



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

LOKALIZACE POLOHY A POČÍTÁNÍ OSOB S VYUŽITÍM RADIOVÝCH SÍTÍ

LOCATING AND COUNTING PEOPLE USING RADIO NETWORKS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Lukáš Varanai

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Soběslav Valach

BRNO 2024

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Automatizační a měřicí technika**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Lukáš Varanai

ID: 232162

Ročník: 3

Akademický rok: 2023/24

NÁZEV TÉMATU:

Lokalizace polohy a počítání osob s využitím radiových sítí

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je tvorba softwarového vybavení pro mobilní telefony za účelem lokalizace polohy osob v prostoru nákupních center a jiných složitých aglomeracích. Především by se mělo jednat o využití RF lokalizace za pomoci standardů typu Bluetooth nebo WiFi. Ze získaných dat bude třeba vytěžit informace o pohybu / poloze zařízení, počtu průchodu monitorovanými stanovišti a odhadem počtu osob, které prošly daným stanovištěm za jednotku času.

- 1) Prostudujte principy a techniky monitorování pohybu osob pomocí mobilních zařízení využívajících standardu BT a WiFi.
- 2) Nastudujte nástroje potřebné pro softwarovou realizaci (knihovny, frameworks).
- 3) Vytvořte aplikaci pro monitorování polohy, ověřte její funkci.
- 4) Stanovte charakteristiky měření s ohledem na chyby a otestujte v reálných podmínkách.
- 5) Analyzujte spolehlivost, funkčnost vzniklého řešení a navrhňte další zlepšení.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

<https://www.raspberrypi.org/>

Stone R.; 30-Aug-2019: RASPBERRY PI 4 COMPLETE MANUAL: A Step-by-Step Guide to the New Raspberry Pi 4 and Set Up Innovative Projects

<https://www.analog.com>

Termín zadání: 5.2.2024

Termín odevzdání: 22.5.2024

Vedoucí práce: Ing. Soběslav Valach

Ing. Miroslav Jirgl, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Táto bakalárska práca sa zaoberá návrhom a realizáciou aplikácie pre lokalizáciu osôb v interiéroých priestoroch. Práca obsahuje prehľad dostupných technológií, metód, hardvérových možností užívateľského zariadenia a programovacích jazykov pre účely tvorby aplikácie pre mobilné telefóny. Následne prebehol návrh a realizácia aplikácie pre lokalizáciu osôb a testovacie merania. V závere práce je zhrnutie funkčnosti realizovanej aplikácie a návrhy na jej budúce zlepšenie.

Kľúčové slová

Wi-Fi, Bluetooth, pásmo 2,4 GHz, pásmo 5 GHz, monitoring, rádiové frekvencie, BLE, Flutter, MATLAB, trilaterácia, filtrácia, lokalizácia,

Abstract

The aim of this bachelor thesis is the design and implementation of an application for locating people in indoor spaces. The thesis provides an overview of the available technologies, methods, user device hardware options and programming languages for the purpose of creating a mobile phone application. Subsequently, the design and implementation of an application for person localization and test measurements is discussed. The thesis concludes with a summary of the functionality of the implemented application and suggestions for future improvements.

Keywords

Wi-Fi, Bluetooth, 2.4 GHz band, 5 GHz band, monitoring, radio frequencies, BLE, Flutter, MATLAB, trilateration, filtering, localization

Bibliografická citace

VARANAI, Lukáš. *Lokalizace polohy a počítání osob s využitím radiových sítí* [online]. Brno, 2024 [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/160020>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce Soběslav Valach.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	Lukáš Varanai
VUT ID studenta:	232 162
Typ práce:	Bakalárska práca
Akademický rok:	2023/24
Téma závěrečné práce:	Lokalizace polohy a počítání osob s využitím rádiových sítí

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 22. května 2024

podpis autora

Pod'akovanie

Ďakujem vedúcemu semestrálnej práce Ing. Soběslavovi Valachovi za metodickú, pedagogickú a odbornú pomoc, ako aj cenné rady počas spracovania mojej bakalárskej práce.

V Brne dňa: 22. mája 2024

podpis autora

Obsah

ZOZNAM OBRÁZKOV	9
ÚVOD	10
1. OBOZNÁMENIE S PROBLEMATIKOU	11
1.1 RÁDIOFREKVENČNÉ TECHNOLOGIE	11
1.1.1 <i>Pásmo 2,4 GHz</i>	11
1.1.2 <i>Pásmo 5 GHz</i>	11
1.1.3 <i>Wi-Fi</i>	11
1.1.4 <i>Ultra-wideband(UWB)</i>	12
1.1.5 <i>Bluetooth [4] [5]</i>	12
1.1.6 <i>Bluetooth Low Energy (BLE) [6]</i>	12
1.1.7 <i>Global Positioning System (GPS)</i>	13
1.2 URČOVANIE POLOHY POMOCOU KAMIER	13
1.2.1 <i>Princíp</i>	13
1.2.2 <i>Metódy určovania polohy pomocou kamery</i>	14
1.3 METÓDY URČOVANIA POLOHY POMOCOU BLE	14
1.3.1 <i>Triangulácia</i>	14
1.3.2 <i>Trilaterácia</i>	15
1.3.3 <i>Fingerprinting[11]</i>	15
1.3.4 <i>Angle of Arival (AoA)</i>	15
1.3.5 <i>Angle of Departure (AoD)</i>	15
1.4 DOSTUPNÉ PROGRAMOVACIE JAZYKY PRE VÝVOJ MOBILNÝCH APLIKÁCIÍ	16
1.4.1 <i>Swift</i>	16
1.4.2 <i>Kotlin</i>	16
1.4.3 <i>Java</i>	16
1.4.4 <i>JavaScript</i>	17
1.4.5 <i>Dart</i>	17
1.5 DOSTUPNÉ FRAMEWORKY PRE VÝVOJ APLIKÁCIÍ	17
1.5.1 <i>React Native</i>	17
1.5.2 <i>Flutter</i>	18
1.6 HARDVÉROVÉ MOŽNOSTI UŽÍVATEĽSKÉHO ZARIADENIA	18
1.6.1 <i>Mobilný telefón s operačným systémom Android</i>	18
1.6.2 <i>Mobilný telefón s operačným systémom iOS</i>	18
1.7 ZHRNUTIE	18
2. TEORETICKÝ ÚVOD	20
2.1 BLE	20
2.1.1 <i>Nastavenie spojenia [20]</i>	20
2.1.2 <i>Štruktúra paketu [20]</i>	21
2.1.3 <i>Architektúra transportných entít [20]</i>	22
2.2 METÓDA TRILATERÁCIE	23
2.2.1 <i>Výpočet vzdialenosti pomocou hodnoty RSSI</i>	23
2.2.2 <i>Princíp fungovania</i>	24
2.2.3 <i>Výpočet polohy užívateľského zariadenia [22]</i>	24

3.	RIEŠENIE	26
3.1	SLEDOVANIE KOMUNIKÁCIE MEDZI ZARIADENIAMI.....	26
3.1.1	<i>Inicializácia zariadenia nRF52840.....</i>	26
3.1.2	<i>Inštalácia a príprava programu Wireshark.....</i>	27
3.1.3	<i>Kontrola komunikácie medzi mobilným telefónom a BLE modemom.....</i>	28
3.2	SOFTVÉROVÉ RIEŠENIE	28
3.2.1	<i>Navigačné menu.....</i>	29
3.2.2	<i>Tvorba mapy.....</i>	30
3.2.3	<i>Vykresľovanie polohy na displeji.....</i>	30
3.3	MERANIE POLOHY	31
3.3.1	<i>Zber meraných dát.....</i>	31
3.3.2	<i>Meranie vo vonkajších priestoroch.....</i>	32
3.3.3	<i>Príprava vonkajšieho priestoru na meranie</i>	32
3.3.4	<i>Kalibrácia meracieho systému.....</i>	33
3.3.5	<i>Sledovanie pohybu.....</i>	34
3.4	SPRACOVANIE NAMERANÝCH DÁT	34
3.4.1	<i>Spracovanie dát pomocou MATLABu.....</i>	35
3.4.2	<i>Vykresľovanie vypočítaných hodnôt</i>	35
3.4.3	<i>Filtrácia hodnôt pomocou plávajúceho priemeru.....</i>	36
3.5	VÝSLEDKY SPRACOVANIA DÁT.....	37
3.5.1	<i>Výsledky meraní.....</i>	37
3.5.2	<i>Návrh riešenia problémov</i>	40
4.	VYLEPŠENIA PRE PRAKTICKÉ POUŽITIE	42
4.1	DISTRIBÚCIA APLIKÁCIE.....	42
4.2	ZÍSKAVANIE POTREBNÝCH DÁT Z DATABÁZY	42
5.	ZÁVER.....	43
	LITERATÚRA	45
	ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK	47
	ZOZNAM PRÍLOH	48

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obrázok 1: Signalizácia LMP [20]	20
Obrázok 2: Štruktúra paketu [20]	21
Obrázok 3: Prehľad entít a hierarchie dopravnej architektúry [20]	22
Obrázok 4: Princíp trilaterácie [22]	24
Obrázok 5: Sniffer nRF52840	27
Obrázok 6: Interface výberu komunikačných kanálov aplikácie Wireshark	27
Obrázok 7: Ukážka paketov pri započatí párovania	28
Obrázok 8: Ukážka posledných paketov pred ukončením komunikácie	28
Obrázok 9: Navigačné menu	29
Obrázok 10: Obrazovka „Map“	30
Obrázok 11: Diagram postupu merania	31
Obrázok 12: Pôdorys meracej plochy	32
Obrázok 13: Fotografia priestoru merania	33
Obrázok 14: Ukážka trajektorií merania	34
Obrázok 15: Príklad vykreslenej trajektórie	36
Obrázok 16: Ukážka filtrácie pomocou plávajúceho priemeru	37
Obrázok 17: trajektória z vrcholu C do vrcholu A	38
Obrázok 18: trajektória v tvare diamantu proti v protismere hodinových ručičiek	39
Obrázok 19: trajektória po diagonále z vrcholu A do vrcholu C vo vnútorných priestoroch	40

ÚVOD

Cieľom tejto bakalárskej práce je navrhnuť a implementovať softvérový systém, ktorý je schopný sledovať pohyb osôb a ich mobilných zariadení v interiéroch priestoroch. Z dôvodu veľkého množstva rušenia a odrazov bolo meranie a testovanie systému vykonané primárne v exteriéri. Použitím pokročilejších metód filtrovania bude v budúcnosti možné tento systém využiť v rôznych aplikáciách pre účely navigácie a lokalizácie užívateľa. Tieto dáta môžu následne slúžiť napríklad na zefektívnenie umiestnenia rôznych produktov v supermarketoch, čím sa dosiahne vyšších ziskov. Práca pozostáva z viacerých častí.

Úvod práce obsahuje prehľad dostupných hardvérových možností užívateľského zariadenia, programovacích jazykov, rádiových technológií, metódy určovania polohy, ako aj popis výberu z týchto možností.

Druhá časť oboznamuje čitateľa s technickými detailmi komunikácie zariadení pomocou Bluetooth a BLE. Nasleduje popis metód určovania vzdialenosti medzi jednotlivými zariadeniami využívajúcimi BLE a taktiež vysvetlenie metódy trilaterácie, ako aj odvodenie vzťahov pre určenie súradníc v priestore.

Následne prebehol návrh a realizácia aplikácia pre určovanie polohy. Bolo navrhnuté prostredie, v ktorom prebehli testovacie merania. Pokračovalo sa kalibráciou systému pomocou softvérového rozhrania MATLAB. Taktiež prebehlo spracovanie nameraných dát a ich vykreslenie pomocou MATLABu. Praktická časť je zakončená porovnaním zobrazenia polohy nameraných hodnôt proti hodnotám, ktoré boli filtrované plávajúcim priemerom, a návrhom riešenia nepresností pri určovaní polohy.

Záver práce bol venovaný návrhu možných vylepšení a riešení pre zlepšenie funkcie vytvoreného systému. Taktiež budú popísané možnosti distribúcie takejto aplikácie.

1. OBOZNÁMENIE S PROBLEMATIKOU

Existuje mnoho spôsobov a metód, ako lokalizovať či už objekty, alebo osoby. Zatiaľ čo technológie ako GPS poskytujú relatívne presné údaje o polohe v exteriéri, vnútorné priestory predstavujú problém kvôli rôznym prekážkam a interferenciám.

Na lokalizáciu vo vnútorných priestoroch je možné použiť rôzne prístupy navrhnuté tak, aby poskytovali spoľahlivé dáta o polohe v rámci budov. Jedná sa o rádiových frekvenčné technológie, ako napríklad UWB, Bluetooth alebo Wi-Fi, ktoré sú cenovo dostupné a veľmi rozšírené, ako aj spracovanie obrazových vstupov kamier a následné vyhodnocovanie napríklad pomocou neurónovej siete.

