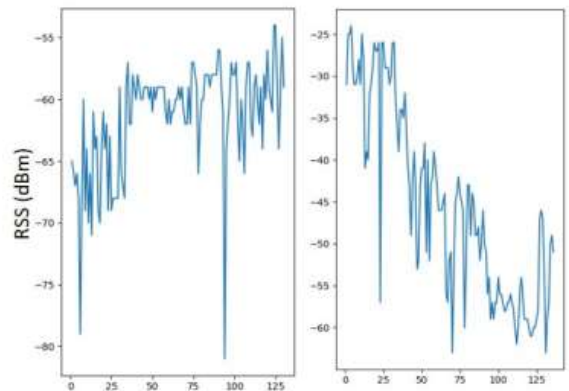


Fig. 4.a. RSS Predictions - BLE

-x-Board #1 -x-Board #2 -x-Board #7
-x-Board #8

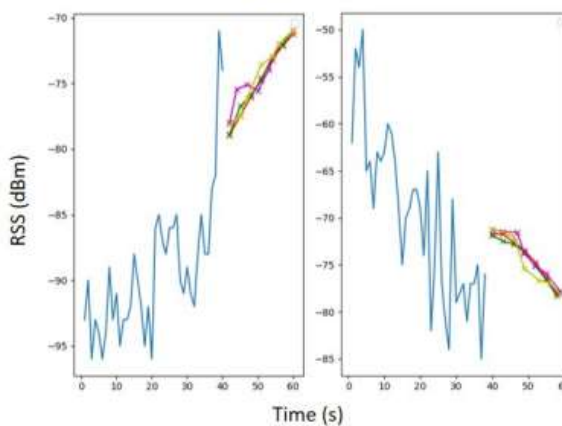
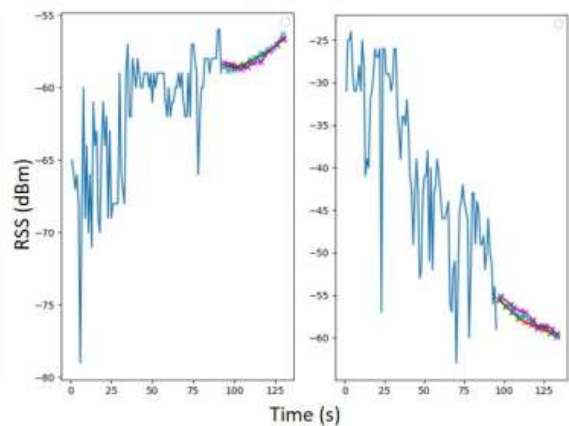


Fig.4.b RSS Predictions - WiFi

-x-Board #3 -x-Board #4 -x-Board #5
-x-Board #6



11 pav. Signalo stiprumo prognozavimo rezultatai [17]

Galima pastebėti, jog numatymo rezultatai teisingai parodo tendencijas, kuriomis krypta signalo stiprumas. Norint gauti tikslesnius rezultatus ir gauti aiškesnius RSS verčių svyravimus, reikėtų surinkti didesni mokymo duomenų rinkinį.

1.5. Skyriaus apibendrinimas

Atsižvelgiant į nagrinėtus atvejus, galima daryti išvadas, jog navigacijos pastato viduje uždavinį galima spręsti įvairiais metodais. Dalis apžvelgtų metodų yra tik teoriniai ir gali būti ne visai veiksmingi (tikslūs) pritaikant realiomis sąlygomis. Visi nagrinėti metodai turi pranašumų ir trūkumų.

Taip pat sprendžiant šį uždavinį svarbu atsižvelgti į daug skirtingų kylančių problemų:

- pakankamo ryšio stotelių skaičiaus parinkimas;
- tinkamas vietos nustatymo algoritmas;
- patalpų planų skaitmeninimas;
- tinkamiausio maršruto apdorojimas ir skaičiavimas;

- sistemos vientiso veikimo išlaikymas (sistema turėtų nereikalausti dažno kalibravimo);
- informacijos pateikimas galutiniam vartotojui.

Taigi, apžvelgtas uždavinys yra kompleksiškas, o išnagrinėtų straipsnių autoriai pateikė pagrindinius akcentus, į kuriuos reikėtų atsižvelgiant pasirenkant metodą būsimam navigacijos pastato viduje metodų tyrimui.

Šio tyrimo metu bus naudojama BLE (angl. *Bluetooth Low-Energy*) technologija ir taikomi MCPD metodai signalams apdoroti, bei atstumo duomenims gauti. Apžvelgiant kitus bandymus spręsti navigacijos pastato viduje uždavinį matyti, kad BLE gali būtų efektyvi technologija. Taip pat matyti, kad didžioji dalis atliktų bandymų, taikant ankščiau minėtas technologijas yra atliekami laboratorinėje terpėje. Šio tyrimo metu bus naudojama patalpa, kuri labiau atitinka realias sąlygas. Eksperimentų metu patalpoje bus objektų, kurie gali įtakoti matavimo rezultatus. Taip pat eksperimentų metu patalpoje bus žmonių, kurie gali turėti įtakos matavimo tikslumui. Matant rezultatus, kuriuos gavo kiti tyrėjai, tyrimo metu bus siekiama nustatyti vietą patalpoje ne didesne nei 1,5 m paklaida. Remiantis ankščiau analizuotais moksliniais straipsniais, pastebėta, kad dirbtiniai neuronų tinklai gali būti naudojami atstumo matavimų apdorojimui. Eksperimento metu surinkti duomenys bus sudėti į mokymo, validavimo ir testavimo rinkinius, kurie bus paduodami dirbtiniams neuronų tinklui. Tinklas bus skirtas klasifikuoti – tinklui pateikus duomenis be antraščių, rezultatas turėtų būti zona, kurioje atliktas matavimas.

2. PASTATO VIDUJE SURENKAMŲ NAVIGACIJOS DUOMENŲ APDOROJIMO METODŲ ANALIZĖ

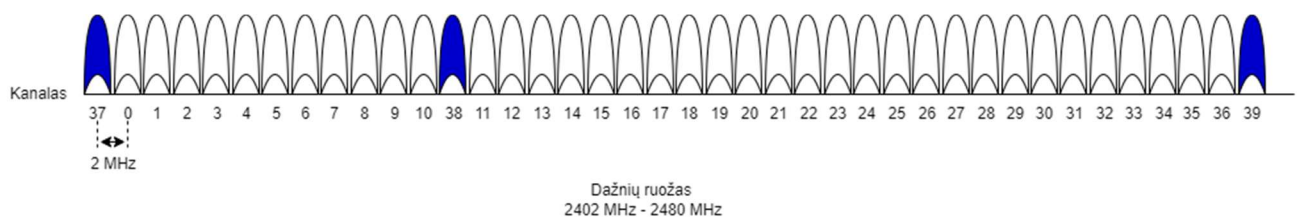
Šiame skyriuje bus aptartos technologijos ir metodai, kurie bus taikomi tyrimo metu. Kadangi eksperimentai bus atliekami taikant BLE technologiją, skyriuje bus aptarti protokolo pagrindai – įrenginių komunikacijos užmezgimas, skirtingos įrenginių funkcijos, dažnių ruožai ir pagrindiniai paketai ryšio užmezgimui. Toliau bus aptariamas MCPD metodas, kuris yra paremtas fazių skirtumų skaičiavimu ir kaip šį metodą taikyti kartu su BLE technologija.

2.1. BLE protokolo pagrindai

Bluetooth Low Energy yra kompleksiškas įrenginių komunikavimo protokolas [18]. Šio tyrimo metu bus atsižvelgta į pagrindines protokolo savybes, reikalingas atstumui tarp įrenginių matuoti. Naudojant protokolą suteikiama galimybė įrenginiams komunikuoti belaidžiu būdu. BLE protokolo architektūroje bendro prieigos profilio (angl. *Generic Access Profile*) funkcija – užtikrinti ryšius tarp skirtingų BLE įrenginių. Ši protokolo dalis užtikrina renginių funkcijų paskirstymą, įrenginių aptikimą, ryšio užmezgimą ir saugumą. Tyrimo metu daugiausiai yra naudojama įrenginių aptikimo dalis (įrenginių aptikimas, aptikimo parametrai ir aptikimo duomenys). Pagrindinės BLE įrenginių funkcijos:

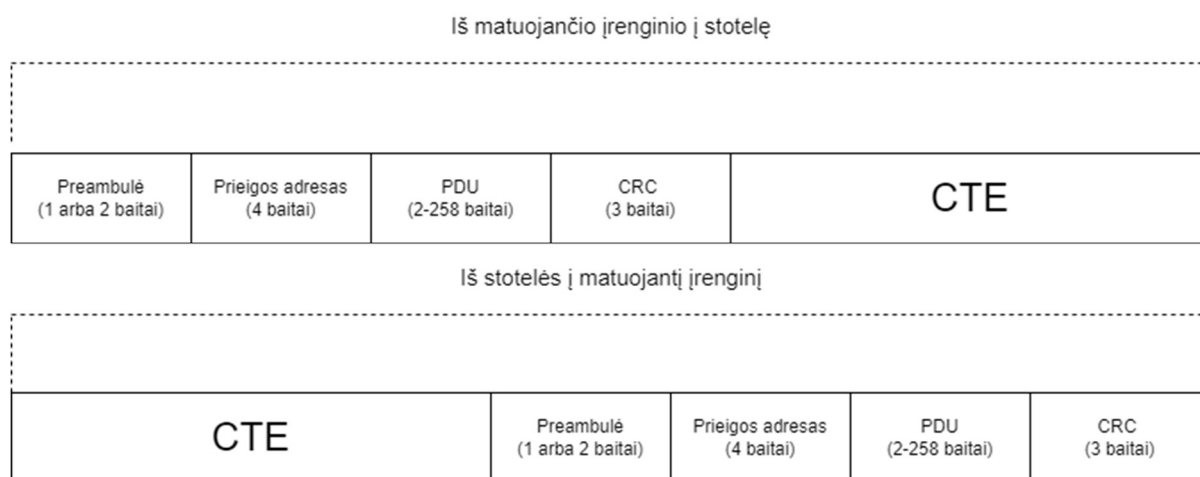
- Centrinis įrenginys gali aptikti kitus įrenginius ir prie jų prisijungti.
- Periferinis įrenginys praneša apie galimybę prie jo prisijungti centriniam įrenginiui.
- Transliuojantis įrenginys siunčia aptikimo paketus, tačiau neleidžia prie jo prisijungti.
- Stebintis įrenginys aptinka periferinius ir transliuojančius įrenginius, tačiau neturi galimybės užmegzti ryšio su centriniu įrenginiu.

BLE įrenginiai, kurie yra aptikimo režime, siunčia paketus, kuriuose yra naudinga informacija kitiems įrenginiams aptikti ir identifikuoti. Paketai yra siunčiami fiksuotu intervalu, kuris vadinamas skelbimo intervalu. BLE protokole yra 40 radijo kanalų, tarp kurių centrų yra 2 MHz skirtumas. Kanalų išdėstymas yra pavaizduotas 12 pav.



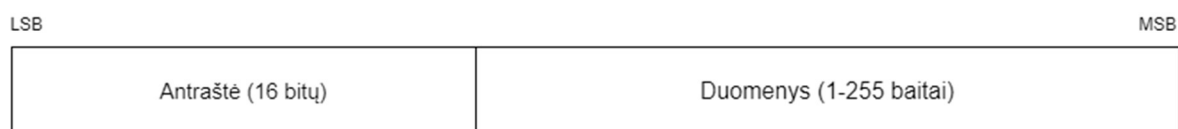
12 pav. Ryšio kanalai naudojami BLE protokole [19]

Paveiksle matyti, kad mėlyna spalva yra paryškinti 37, 38 ir 39 kanalai, kurie yra laikomi pagrindiniais skelbimo kanalais (angl. *Primary Advertising Channels*), o likę 37 kanalai vadinami antriniais skelbimo kanalais (angl. *Secondary Advertising Channels*). Antriniai skelbimo kanalai naudojami duomenims įrenginių prisijungimo metu perduoti. Taip pat verta paminėti, kad antriniais kanalais įrenginiai gali siųsti duomenis tik tuo atveju, jeigu prieš tai skelbimus atliko pagrindiniais kanalais. Būtent paminėti kanalai leidžia atlikti aplink esančių įrenginių aptikimą, naudojant įrenginių aptikimo paketus (angl. *Advertising Packet*). Šį paketą sudaro penkios pagrindinės dalys – preambulė, prieigos adresas, protokolo duomenų vienetas (angl. *Protocol Data Unit*), CRC (baitai naudojami klaidų aptikimui) ir nuolatinis tono pratęsimas (angl. *Constant Tone Extention*). Nors CTE yra naudojamas ne visais atvejais, tačiau šio tyrimo kontekste jis yra svarbus, nes ryšys tarp įrenginių turi būti išlaikomas net tada, kai komunikacija jau pradedama tarp skirtingų kanalų. Tokiu būdu galima išnaudoti skirtingus dažnių ruožus vienu metu. Kaip atrodo skelbimo paketo struktūra, pavaizduota 13 pav.