Aj keď je spôsobov a metód na určovanie naozaj veľa, tak táto kapitola bude zameraná na najbežnejšie metódy a spôsoby, ktoré sa používajú v dnešnej dobe.

1.1 Rádiových frekvenčné technológie

Táto podkapitola sa zameriava na rádiových frekvenčné technológie využívajúce frekvenčné pásma 2,4 GHz a 5GHz. Takýchto technológií existuje mnoho, no táto práca je venovaná hlavne Wi-Fi a Bluetooth z dôvodu ich rozšírenosti.

1.1.1 Pásmo 2,4 GHz

Pravdepodobne najpoužívanejším pásmom ISM (Industrial, Scientific, Medical) je prenosové pásmo od 2,4-2,4835 GHz. Toto pásmo vzniklo rovnako, ako aj väčšina pásiem ISM ešte v roku 1985, aby na ňom mohli koncoví užívatelia vysielat' bez potreby licencií. Tieto rozsahy boli navrhnuté tak, aby nezasahovali do už existujúcich a používaných pásiem. [1]

1.1.2 Pásmo 5 GHz

Udávaný rozsah pásma 5 GHz je 5,180-5,850 GHz. Výhodou 5 GHz oproti 2,4 GHz je vyššia prenosová rýchlosť a menšia obsadenosť pásma, keďže má väčšiu šírku pásma a tým pádom aj viac kanálov. Jeho veľkou nevýhodou je nízka priestupnosť stien a objektov a taktiež nekompatibilita so staršími zariadeniami.

1.1.3 Wi-Fi

Jedná sa o bezdrôtovú sieťovú technológiu, ktorá umožňuje zariadeniam, ako sú počítače, mobilné telefóny, kamery a iným, pripojenie na internet. Vďaka tomu si tieto zariadenia vedia medzi sebou vymieňať informácie a vytvárať tak sieť. Technickú stránku definuje norma IEEE 802.11, ktorá popisuje protokoly pre komunikáciu s bezdrôtovými zariadeniami s podporou Wi-Fi vrátane bezdrôtových smerovačov a prístupových bodov. Prístupové body podporujú niekoľko IEEE štandardov. [2]

Najbežnejšími používanými frekvenčnými pásmami Wi-Fi sú 2,4 GHz a 5 GHz. Pri pásme 2,4 GHz je výhodou vyšší dosah a menší útlm objektov a stien. Pásmo 5 GHz má

vyššiu prenosovú rýchlosť a kanály sa vďaka väčšej šírke pásma neprekrývajú, čo má za následok menšie zarušenie. [3]

1.1.4 Ultra-wideband(UWB)

Ultra-wideband je protokol zaoberajúci sa bezdrôtovou komunikáciou s krátkym dosahom. Využíva vyššie frekvencie ako Wi-Fi a Bluetooth a to v rozsahu od 3,1 GHz až do 10,6 GHz. Vďaka veľkým šírkam pásiem (500 MHz a viac) môžeme pomocou krátkych impulzov určiť vzdialenosť medzi zariadeniami s presnosťou na centimetre. Dokáže sledovať pohyb zariadení v reálnom čase a určiť jeho vzájomnú polohu. Vďaka tomu môžeme v praxi napríklad otvoriť bránu alebo garážové dvere, keď sa priblížime autom, pretože zariadenie vyhodnotí, že sa dve zariadenia k sebe približujú. [4]

Akonáhle sa priblížia dve zariadenia využívajúce tento štandard, spustia takzvaný „ranging“. Ranging slúži na určenie času letu v angličtine Time of Flight(ToF), teda času, ktorý uplynie medzi odoslaním výzvy a prijatím odpovede. [4]

1.1.5 Bluetooth [4] [5]

Bluetooth je, rovnako ako UWB a Wi-Fi, štandard pre bezdrôtovú komunikáciu na krátky dosah. Medzi jeho prednosti patrí nízka spotreba energie a nízke náklady. Je rozšírený v mnohých zariadeniach ako sú napríklad mobilné telefóny, klávesnice a myši, elektrické zámky v automobiloch atď. Komunikačná sieť Bluetooth sa skladá z piconetov. Každý piconet je zhluk maximálne ôsmich Bluetooth zariadení. Funguje na komunikačnom princípe master/slave, kde vždy len jedno zariadenie je master a ostatné sú slave. Master je zariadenie, ktoré môže komunikovať s ľubovoľným slave zariadením a taktiež povoľuje a zakazuje komunikáciu. Slave účastníci môžu komunikovať len ak im to dovolí master, no nikdy nie medzi sebou.

Bluetooth komunikácia prebieha na frekvenčnom pásme 2,4 GHz. Predpisy FCC(Federal Communication Commission) obmedzujú jej maximálny vysielač výkon na 1 W a vyžadujú, aby sa aspoň 75 zo 79 kanálov používalo pseudonáhodným spôsobom. Nominálna šírka každého pásma je potom približne 1 MHz. Vysielače signálu využívajú všetkých 79 kanálov, medzi ktorými preskakujú približne 1600 krát za sekundu a majú dosah približne 10 metrov. Používajú prenos paketov založený na dopytovaní. Komunikácia prebieha medzi nadriadeným a podriadeným zariadením pomocou duplexu, kde master vysiela iba v párnych časových slotoch a slave iba v nepárnych. V každom časovom slote sa využíva iný frekvenčný kanál.

1.1.6 Bluetooth Low Energy (BLE) [6]

Technológia BLE, nazývaná aj Bluetooth 4.0, sa zameriava, ako aj z názvu vyplýva, na Bluetooth s nižšou spotrebou energie. Rovnako ako aj technológia Bluetooth pracuje v pásme 2,4 GHz. No na rozdiel od pôvodnej technológie pripojenie trvá len niekoľko milisekúnd, počas ktorých si zariadenia vymenia malé množstvo údajov. Z tohto dôvodu BLE nie je vhodný na prenášanie veľkého množstva dát, ako napríklad pre počúvanie

hudby, no je ideálny pre aplikácie, kde je potrebné periodicky vymieňať malé množstvo údajov.

Bluetooth a BLE sa líšia z hľadiska poskytovaných možností, aj bežného používania. Ako už bolo spomenuté, technológia BLE bola navrhnutá s cieľom minimalizovať spotrebu energie pri použití Bluetooth. Zlepšenie výdrže batérie spočíva v tom, že zariadenie sa dokáže prepnúť do režimu spánku až do času, kedy je potrebné uskutočniť prenos údajov. Na druhú stranu, Bluetooth je vždy zapnutý alebo vypnutý. BLE taktiež prenáša dáta v oveľa menšom množstve, čo opäť znamená, že spotrebuje menej energie ako tradičný Bluetooth.

Ďalším dôležitým rozdielom je prenosová rýchlosť. Bluetooth má prenosovú rýchlosť do 2,1 Mb/s, zatiaľ čo BLE len do 1 Mb/s. Tento rozdiel je zdôvodniteľný tým, že Bluetooth bol navrhnutý pre aplikácie s účelom nepretržitého streamovania dát. Bol navrhnutý tak, aby si užívatelia mohli v čo najkratšom čase vymieňať napríklad videá a iné údaje z jedného zariadenia do druhého. Naopak, BLE bol navrhnutý s víziou minimalizácie spotreby energie a tým pádom maximalizácie výdrže batérie v zariadeniach, kde nie je plynulá výmena dát až taká dôležitá.

Aj keď má Bluetooth vyššiu prenosovú rýchlosť, BLE má nižšiu mieru latencie. Latencia je miera toho, ako dlho pripojenému zariadeniu trvá zareagovať na vstup užívateľa. Aj tento rozdiel dáva zmysel, keď vezmeme do úvahy, že Bluetooth bol navrhnutý na čo najrýchlejšie odosielanie údajov, no nezáležalo až tak na tom, ako rýchlo zareaguje na pokyn užívateľa. BLE však bol čiastočne navrhnutý na iné použitie, než je jednoduché vysielanie údajov pre spotrebiteľov.

1.1.7 Global Positioning System (GPS)

Satelitná navigácia je založená na globálnej sieti satelitov, ktoré vysielajú rádiové signály zo strednej obežnej dráhy Zeme. Prijímač používa časový rozdiel medzi vyslaním signálu a prijatým signálom, vďaka čomu dokáže vypočítať vzdialenosť. Následne pomocou metódy triangulácie signálov z viacerých satelitov určí približnú polohu. Tieto služby poskytujú užívateľom presnosť približne 5 až 7 metrov.[7]

Pre účely tejto bakalárskej práce však nie je tento systém vhodný z dôvodu jeho nedostatočnej presnosti. Taktiež tento spôsob lokalizácie neumožňuje monitorovanie polohy v priestoroch budov a skladov.

1.2 Určovanie polohy pomocou kamier

1.2.1 Princíp

Pri určovaní polohy za pomoci kamier sa využívajú geometrické vlastnosti obrazu. Keď kamera zachytáva obraz scény, každý bod objektu sa zobrazuje na obrazovom snímku v určitom mieste v závislosti od jeho vzdialenosti a uhla vzhľadom ku kamere. Tieto geometrické vzťahy neskôr môžeme použiť na analýzu a interpretáciu polohy. [8]

1.2.2 Metódy určovania polohy pomocou kamery

Existuje mnoho metód pre určovanie polohy pomocou kamier. V tejto podkapitole však budú spomenuté len tie najbežnejšie.

Stereo vision

Táto metóda využíva dve alebo viacero kamier umiestnených vedľa seba v známej vzdialenosti. Na základe rozdielov vo vzdialenosti je možné dopočítať polohu objektu.

Structure from Motion

Táto technika sa zaoberá rekonštrukciou trojrozmerného modelu scény za pomoci dvojrozmerných obrázkov získanými kamerami. Následne sa určuje poloha objektu v tomto priestore.

Feature matching

Jedná sa o metódu strojového videnia, pri ktorej sa detegujú dôležité body a hrany. Tieto objekty sú následne popísané vektormi, ktoré poskytujú informácie o jeho okolí a vlastnostiach. Ďalším krokom je porovnanie po sebe idúcich obrázkov, vďaka čomu môžeme určiť polohu daných objektov.

Time of Flight

Metóda Time of Flight, tiež známa pod skratkou TOF, je metóda, ktorá slúži na určovanie vzdialenosti. Funguje tak, že vysielateľ vyšle signál, ktorý sa odrazí od objektu, ktorého vzdialenosť chceme merať. Následne sa odrazený signál prijme na prijímači a pomocou času, ktorý uplynul medzi vyslaním a prijatím signálu vieme určiť vzdialenosť daného objektu.

Určovanie polohy technológiou Lidar

Lidar (Light Detection and Ranging) je technológia, ktorá využíva odrazu vyslaných laserových lúčov, ktoré následne príma, a tým vytvára podrobné mapy priestoru. Ak toto zariadenie pracuje s preddefinovanou mapou, tak Lidar môže porovnávať aktuálne získané dáta s preddefinovanou mapou, a tak určiť polohu objektov. Táto technológia je v súčasnej dobe veľmi obľúbená v oblasti autonómneho riadenia automobilov a robotiky.

1.3 Metódy určovania polohy pomocou BLE

1.3.1 Triangulácia

Triangulácia je geodetická metóda, ktorá meria uhly v trojuholníku vytvorenom tromi kontrolnými bodmi. Pomocou trigonometrie a nameranej dĺžky len jednej strany sa vypočítajú ostatné vzdialenosti v trojuholníku. Každá z vypočítaných vzdialeností sa potom použije ako jedna strana v ďalšom trojuholníku na výpočet vzdialeností k ďalšiemu bodu, ktorý zase môže začať ďalší trojuholník.[9]

1.3.2 Trilaterácia

Na rozdiel od triangulácie, trilaterácia meria vzdialenosti a nie uhly. Na začiatku sa meraná oblasť rozdelí na trojuholníky a zmerajú sa dĺžky všetkých strán trojuholníkov. Môžu to byť aj mnohoúhelníky, štvoruholníky alebo ich ľubovoľná kombinácia. Trojuholníky a súradnice ich vrcholov sú stanovené s využitím trigonometrie. Táto metóda nevyžaduje priame meranie uhlov. Podobnejší popis tejto metódy prebehne v nasledujúcej kapitole. [10]

1.3.3 Fingerprinting[11]

Fingerprinting je bežnou technológiou na určovanie polohy používateľa vo vnútri budov. Táto technika sa spolieha na údaje o sile signálu nazývané RSSI (Received Signal Strength Indication), ktoré predstavujú vzdialenosť každého majáka alebo snímača od zariadenia používateľa.

Tento prístup spočíva v postupnom prechádzaní miestom konania a zaznamenávaní signálov v každom bode. Tým, že sa miesto konania transformuje na mriežku, je možné vytvoriť databázu signálov s rôznymi intenzitami. Táto databáza potom umožňuje priradiť konkrétne intenzity signálov k jednotlivým lokalitám v budove.

Týmto spôsobom môže systém odhadnúť aktuálnu polohu zariadenia porovnaním sily signálu (RSSI) so zapísanými dátami. Výpočet vzdialenosti medzi majákom alebo senzorom a používateľským zariadením je založený na údajoch o „otlačkoch“ z počiatočného nastavenia systému.

1.3.4 Angle of Arrival (AoA)

Technológia Angle of Arrival sa využíva na detekciu smeru, z ktorého zariadenie vysiela. Samotné zariadenie vysiela signál prostredníctvom jednej antény, zatiaľ čo prijímacie zariadenie disponuje sústavou viacerých antén. Pri prechode signálu cez prostredie prijímacie zariadenie zisťuje fázové rozdiely, ktoré vznikajú v dôsledku rôznych vzdialeností medzi vysielačom a jednotlivými anténami prijímača. Na základe týchto údajov sa následne vypočíta konkrétny smer signálu, čo vedie k presnému sledovaniu polohy zariadenia. [12]

1.3.5 Angle of Departure (AoD)

Na rozdiel od AoA má vysielač pri metóde AoD viacero antén, vďaka ktorým komunikuje s prijímačom. Prijímač má len jednu anténu ktorá slúži na príjem všetkých vysielaných snímačov. Prijímač následne vyhodnocuje fázové posuny medzi prichádzajúcimi signálmi a vďaka tomu dokáže určiť približnú polohu zariadenia. Vysielač AoD je vždy pevný zatiaľ čo prijímačom môže byť napríklad mobilný telefón. [21]

1.4 Dostupné programovacie jazyky pre vývoj mobilných aplikácií

Existuje mnoho programovacích jazykov, ktoré slúžia ako nástroje pre tvorbu softvérových riešení, a ich výber často zohľadňuje špecifické potreby, preferencie a charakteristiky daného projektu. Tieto jazyky sa vyvíjali v reakcii na rastúce technologické výzvy a súčasné trendy v oblasti informačných technológií. Táto kapitola sa bude zaoberať popisom niektorých dostupných programovacích jazykov.

1.4.1 Swift

Swift je výkonný a intuitívny programovací jazyk pre všetky platformy Apple. Je nástupcom jazykov C, C++ a Objective-C. Obsahuje nízkoúrovňové primitívy, ako sú typy, riadenie toku a operátory. Poskytuje aj objektovo orientované funkcie, ako sú triedy, protokoly a generické prvky. Tento programovací jazyk je navrhnutý tak, aby bol vhodný aj pre úplných začiatočníkov v oblasti programovania. Je však navrhnutý hlavne ohľadom na bezpečnosť, preto sa premenné pred použitím vždy inicializujú, polia a celé čísla sa kontrolujú na pretečenie, pamäť sa automaticky spravuje a vynucovanie výhradného prístupu do pamäte chráni pred mnohými programátorskými chybami.[13]

1.4.2 Kotlin

Kotlin je programovací jazyk, ktorý bol vyvinutý spoločnosťou JetBrains a oficiálne podporovaný Googlom ako alternatíva k jazyku Java pre vývoj aplikácií pre platformu Android. Kotlin je staticky typovaný jazyk, čo znamená, že typy premenných sú známe v čase kompilácie, čo prispieva k vysokej bezpečnosti a efektívnosti kódu. Jednou z významných vlastností Kotlinu je jeho jednoduchosť a čitateľnosť. Jazyk podporuje funkcionálne programovanie a obsahuje moderné konštrukcie ako lambda funkcie, rozšírenia alebo deštruktúrované atribúty, čo umožňuje písať kompaktný a zrozumiteľný kód. V súčasnej dobe sa teší veľkej popularite, keďže ho využíva približne 60% programátorov aplikácií pre systém Android. [14]

1.4.3 Java

Java je objektovo orientovaný programovací jazyk, ktorý bol pôvodne vyvinutý v roku 1995 spoločnosťou Sun Microsystems a neskôr zakúpený firmou Oracle. Je známy svojou povahou nezávislou na platforme, čo znamená, že kód napísaný v Jave je kompilovaný do tzv. "bytecode", ktorý je následne interpretovaný na rôznych platformách pomocou Java Virtual Machine (JVM). Java sa stala jedným z najpopulárnejších programovacích jazykov na svete vďaka svojej univerzálnosti a širokému ekosystému nástrojov a knižníc. Tento programovací jazyk môžeme vidieť v množstve desktopových, webových, mobilných, no aj mnoho iných aplikáciách. [15]

1.4.4 JavaScript

JavaScript je multiparadigmatický, dynamický programovací jazyk s vlastnosťami ako typy, operátory, integrované štandardné objekty a metódy. Jeho syntax je inšpirovaná jazykmi Java a C a mnoho ich konceptov je zahrnutých aj v JavaScripte. V jazyku JavaScript je možné využívať objektovo orientovaný prístup prostredníctvom objektových prototypov a tried. Okrem toho podporuje aj funkcionálne programovanie, pričom funkcie sú vnímané ako objekty prvej triedy, ktoré je možné jednoducho definovať pomocou výrazov a manipulovať s nimi rovnako ako s inými objektami. [16]

1.4.5 Dart

Jedná sa o objektovo orientovaný programovací jazyk, ktorý vyvinula spoločnosť Google. Hlavným cieľom pri vytváraní Dartu bolo poskytnúť jednoduchý, rýchly a flexibilný jazyk vhodný na vývoj webových a mobilných aplikácií. Dart je kompilovaný jazyk, čo znamená, že kód sa pred spustením prekladá do strojového kódu, a tým prispieva k jeho vysokému výkonu. Dart tiež ponúka bohatú sadu knižníc a nástrojov, vrátane frameworku Flutter, ktorý je populárny pre vývoj multiplatformových aplikácií. [17]

1.5 Dostupné frameworky pre vývoj aplikácií

Frameworky sú kľúčovým stavebným blokom, uľahčujúce a zefektívňujúce proces vývoja aplikácií. Pod pojmom framework si môžeme predstaviť preddefinované štruktúry a nástroje, ktoré poskytujú programátorom základné komponenty a funkcie, ktoré im umožňujú sústrediť sa na implementáciu špecifickejších častí projektov namiesto opakovaného písania kódu od začiatku.

1.5.1 React Native

Jedná sa o open-source framework vyvinutý spoločnosťou Facebook, ktorý využíva programovacie jazyky JavaScript a React. Hlavnou výhodou React Native je schopnosť vytvárať multiplatformové aplikácie s vysokým výkonom a natívnym vzhľadom, čo znamená, že aplikácie sú optimalizované pre špecifické mobilné platformy a môžu využívať ich natívne funkcie a výkonnostné výhody. [18]

1.5.2 Flutter

Flutter je framework vyvinutý spoločnosťou Google. Jeho cieľom je rýchly a efektívny vývoj aplikácií pre rôzne platformy za použitia jedného kódu. Je založený na programovacom jazyku Dart a využíva „widget-based“ architektúru. To znamená že na vytvorenie užívateľského rozhrania používa komponenty zvané widgety, ktoré sa následne kombinujú, a vytvárajú tak komplexné užívateľské rozhranie. Flutter ponúka funkciu „hot reload“, vďaka ktorej môže programátor okamžite vidieť zmeny v aplikácii bez potreby opakovanej kompilácii kódu. Flutter sa stal populárnym vďaka svojej schopnosti vytvoriť aplikáciu pre Android, iOS, Windows, MacOS a veľa iných za pomoci jedného kódu. [19]

1.6 Hardvérové možnosti užívateľského zariadenia

Táto podkapitola je zameraná na dostupné možnosti hardware pre užívateľa. Existuje mnoho možností. My sa bližšie pozrieme na mobilné telefóny, keďže všetko čo bude musieť urobiť užívateľ, je stiahnuť si aplikáciu, vďaka ktorej sa dozvie, kde sa v priestore nachádza.

1.6.1 Mobilný telefón s operačným systémom Android

Mobilné telefóny s operačným systémom Android patria medzi najpoužívanějšíe telefóny na trhu. Bol vyvinutý spoločnosťou Google a je založený na jadre Linuxu, ktorý ponúka flexibilitu a vysokú prispôsobivosť. Jednou z hlavných vlastností Androidu je, že vývojári a výrobcovia môžu prispievať k jeho vývoju a modifikovať ho podľa svojich špecifických potrieb. Z tohoto dôvodu môžeme na trhu vidieť veľkú rôznorodosť zariadení využívajúce operačný systém Android od lacnejších, až po high-end modely.

1.6.2 Mobilný telefón s operačným systémom iOS

Na rozdiel od Androidu, operačný systém iOS využívajú len zariadenia vyrobené spoločnosťou Apple. Telefóny používajúce iOS sú známe taktiež ako iPhone a jedná sa o high-end zariadenia. Jedná sa o uzavretý operačný systém, ktorý bol navrhnutý tak, aby poskytoval intuitívny užívateľský zážitok. Kladie veľký dôraz na dizajn, bezpečnosť a výkon. Jadro iOS je optimalizované pre konkrétny hardware na ktorom beží, čo zabezpečí vysoký výkon a efektivitu. Ich nevýhodou je však vyššia cena a fakt, že užívateľ nemá až toľko možností prispôsobenia, ako pri systéme Android.

1.7 Zhrnutie

Pre účely tejto bakalárskej práce bola vybraná rádiová technológia Bluetooth Low Energy. Dôvodom je, že pre lokalizáciu nie je potrebný prenos veľkého množstva dát a taktiež rôzne články a webové stránky naznačujú, že je z hľadiska presnosti a aj spotreby vhodnejšie použiť BLE ako napríklad Wi-Fi. Ďalšou výhodou je skutočnosť, že mnoho

vlastníkov mobilných telefónov už disponuje zariadením, ktoré je schopné pracovať s BLE, a tým pádom aplikáciu bude schopný používať takmer každý. V tomto ohľade je táto technológia vhodnejšia, ako napríklad Ultra-wideband, ktorá sa nachádza skôr v drahších zariadeniach. Taktiež prípadný zákazník bude mať možnosť zakúpiť si výsledný produkt kedykoľvek, bez potreby dodatočnej elektroinštalácie, keďže modemy BLE majú malú spotrebu, a tým pádom je možné využiť napájanie pomocou batérií, ktoré vydržia niekoľko rokov.

Poloha je určovaná pomocou metódy trilaterácie, keďže sa jedná o jednu z najvyužívanejších metód určovania polohy. Dôvodom je jej rýchlosť, jednoduchosť a dostupnosť veľkého množstva článkov a výskumov týkajúcich sa tejto metódy.

Ako programovací jazyk bol vybraný jazyk Dart spolu s frameworkom Flutter, pretože v čase výberu mal väčšiu užívateľskú základňu. Ďalším faktorom pri výbere bola existencia užitočných alebo potrebných knižníc. Taktiež je jeho veľkou výhodou to, že napísaním jedného kódu získame aplikácie pre takmer všetky zariadenia. Plusom je taktiež fakt, že tvorcom tohto jazyka a frameworku je obrovská spoločnosť, ktorá tento jazyk neustále rozvíja.

Vývoj programu je však v prvom rade cielený na platformu Android, keďže sa zistilo, že pre programovanie platformy iOS je potrebné aj ďalšie vybavenie od spoločnosti Apple, ktoré pre účely tejto bakalárskej práce nebolo k dispozícii.

2. TEORETICKÝ ÚVOD

2.1 BLE

Vlastnosti BLE sú popísané v štandarde IEEE 802.15.1. Základné charakteristiky, ktoré sú využívané z hľadiska lokalizácie pomocou BLE, sú „názov“ zariadenia ID, indikátor intenzity prijatého signálu a parameter Tx, ktorý slúži na kalibráciu a následný odhad vzdialenosti.

2.1.1 Nastavenie spojenia [20]

Link Manager Protocol (LMP) sa používa na zabezpečenie, optimalizáciu a správu spojení na linkovej vrstve medzi dvoma zariadeniami. Hlavné úlohy, ktoré tento protokol rieši, sú vytvorenie, správa a ukončenie spojenia, riadenie prenosu údajov medzi zariadeniami, overovanie a párovanie zariadení.

Funkciu tohto protokolu môžeme vidieť na nasledujúcom obrázku číslo 1. Link Manager(LM) zodpovedá za vytváranie a ukončovanie spojení, pričom využíva komunikáciu pomocou LMP, vďaka ktorej si zariadenia vymieňajú riadiace a konfiguračné informácie. Na druhej strane Link Controller(LC) a Radio Frequency(RF) sa venujú fyzickej vrstve. Úlohou LC je riadenie rádiového prenosu, správa energetických zdrojov a kontrola prenosových parametrov, zatiaľ čo RF sa stará o správne prenášanie informácií na rádiových frekvenciách.