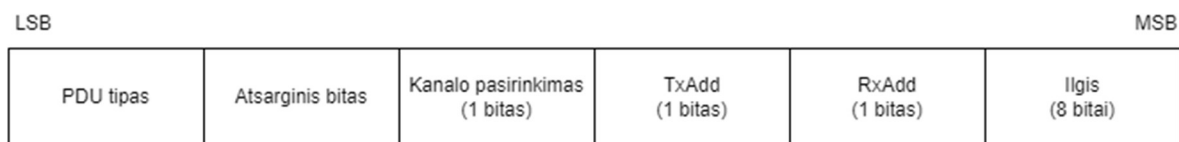
13 pav. Skelbimo paketo struktūra [19]

Analizuojant skelbimo paketus svarbu žinoti, kas sudaro skelbimo paketo PDU dalį. Protokolo duomenis sudaro 16 bitų antraštė ir patys duomenys, kurių dydis gali būti nuo 1 iki 255 baitų. PDU struktūra yra pavaizduota 14 pav.



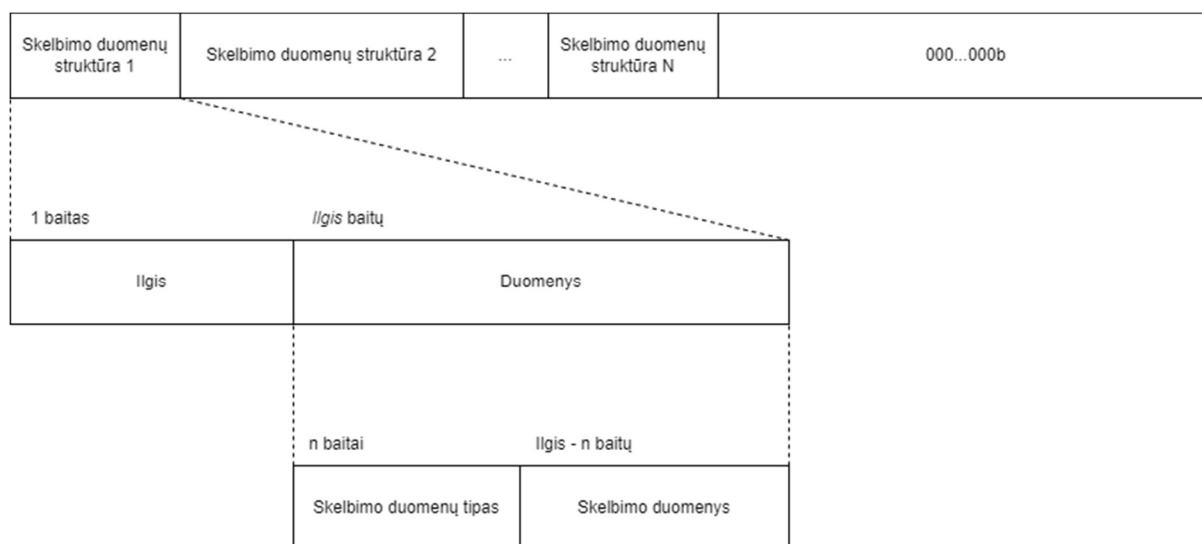
14 pav. PDU struktūra [19]

PDU antraštėje yra aprašomi įrenginiams aptikti reikalingi parametrai. PDU tipas nusako, aprašo visą paketo panaudojimo prasmę. Yra daug skirtingų PDU tipų, tačiau atstumo matavimo uždaviniui spręsti aktualūs yra ADV_IND, SCAN_REQ ir SCAN_RSP tipai. PDU antraštės sandarą galima matyti 15 pav.



15 pav. PDU antraštės struktūra [19]

Protokolo duomenų vienetą taip pat sudaro ir patys duomenys. BLE įrenginių aptikimo atveju ADV_IND pakete yra perduodami duomenys, reikalingi ryšiui užmegzti. Kaip atrodo skelbimo duomenys, pavaizduota 16 pav. Šioje duomenų dalyje yra aprašoma naudojamos paslaugos kodas UUID, įrenginio vardas, vieno bito dydžio vėliavėlės, gamintojo duomenys (pagal juos nustatomas įrenginio gamintojas, įrenginio tipas), perduodamo signalo stiprumas, išorinis įrenginio adresas ir gavėjo adresas. Taip pat ADV_IND pakete nurodomos papildomos įrenginio galimybės.



16 pav. PDU duomenų struktūra [19]

Kartu su *Bluetooth* 5.1 protokolo versija atsirado galimybė anksčiau minėtuose paketuose, CTE dalyje saugoti informaciją susijusią su įrenginių vieta ir atstumu [18]. Būtent šioje protokolo versijoje ir atsirado papildoma paketų dalis, kurioje saugoma AoA/AoD informacija (angl. *Angle of Arrival/Angle of Departure*). CTE yra moduluojamų simbolių eilutė, kuri pradiniu atveju yra užpildyta vienetų.

Žinant, kaip veikia komunikacija tarp įrenginių, naudojant BLE skelbimo paketus, šią technologiją galima pritaikyti atstumui tarp įrenginių skaičiuoti. Šio tyrimo metu bus siekiama iširti, kokios yra praktinės galimybės taikyti kelių nešlių fazės skirtumo (angl. *Multi-Carrier Phase Difference*) metodą atstumui tarp BLE įrenginių skaičiuoti. Skirtingai nei AoA ar AoD, MCPD atveju, komunikacija vyksta į dvi puses.

2.2. Matematinis kelių nešlių fazės skirtumo (MCPD) modelis

Remiantis [20, 21, 22] matyti, kad fazės poslinkis tarp dviejų signalų $\Delta\phi$ yra proporcingas laiko skirtumui tarp dviejų signalų ir jų dažniui f .

$$\Delta\phi = 2\pi\tau f. \quad (3)$$

Daroma prielaida, kad turimos dvi antenos ir matymo laukas (angl. *Line of Sight*) tarp jų. Pirmoji antena išsiunčia signalą antrajam įrenginiui. Tokiu atveju signalas iki antrojo įrenginio atkeliauja su τ_{LoS} trukmės uždelsimu. Tai leidžia užrašyti kokią lygybę:

$$\tau_{LoS} = \frac{r}{c_0}, \quad (4)$$

čia lygybėje r yra atstumas tarp antenų, o c_0 yra šviesos greitis vakuume.

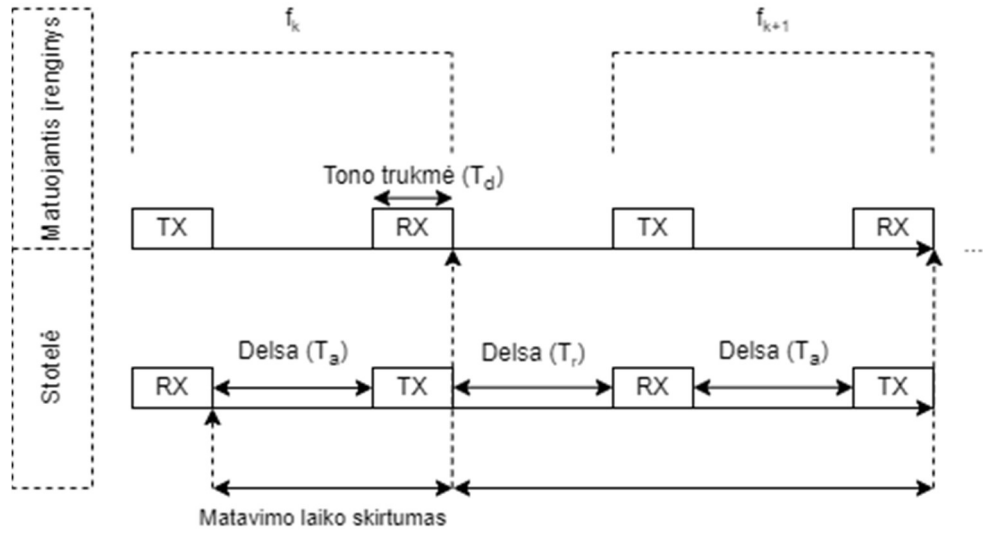
Iš fazės pasislinkimo tarp dviejų antenų formulės galima užrašyti formulę, reikalingą atstumui tarp r gauti.

$$\Delta\phi = 2\pi f \frac{r}{c_0}, \quad (5)$$

$$r = \frac{\Delta\phi c_0}{2\pi f}. \quad (6)$$

Iš formulės (4) matyti, kad žinant fazių skirtumą tarp dviejų antenų, yra galimybė rasti atstumą tarp jų.

MCPD modelio atveju įrenginiai skirstomi į dvi funkcijas. Šio tyrimo atveju jie vadinami „matuojančiu įrenginiu“ ir „stotele“. Matuojantis įrenginys pradeda matavimo procedūrą, o stotelė jam atsako. Šie principai taikomi ir BLE technologijoje. Pasibaigus įrenginių sinchronizavimo procedūrai, matuojantis įrenginys siunčia vietinio osciliatoriaus (angl. *Local Oscillator*) signalą stotelei pirmuoju kanalu f_0 . Stotelė atlieka fazės (I/Q) matavimus gautajam nešliui. Gautas rezultatas priklauso nuo siunčiančio įrenginio vietinio osciliatoriaus ir atstumo tarp įrenginių. Toliau stotelė siunčia savo vietinio osciliatoriaus toną tuo pačiu kanalu f_0 , kad matuojantis įrenginys galėtų atlikti fazės matavimą. Tokia procedūra atliekama visiems K_f kanalams, kur skirtumas tarp kanalų dažnių yra Δf . Matuojantis įrenginys ir stotis per visą dažnių ruožą (80 MHz ties 2,4 GHz) atlieka nešlių perdavimą. Šio modelio veikimas yra pavaizduotas 17 pav.



17 pav. Fazių skirtumų matavimas naudojant kelių nešlių modelį [21]

Toks algoritmas reikalauja ciklinio įrenginių laikrodžių kalibravimo. Fazė, kuri buvo išmatuota stotelėje priklauso nuo jo paties vietinio osciliatoriaus signalo fazės ir yra siunčiama matavimo įrenginiui, kuriame ši fazė gali būti panaudojama klaidos taisyti.

Daroma prielaida, kad Δ_t yra laiko skirtumas tarp matavimo įrenginio ir stotelės, kur stotelė matuoja fazę $\Delta\phi_R$:

$$\Delta\phi_R(f_k, r) = -2\pi f_k \left(\frac{r}{c_0} - \Delta_t \right) - \theta \pmod{2\pi}. \quad (7)$$

O po funkcijų pasikeitimo (matuojančio įrenginio fazės skirtumas $\Delta\phi_I$):

$$\Delta\phi_I(f_k, r) = -2\pi f_k \left(\frac{r}{c_0} + \Delta_t \right) + \theta \pmod{2\pi}, \quad (8)$$

čia θ fazės skirtumas tarp matuojančio įrenginio ir stotelės osciliatorių signalų.

Susumavus gautas fazes tarp I ir R, gaunamas dvigubas atstumas tarp įrenginių. Išsprendus pusės bangos ilgio problemą ir matuojant fazės poslinkį tarp dviejų tonų, gaunamas atstumas r :

$$\Delta\phi = \phi_{2W}(f_1, r) - \phi_{2W}(f_0, r) = -\frac{4\pi\Delta_f}{c_0} r \pmod{2\pi}, \quad (9)$$

$$r = -\frac{c_0}{4\pi\Delta_f} \Delta\phi \left(\pmod{\frac{c_0}{2\pi\Delta_f}} \right). \quad (10)$$

Šią procedūrą galima pritaikyti visam dažnių ruožui K_f . Daroma prielaida, kad $\Delta\phi[k]$ yra fazės skirtumas tarp k -ojo tono ir $k-1$ -ojo tono:

$$\Delta_\phi = \frac{1}{K_f - 1} \sum_{k=1}^{K_f-1} \Delta_\phi[k] \pmod{2\pi}. \quad (11)$$

Iš čia gaunama atstumo formulė:

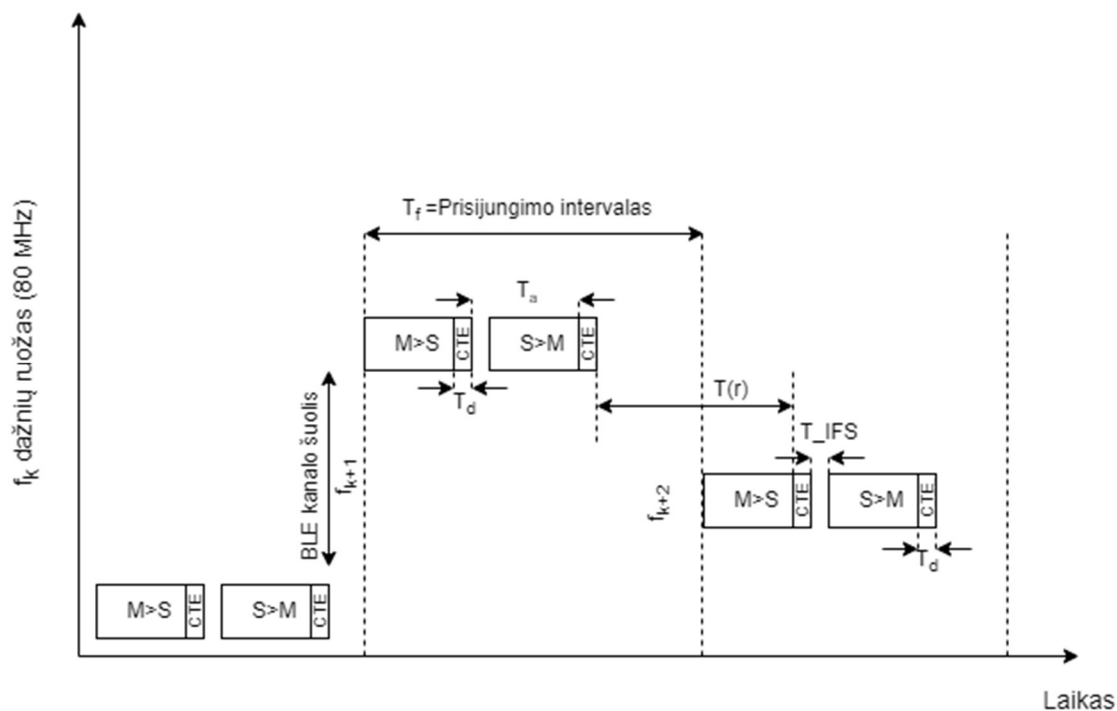
$$r = \frac{c_0}{4\pi\Delta_f} \frac{\phi_{2W}(f_{K_f}, r) - \phi_{2W}(f_0, r)}{K_f - 1} \quad (12)$$

Naudojant daug tonų, srautas yra didinamas $K_f - 1$ karto. Tai leidžia MCPD atstumo matavimo metodui būti mažiau jautriam fazių klaidoms. Kaip ir minėta anksčiau, BLE standarto tonų dažnių amplitudė yra 80 MHz, o ji yra padalinta į 40 kanalų po 2 MHz. Trys kanalais yra naudojami skelbimams, o likusių 37 paskirtis yra perduoti duomenis. MCPD metodas yra efektyvus, nes gali naudoti 37 laisvus kanalus kelių nešlių fazių skirtumams skaičiuoti. Teoriškai, 2 MHz pločio kanalas turi galimybę skliti 75 metrų atstumu.