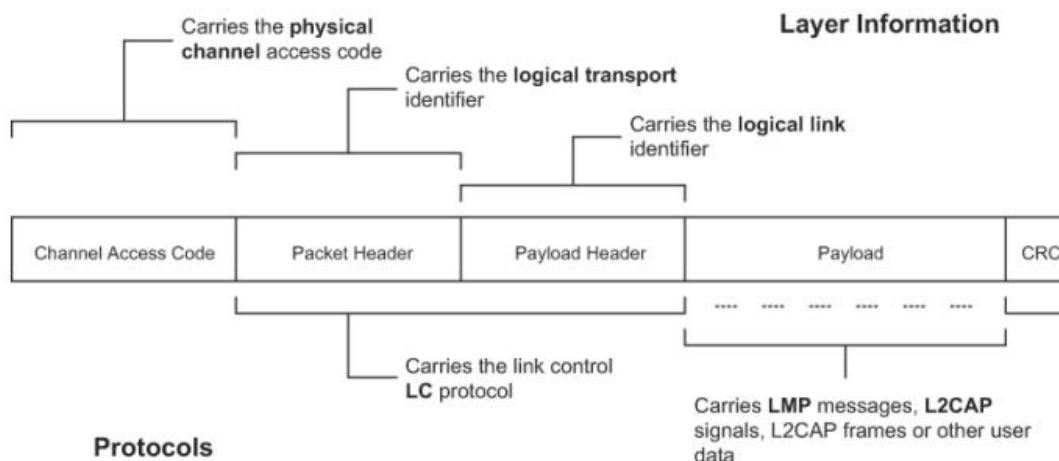


Obrázok 1: Signalizácia LMP [20]

Pre komunikáciu medzi LM Master a LM Slave sa využíva logická linka ACL-C, ktorá nezaručuje presný čas doručenia paketu a ani doručenie potvrdenia o jeho doručení. To znamená, že existujú kritéria, určujúce kedy môže byť LT_ADDR(Link Type Address) opätovne použitá pre komunikáciu s daným slave zariadením. LT_ADDR je adresa, stanovená pre identifikáciu jednotlivých spojení v piconete.

2.1.2 Štruktúra paketu [20]

Štruktúru paketu, ktorý je využívaný v bežných aplikáciách, môžeme vidieť na nasledujúcom obrázku číslo 2.



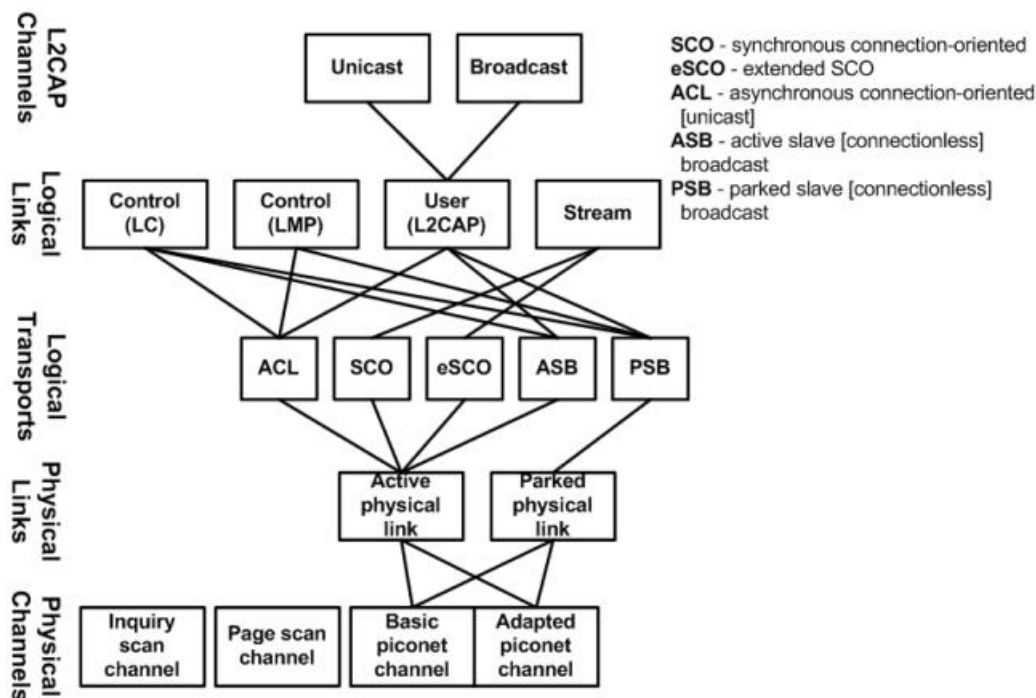
Obrázok 2: Štruktúra paketu [20]

Pakety používané v komunikácii obvykle obsahujú len polia potrebné na reprezentáciu vrstiev transakcie. Jednoduchý dopyt cez fyzický kanál nevyžaduje logické spojenie a pozostáva len z prístupového kódu Channel Access Code (CAC) spojeného s fyzickým kanálom. Všeobecná komunikácia v rámci piconetu využíva pakety, ktoré obsahujú informácie vo všetkých poliach z obrázka 2, pretože sa používajú všetky architektonické vrstvy. Súčasťou všetkých paketov je už spomínaný CAC, slúžiaci na identifikáciu komunikácie na fyzickom kanáli a na filtrovanie paketov z iného fyzického kanála na rovnakej nosnej frekvencii.

Informácie týkajúce sa fyzických spojení sú uvedené v LT_ADDR, ktorá sa nachádza v hlavičke paketu. LT_ADDR obsahuje každá hlavička a slúži na posúdenie, či daný paket bol určený práve pre naše zariadenie.

2.1.3 Architektúra transportných entít [20]

Architektúra, ktorú je možné vidieť na nasledujúcom obrázku popisuje, ako sú prenášané a organizované dáta pri prenose medzi dvoma zariadeniami.



Obrázok 3: Prehľad entít a hierarchie dopravnej architektúry [20]

Systém má niekoľko typov fyzických kanálov, ktoré sú charakterizované frekvenciou a časovými parametrami. Fyzické kanály menia frekvenciu periodicky, aby sa eliminovalo rušenie a zabezpečila synchronizácia. Avšak, existuje pravdepodobnosť kolízie fyzických kanálov. Tento problém je vyriešený tým, že použijeme prístupový kód CAC, ktorý je umiestnený v hlavičke na začiatku každého paketu. Väčšina zariadení je v danom momente schopná využívať len jeden fyzický kanál.

Základné fyzické kanály piconetu podporujú Physical Link. Môže byť v režime active alebo park. Ak je spojenie v režime active, tak to znamená, že v danom čase prebieha výmena dát medzi zariadeniami master a slave. Naopak, v režime park je vytvorené spojenie, no nenastáva žiadna komunikácia medzi zariadeniami. Physical Link je spojenie bod-bod medzi nadradeným a podradeným zariadením. Je prítomné vždy, keď je podriadené zariadenie synchronizované v sieti piconet.

Existuje niekoľko druhov logických transportov. Tieto typy je možné vidieť na obrázku číslo 3. Jedná sa o synchronne logické prenosy bod-bod medzi nadradeným a jedným podriadeným zariadením v sieti piconet. Master udržiava synchronne logické transporty používaním rezervovaných slotov v pravidelných intervaloch. Logické transporty ACL však môžu použiť aj nerezervované sloty.

Riadiace logické spojenia LC a ACL-C sa používajú na úrovni riadenia spojenia a taktiež na úrovni LM. Logické spojenie LC sa používa na synchronný prenos

užívateľských informácií, zatiaľ čo pri ACL-C ide o asynchrónny prenos informácií. Všetky ostatné logické spojenia sú uložené v časti paketu nazývanej packet payload, ktorá v sebe nesie všetky konkrétne dáta, ktoré chceme preniesť medzi zariadeniami.

L2CAP poskytuje úlohu multiplexovania, umožňujúca mnohým rôznym aplikáciám zdieľať zdroje logického spojenia ACL-U medzi dvoma zariadeniami. Okrem vytvárania, konfigurácie a rušenia kanálov je hlavnou úlohou L2CAP multiplexovať základnú jednotku dát Service Data Unit(SDU) z klientov kanálov na logické spojenia ACL-U a vykonávať jednoduchú úroveň plánovania, pričom vyberá SDU podľa relatívnej priority.

2.2 Metóda trilaterácie

2.2.1 Výpočet vzdialenosti pomocou hodnoty RSSI

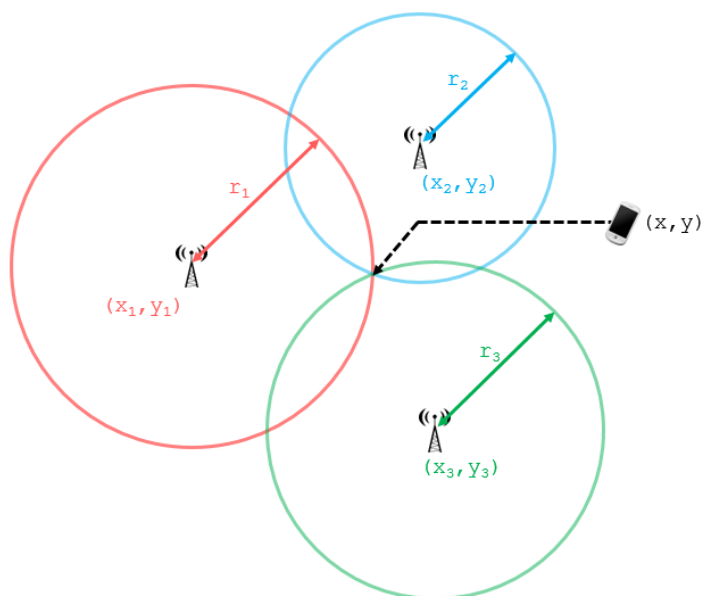
Výpočet vzdialenosti za pomoci RSSI je proces, pri ktorom sa snažíme odhadnúť vzdialenosť medzi vysielateľom a prijímačom na základe meranej hodnoty RSSI. Tento prístup sa zakladá na predpoklade, že s narastajúcou vzdialenosťou intenzita signálu klesá. Pri tejto metóde výpočtu sa vo väčšine prípadov počíta s exponenciálnym poklesom intenzity RSSI so stúpajúcou vzdialenosťou. Pravdepodobne najčastejšie používaný vzťah pre výpočet vzdialenosti z meranej hodnoty RSSI je:

$$d = 10^{\frac{Tx-RSSI}{n*10}} \quad (2.1)$$

Výsledkom použitia tohto vzorca je vzdialenosť d . RSSI je priebežne meraná hodnota. Jedná sa o jedinú premennú hodnotu v tomto vzťahu. Konštanta Tx predstavuje hodnotu RSSI, ktorá je nameraná vo vzdialenosti jedného metra od BLE modemu. Používa sa ako referenčná hodnota. Konštanta n udáva, ako rýchlo klesá hodnota RSSI s narastajúcou vzdialenosťou. Čím vyššia je hodnota n , tým strmšia je charakteristika prevodu RSSI na vzdialenosť. Hodnoty Tx a n slúžia na kalibráciu systému. Obe tieto hodnoty sa líšia podľa prostredia, v ktorom meranie prebieha.

2.2.2 Princíp fungovania

Na určenie polohy telefónu, použijeme podobný princíp, ako je použitý pri lokalizácii pomocou mobilných telefónnych veží. Keďže poznáme polohu BLE modemov a sme schopný zistiť vzdialenosť od každého z nich, môžeme následne dopočítať polohu mobilného telefónu užívateľa. Tento princíp zobrazuje nasledujúci obrázok číslo 4. [22]



Obrázok 4: Princíp trilaterácie [22]

Ikonky veží na tomto obrázku v našom prípade symbolizujú BLE modemov. Súradnice x_1, x_2, x_3 a y_1, y_2, y_3 udávajú polohu jednotlivých BLE modemov v priestore. Tieto hodnoty sú vopred známe a sú dané jednotlivým umiestnením. Hodnoty r_1, r_2, r_3 predstavujú vzdialenosť od konkrétnych modemov. Tieto vzdialenosti získame na základe výpočtov pomocou vzťahu z podkapitoly 2.2.1. Hodnoty x a y udávajú polohu užívateľského zariadenia. [22]

2.2.3 Výpočet polohy užívateľského zariadenia [22]

Pre výpočet použijeme vzťahy odvodené z obrázka číslo 4. Postup vyzerá nasledovne:

Ako prvé si musíme odvodiť vzťahy pre každý z troch kruhov:

$$(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 = r_1^2$$

$$(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 = r_2^2$$

$$(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 = r_3^2$$

Tieto vzťahy je potom možné roznásobiť a ich vzájomným odčítaním získame:

$$(-2x_1 + 2x_2)x + (-2y_1 + 2y_2)y = r_1^2 - r_2^2 - x_1^2 + x_2^2 - y_1^2 + y_2^2$$

$$(-2x_2 + 2x_3)x + (-2y_2 + 2y_3)y = r_2^2 - r_3^2 - x_2^2 + x_3^2 - y_2^2 + y_3^2$$

Z dôvodu zjednodušenia vzťahov je vhodné jednotlivé časti substituovať. Získame tak nasledujúce vzťahy:

$$Ax + By = C$$

$$Dx + Ey = F$$

Z týchto vzťahov je následne možné vyjadriť súradnice x a y :

$$x = \frac{CE - FB}{EA - BD} \quad (2.2)$$

$$y = \frac{CD - AF}{BD - AE} \quad (2.3)$$

Súradnice slúžia na vykreslenia polohy užívateľa na displeji mobilného zariadenia.