2.3. BLE protokolo taikymas MCPD metodui įgyvendinti

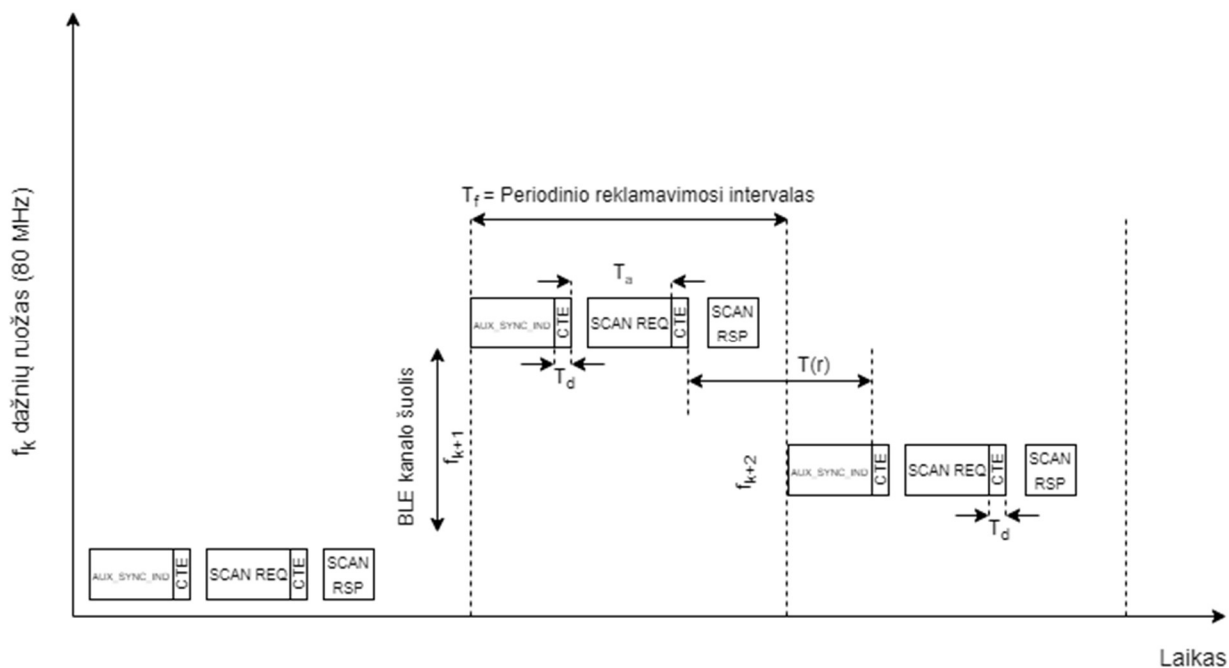
MCPD metodas gali veikti abiem BLE komunikacijos atvejais, t.y. kai įrenginiai susijungia (angl. *Connection-orientated*) ir kai įrenginiai žino apie vienas kitą nesusijungus (angl. *Connectionless*) [18]. Susijusių įrenginių atveju įrenginiai tarpusavyje susijungia ties kiekvienu šuoliu į kitą dažnių kanalą.

Du įrenginiai apskaičiuoja kokiame kanale vyks komunikacija pusiau atsitiktiniu būdu: $f_{k+1} = (f_k + \text{\textit{šuolis}}) \pmod{37}$, kur f_k – dažnių kanalas, kuriame šiuo metu komunikuojama, f_{k+1} – sekantis dažnių kanalas, *\text{\textit{šuolis}}* – tai šuolio parametras, kurio skaitinė vertė nuo 5 iki 16. Įrenginių susijungimo intervalo trukmė yra nuo 7,5 ms iki 4 s (didėja arba mažėja 1,25 ms režiais). Šie šuoliai tarp skirtingų kanalų vyksta per visą dažnių ruožą. Šio algoritmo veikimą galima matyti 18 pav. Paveiksle matyti, kad šiame režime įrenginiai veikia *Slave* ir *Master* režimais. Paveiksle matyti, kad matavimai įvyksta trijuose skirtinguose dažnių kanaluose.



18 pav. MCPD, kai įrenginiai veikia *Connection-orientated* režimu [21]

Kai BLE įrenginiai veikia režimu be prisijungimo galima įgyvendinti panašią architektūrą. Skirtingai nuo pirmojo atvejo, įrenginiai komunikuoja kitais paketais ir komunikacija vyksta į abi puses. Kadangi Bluetooth protokolas turi galimybę atlikti ciklinę skelbimo procedūrą, matavimo įrenginys gali periodiškai siųsti paketus į visus 37 kanalus intervalu nuo 7,5 ms iki 81,91875 s. Kaip veikia MCPD tuo atveju, kai įrenginiai veikia režimu be prisijungimo, pavaizduota 19 pav.



19 pav. MCPD, kai įrenginiai veikia *Connectionless* režimu [21]

Pagrindinis skirtumas tarp dviejų režimų yra tai, kad pirmuoju atveju atstumo matavimo trukmė priklauso nuo įrenginio prisijungimo intervalo trukmės. Signalų apsikeitimas per visą dažnių ruožą trunka 277,5 ms. Norint nustatyti įrenginio vietą taikant trianguliacijos metodą, reikia bent trijų stotelių, taigi viena vietos nustatymo procedūra trunka mažiausiai 832,5 ms. Todėl, atvejams, kai reikia nustatyti atstumą realiu laiku, metodas, kuriame įrenginiai nesusijungia, yra efektyvesnis.

2.4. Skyriaus apibendrinimas

Skyriuje aptarti BLE protokolo pagrindai, MCPD metodo matematinis modelis ir kaip naudojant BLE technologiją taikomas MCPD metodas. Nagrinėjant matematinį ir teorinį MCPD modelį, matyti, kad šis metodas yra tinkamas naudoti kartu su BLE technologija. Taip pat pastebėta, jog atvejais, kai atstumai matuojami realiu laiku, turi vykti komunikacija be susijungimų. Tokiu būdu išvengiama delsos, kurią sukelia įrenginių susijungimas. Taip pat pastebėta, kad taikant šiuos metodus, įrenginiai gali komunikuoti iki 75 m atstumu. Teorinio modelio analizės pagalba buvo nuspręsta, jog eksperimentai bus vykdomi įrenginiams veikiant *connectionless* režimu.

3. NAVIGACIJAI PASTATO VIDUJE REIKALINGŲ DUOMENŲ ATRANKA

Projektuojant ir įgyvendinant laboratorinį maketą siekiama sukurti sistemą, kurią naudojant, būtų galima nustatyti vietą patalpoje. Remiantis atlikta literatūros apžvalga pastebėta, sistemos naudojančios BLE (angl. *Bluetooth Low Energy*) leidžia gauti ganėtinai tikslius rezultatus. Prieš atliekant eksperimentus, buvo nuspręsta, kad bus sistemos darbas ir efektyvumas bus paremtas realaus gyvenimo scenarijumi – daikto, pavyzdžiui, medicininės įrangos vietos patalpoje nustatymas. Toks eksperimentas, pritaikius įrangą ir radus universalų taikymo sprendimą, galėtų panaudojamas ir realiomis sąlygomis. Tuo remiantis, buvo nustatytos siekiamos atstumo paklaidos ir mastelis, kuris bus naudojamas patalpos padalinimui į zonas. Pagrindiniai eksperimentų pasiruošimo ir vykdymo etapai būtų tokie:

- NRF5340DK maketų paruošimas;
- patalpos paruošimas eksperimentams;
- matavimų atlikimas kiekviename pažymėtame patalpos taške;
- gautų duomenų perdirbimas ir paruošimas apdorojimui;
- gautų atstumo duomenų apdorojimas ir rezultatų gavimas taikant intelektualiuosius metodus.

Eksperimentų tikslas – iš surinktų duomenų nustatyti, kuriame patalpos taške buvo atlikti matavimai. Svarbu pastebėti, jog eksperimento eigoje bus įvertintos naudojamos technologijos galimybės atlikti tikslius matavimus (įvertinamos atstumo paklaidos metrais).

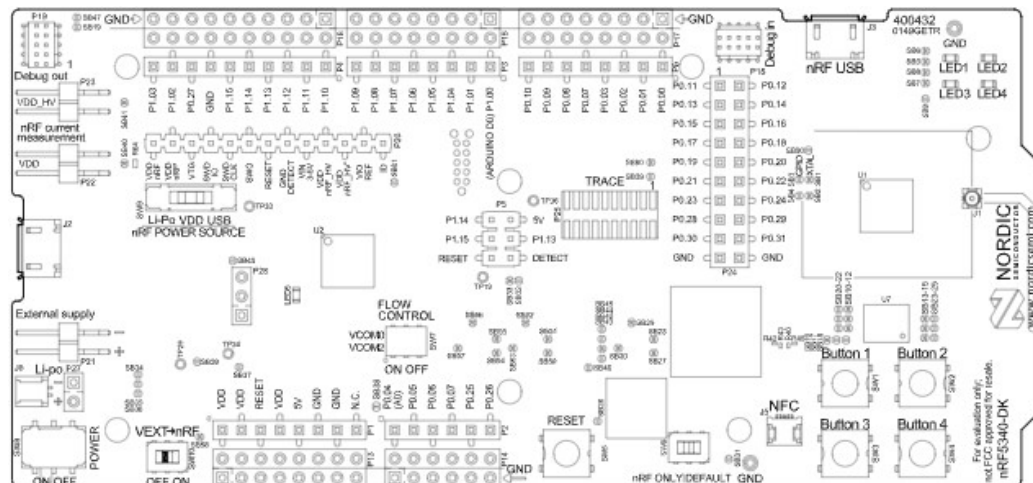
3.1. NRF5340DK maketų paruošimas eksperimentams

Eksperimento metu bus renkami duomenys, naudojant nRF5340DK maketus, kurie palaiko *Bluetooth* BLE ir bibliotekas skirtas kryptiškai ir atstumui nustatyti [23]. Pagrindiniai nRF5340DK maketo specifikacijos parametrai pavaizduoti 1 lentelėje. Šis maketas paruoštas išbandyti BLE 5.1 funkcijas reikalingas tyrimui – gali 2 Mbps greičiu perduoti duomenis, turi CTE parametrus skelbimo paketuose ir gali veikti dideliu atstumu (iki 75 m). Įrenginys yra programuojamas per *SEGGER J-Link* sąsają ir programinę įrangą.

1 lentelė. nRF5340DK techninė specifikacija [23]

Procesorius	128/64 MHz Arm Cortex-M33 + 64 MHz Arm Cortex-M33
Atmintis	1 MB Flash + 512 KB RAM, 256 KB Flash + 64 KB RAM
Maitinimo įtampa	1,7-5,5 V

Maketo elektrinė schema pavaizduota 20 pav. Įrenginys turi integruotą 2,4 GHz PCB anteną skirtą komunikacijai tarp įrenginių.



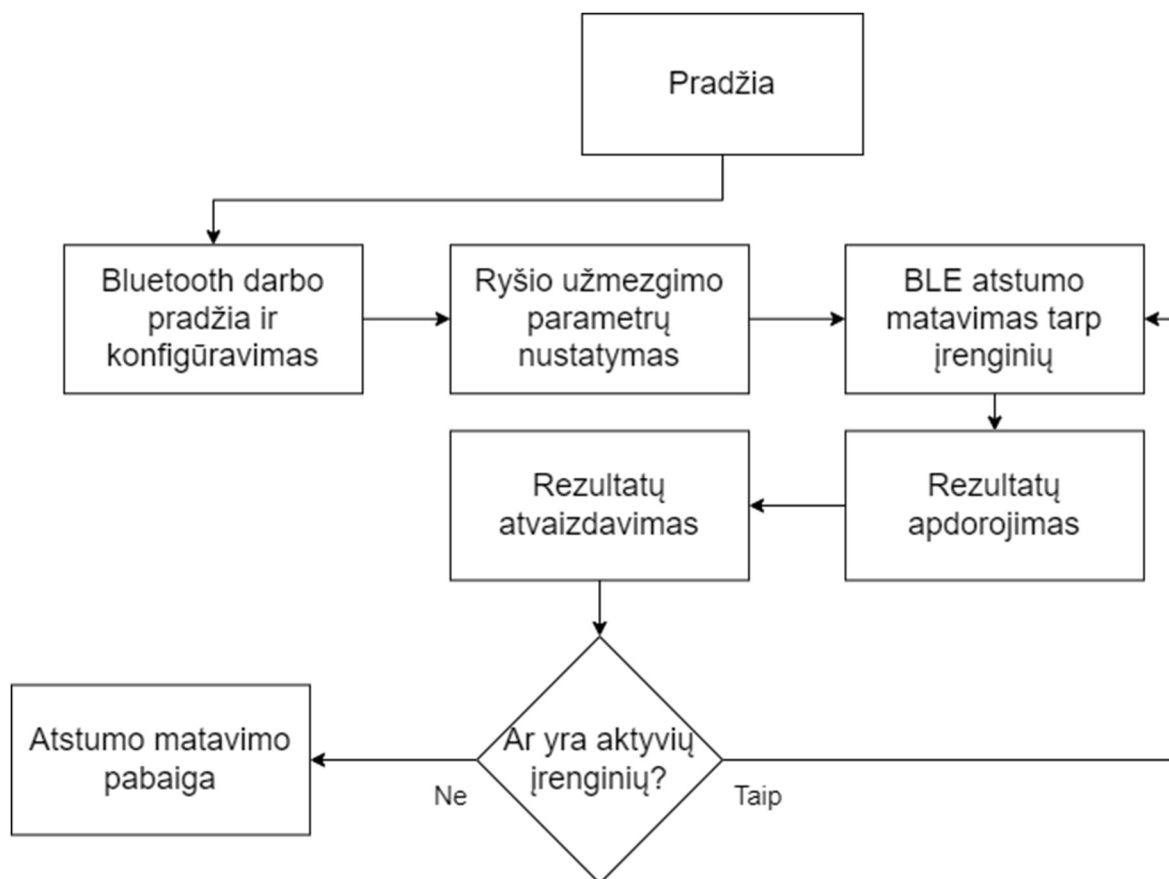
20 pav. nRF5340DK maketo spausdintinės plokštės elementų išdėstymas iš viršaus [24]

Iš viso eksperimento metu, bus naudojami keturi nRF5340DK maketai:

- trims maketams bus priskirta funkcija „stotelė“;
- vienam maketui bus priskirta funkcija „matavimo įrenginys“.

Visiems keturiems maketams pritaikytas programinis kodas, skirtas atstumo matuoti taikant MCPD (angl. *Multi-Carrier Phase Difference*) metodą.

Kadangi tyrimo metu atliekami matavimai remiantis BLE (angl. *Bluetooth Low Energy*) technologija, nRF5340DK maketams buvo paruoštas programinis kodas, kuris atliktų atstumo matavimus, juos pateiktų tyrimui tinkamu formatu ir leistų duomenis rinkti į vieną duomenų rinkinį, kuris bus naudojamas technologijos galimybių įvertinimui. Programinis kodas yra paremtas maketo gamintojų *Nordic Semiconductor* programinio kodo kūrimo įrankiu (angl. *Software development kit*) [25]. Gamintojas pateikia atvirojo kodo pavyzdžius skirtus nRF5340DK maketams, tarp kurių yra ir *Bluetooth: nRF Distance Measurement with Bluetooth LE discovery* programinio kodo pavyzdys [26]. Ruošiantis tyrimui anksčiau minėtas pavyzdys buvo pakeistas pagal tyrimo specifiką – buvo pridėta galimybė identifikuoti įrenginius, iki kurių atliekamas atstumo matavimas, pridėtas paprastesnis duomenų pavaizdavimas, galimybė numeruoti ir saugoti rezultatus. Apibendrintas programinio kodo veikimo algoritmas yra pavaizduotas 21 pav.



21 pav. Programinio kodo veikimo blokinė diagrama

Programinio kodo veikimo blokinėje diagramoje matyti keli pradinio konfigūravimo etapai ir ciklas, kuris tikrina ar yra aktyvių įrenginių, tarp kurių gali būti matuojamas atstumas. Pagrindiniai parametrai ir kintamieji, kurie yra naudojami programiniame kode:

- Bluetooth darbo pradžia ir konfigūravimas
 - DEVICE_NAME – kintamasis įrenginio vardui saugojimui. Šis parametras naudojamas atliekant įrenginių kalibravimui;
 - ADV_PARAM_CONN ir ADV_PARAM_NOCONN – kintamieji skirti saugoti įrenginio būsenai. Atliekant įrenginių kalibravimą, įrenginys siunčia ADV IND paketą, kuriame yra nurodomas parametras, kuris lemia, ar prie įrenginio galima prisijungti.
 - AD[] ir SD[] – kintamieji skirtingi saugoti įrenginio pranešimo ir teikiamų paslaugų informaciją.
 - SCAN_PARAM – struktūra, kurioje saugoma informacija skirta aplinkinių įrenginių nuskaitymui. Saugomi parametrai – nuskaitymo tipas, intervalas, nuskaitymo lango dydis, papildomi parametrai.
- Ryšio užmezgimo parametrų nustatymas

- ADV_PARAM – struktūra skirta saugoti įrenginio skelbimo duomenis tuo atveju, jeigu jo būseną yra ADV_PARAM_CONN, t.y. kai prie įrenginio galima prisijungti ir su juo užmegzti ryšį. Čia saugoma – ar prie įrenginio galima prisijungti, nuskaitymo dažnis, bei minimalios ir maksimalios nuskaitymo vertės.
- SCAN_MFG_DATA – struktūra skirta saugoti BLE protokolui reikalingus įrenginio gamintojo duomenis.
- Atstumo matavimas
 - PEER_INIT(), PEER_SUPPORTED_ADD, PEER_RNG_SEED_PREPARE () – funkcijos skirtos stotelių aptikimui.
 - PEER_THREAD() – gija, kuri yra atsakinga už duomenų gavimą ir pavaizdavimą;
 - ADV_SCANNED_CB() – funkcija, kuri reaguoja į aptiktus skelbimo paketus ir pradeda matavimus.
 - DATA_CB() – funkcija, kuri apdoroja gautus duomenis iš skelbimo paketų.

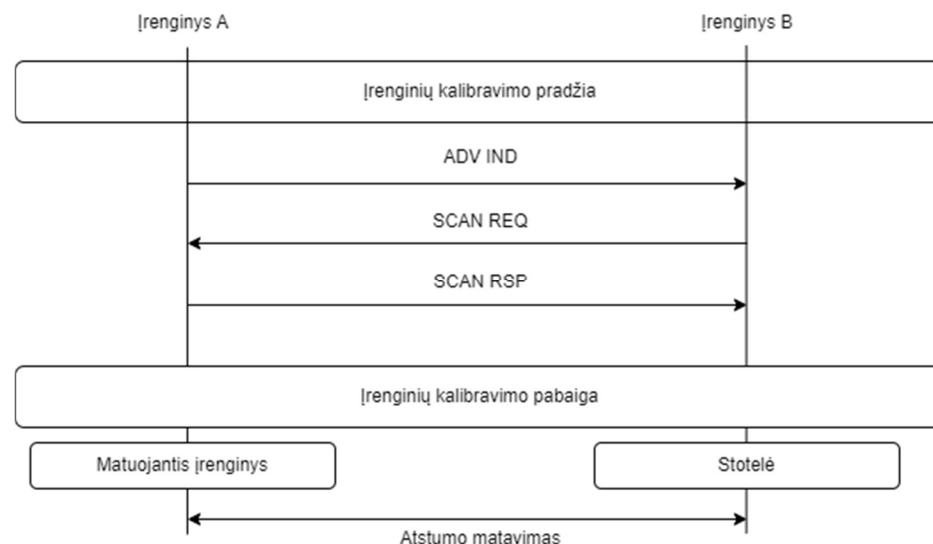
Programinio kodo rezultatas – išmatuotų atstumo duomenų eilutės. 22 pav. pavaizduoti neapdoroti programos rezultato duomenys.

```
00> Measurement result: Addr: CD:AA:FE:C4:B8:40 (random), Station: Stotėle 3, mcpd: ifft=5.57 phase_slope=11.06 rssi_openspace=25.12 best=5.57 Measurement iteration: 8
00> Measurement number: 0
00>
00> Measurement result: Addr: CD:AA:FE:C4:B8:40 (random), Station: Stotėle 3, mcpd: ifft=5.86 phase_slope=11.13 rssi_openspace=25.12 best=5.86 Measurement iteration: 9
00> Measurement number: 0
00>
00> Measurement result: Addr: EF:D4:01:44:7A:9A (random), Station: Stotėle 1, mcpd: ifft=1.70 phase_slope=3.22 rssi_openspace=1.58 best=1.70 Measurement iteration: 9
00> Measurement number: 0
00>
00> Measurement result: Addr: CB:81:EB:F5:CE:0F (random), Station: Stotėle 2, mcpd: ifft=5.07 phase_slope=6.76 rssi_openspace=7.08 best=5.07 Measurement iteration: 11
00> Measurement number: 0
00>
00> Measurement result: Addr: EF:D4:01:44:7A:9A (random), Station: Stotėle 1, mcpd: ifft=1.76 phase_slope=3.26 rssi_openspace=1.78 best=1.76 Measurement iteration: 10
00> Measurement number: 0
```

22 pav. Programinio kodo rezultato pavyzdys

Kaip vykdomas įrenginių sinchronizavimas ir matavimo pradėjimas pavaizduota 23 pav. Įrenginys A siunčia ADV IND (angl. *Advertising Indication*) paketą, kuriuo įrenginys informuoja aplinkui esančius įrenginius apie savo buvimą ir praneša apie galimybę prie jo prisijungti. Tuomet aktyvus įrenginys B siunčia SCAN REQ (angl. *Scan Request*) paketą, kuris siunčiamas iš skenuojančio įrenginio, siekiant sužinoti daugiau informacijos apie įrenginį A. Įrenginys A siunčia SCAN RSP (angl. *Scan Response*) paketą, kuriame nurodo gamintojo informaciją, bei parametrus, reikalingus įrenginių susijungimui. Po šio sinchronizavimo įrenginiai įgauna funkcijas. Šio eksperimento ir tyrimo atveju funkcijas galima pavadinti „matuojantis įrenginys“ ir „stotelė“. Pirmoji funkcija yra priskiriama įrenginiui, su kuriuo bus

judama patalpoje ir bandoma nustatyti to įrenginio vietą patalpoje. „Stotelė“ – tai vienas iš trijų įrenginių, kurie pritvirtinti prie patalpos sienos, veikiantys kaip ramsčiai vietos nustatymui. Svarbu paminėti, kad sinchronizavimo procesas įvyksta ir matavimo eigoje, siekiant išlaikyti įrenginius susijungusius tarpusavyje.



23 pav. Įrenginių kalibravimo algoritmo UML sekų diagrama [26]

Būtent dėl šio BLE įrenginių kalibravimo algoritmo yra galimybė išmatuoti atstumą tarp kelių skirtingų patalpoje esančių įrenginių. Eksperimento metu vienu metu iš vieno matuojančio įrenginio atliekami atstumo matavimai iki trijų stacionarių įrenginių pritvirtintų prie sienos.

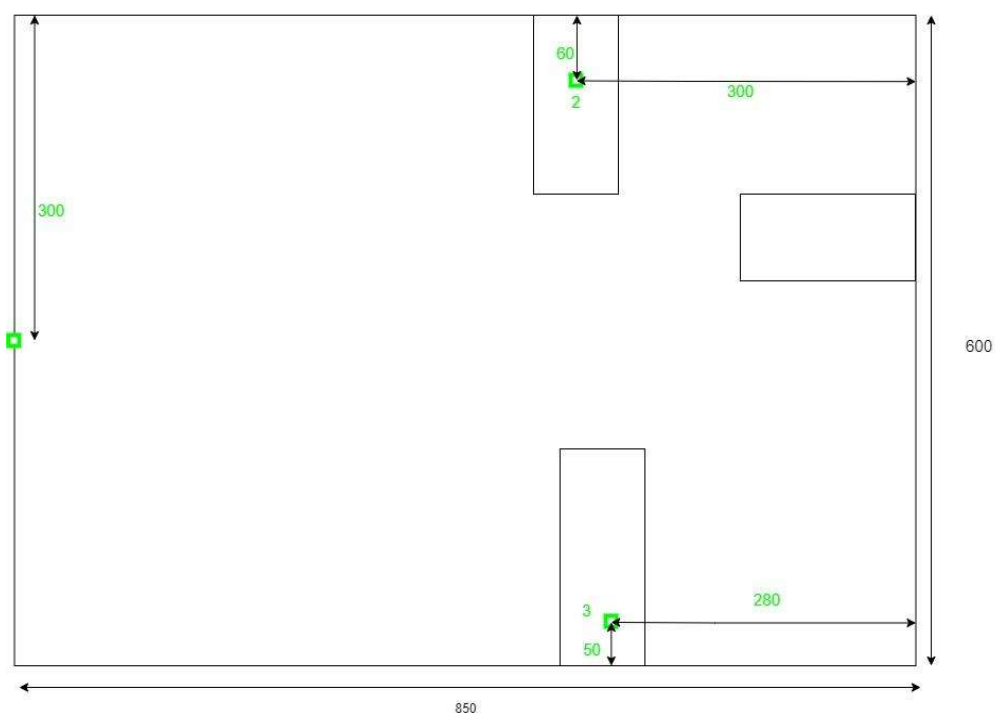
3.2. Patalpos paruošimas eksperimentams

Eksperimentams atlikti buvo pasirinkta biuro patalpa, kurios dydis yra 8,5 x 6 m. Patalpos matmenys ir išdėstymas yra tinkamas tokio tipo eksperimentams atlikti – patalpoje yra kliūčių, kurios galėtų įtakoti matavimų paklaidą. Taip pat tokie patalpos išmatavimai gali padėti tinkamai išbandyti technologijos galimybes, nes matavimai bus atliekami esant ir mažam (0,5 metro) ir dideliui atstumui (8 metrai). Viduryje patalpos yra daiktų laikymo spintos, kurios gali blokuoti signalą, o tai padėtų įvertinti ar sistema galėtų gauti tikslūs rezultatus, esant kliūtims (žmonėms ir pašaliniais daiktams patalpoje). Taip pat patalpoje yra langai, kurie galėtų įtakoti bevielių signalų pagrindu veikiančios sistemos darbą (atspindžiai). Pasirinktos patalpos nuotraukos matyti 24 pav.