3. RIEŠENIE

Zariadenie, ktoré bolo vybrané ako cieľová platforma pre aplikáciu určenú pre lokalizáciu pomocou technológie BLE je zariadenie s operačným systémom Android 13, konkrétne Samsung Galaxy A14 5G, využívajúci verziu Bluetooth 5.2. Zo začiatku prebehla snaha o realizovanie aplikácie na platforme iOS. Ukázalo sa však, nakoľko nie je k dispozícii zariadenie s operačným systémom macOS, nahráť software do zariadenia iPhone nebude možné. Tento problém a jeho možné riešenia sú lepšie popísané v semestrálnej práci *Lokalizace polohy a počítání osob s využitím radiových sítí*. [23]

Pre účely vysielania signálov BLE, boli použité modemy od spoločnosti DFC Design. Konkrétne sa jedná o zariadenie Ines Micro v1.0, ktoré je osadené Bluetooth modulom BMD 340, využívajúci verziu Bluetooth 5.0. Tento vývojový kit taktiež obsahuje množstvo iných senzorov, ktoré merajú napríklad hodnoty teploty, vlhkosti, tlaku a iných veličín. Pre účely lokalizácie však potrebujeme len schopnosť tohto zariadenia komunikovať pomocou BLE.

Na účely sledovania dátového toku medzi dvomi zariadeniami, v tomto prípade medzi mobilným telefónom a BLE modemom, bol použitý sniffer od spoločnosti Nordic Semiconductors s označením nRF52840.

3.1 Sledovanie komunikácie medzi zariadeniami

Cieľom sledovania komunikácie medzi zariadeniami využívajúce rádiové technológie je potrebné použiť zariadenie, dokazujúce zachytávať informácie o všetkých paketoch prenášaných v jeho okolí. Pomocou sniffera nRF52840 a počítačovej aplikácie Wireshark je možné sledovať všetky prenosy informácií v danom prostredí.

3.1.1 Inicializácia zariadenia nRF52840

Pred použitím sniffra je najprv potrebné inicializovať jeho software. Prvým krokom je nainštalovanie programu nRF Connect for Desktop, obsahujúci množstvo užitočných aplikácií pre sniffer. Aplikácia, ktorú pre naše účely potrebujeme sa nazýva Programmer. Z webovej stránky výrobcu je potrebné stiahnuť inicializačný súbor pre konkrétny model sniffra. Následne už len stačí vložiť sniffer do ľubovoľného USB portu, spustiť aplikáciu Programmer, nahráť softvérový súbor a spustiť inicializáciu zariadenia. Pripojený a inicializovaný sniffer je možné vidieť na nasledujúcom obrázku číslo 5. [24]



Obrázok 5: Sniffer nRF52840

3.1.2 Inštalácia a príprava programu Wireshark

Aplikácia Wireshark slúži na zobrazenie komunikácie medzi zariadeniami. Inštalácia programu prebieha podľa návodu na stránke poskytovateľa softvéru. Po nainštalovaní softvéru však aplikácia nedokáže používať sniffer. Je preto potrebné vytvoriť profil v programových priečinkoch. Súbor, ktorý obsahuje profil pre program Wireshark je súčasťou komprimovaného súboru obsahujúceho softvér sniffera. Po reštartovaní programu Wireshark už môžeme vidieť medzi dostupnými kanálmi aj Bluetooth sniffer. [24][25]



Obrázok 6: Interface výberu komunikačných kanálov aplikácie Wireshark

3.1.3 Kontrola komunikácie medzi mobilným telefónom a BLE modemom

Počas kontroly komunikácie medzi zariadeniami bola odhalená chyba v softvéri zariadenia, ktorá zapríčinila, že po započatí párovania telefónu a modemu prestal BLE modem komunikovať. Komunikácia zobrazená v programe Wireshark vyzerala nasledovne.

209	8.003994	fc:19:ae:1a:6b:66	Broadcast	LE LL	57 ADV_IND
210	8.019161	fc:19:ae:1a:6b:66	Broadcast	LE LL	57 ADV_IND
211	8.019987	fc:19:ae:1a:6b:66	Broadcast	LE LL	57 ADV_IND
212	8.020813	fc:19:ae:1a:6b:66	Broadcast	LE LL	57 ADV_IND
213	8.269612	fc:19:ae:1a:6b:66	Broadcast	LE LL	57 ADV_IND
214	8.270090	4c:17:10:bf:d3:16	fc:19:ae:1a:6b:66	LE LL	38 SCAN_REQ
215	8.270417	fc:19:ae:1a:6b:66	Broadcast	LE LL	50 SCAN_RSP
216	8.270990	fc:19:ae:1a:6b:66	Broadcast	LE LL	57 ADV_IND
217	8.271816	fc:19:ae:1a:6b:66	Broadcast	LE LL	57 ADV_IND
218	8.307746	fc:19:ae:1a:6b:66	Broadcast	LE LL	57 ADV_IND
219	8.308572	fc:19:ae:1a:6b:66	Broadcast	LE LL	57 ADV_IND
220	8.309398	fc:19:ae:1a:6b:66	Broadcast	LE LL	57 ADV_IND
221	8.309876	75:e6:8f:08:00:55	fc:19:ae:1a:6b:66	LE LL	60 CONNECT_IND
222	8.326711	Master_0xa22acfbe	Slave_0xa22acfbe	LE LL	35 Control Opcode: LL_FEATURE_REQ
223	8.327013	Slave_0xa22acfbe	Master_0xa22acfbe	ATT	33 Rcvd Exchange MTU Request, Client Rx MTU: 247
224	8.327299	Master_0xa22acfbe	Slave_0xa22acfbe	LE LL	26 Empty PDU
225	8.375461	Master_0xa22acfbe	Slave_0xa22acfbe	LE LL	26 Empty PDU

Obrázok 7: Ukážka paketov pri započatí párovania

317	13.153000	Master_0xa22acfbe	Slave_0xa22acfbe	LE LL	26 Empty PDU
318	13.201750	Master_0xa22acfbe	Slave_0xa22acfbe	LE LL	26 Empty PDU
319	13.250501	Master_0xa22acfbe	Slave_0xa22acfbe	LE LL	26 Empty PDU
320	13.299251	Master_0xa22acfbe	Slave_0xa22acfbe	LE LL	26 Empty PDU
321	121.112170	Anonymous	Broadcast	LE LL	41 ADV_EXT_IND[Malformed Packet]
322	199.117631	Anonymous	Broadcast	LE LL	41 ADV_EXT_IND[Malformed Packet]
323	212.446253	Anonymous	Broadcast	LE LL	41 ADV_EXT_IND[Malformed Packet]
324	321.711440	Anonymous	Broadcast	LE LL	89 ADV_EXT_IND[Malformed Packet]

Obrázok 8: Ukážka posledných paketov pred ukončením komunikácie

Na obrázku 7 je možné vidieť pakety, ktoré BLE modem pravidelne vysiela. Jedná sa o pakety ADV_IND, obsahujúce advertisement dáta, ktorých súčasťou sú napríklad hodnoty Tx. Po týchto paketoch sa objaví paket CONNECT_IND, slúžiaci ako žiadosť o zahájenie komunikácie medzi zariadeniami. Následne prebehne kalibrácia spojenia nasledovaná prázdnyimi paketmi Empty PDU. Sekvencia týchto prázdnych paketov je po chvíli zakončená ADV_EXT_IND[Malformed Packet], po ktorom komunikácia utíchne.

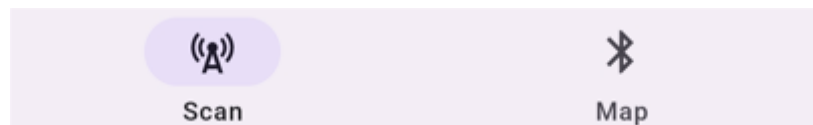
Nájdená chyba bola oznámená výrobcovi modemu Ines Micro v1.0, ktorý následne chybu opravil. Je však nutné podotknúť, že pre potreby lokalizácie nie je nutné zariadenia párovať, pretože všetky pre nás potrebné dáta sa dajú vložiť do advertisement paketu, ktorý sa vysiela periodicky približne o frekvencii 4,3 Hz.

3.2 Softvérové riešenie

Pre účely tejto bakalárskej práce bol vybraný framework Flutter a programovací jazyk Dart. Ako základ aplikácie slúži example priložený ku knižnici flutter_blue_plus, ktorej správcom je jamcoder.com. Táto knižnica je zameraná primárne na prácu s technológiou BLE. Ukážkový kód tejto knižnice obsahuje základné funkcie pre prácu s BLE, ako sú napríklad čítanie RSSI, MAC adresy a možnosť pripojiť sa na nájdené zariadenie v okolí. Pre účely lokalizácie je však nutné vykonať úpravy tejto aplikácie.

3.2.1 Navigačné menu

Ako prvé bolo z praktických dôvodov potrebné rozdeliť interface aplikácie na dve časti. Prvá zobrazuje všetky prítomné zariadenia, ich názvy, MAC adresy a hodnoty RSSI a na druhej je možné vidieť našu polohu v danom priestore. Ako vhodné riešenie bol vybraný widget `NavigationBar`, ktorý sa používa na vytváranie jednoduchého navigačného menu. Toto menu slúži na presun medzi obrazovkou s názvom „Scan“, na ktorej bude možné vidieť všetky okolité zariadenia a ich parametre, a obrazovkou „Map“, kde je možné vidieť mapu miestnosti, polohu BLE modemov a polohu užívateľa. Navigačné menu je umiestnené v spodnej časti displeja. Výsledok je možné vidieť na obrázku číslo 9.



Obrázok 9: Navigačné menu

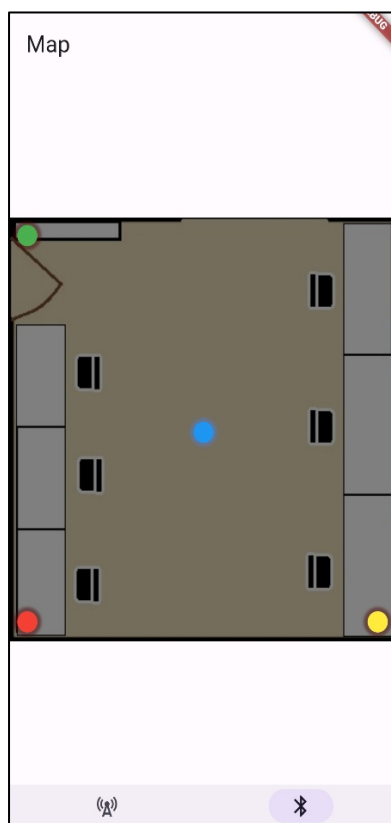
Základ zdrojového kódu navigačného menu je možné vidieť na nasledujúcich riadkoch.

```
class _MyMainScreenState extends State<MyMainScreen> {
  int index = 0;
  final pages = [
    ScanScreen(),
    MapWidget(),
  ];
  @override
  Widget build(BuildContext context) {
    return Scaffold(
      body: pages[index],
      bottomNavigationBar: NavigationBar(
        height: 60,
        selectedIndex: index,
        onDestinationSelected: (index) => setState(() => this.index =
index),
        destinations: [
          NavigationDestination(icon: Icon(Icons.cell_tower),
selectedIcon: Icon(Icons.cell_tower), label: 'Scan')
          ,
          NavigationDestination(icon: Icon(Icons.bluetooth_outlined),
selectedIcon: Icon(Icons.bluetooth), label: 'Map')
        ],
      ),
    );
  }
}
```

Ako je možné vidieť v kóde vyššie, metóda `build` vracia widget `Scaffold`, ktorý obsahuje pole s názvom `pages`. Obsahom tohto poľa sú metódy, ktoré vykreslia jednotlivé obrazovky. Po kliknutí užívateľa na ikonku veže alebo Bluetooth sa zmení hodnota premennej `index` a následne sa vykreslí požadovaná obrazovka. Výslednému navigačnému menu je možné priradiť rôzne názvy a ikony. Použité ikony sú súčasťou frameworku Flutter.