24 pav. Patalpos nuotraukos

Pasirinkus patalpą, buvo nupieštas virtualus patalpos planas. Plane yra žalia spalva pažymėtos nRF5340DK maketų tvirtinimo vietos. Taip pat plane yra pažymėti reikšmingi objektai, kurie galėtų trukdyti signalui sklidimui (aukštos spintos, kurios galėtų kirsti kelią tarp matavimo taško ir kiekvienos matavimo stotelės). 25 pav. pavaizduotas virtualus patalpos planas.



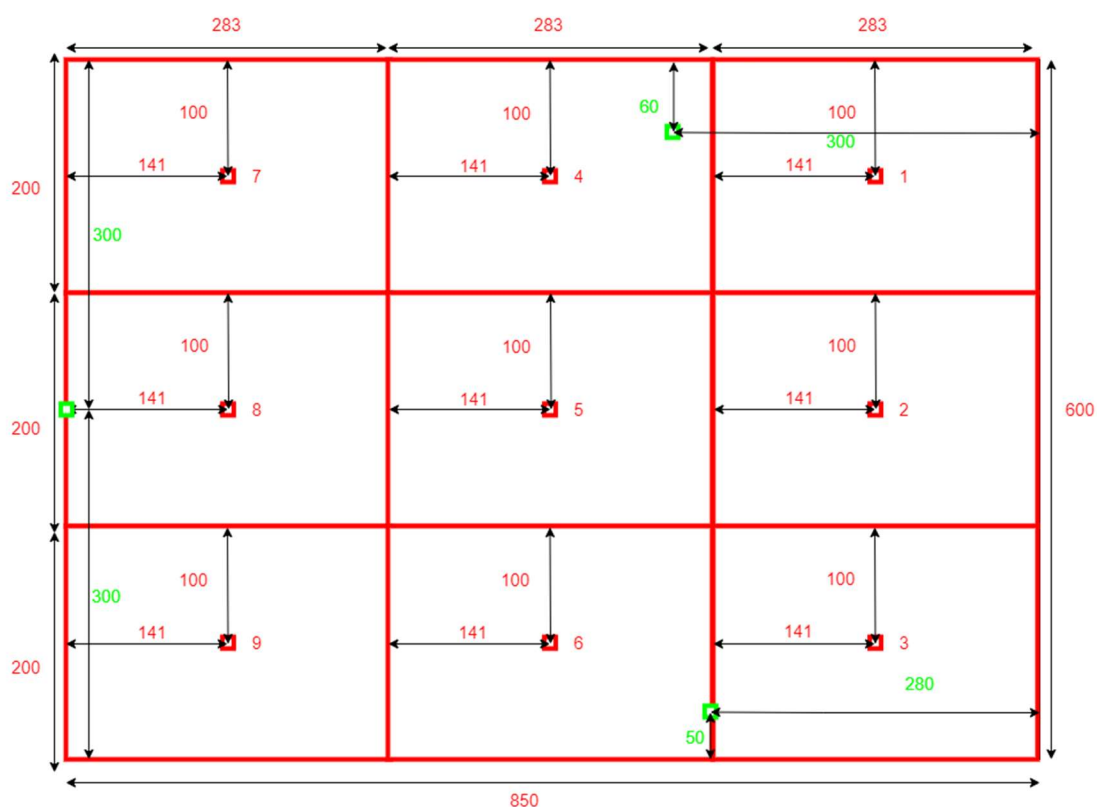
25 pav. Pasirinktos patalpos planas su matavimo stotelių vietomis

Atlikus patalpos matavimus ir pasirinkus stotelių vietas, patalpa buvo padalinta į vienodas zonas dviem skirtingais masteliais:

- patalpa padalinta į 9 taškus;
- patalpa padalinta į 24 taškus.

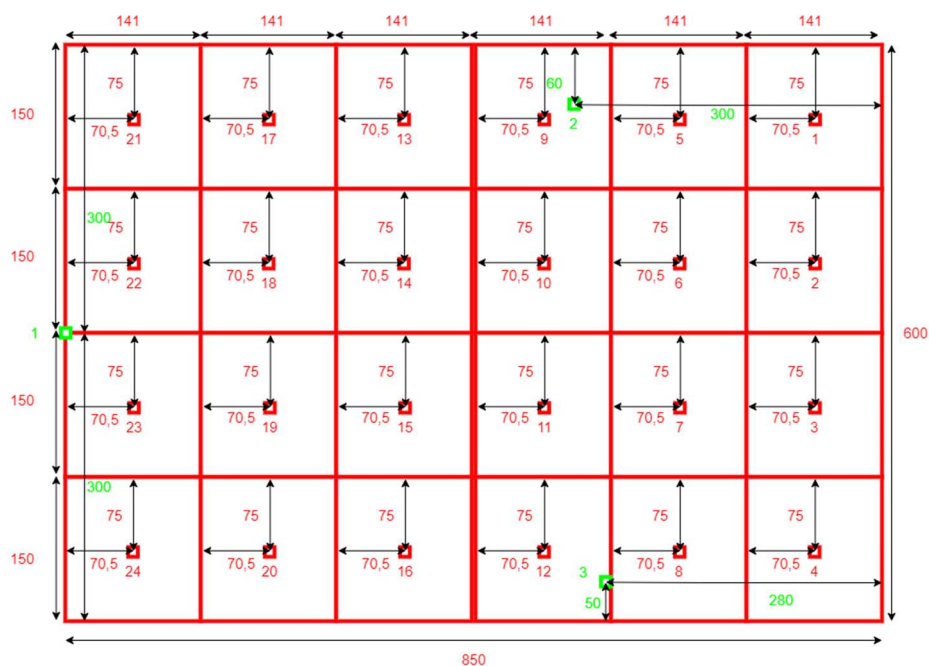
Patalpos padalinimo į vienodas zonas leidžia pasirinkti kokio tikslumo ir paklaidos iš tikrųjų ieškome. Padalinus į 9 taškus, gaunamos zonos, kurių dydis 2 x 2,83 m, o padalinus į 24 gaunamos 1,5 x 1,41 m dydžio zonos. Šiais dviem eksperimentais bandoma pritaikyti prie realių panaudojimo scenarijų. Darant prielaidą, kad mums svarbu žinoti, tik kuriame patalpos kampe yra ieškomas daiktas – tokiu atveju mums užtenka stambaus mastelio. Priešingu atveju, jeigu patalpoje saugome 15 skirtingų medicininės įrangos vienetų, ir mums reikia žinoti, būtent kurioje vietoje, naudingesnis būtų smulkesnis patalpos padalijimo mastelis.

Taigi, suformulavus reikalavimus patalpos padalinimo masteliui, buvo sukurti patalpos planai dviem eksperimentams atlikti. Patalpos suskirstytos į 9 vienodas zonas yra pavaizduotas **26 pav.**



26 pav. Eksperimento patalpos planas (9 matavimo taškai)

Patalpos, padalintos į 24 matavimo zonas yra pavaizduotas 27 pav. Svarbu paminėti, jog abiem atvejais matavimo stotelių pozicijos išlieka tokios pat, kad būtų galimybė palyginti sistemos darbą tarp skirtingų panaudojimo atvejų variantų.



27 pav. Eksperimento patalpos planas (24 matavimo taškai)

Atlikus patalpos ir patalpos brėžinių paruošimo darbus, buvo apskaičiuoti visi atstumai tarp matavimo taško ir kiekvieno iš trijų nRF5340DK maketų. Atstumai buvo apskaičiuoti, remiantis sukurtais brėžiniais, ir prilyginti realiems atstumams, matuojant rankiniu būdu. Tuomet buvo sudarytas visų galimų atstumų sąrašas. Jis bus naudojamas paklaidų ir sistemos tikslumui skaičiuoti. Taip pat toks rinkinys padeda lengviau nustatyti, ar matavimo metu sistema teisingai atlieka savo darbą. 2 lentelėje pavaizduoti pirmojo eksperimento varianto atstumai nuo kiekvieno taško iki kiekvienos stotelės. Identiškas atstumų sąrašas paruoštas ir antrajam eksperimento variantui, kai patalpa padalinta į 24 zonas, jį galima pamatyti 1 priede. Eksperimento metu bus atsižvelgiama į skirtumą tarp sistemos išmatuoto atstumo ir realaus, prieš atliekant eksperimentus gauto, atstumo.

2 lentelė. Realūs atstumai tarp matavimo taškų ir stotelių

Stotelė	Matavimo taškas	Atstumas (cm)	Stotelė	Matavimo taškas	Atstumas (cm)
1	1	733	2	6	457
1	2	705	2	7	408
1	3	733	2	8	472
1	4	468	2	9	599
1	5	423	3	1	471
1	6	468	3	2	287
1	7	245	3	3	149
1	8	141	3	4	471
1	9	245	3	5	287
2	1	164	3	6	149
2	2	288	3	7	552

2	3	468	3	8	406
2	4	130	3	9	324
2	5	270			

3.3. Atstumo duomenų rinkimas

Atlikus maketo programinio kodo ir patalpos paruošimo darbus, sekantis eksperimento pasiruošimo darbas – duomenų rinkinio struktūros sudarymas ir atstumo duomenų surinkimas. 4.1 skyriuje aprašyto programinio kodo rezultatas yra vienas matavimas iš tam tikro taško. Vieno matavimo rezultatų struktūra pavaizduota 3 lentelėje. Kaip matyti duomenų struktūroje, kiekvieno matavimo metu yra gaunamas atstumas iki stotelės taikant MCPD metodą ir jį apdorojant keturiais skirtingais metodais:

- IFFT metodas;
- *Phase Slope* metodas;
- RSSI metodas;
- geriausias matavimo rezultatas.

Svarbu paminėti, jog nors beveik visas gamintojo kodas skirtas nRF5340DK maketas yra atviras, yra kodo detalių, kuriomis gamintojas nesidalina dėl komercinių priežasčių [25]. Būtent dėl šios priežasties anksčiau minėtų keturių apdorojimo metodų programinis kodas nėra viešai prieinamas. Taip pat gamintojas nesidalina, koku būdu yra skaičiuojamas geriausias matavimo rezultatas. Rezultatų apdorojimo metu prie duomenų rinkinio yra pridamos matavimo taško ir realaus atstumo reikšmės. Realaus atstumo reikšmės buvo gautos patalpos paruošimo etape, aprašytame 4.2 skyriuje. Naudojant prašytą rezultatų struktūrą bus atliekami paklaidų skaičiavimai metodui ir technologijai įvertinti.

3 lentelė. Vieno matavimo rezultatų struktūra

Eilės nr.	Matavimo taškas	Stotelės nr.	Atstumas su MCPD taikant IFFT	Atstumas su MCPD taikant <i>Phase Slope</i>	Atstumas su MCPD taikant RSSI	Geriausias matavimo rezultatas	Realus atstumas

Aprašius vieno matavimo rezultatų struktūrą, buvo suformuota duomenų struktūra, kurioje bus saugomi visi eksperimento rezultatai. Kaip atrodo eksperimento rezultatų duomenų rinkinio struktūra pavaizduota 4 lentelėje. Kaip matyti lentelėje, į vieną duomenų rinkinį yra sudedami atstumų iki visų trijų stotelių duomenys. Šiuo atveju, tokia struktūra bus naudojama įvertinti ar MCPD metodu surinkus duomenis ir taikant intelektualiuosius metodus, galima nustatyti vietą pastato viduje.

4 lentelė. Duomenų rinkinio struktūra vietos nustatymo eksperimentui

1	IFFT	1	PS	1	RSSI	1	BEST	2	IFFT	2	PS	2	RSSI	2	BEST	3	IFFT	3	PS	3	RSSI	3	BEST	T
---	------	---	----	---	------	---	------	---	------	---	----	---	------	---	------	---	------	---	----	---	------	---	------	---

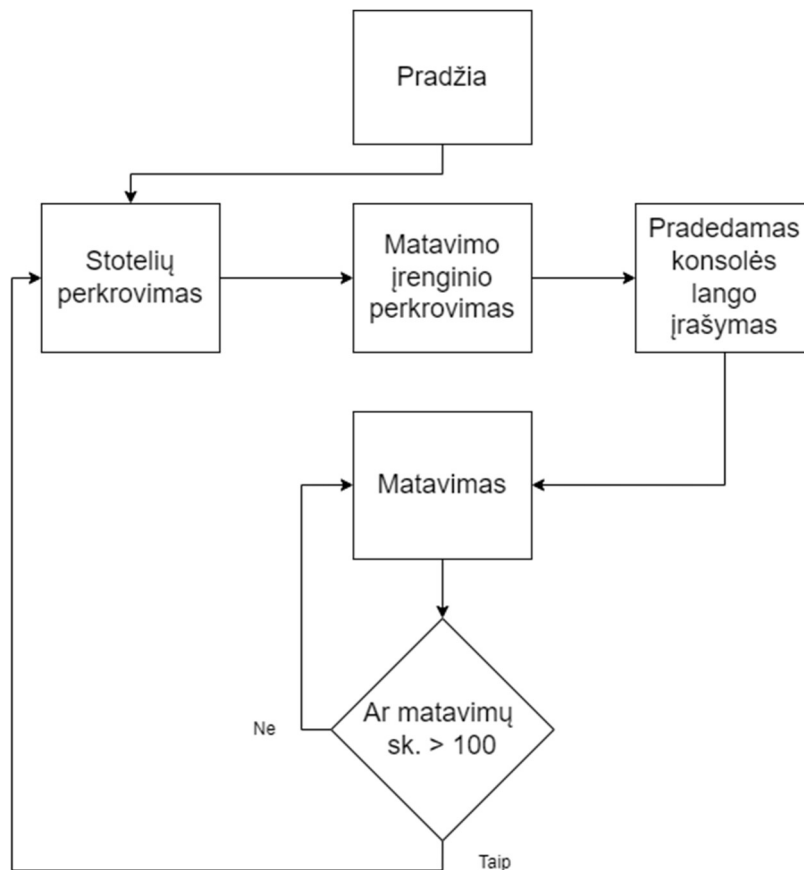
Remiantis patalpos pasiruošimo dalimi duomenų rinkimo eksperimentas susidaro iš dviejų dalių:

- atstumo duomenų rinkimas, kai patalpa padalinta į 9 dalis;
- atstumo duomenų rinkimas, kai patalpa padalinta į 24 dalis.

Surinkti duomenys perkelti į duomenų rinkinius, skirtus paklaidoms skaičiuoti ir vietos nustatymo eksperimentui atlikti. Iš kiekvieno matavimo taško eksperimento metu atlikta po 100 matavimų. Taigi duomenų rinkinių dydžiai tokie:

- padalinus patalpą į 9 zonas, pirmojo duomenų rinkinio dydis yra 900 eilučių;
- padalinus patalpą į 9 zonas, antrojo duomenų rinkinio dydis yra 300 eilučių;
- padalinus patalpą į 24 zonas, pirmojo duomenų rinkinio dydis yra 2400 eilučių;
- padalinus patalpą į 24 zonas, antrojo duomenų rinkinio dydis yra 800 eilučių.

Kiekviename eksperimento taške veiksmų seka yra tokia pati. Prieš pradėdant matuoti, kiekviena stotelė yra perkraunama siekiant tikslesnių rezultatų (po perkrovimo išsivalo duomenų saugojimo eilė, kas leidžia sistemai veikti greičiau). Tuomet laikant matavimo įrenginį, atsistojama į matavimo tašką. Matavimo įrenginys taip pat yra perkraunamas. Atlikus perkrovimą, kompiuteryje įjungiamas konsolės lango įrašymas ir atliekami matavimai. Matavimo įrenginiui surinkus po 100 reikšmių iš kiekvienos stotelės, matavimas yra sustabdomas ir procedūra yra kartojama kiekvienam matavimo taškui. Eksperimento duomenų rinkimo schema yra pavaizduota 28 pav.



28 pav. Duomenų rinkimo darbo eiga

3.4. Skyriaus apibendrinimas

Navigacijai pastato viduje reikalingų duomenų atrankos metu buvo paruošti nRF5340DK maketai ir jų programinis, reikalingas atstumo matavimui. Paruošta eksperimentams skirta patalpa, skaitmenintus patalpos planas ir patalpa padalinta į matavimo zonas. Paruošus patalpą, buvo atlikti matavimai esant dviem skirtingiems patalpos padalinimo masteliams. Gautiems rezultatams paruoštos duomenų struktūros, kuriose saugomi rezultatai tolimesniam apdorojimui. Sekančiame etape gautieji duomenys bus vertinami pagal vidutinę paklaidą. Taip pat duomenys bus pritaikyti dirbtinių neuronų tinklo apmokymui.

4. NAVIGACIJOS PASTATO VIDUJE TYRIMO REZULTATAI

Atlikus du eksperimentus su skirtingais patalpos padalinimo masteliais atliekama rezultatų analizė. Analizė atliekama dviem būdais:

- įvertinamas metodo tikslumas iš skirtingų perspektyvų;
- gautieji duomenys apdorojami intelektualiais metodais.

Rezultatų analizės tikslas šiuo atveju yra nustatyti, ar technologija yra pakankamai tiksli uždaviniui spręsti, bei pabandyti pritaikyti gautąjį duomenų rinkinį dirbtinių neuroninių tinklų apmokymui.

4.1. Eksperimento rezultatai

Pagrindinis eksperimento vertinimo kriterijus yra matavimo paklaida metrais. Eksperimentas buvo atliekamas realiomis sąlygomis patalpoje, kurioje yra įvairių kliūčių, tarp kurių – aukštos spintos kurios gali užverti kelią tarp matavimo įrenginio ir stotelės. Atlikus matavimus ir gautus rezultatus išsaugojus į duomenų rinkinį galima įvertinti, kokia vidutinė atstumo matavimo paklaida. Vidutinė matavimų paklaida yra gaunama iš realaus atstumo atėmus gautą matavimo rezultatą ir padalinus iš matavimų skaičiaus. Matavimo paklaida buvo apskaičiuota abiem matavimo variantams – kai patalpa padalinta į 9 dalis ir kai patalpa padalinta į 24 dalis. Gautieji rezultatai:

- patalpą padalinus į 9 dalis gauta paklaida yra 1,4 m;
- patalpą padalinus į 24 dalis gauta paklaida yra 1,08 m.

Siekiant įvertinti kaip kliūtys patalpoje gali paveikti matavimo tikslumą, paklaidos vidurkis buvo apskaičiuotas ir kiekvienam taškui atskirai. Šie rezultatai, 9 matavimo taškų atveju yra pavaizduoti 5 lentelėje.

5 lentelė. Atstumo paklaidos, kai patalpa padalinta į 9 zonas

Taško nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Paklaida, m	1,73	1,97	1,77	1,13	0,68	1,33	1,34	1,02	1,7

6 lentelėje pavaizduotos vidutinės matavimo patalpos kiekvienam taškui, kai patalpa padalinta į 24 zonas. Iš rezultatų matyti, kad patalpą padalijus į daugiau zonų, gaunama didesnė amplitudė tarp mažiausios ir didžiausios vidutinės paklaidos.

6 lentelė. Atstumo paklaidos, kai patalpa padalinta į 24 zonas

Taško nr.	Paklaida, m	Taško nr.	Paklaida, m	Taško nr.	Paklaida, m
1	0,89	10	0,65	19	1,87
2	0,37	11	0,66	20	0,86
3	0,67	12	1,44	21	1,3
4	0,77	13	1,45	22	1,46
5	0,81	14	1,76	23	1,77
6	0,5	15	1,44	24	1,12
7	0,65	16	1,24		
8	0,98	17	1,32		
9	0,78	18	1,28		

Nagrinėjant eksperimento rezultatus buvo atsižvelgtą ir į paklaidą kiekvienai stotelei kiekvieno eksperimento metu. 7 lentelėje matyti apskaičiuotos vidutinės paklaidos kiekvienai stotelei. Iš rezultatų matyti, kad 9 taškų eksperimento atveju, trečioji stotelė turėjo dvigubai didesnę vidutinę paklaidą, lyginant su kitomis stotelėmis. Taigi, būtų galima įtarti, jog eksperimento metu buvo nesklandumų su trečiosios stotelės sinchronizavimu, nes antrojo eksperimento metu trečioji stotelė nebeteri tokios aukštos vidutinės paklaidos.

7 lentelė. Kiekvienos stotelės vidutinė atstumo paklaida

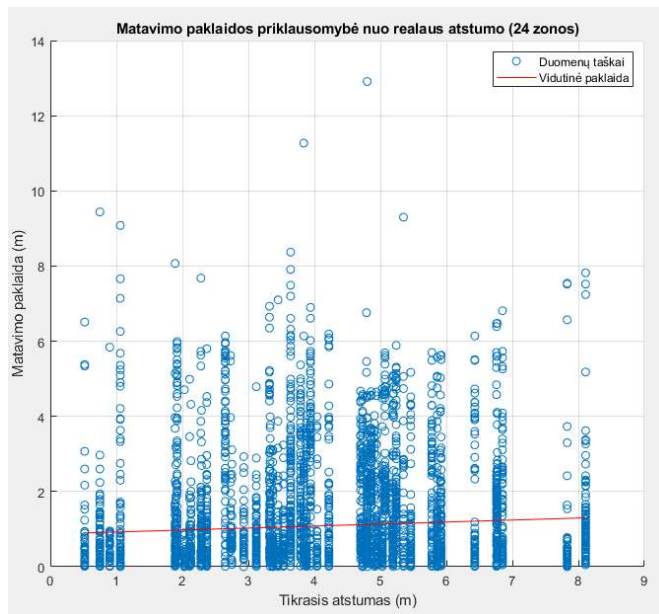
Taškų skaičius	Stotelės nr.	Vidutinė paklaida, m
9	1	1
9	2	1,07
9	3	2,15
24	1	0,91
24	2	1,36
24	3	0,99

Taip pat buvo apskaičiuotas koreliacijos koeficientas tarp realaus atstumo ir gautų matavimo paklaidų:

- patalpą padalinus į 9 dalis gautas koreliacijos koeficientas yra 0,05716;
- patalpą padalinus į 24 dalis gautas koreliacijos koeficientas yra 0,078872.

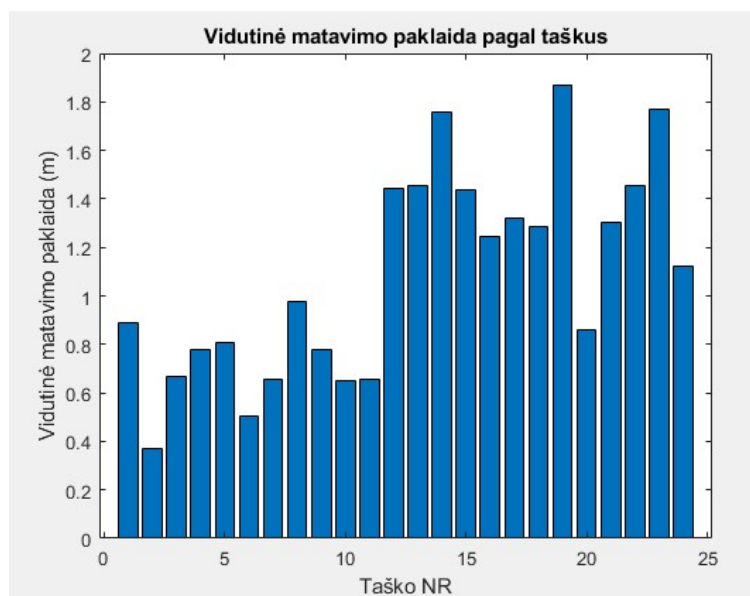
Iš gautųjų koreliacijos koeficientų matyti, kad tokios patalpos atveju, paklaida nepriklauso nuo realaus atstumo iki stotelės. Šis koeficientas gali didėti, atliekant matavimus didesniu atstumu. Apskaičiavus koreliacijos koeficientus tarp realaus atstumo ir gautų matavimo paklaidų, buvo nubraižyti grafikai, vaizduojantys, kaip pasiskirsto matavimo paklaidos. 29 pav. matyti, koku tankiu yra pasiskirsčiusi paklaida tikrojo atstumo atžvilgiu, kai patalpa padalinta į 24 zonas. Iš grafiko matyti, kad dažniausiai paklaida yra iki 1 m. Tačiau matyti, kad yra matavimų su anomalijomis – t.y. paklaida didesnė nei 5 metrai. Šią problemą būtų galima spręsti, ruošiant patalpą nustačius matavimo lubas – daroma prielaida, kad

atstumas negali būti didesnis nei 10 m, nes patalpa nėra tokia didelė. Vidutinė paklaida minėtame grafike yra pažymėta spalva. Iš grafiko matyti, kad vidutinės paklaidos tiesė nežymiai kyla didėjant tikrajam atstumui.