3.2.2 Tvorba mapy

Mapa je umiestnená na obrazovke, ktorá bola vytvorená v predchádzajúcej podkapitole. Na jej vytvorenie bol použitý widget Stack, ktorého hlavnou funkcionalitou je možnosť ukladať viacero objektov nad seba do vrstiev. V tomto prípade na najnižšiu vrstvu umiestnime mapu priestoru, na ktorú sa následne budú vykresľovať polohy modemov a samotného užívateľa. Samotný Stack je umiestnený vo widgete Container, slúžiaci ako rodičovský widget, ktorému sa Stack prispôsobí rozmerom. Rozmery kontajnera sú predom dané, čím sa predídne prispôsobovaniu rozmerov mapy k displeju. Pohľad na obrazovku „Map“ je možné vidieť na obrázku číslo 10.



Obrázok 10: Obrazovka „Map“

Na obrázku je možné vidieť kruhy rôznych farieb, pričom zelená, červená a žltá farba reprezentujú polohy BLE modemov a modrá polohu užívateľa. Sú umiestnené na hnedom pozadí reprezentujúce plochu miestnosti, v ktorej budú prebiehať testovacie merania polohy. Modrou farbou je reprezentované okno. Sivé obdĺžniky predstavujú stoly a skrine ktoré sa v miestnosti nachádzajú. Objekty čiernej farby zobrazujú polohu kancelárskych kresiel. Rozmery mapy zodpovedajú veľkosti reálnej miestnosti, pričom mierka je závislá na rozmeroch displeja.

3.2.3 Vykresľovanie polohy na displeji

Keďže sa rozmery displejov jednotlivých mobilných telefónov líšia, je potrebné aby sa veľkosť mapy a taktiež poloha zobrazovala správne. To je možné dosiahnuť tak, že

normalizujeme mierku mapy podľa rozmerov displeja. Rozmery displeja je možné získať pomocou triedy MediaQuery, obsahujúca informácie o zariadení, na ktorom aplikácia beží. Výpočty prebiehajú podľa nasledujúcich vzťahov.

$$top = \left(\frac{displayHeight}{b} \right) * y$$

$$left = \left(\frac{displayWidth}{a} \right) * x$$

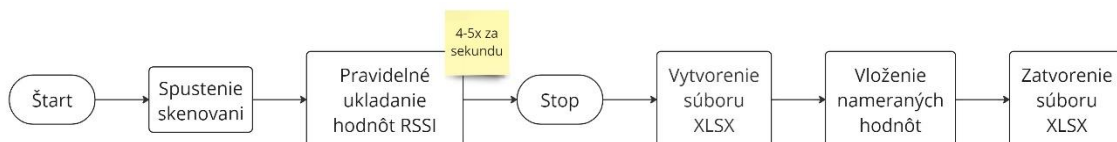
Kde premenné *top* a *left* reprezentujú odsadenie od vrchu a ľavej strany mapy, *displayHeight* a *displayWidth* sú rozmery displeja získane pomocou MediaQuery, konštanty *a* a *b* sú rozmery strán miestnosti obdĺžnikového tvaru v metroch a premenné *x* a *y* reprezentujú polohu užívateľa alebo modemu danú v metroch.

Vďaka tomuto výpočtu môžeme pracovať s reálnymi rozmermi, ktoré sa následne vhodne prepočítajú a vykreslia na displej. Ďalšou výhodou je, že táto mapa bude vyzeráť rovnako na každom zariadení, keďže MediaQuery každého zariadenia poskytne iné rozmery displeja, v dôsledku čoho sa mierka prepočíta.

3.3 Meranie polohy

3.3.1 Zber meraných dát

Namerané hodnoty RSSI je, z dôvodu kontroly a návrhu vhodnej metódy redukcie poruchy, potrebné zozbierať a uložiť do súboru pre neskoršie spracovanie. Pre túto úlohu bola vybraná knižnica excel verzie 4.0.3, ktorej správcom je justkawal.dev. Táto knižnica slúži na prácu so súbormi XLSX. Obsahuje metódy, umožňujúce čítanie, úpravu a zápis do súborov programu Excel. Tento formát bol vybraný z dôvodu, že je dobre známy a veľmi často používaný. Stručný diagram priebehu merania vyzerá nasledovne.



Obrázok 11: Diagram postupu merania

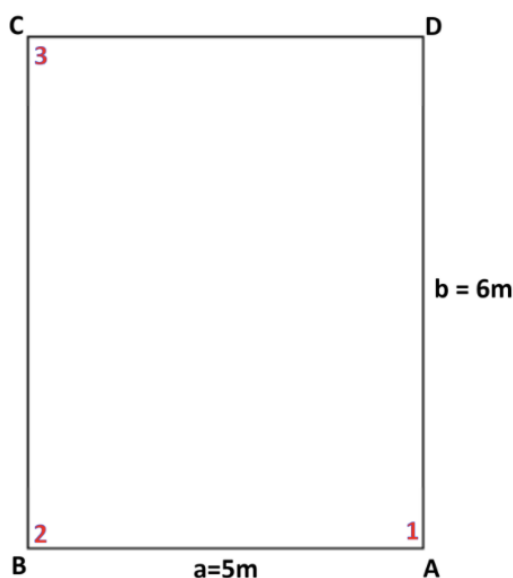
Na obrázku č.11 vidíme, že cyklus merania začína stlačením tlačidla Štart, ktoré spustí skenovanie. Na základe MAC adres sa určí, ktoré zo zariadení v okolí je BLE modem 1, 2 a 3. Následne sa Hodnoty RSSI, zodpovedajúce týmto modemom zapíšu do dátovej štruktúry list. Po stlačení tlačidla Stop sa vytvorí súbor XLSX, do ktorého sa namerané hodnoty RSSI uložia. Po uložení sa súbor XLSX zatvorí. Výsledný súbor obsahuje 3 stĺpce s nameranými hodnotami. Číslo stĺpca zodpovedá číslu BLE modemu. Tento súbor sa následne uloží do pamäte telefónu. Namerané hodnoty je neskôr možné spracovať pomocou výpočtového softvéru, akým je napríklad MATLAB.

3.3.2 Meranie vo vonkajších priestoroch

Pri prvotnom meraní vo vnútorných priestoroch sa zistilo, že určené hodnoty polohy boli výrazne zarušené. Toto zarušenie bolo spôsobené viacerými faktormi, ako napríklad odrazom od prítomných objektov a rušením okolitými zariadeniami. Z tohto dôvodu namerané dáta nezodpovedali reálnej polohe a mali tendenciu zhlukovať sa v strede miestnosti. Bolo teda rozhodnuté presunúť meranie do vonkajších priestorov, kde nedôjde k veľkému množstvu odrazov. Vďaka tomuto zjednodušeniu bolo neskôr možné určiť správanie a nedostatky systému. Pre meranie v interiéri bude v budúcnosti potrebné navrhnuť komplexnejšie riešenie, zahrňujúci spoľahlivejší algoritmus výpočtu a kvalitnejšiu filtráciu. Nasledujúce merania teda prebehli vo vonkajších priestoroch.

3.3.3 Príprava vonkajšieho priestoru na meranie

Prvým krokom bol výber správneho prostredia. Aby sa predišlo rôznym odrazom a rušeniu, prebehlo meranie najprv vonku na otvorenom priestranstve, bez prekážok, ktoré by mohli spôsobiť zoslabenie alebo odraz signálu. Pôdorys priestoru, ktorý bol pre toto meranie určený je možné vidieť na obrázku číslo 12.



Obrázok 12: Pôdorys meracej plochy

Veľké tlačené písmená popisujú vrcholy obdĺžnika, neskôr sú použité k popisu trajektórie v priestore. Malé tlačené písmená a a b popisujú rozmery priestoru. Červené čísla zobrazujú číslovanie BLE modemov. Fotografiu prostredia, v ktorom boli hodnoty merané je možné vidieť na nasledujúcom obrázku číslo 13.



Obrázok 13: Fotografia priestoru merania

Na fotografii je možné vidieť umiestnenie štyroch krabíc, ktorých vnútorné rohy vymedzujú merací priestor tvaru obdĺžnika. Modemy sú umiestnené vo výške približne 30 cm nad zemou na rohu krabice, ktorý smeruje do stredu priestoru. Čísla reprezentujú označenie jednotlivých BLE modemov. Priestor, v ktorom meranie prebieha má rozmery $5\text{ m} \times 6\text{ m}$.

3.3.4 Kalibrácia meracieho systému

Kalibrácia meracieho systému je nutný krok, ktorý zabezpečuje presnosť a spoľahlivosť nameraných dát. V tomto prípade je potrebné správne určiť hodnoty T_x a n pre každý z modemov, aby sme zaistili správny prepočet RSSI na vzdialenosť v metroch.

Kalibrácia začína meraním hodnôt RSSI pre každý BLE modem. Parameter T_x zodpovedá hodnote RSSI vo vzdialenosti jedného metra od vysielача. Tento parameter bol určený meraním, ktoré trvalo približne jednu minútu, počas ktorej sa nameralo približne 300 hodnôt RSSI. Následným priemerovaním týchto hodnôt bola získaná referenčná hodnota intenzity signálu vo vzdialenosti jedného metra T_x . Týmto spôsobom boli určené hodnoty T_x pre každý modem.

Následne boli odmerané hodnoty RSSI vo vzdialenosti 1, 2, 3, 4 a 5 m od každého z modemov a, rovnako ako pre pri parametri T_x , hodnoty spriemerujeme. Hodnoty vzdialeností 1-5 m zlogaritmujeme a pomocou programu MATLAB použijeme lineárnu regresiu, ktorá pracuje s zlogaritmovanými vzdialenosťami a taktiež hodnotami RSSI nameranými pri týchto vzdialenostiach. Výsledkom tohoto výpočtu je parameter n . Príklad použitého zdrojového kódu pre vypočítanie jedného parametra n je možné vidieť nižšie.

```

distances = [1, 2, 3, 4, 5];
logDistances = log10(distances); % Logaritmus vzdialenosti
%      1m      2m      3m      4m      5m
RSSI1 = [BLEM1_1m, BLEM1_2m, BLEM1_3m, BLEM1_4m, BLEM1_5m];

% Lineárna regresia
p1 = polyfit(logDistances, RSSI1, 1);

% p(1) je sklon priamky
slope1 = p1(1);

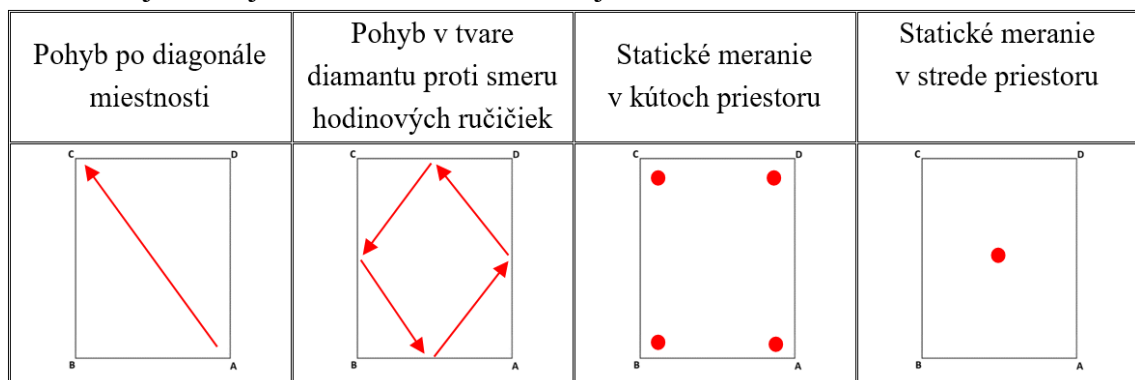
n1 = -slope1 / 10;

```

Tento výpočet je následne zopakovaný pre hodnotu n každého BLE modemu.

3.3.5 Sledovanie pohybu

Využitie preddefinovanej trajektórie je nevyhnutné pre určenie správnosti dát a následný návrh optimalizácií a filtrov. Počas meraní bolo použitých niekoľko druhov trajektórií, ktoré zahŕňali pohyb po diagonále miestnosti, trajektórie tvaru diamantu, ktorý mal vrcholy v strede strán priestoru, ako aj statické merania v jednotlivých kútoch priestoru a jej strede. Spomenuté trajektórie je možné vidieť na nasledujúcich obrázkoch.



Obrázok 14: Ukážka trajektórií merania

Trajektórie, ktoré popisujú dynamický pohyb budú použité v oboch smeroch. Statické merania prebehnú pre každý bod zvlášť. Všetky merania, s výnimkou trajektórie v tvare diamantu, budú trvať približne jednu minútu. Meranie diamantovej trajektórie bude trvať približne dve minúty z dôvodu zberu väčšieho množstva dát na jednotlivých úsekoch.