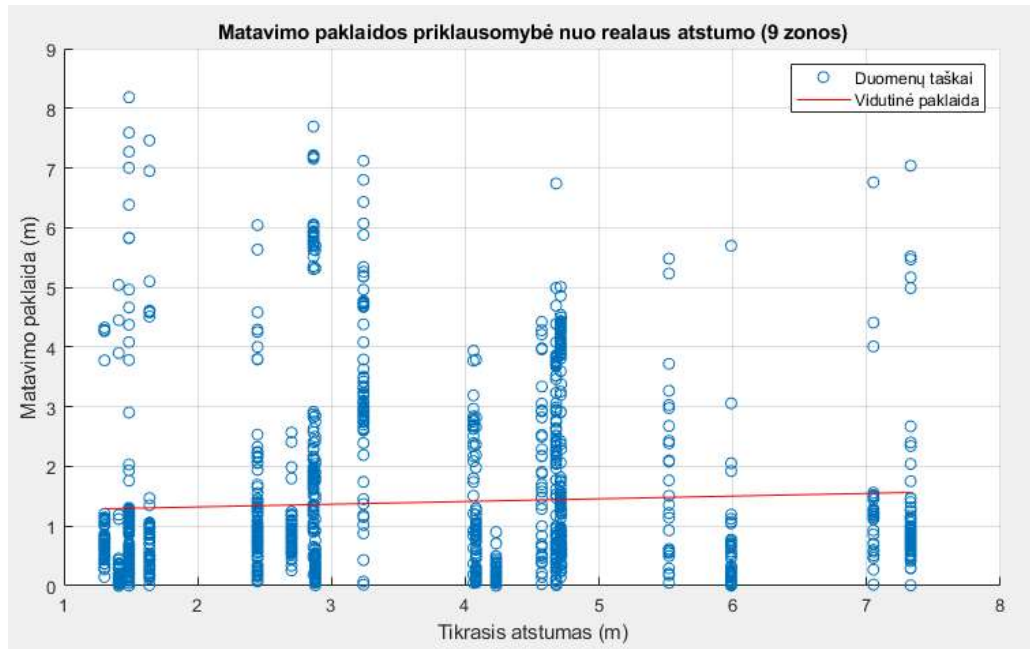
29 pav. Matavimo paklaidos ir realaus atstumo (24 zonos) priklausomybės grafikas

Įvertinus paklaidos priklausomybę nuo matavimo atstumo, buvo įvertintas matavimas iš kiekvieno taško, skaičiuojant vidutinę to taško paklaidą. Rezultatai, kai patalpa padalinta į 24 zonas, matyti 30 pav. Iš grafiko matyti, kad vidutinės paklaidos kai kuriuose taškuose skiriasi kelis kartus. Tarpkime antrojo ir devyniolikto taško paklaida skiriasi penkis kartus. Taigi, pritaikius optimizavimo metodus, vietoms, kuriose paklaida yra didesnė, būtų galima rezultatus panašius į antrojo taško rezultatus.



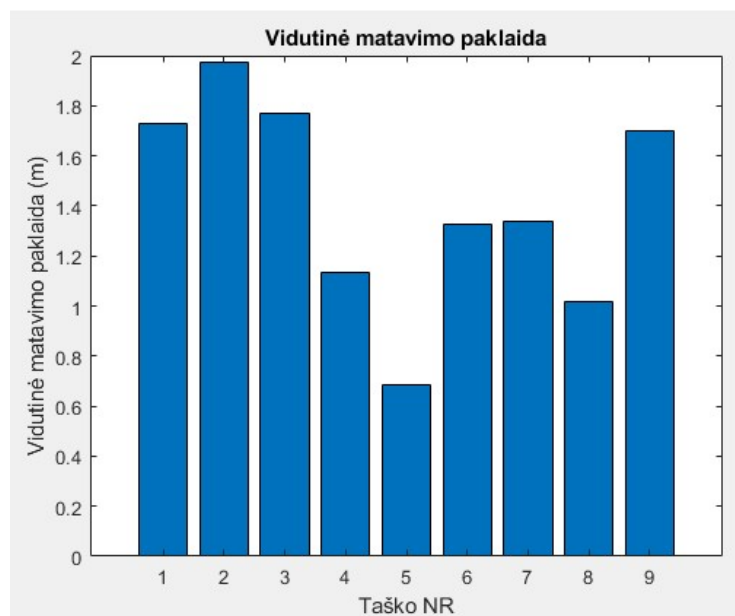
30 pav. Vidutinės matavimo paklaidos kiekviename taške (24 zonos) grafikas

Matavimo paklaidos ir realaus atstumo priklausomybė buvo apskaičiuota ir eksperimento su 9 matavimo taškais, atveju. Matyti, kad šiuo atveju taškų tankumas yra kitoks nei 24 taškų atveju. Iš grafiko matyti didelis aukštų paklaidų tankis tarp 4 ir 5 metrų realaus atstumo. Šiuo atveju matyti, kad vidutinės paklaidos tiesė yra aukščiau.



31 pav. Matavimo paklaidos ir realaus atstumo (9 zonos) priklausomybės grafikas

Lyginant su 24 taškų atveju, vidutinės paklaidos yra didesnės, tačiau nėra tokių didelių paklaidų svyravimų. Iš šio paveikslo galima nustatyti, jog taikomas metodas optimizavus gali būti stabilus.



32 pav. Vidutinės matavimo paklaidos kiekviename taške (9 zonos) grafikas

Išnagrinėjus abu eksperimentus atskirai, reikšminga įvertinti bendrą eksperimentų rezultatą. Bendroji vidutinė metodo paklaida yra 1,24 m. Tokio tikslumo sistemos užtenka darbui patalpoje suskirstytoje į 9 ir 24 zonas, nes pirmuoju atveju vienos matavimo zonos dydis yra 2 x 2,83 m, o antruoju atveju 1,5 x 1,41 m. Taigi, sistemai veikiant 1,24 m tikslumu yra galimybė nustatyti, kurioje patalpos vietoje galėtų būti pažymėtas objektas.

4.2. Eksperimento rezultatų apdorojimas taikant intelektualiuosius metodus

Gautieji eksperimentų duomenys buvo panaudoti dirbtinių neuroninių tinklų apmokymui, siekiant tinklui padavus atstumus iki trijų stotelių nustatyti, iš kurios patalpos zonos buvo atliktas matavimas. Šiuo atveju buvo atlikti dviejų dirbtinių neuroninių tinklų apmokymo eksperimentai:

- patalpa padalinus į 9 zonas;
- patalpa padalinus į 24 zonas.

Kadangi siekiamas neuroninio tinklo rezultatas yra zonos nustatymas, yra sprendžiamas klasifikavimo uždavinys. Kiekvieną zoną galima laikyti klase, kuri yra nustatoma pagal trijų atstumų vertes. Prieš kuriant dirbtinių neuronų tinklus buvo paruošti duomenų rinkiniai iš eksperimentų metu gautų rezultatų. Duomenų rinkinio struktūra pavaizduota 8 lentelėje.

8 lentelė. Duomenų rinkinio struktūra

1 IFFT metodas		2 Geriausias rezultatas	
1 Phase slope metodas		3 IFFT metodas	
1 RSSI metodas		3 Phase slope metodas	
1 Geriausias rezultatas		3 RSSI metodas	
2 IFFT metodas		3 Geriausias rezultatas	
2 Phase slope metodas		Taškas patalpoje	
2 RSSI metodas			

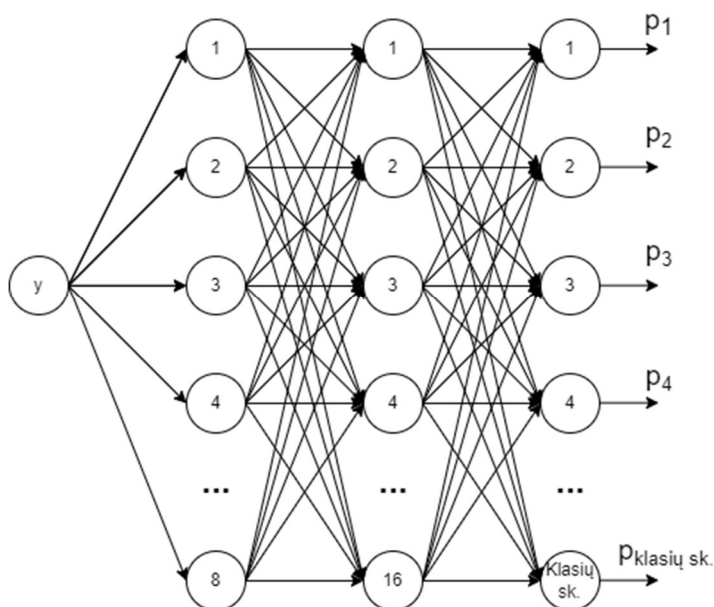
Ankščiau paminėta duomenų struktūra panaudota dirbtinių neuronų tinklo mokymui, rezultatų validavimui ir tinklo testavimui. Duomenų rinkinio fragmentas yra pavaizduotas 33 pav.

1_IFFT metodas	1_Phase slope meto	1_RSSI metodas	1_Geriausias rezult	2_IFFT metodas	2_Phase slope meto	2_RSSI metodas	2_Geriausias rezult	3_IFFT metodas	3_Phase slope meto	3_RSSI metodas	3_Geriausias rezult	Taškas patalpoje
7,95	10,51	7,08	7,95	3,56	8,44		10 3,56	5,57	7,39	15,85	5,57	1
8,3	10,16	14,13	8,3	4,98	11,26	11,22	4,98	5,86	7,81	25,12	5,86	1
8,5	9,78	4,47	8,5	3,52	9,65	7,08	3,52	5,86	7,48	22,39	5,86	1
9,62	10,5	5,62	9,62	2,34	8,68	8,91	2,34	0,59	11,05	44,67	0,59	1
9,08	10,65	3,98	9,08	2,05	7,89	7,08	2,05	5,57	6,46	7,94	5,57	1
8,79	10,6	5,01	8,79	1,76	9,26	15,85	1,76	5,68	6,05	8,91	5,68	1
7,32	10,54	4,47	7,32	4,19	11,42		10 4,19	5,57	6,2	8,91	5,57	1
7,03	10,36	3,98	7,03	4,98	11,35	14,13	4,98	5,57	6,38	7,94	5,57	1

33 pav. Duomenų rinkinio fragmento nuotrauka

Tinklo mokymui buvo paruoštas duomenų rinkinys, kuriame kiekvienam patalpos taškui yra skirta po 100 duomenų eilučių. Taigi mokymo duomenų rinkinio dydis pirmojo eksperimento atveju yra 900 eilučių, o antrojo – 2400 eilučių. Validavimo duomenų rinkinį sudaro 10 eilučių kiekvienam taškui patalpoje. Mokymo duomenų rinkinį taip pat sudaro 10 eilučių kiekvienam taškui patalpoje. Taigi validavimo ir mokymo duomenų rinkinių dydis pirmojo eksperimento atveju yra 90 eilučių, o antrojo – 240 eilučių. Validavimo ir mokymo duomenų rinkiniai buvo sudaryti rankiniu būdu, siekiant išbandyti tinklą su kuo įvairesnėmis situacijomis, tokiu būdu siekiant nustatyti, ar tinklas gebės atlikti klasifikavimą esant sąlygoms panašioms į realias.

Kadangi duomenų kiekis nėra labai didelis, pasirinkta dirbtinių neuronų tinklo struktūra yra sąlyginai nedidelė. Dirbtinių neuronų tinklą sudaro du paslėpti sluoksniai, su 8 ir 16 dirbtinių neuronų. Išėjimo sluoksnyje neuronų yra tiek kiek klasių bandoma nustatyti, tai yra 9 arba 24. Paslėptuosiuose neuronų sluoksniuose naudojama ReLU (angl. *Rectified Linear Unit*) aktyvavimo funkcija, o išėjimo sluoksnyje *softmax* funkcija. *Softmax* kaip rezultatą pateikia tikimybę, kokiai klasei galėtų priklausyti paduodama duomenų eilutė. Tinklo rezultatas yra aukščiausios tikimybės taškas patalpoje gautas išėjimo sluoksnyje. Dirbtinio neuronų tinklo architektūra pavaizduota 34 pav. Modeliui taikyta *Adam* optimizavimo funkcija, o tikslo funkcija – *sparse categorical crossentropy*. Tikslumo vertinti naudota *accuracy* metrika. Taigi tinklo tikslumas įvertinamas pagal tai, kiek duomenų imčių (procentais) nustatė teisingą klasę (tašką patalpoje).



34 pav. Dirbtinių neuronų tinklo architektūra

Atlikus dirbtinių neuronų tinklo paruošimo darbus, tinklas buvo apmokytas su anksčiau minėta duomenų struktūra. Po mokymo, tinklas išbandytas su testavimo duomenimis.

Rezultatų pavyzdys yra pavaizduotas 35 pav. Rezultate matyti, koks turėtų būti teisingas atsakymas ir kokią atsakymą pateikė tinklas. Gautas testavimo tikslumas kai patalpa yra padalinta į 9 zonas yra 85 %, o patalpą padalinus į 24 zonas gautas 75 % tikslumas. Svarbu atsižvelgti į tai, jog tinklas klaidingu atveju dažnai prognozuoja gretimus taškus teisingam atsakymui. Tinklo tikslumą galima pagerinti padidinus mokymo ir testavimo duomenų rinkinius, mokant su 1000 imčių iš kiekvieno taško, bei testuoti naudojant bent su 100 imčių iš kiekvieno taško.

```
evaluate_and_compare(model, X_test, y_test)
```

```
Testing Accuracy: 0.8500000238418579
1/1 [=====] - 0s 22ms/step
Actual: 2, Predicted: 2
Actual: 1, Predicted: 1
Actual: 4, Predicted: 5
Actual: 4, Predicted: 4
Actual: 1, Predicted: 1
Actual: 1, Predicted: 1
```

35 pav. Dirbtinių neuronų tinklo testavimo rezultatų fragmentas

4.3. Skyriaus apibendrinimas

Eksperimento metu dirbtiniai neuronų tinklai taikomi siekiant patikrinti ar intelektualieji metodai gali būti taikomi tokiems uždaviniams spręsti. Nepaisant tikslumo metrikos šiuo atveju galima teigti, jog intelektualiujų metodų pritaikymas šiam uždaviniui yra naudingas, nes nebereikia taikyti kompleksiško algoritmo vietos nustatymui pagal trijų taškų koordinates. Tačiau metodai turi trūkumų – tinklas turi būti iš anksto apmokytas su mokymo duomenimis gautais iš patalpos, kuriai įrengiama vietos nustatymo sistema. Taip pat dirbtiniai neuronų tinklai dažnu atveju reikalauja daugiau kompiuterinių resursų skaičiavimams. Tai galėtų įtakoti sistemos darbą – įrenginių skaičiavimo trukmę, baterijos veikimo laiką. Norint taikyti intelektualiuosius metodus reikėtų atsižvelgti į šias dvi problemas ir apgalvoti, kaip būtų galima universaliu būdu mokyti tinklą, kad nebūtų poreikio kiekvienos patalpos įrengimo metu mokyti neuronų tinklą, bei ieškoti kuo optimaliausio ir spartesnio algoritmo.