3.4 Spracovanie nameraných dát

Na začiatku vývoja algoritmu je na zobrazenie dát a ich filtráciu potrebné vybrať nástroj, umožňujúci manipuláciu s dátami a následne ich dokáže zobraziť. MATLAB sa v tomto ohľade javí ako ideálna voľba. Obsahuje mnoho nástrojov a preddefinovaných funkcií, potrebné pre tento účel. Týmto prístupom je možné vyhnúť sa množstvu chýb, ktoré môžu neskôr vzniknúť napríklad v dôsledku nesprávneho výberu metódy.

3.4.1 Spracovanie dát pomocou MATLABu

Ako prvé bolo potrebné zadať parametre T_x a n , ktoré sme získali počas kalibrácie, rozmery miestnosti a polohy jednotlivých modemov. Tieto hodnoty je možné vidieť nižšie.

```
tx1=-60.9242; % Tx modemu 1
tx2=-56.6628; % Tx modemu 2
tx3=-56.3615; % Tx modemu 3
n1 = 2.8755; % n modemu 1
n2 = 3.2160; % n modemu 2
n3 = 3.0299; % n modemu 3

a=5; % šírka miestnosti(súradnica x)
b=6; % dĺžka miestnosti(súradnica y)
% Polohy jednotlivých modemov
x1=a;
y1=0;
x2=0;
y2=0;
x3=0;
y3=b;
```

Pomocou týchto konštánt prebehli všetky výpočty týkajúce sa polohy a jej zobrazenia. Ako prvé bolo potrebné vypočítať z nameraných dát vzdialenosti od jednotlivých modemov podľa vzorca 2.2.1. Cyklus, v ktorom sa vypočítavajú hodnoty vzdialenosti z hodnôt RSSI vyzerá nasledovne.

```
for i =1:r % r-počet nameraných hodnôt RSSI, i-iteračná premenná
% d1,d2,d3-hodnoty vypočítaných vzdialeností
d1(i)=10^((tx1-rssi1(i))/(10*n1));
d2(i)=10^((tx2-rssi2(i))/(10*n2));
d3(i)=10^((tx3-rssi3(i))/(10*n3));
end
```

Tieto hodnoty vzdialeností boli následne pomocou vzorcov 2.2.3 a 2.2.33 prepočítané na hodnoty x a y zodpovedajúce polohe v priestore.

```
for i=1:r % r-počet hodnôt vzdialenosti, i-iteračná premenná

A = (-2*x1 + 2*x2);
B = (-2*y1 + 2*y2);
C = d1(i)*d1(i) - d2(i)*d2(i) - x1*x1 - x2*x2 - y1*y1 + y2*y2;
D = (-2*x2 + 2*x3);
E = (-2*y2 + 2*y3);
F = d2(i)*d2(i) - d3(i)*d3(i) - x2*x2 + x3*x3 - y2*y2 + y3*y3;

x_new = (C*E - F*B)/(E*A - B*D); % pomocná premenná hodnoty x
y_new = (C*D - A*F)/(B*D - A*E); % pomocná premenná hodnoty y

X=[X x_new]; % vloženie vypočítanej hodnoty x do poľa
Y=[Y y_new]; % vloženie vypočítanej hodnoty y do poľa
end
```

Hodnoty označené veľkými písmenami X a Y reprezentujú polia obsahujúce vypočítané hodnoty polohy. Tieto polia boli následne priamo použité na vykresľovanie polohy.

3.4.2 Vykresľovanie vypočítaných hodnôt

Pre vykresľovanie hodnôt bolo taktiež použité softvérové prostredie MATLAB. Tento krok

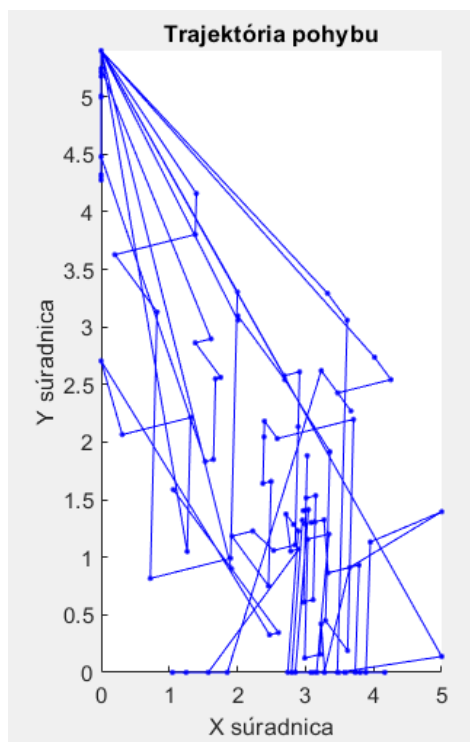
je nevyhnutný pre určenie správnosti nameraných a vypočítaných dát. Cyklus, ktorý bol použitý na vykreslenie vypočítaných hodnôt je možné vidieť nižšie.

```
for k = 1:r

    % Vykreslenie novej pozície
    plot(X(1:k), Y(1:k), 'b.-');
    hold on;

    % Pauza pre vizualizáciu
    pause(0.01); % Pauza 0.1 sekundy medzi pridaním každého bodu
end
```

Na vykresľovanie hodnôt bola použitá funkcia plot, ktorá je jedna z najpoužívanějších a najflexibilnejších funkcií v MATLABe. Aby sa docielilo postupného vykresľovania prvkov, tak je potrebné, aby bola zapnutá funkcia hold. Reťazec 'b.-', ktorý môžeme vidieť vo funkcii plot, slúži na prepájanie jednotlivých bodov, aby bolo jednoduchšie určiteľné, ako za sebou nasledovali jednotlivito vykresľované body. Príklad vykreslenej trajektórie je zobrazený na obrázku číslo 15.



Obrázok 15: Príklad vykreslenej trajektórie

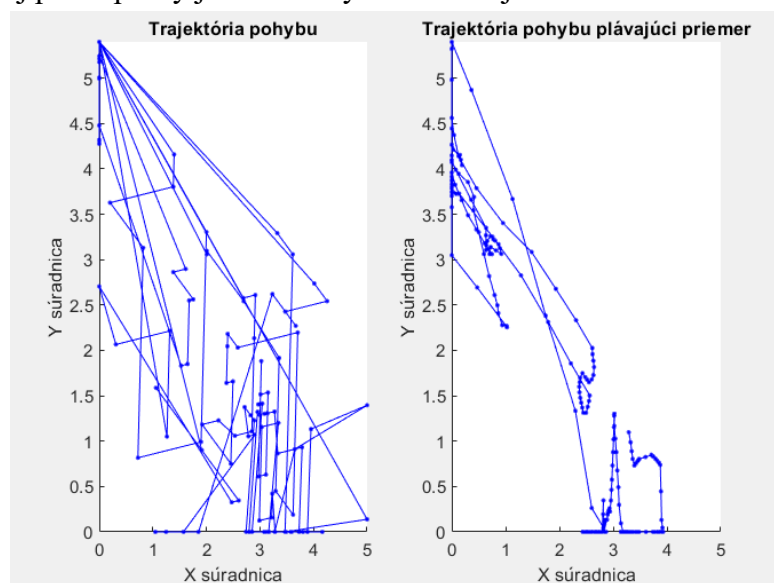
Na obrázku je zobrazená diagonálna trajektória z bodu A do C. Je možné vidieť obrovské roztrúsenie hodnôt. Z tohoto dôvodu bude potrebná aplikácia filtra, ktorý zmenší ich rozptyl.

3.4.3 Filtrácia hodnôt pomocou plávajúceho priemeru

Plávajúci priemer je štatistická metóda používaná na redukcii dočasného šumu a zvýraznenie dlhodobého trendu. Ako je možné vidieť v predchádzajúcej podkapitole, filtrácia hodnôt je nevyhnutným krokom pri výpočte a zobrazovaní dát. Jednou

z najpoužívanejších a najjednoduchších metód je použitie plávajúceho priemeru. Používa sa na zmiernenie dočasných výkyvov, ktoré môžu významne skresliť výsledky. Pre upravenie hodnôt pomocou plávajúceho priemeru bola použitá MATLAB funkcia `movmean`, majúca dva vstupné parametre. Prvým parametrom je pole hodnôt, na ktoré chceme plávajúci priemer aplikovať a druhým je číslo označujúce počet prvkov, z ktorých sa bude plávajúci priemer počítať.

Filtrovanie pomocou plávajúceho priemeru bolo použité na hodnoty vzdialeností ešte pred tým, ako sa z hodnôt vzdialeností od jednotlivých modemov vypočítala poloha mobilného telefónu. Výsledok aplikácie plávajúceho priemeru na trajektóriu z predchádzajúcej podkapitoly je zobrazený na nasledujúcom obrázku číslo 16.



Obrázok 16: Ukážka filtrácie pomocou plávajúceho priemeru

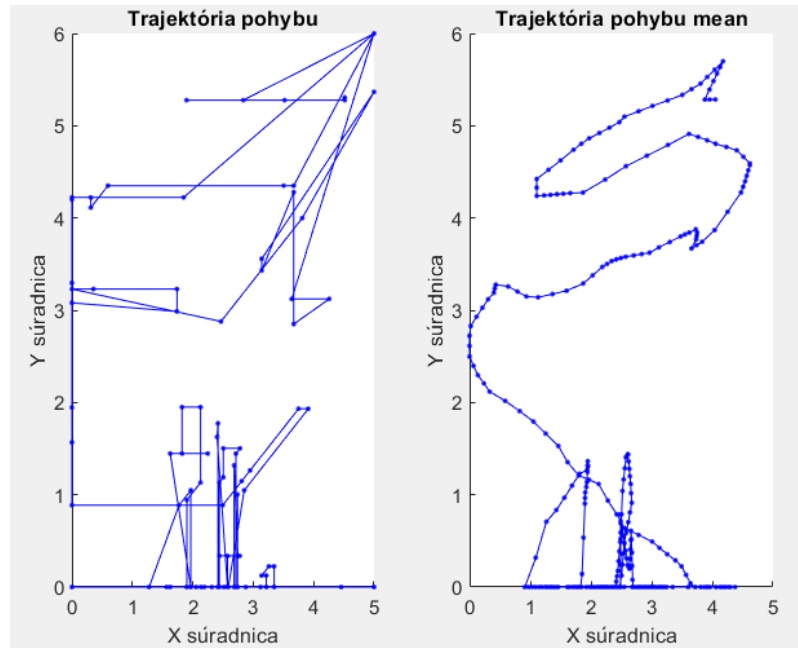
Na obrázku vidíme, že aplikácia priemerovacieho filtra významne znížila roztrúsenie hodnôt, a tým zvýšila kvalitu zobrazených dát.

3.5 Výsledky spracovania dát

3.5.1 Výsledky meraní

Táto podkapitola popisuje výsledky spracovaných dát. Dáta boli merané vo vonkajšom prostredí, zobrazujúce na obrázku číslo 13. Pre monitorovanie pohybu boli použité trajektórie z obrázka číslo 14.

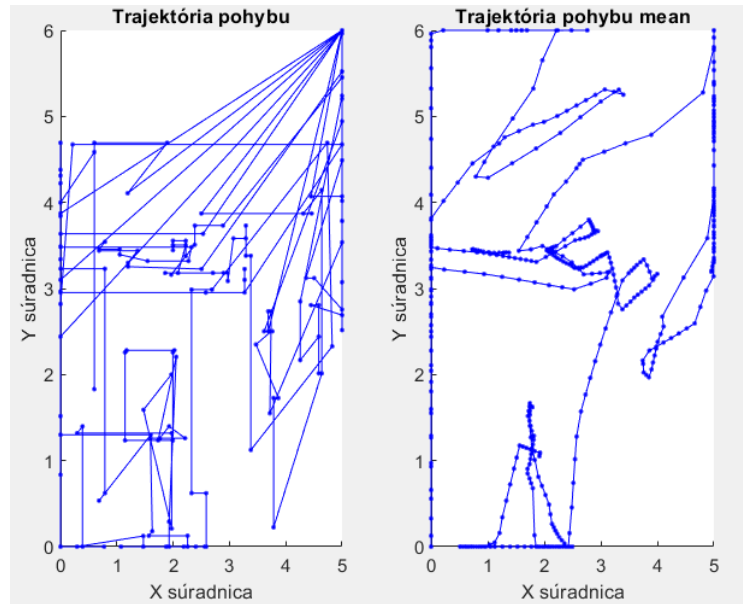
Trasa, ktorá vystihuje správanie tohto systému je trajektória po diagonále z vrcholu C do vrcholu A, ktorú je možné vidieť na nasledujúcom obrázku číslo 17.