Tačiau remiantis rezultatais ir jų grafinėmis iliustracijomis, matyti, jog naudojant nRF5340DK ir taikant MCPD matavimo metodą gauti rezultatai ne visada stabilūs. Ši problema galėtų būti sprendžiama patalpos paruošimo metu. Taikant šį metodą, būtų galima sukurti patalpos konfigūravimo įrankį, t.y. įrankį, kuriame būtų galima nurodyti patalpos matmenis, reikalingą matavimo mastelį, papildomas kliūtis patalpoje ir kt. Naudojant tokį patalpos konfigūravimo įrankį, būtų galima tiksliai nustatyti efektyviausius matavimo stotelių

tvirtinimo taškus ir nustatyti filtrus gautiems matavimo rezultatams. Filtrai šios problemos sprendimo atveju padėtų išvengti anomalijų matavimuose – jeigu patalpoje nėra taškų, nuo kurių atstumas iki tolimiausios stotelės yra 10 metrų, tai būti galima šią reikšmę sumažinti iki mažiausio atstumo. Tokį pat principą galima taikyti mažiems atstumams.

APIBENDRINIMAS. IŠVADOS

Darbo metu buvo atlikta vietos nustatymo patalpoje galimų taikyti technologijų ir signalų apdorojimo metodų mokslinė literatūros analizė. Analizės metu aptartos pagrindinės šiuo metu aktualiausios technologijos minėtam uždaviniui spręsti. Atlikus taikomų technologijų analizę buvo pasirinkta taikyti BLE technologiją, naudojant MCPD metodus. Darbe aptarti metodai, kuriais apdoroti eksperimentų metu surinkti duomenys. Ruošiant eksperimentinį maketą buvo paruošta aparatinė ir programinė įranga atstumo duomenims rinkti. Eksperimentams atlikti pasirinkta patalpa, kurios dydis yra 8,5 x 6 m. Patalpoje buvo atliekami du eksperimentai – patalpą padalijus į 9 ir 24 matavimo zonas. Surinkti duomenys buvo sudėti į duomenų rinkinį apdorojimui. Iš kiekvieno matavimo taško buvo surinkta po 100 atstumo duomenų imčių. Gauta, jog vidutinė paklaida yra 1,24 m. Gautieji duomenys įvertinti iš skirtingų perspektyvų – gautos paklaidos kiekvienai stotelei, matavimo taškui ir eksperimentui atskirai. Gauti duomenys buvo panaudoti dirbtinių neuronų tinklų apmokymo, validavimo ir testavimo tikslais. Taikant dirbtinių neuronų tinklus buvo sprendžiamas klasifikavimo uždavinys – pagal pateikiamus atstumo duomenis sistema turi nustatyti, iš kurios patalpos zonos buvo atliktas matavimas. Gauta, jog vidutinis tikslumas yra 80 % procentų, tačiau svarbu paminėti, jog naudojant didesnę duomenų rinkinį rezultatai būtų tikslesni. Eksperimentų ir analizės metu nustatyta, jog vietos nustatymo patalpos viduje galima naudoti BLE technologiją ir signalus apdoroti, taikant MCPD metodą.

Po atlikto tyrimo gaunamos pagrindinės išvados:

1. Naudojant BLE technologiją ir taikant MCPD metodą gauta 1,24 m vidutinė matavimo paklaida.
2. Gautiems duomenims apdoroti naudojant dirbtinius neuronų tinklus gautas 80 % tikslumas.
3. Pastebėta, jog intelektualiesiems metodams taikyti šiuo atveju reikalingas didesnis duomenų rinkinys.
4. Tyrimo metu nenustatyta koreliacija tarp atstumo ir matavimo paklaidos.
5. Dėl kliūčių patalpoje ir sinchronizacijos problemų duomenų rinkinyje pastebėta anomalinių reikšmių.

Atlikus eksperimentus ir apibendrinus jų rezultatus teikiamos šios rekomendacijos:

1. Norint taikyti dirbtinių neuronų tinklus vietai patalpoje klasifikuoti, reikalingas didesnis duomenų rinkinys.
2. Siekiant išspręsti navigacijos pastato viduje uždavinį, taikant BLE ir panašias technologijas, reikia universalaus patalpų planavimo įrankio, kuris padėtų adaptyviai pritaikyti esamą arba naują infrastuktūrą vietai nustatyti.
3. Eksperimento metu parašytas programinis kodas gali būti optimizuotas užtikrinant patogesnę ir efektyvesnę duomenų surinkimo procesą. .
4. Turėtų būti išbandytos galimybės naudoti intelektualiuosius metodus nRF5340DK makete. Taip būtų išbandomas vietos nustatymas realiu laiku.
5. Prieš atliekant dirbtinių neuroninių tinklų apmokymą, būtina apdoroti duomenų rinkinį, kad būtų pašalintos anomalijos ir išvengta didesnių matavimų ir vietos nustatymo paklaidų.

LITERATŪROS ŠALTINIAI

1. *Applications for Indoor Positioning* | *infsoft*. (n.d.-b). Infsoft. Prieiga per internetą: <https://www.infsoft.com/basics/applications/>
2. Favendo. (n.d.). *Indoor Navigation* | *Favendo*. Favendo. Prieiga per internetą: <https://www.favendo.com/wayfinding>
3. *Amazing indoor maps solutions with MapsIndoors*. (n.d.). Prieiga per internetą: <https://www.mapspeople.com/mapsindoors>
4. Kia, G., Ruotsalainen, L., & Talvitie, J. (2022). Toward accurate indoor positioning: an RSS-Based fusion of UWB and Machine-Learning-Enhanced WiFi. *Sensors*, 22, 3204. <https://doi.org/10.3390/s22093204>
5. Koutris, A., Siozos, T., Kopsinis, Y., Pikrakis, A., Merk, T., Mahlig, M., Papaharalabos, S., & Karlsson, P. (2022). Deep Learning-Based Indoor Localization using Multi-View BLE Signal. *Sensors*, 22, 2759. <https://doi.org/10.3390/s22072759>
6. Schuldt, C., Shoushtari, H., Hellweg, N., & Sternberg, H. (2021). L5IN: Overview of an indoor navigation pilot project. *Remote Sensing*, 13, 624. <https://doi.org/10.3390/rs13040624>
7. *Index of IFC/RELEASE/IFC4*. (n.d.). Prieiga per internetą: <https://standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC4/>
8. Pao, C. (2022, October 31). *What is Pedestrian Dead Reckoning and why is it important?* | *CEVA Experts Blog*. CEVA's Experts Blog. <https://www.ceva-dsp.com/ourblog/pedestrian-dead-reckoning/>
9. Ashraf, I., Hur, S., & Park, Y. (2020). Smartphone Sensor based indoor Positioning: current status, opportunities, and future challenges. *Electronics*, 9, 891. <https://doi.org/10.3390/electronics9060891>
10. *BLE Beacons in CiscoWave 2 Access Points*. Prieiga per internetą: https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/wireless/controller/9800/16-12/config-guide/b_wl_16_12_cg/ble-beacon.pdf
11. Rubio-Sandoval, J. I., Martínez-Rodríguez, J., López-Arévalo, I., Ríos-Alvarado, A. B., Rodríguez-Rodríguez, A. J., & Vargas-Requena, D. T. (2021). An indoor navigation methodology for mobile devices by integrating augmented reality and semantic web. *Sensors*, 21, 5435. <https://doi.org/10.3390/s21165435>
12. Mendoza-Silva, G. M., Matey-Sanz, M., Torres-Sospedra, J., & Huerta, J. (2019). BLE RSS Measurements Dataset for research on accurate indoor positioning. *Data*, 4, 12. <https://doi.org/10.3390/data4010012>

13. *Web standards*. (n.d.). W3C. Prieiga per internetą:
<https://www.w3.org/standards/semanticweb/>
14. Mehta, Parth & Shah, Hetasha & Shukla, Soumya & Verma, Saurav. (2015). *A Review on Algorithms for Pathfinding in Computer Games*.
15. Magsi, S. A., Saad, M. N. M., Khir, M. H. M., Witjaksono, G., Siddiqui, M. A., & Sameer, L. (2021). *Wi-Fi based indoor navigation system for campus directions*.
<https://doi.org/10.1109/iciias49414.2021.9642629>
16. Hisham, A. N. N., Ng, Y. H., Tan, C. K., & Chieng, D. (2022). Hybrid Wi-Fi and BLE Fingerprinting Dataset for Multi-Floor Indoor Environments with Different Layouts. *Data*, 7, 156. <https://doi.org/10.3390/data7110156>
17. Bharath Sudharsan, John G. Breslin, and Muhammad Intizar Ali. (2020). RCE-NN: a five-stage pipeline to execute neural networks (CNNs) on resource-constrained IoT edge devices. In Proceedings of the 10th International Conference on the Internet of Things (IoT '20). *Association for Computing Machinery*, 5, 1–8.
<https://doi.org/10.1145/3410992.3411005>
18. *Core specification | Bluetooth® Technology website*. (2023, May 3). Bluetooth® Technology Website. Prieiga per internetą:
<https://www.bluetooth.com/specifications/specs/core-specification-5-1/>
19. *BLE Advertising channels | BLE Data channels list*. (n.d.). <https://www.rfwireless-world.com/Terminology/BLE-Advertising-channels-and-Data-channels-list.html>
20. Cortesi, S., Vogt, C., & Magno, M. (2023). Comparison between an RSSI- and an MCPD-Based BLE Indoor Localization System. *Computers*, 12(3), 59.
<https://doi.org/10.3390/computers12030059>
21. Zand, P., Romme, J., Govers, J., Pasveer, F., & Dolmans, G. (2019). A high-accuracy phase-based ranging solution with Bluetooth Low Energy (BLE). *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC) 2019*.
<https://doi.org/10.1109/wcnc.2019.8885791>
22. Ólafsdóttir, H., Ranganathan, A., & Čapkun, S. (2017). On the Security of Carrier Phase-Based Ranging. In *Lecture notes in computer science* (pp. 490–509).
https://doi.org/10.1007/978-3-319-66787-4_24
23. *NRF5340-DK-PB-10*. (n.d.). nRF5340. Prieiga per internetą:
<https://www.nordicsemi.com/-/media/Software-and-other-downloads/Product-Briefs/nRF5340-DK-PB-10.pdf>

24. *Nordic Semiconductor Infocenter*. (n.d.). Prieiga per internetą:
https://infocenter.nordicsemi.com/index.jsp?topic=%2Fug_nrf5340_dk%2FUG%2Fd%2Fsignal_switches.html
25. *Introduction — nRF Connect SDK 2.6.99 documentation*. (n.d.). Prieiga per internetą:
https://developer.nordicsemi.com/nRF_Connect_SDK/doc/latest/nrf/index.html
26. *Bluetooth: nRF Distance Measurement with Bluetooth LE discovery — nRF Connect SDK 2.6.99 documentation*. (n.d.). Prieiga per internetą:
https://developer.nordicsemi.com/nRF_Connect_SDK/doc/latest/nrf/samples/bluetooth/nrf_dm/README.html
27. Brweb. (n.d.). *P.1238: Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 450 GHz*. Prieiga per internetą: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.1238>

PRIEDAI

1 priedas

Realūs atstumai tarp matavimo taškų ir stotelių (24 zonos)

Stotelė	Matavimo taškas	Atstumas (cm)	Stotelė	Matavimo taškas	Atstumas (cm)
1	1	811	2	13	192
1	2	783	2	14	265
1	3	783	2	15	384
1	4	811	2	16	519
1	5	677	2	17	332
1	6	643	2	18	379
1	7	643	2	19	470
1	8	677	2	20	586
1	9	546	2	21	473
1	10	503	2	22	507
1	11	503	2	23	578
1	12	546	2	24	676
1	13	422	3	1	519
1	14	364	3	2	387
1	15	364	3	3	273
1	16	422	3	4	211
1	17	312	3	5	480
1	18	228	3	6	333
1	19	228	3	7	189
1	20	312	3	8	75
1	21	237	3	9	480
1	22	106	3	10	333
1	23	106	3	11	189
1	24	237	3	12	75
2	1	229	3	13	520
2	2	293	3	14	388
2	3	404	3	15	275
2	4	535	3	16	213
2	5	90	3	17	592
2	6	203	3	18	479
2	7	345	3	19	394
2	8	491	3	20	353
2	9	52	3	21	685
2	10	190	3	22	591
2	11	337	3	23	524
2	12	486	3	24	494