Obrázok 17: trajektória z vrcholu C do vrcholu A

Na obrázku 17 vidíme príklad merania trajektórie, ktorá smerovala z ľavého horného rohu priestoru do pravého dolného rohu. Na obrázku, ktorý je filtrovaný pomocou plávajúceho priemeru vidíme, že trajektória nezačína na súradniciach XY (0 m; 6 m), ako bolo predpokladané. V skutočnosti je možné pozorovať odsadenie od tohto bodu spolu s nepresnosťou, ktorá posunula začiatok viac doprava. Odsadenie od ľavého horného rohu je spôsobené natočením zariadenia počas merania, kde nastáva veľké tlmenie signálu modemu číslo 3 užívateľom mobilného telefónu, v dôsledku čoho systém vyhodnotí, že sme vo väčšej vzdialenosti. Veľká nepresnosť, ktorá zapríčiňuje začiatok na pravej strane, je zapríčinená veľkou vzdialenosťou od modemov 1 a 2, kde sa zistilo, že približne vo vzdialenosti vyššej ako 4,5 m od modemu presnosť určovania polohy značne klesá.

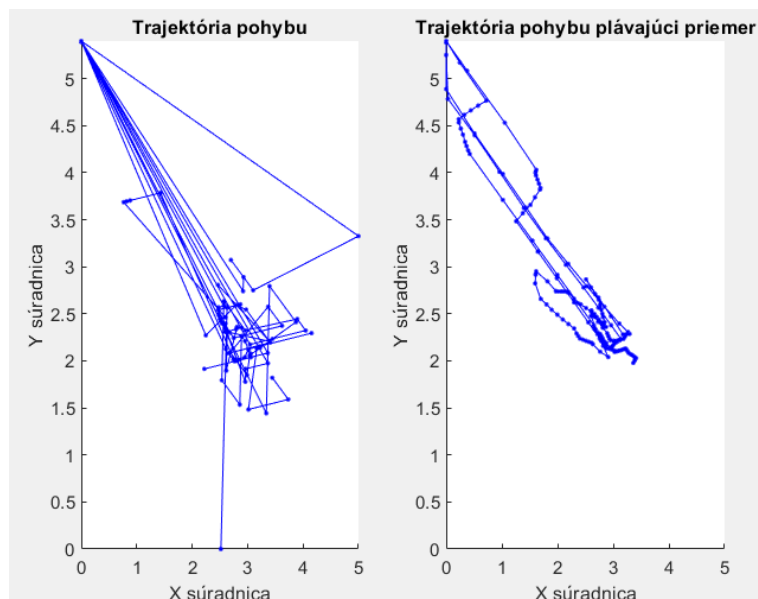
Ďalšou trajektóriou, kde sa spomínané chyby uplatňujú, je trajektória v tvare diamantu v protismere hodinových ručičiek. Výsledok spracovania dát je možné vidieť na nasledujúcom obrázku číslo 18.



Obrázok 18: trajektória v tvare diamantu proti v protismere hodinových ručičiek

Na obrázku vidíme, že pri začiatku v súradniciach XY (2,5 m; 0 m) sa začiatok trasy vykresľuje v bode približne (4 m; 2 m). To je spôsobené chybou zapríčinenou natočením zariadenia, ktoré tlačí hodnoty do pravého horného rohu. Následne sa po otočení užívateľa na pravej hrane miestnosti začne vykresľovaná trajektória pohybovať smerom do ľavého horného rohu v dôsledku prekrytia modemu číslo 1. Po otočení užívateľa na hornej hrane priestoru sa vykresľované hodnoty začnú pohybovať do smeru miestnosti kvôli postupnému prekryvaniu modemu číslo 3. Po otočení užívateľa na ľavej strane miestnosti dôjde k prekrytiu modemu číslo 3, kde sa zároveň začne zosilňovať intenzita signálu modemu 1 a 2. V dôsledku toho sa vykresľované hodnoty zasaturujú na spodnej časti miestnosti.

Z týchto príkladov je zrejmé, že systém je veľmi citlivý na natočenie užívateľa. V rámci testovania prebehli aj merania vo vnútorných priestoroch s podobnými rozmermi. Tento prípad vystihuje nasledujúce meranie.



Obrázok 19: trajektória po diagonále z vrcholu A do vrcholu C vo vnútorných priestoroch

Na obrázku číslo 19. je možné vidieť trajektóriu po diagonále z vrcholu A do vrcholu C. Toto meranie prebehlo vo vnútorných priestoroch s približne rovnakými rozmermi. V interiéri sa nachádzalo množstvo prekážok v podobe stolov, stoličiek, množstvom elektronických zariadení, ako sú stolné počítače, mobilné telefóny a iné. V dôsledku veľkého množstva objektov v miestnosti dochádzalo k odrazom signálov. To malo za následok zhlukovanie zobrazovaných hodnôt v strede miestnosti.

3.5.2 Návrh riešenia problémov

V predchádzajúcej podkapitole prebehlo oboznámenie s najzávažnejšími chybami pri meraní polohy pomocou BLE. Existuje množstvo spôsobov, ktorými je možné riešiť dané problémy. V tejto kapitole sú popísané niektoré z nich.

Ako prvé sa zameriame na chybu, ktorá spôsobuje kolísanie hodnôt. Ako bolo ukázané na meraných trajektóriách, ktoré neboli filtrované plávajúcim priemerom, hodnoty sa skokovo výrazne menili v dôsledku kolísania meraných hodnôt RSSI. Táto chyba sa po aplikovaní filtra s plávajúcim priemerom výrazným spôsobom zmenšila, čo naznačuje, že použitím kvalitnejšej filtrácie môžeme doceliť výrazne lepších výsledkov. V budúcnosti by bola veľmi vhodná metóda filtrácie pomocou Kalmanovho filtra. Prednosťami tejto metódy filtrácie je jej veľmi dobré zvládanie šumu, ako aj vlastnosť filtra začleniť dynamiku sledovaného objektu, vďaka čomu sme schopní napríklad zadať maximálne možné zrýchlenie užívateľa. Aplikácia tejto metódy však nie je predmetom tejto bakalárskej práce.

V prípade chyby spôsobenej prítomnosťou objektov a samotného užívateľa sa ponúka viacero jednoduchších riešení. Prvým z nich je použitie väčšieho množstva BLE modemov, vďaka čomu sa zvýši presnosť merania. V prípade použitia metódy trilaterácie by sa pre výpočet vždy použili modemy s najvyššou intenzitou signálu. Druhým riešením by bolo

umiestnenie modemov do výšky 2 až 2,5 m, vďaka čomu znížime množstvo prekážok medzi užívateľom a modemom. Modemy však nesmú byť umiestnené príliš vysoko, aby bolo možné zanedbať pridanú vzdialenosť vzhľadom k presnosti meracej aparatury. Týmto prístupom sa môže taktiež zvýšiť dosah signálu jednotlivých modemov, vďaka čomu dochádza k lepšej presnosti merania.

4. VYLEPŠENIA PRE PRAKTICKÉ POUŽITIE

Táto kapitola sa zaoberá návrhom praktických vylepšení aplikácie. Tieto zlepšenia sú zamerané na zvýšenie pohodlia užívateľov a adaptabilitu systému v rôznych reálnych prostrediach. Nasledujúce sekcie popisujú navrhované vylepšenia a spôsob ich implementácie.

4.1 Distribúcia aplikácie

Základom úspešnej aplikácie je efektívna distribúcia. Táto podkapitola je venovaná možnostiam distribúcie mobilnej aplikácie ku koncovému užívateľovi. Najbežnejšími platformami pre distribúciu aplikácií pre mobilné telefóny sú Google play pre zariadenia Android a App Store pre zariadenia iOS.

Pred zverejnením aplikácie na týchto platformách je potrebné prejsť procesom schvaľovania aplikácie. Tento proces zahŕňa kroky, ako je testovanie kompatibility zariadení, bezpečnostné testy, ochrana užívateľských údajov, splnenie požiadaviek na kvalitu aplikáciu a mnoho iných.

4.2 Získavanie potrebných dát z databázy

Za účelom použitia aplikácie vo väčšom meradle, je potrebné, aby bolo možné aplikáciu používať na viacerých pobočkách zákazníka. To si vyžaduje získavanie dát z rôznych zdrojov vo viacerých lokalitách. Jedným z riešení je použitie databázového systému, ktorý bude obsahovať informácie o danej lokalite.

Ako príklad nám môže poslúžiť sieť supermarketov, ktorá má v rámci štátu, prípadne mesta, viacero pobočiek. Pomocou GPS alebo po pripojení užívateľa do našej lokálnej siete dokážeme určiť, na ktorej pobočke sa nachádza. Na základe tejto informácie môžeme následne do aplikácie nahráť z databázy informácie, ako je mapa, ale taktiež informácie o polohe BLE modemov a ich kalibračné hodnoty. Táto vlastnosť zaistí príjemnejšiu a bezstarostnú skúsenosť užívateľa a taktiež sa predíde situácii, kde by užívateľ musel manuálne vybrať pobočku, v ktorej sa práve nachádza.

5. ZÁVER

Táto bakalárska práca sa zaoberala prieskumom dostupných metód a možností lokalizácie pomocou rádiových technológií a taktiež návrhom a realizáciou aplikácie pre lokalizáciu užívateľa vo vnútorných priestoroch.

Prvým krokom bol prehľad dostupných technológií, metód, vhodného hardvéru a programovacieho jazyka. Ako najvhodnejšia bola vybraná technológia BLE, ponúkajúca kompromis medzi presnosťou, dostupnosťou a cenou. BLE je taktiež dobre rozšírená technológia, ktorú v dnešnej dobe podporuje väčšina zariadení. Výpočet polohy prebiehol pomocou metódy trilaterácia, ktorá je rýchla, jednoduchá a používa sa v mnohých technológiách, akou je napríklad aj GPS. Z dôvodu kompatibility finálnej aplikácie s čo najväčším množstvom zariadení bol zvolený mobilný telefón s operačným systémom Android Samsung Galaxy A14 5G, ktorý spĺňa požiadavku na podporu BLE. Ako programovací jazyk bol zvolený Dart a jeho framework Flutter. Výhodou tohto frameworku je jeho natívnosť, čo umožňuje vytvárať aplikácie pre stolné počítače, tablety, mobilné telefóny a ďalšie zariadenia pomocou jediného kódu. Taktiež obsahuje veľké množstvo užitočných knižníc, ako je napríklad knižnica flutter_blue_plus, určená priamo na prácu s technológiou BLE.

Druhá časť práce bola zameraná na popis fungovania komunikácie medzi zariadeniami pomocou technológie Bluetooth. Nasledovalo vysvetlenie spôsobu určovania vzdialenosti medzi dvoma zariadeniami využívajúcimi BLE, popis použitého vzťahu a jeho parametrov. Zároveň prebehlo vysvetlenie metódy trilaterácie a popis odvodenia vzťahu pre určovanie polohy pomocou troch BLE modemov.

Nasledoval návrh a realizácia aplikácie pre lokalizáciu osôb vo vopred definovanom prostredí. Prebehlo návrh prostredia a jeho realizácia. Nasledovala kalibrácia meracieho systému, kde boli nastavené hodnoty T_x a n pre jednotlivé BLE modemov. Po kalibrácii prebehlo meranie polohy po rôznych trajektóriách. Namerané hodnoty boli uložené do pamäti mobilného telefónu a následne presunuté do notebooku na ďalšie spracovanie pomocou softvérového rozhrania MATLAB. V MATLABe prebehlo vykreslenie nameranej trajektórie. Následne boli tieto hodnoty porovnané s ich filtrovanou verziou, pričom sa použilo filtrovanie pomocou plávajúceho priemeru. Použitie filtrovania významne zmiernilo roztrúsenie hodnôt v dôsledku kolísania a rušenia signálu BLE. Zistilo sa, že systém je veľmi citlivý na natočenie užívateľa, ktorý tlmí prichádzajúci signál, v dôsledku čoho sa do merania zavádza veľká nepresnosť. Chybu spôsobenú natočením je možné vyriešiť pridaním väčšieho množstva BLE modemov. Pre filtráciu je vhodné do budúcnosti použiť Kalmanov filter, zabezpečujúci kvalitnejšiu filtráciu a vloží do systému dynamiku, ktorú je možné použiť napríklad na určenie maximálneho zrýchlenia užívateľa, čo má za následok zmenšenie rozptylu hodnôt v dôsledku odrazov a šumu.

Zistilo sa, že meranie pomocou BLE modemov je možné približne do vzdialenosti 6 m. Vo vyššej vzdialenosti sa začína prejavovať nedostatočná intenzita signálu. Zistené

hodnoty n pre vnútorné a vonkajšie priestory sa takmer nelíšili a pohybovali sa približne okolo hodnoty 3. Tento parameter môžeme považovať za korektný, keďže zdroje uvádzajú, že hodnoty n sa vo väčšine prípadov pohybujú v rozmedzí 2 až 4. Z toho vyplýva, že útlm signálu v interiéri a exteriéri je podobný, a teda nepresnosti vo vnútorných priestoroch sú pravdepodobne zapríčinené primárne odrazom.

Na záver prebehol návrh možností pre distribúciu aplikácie pomocou platforiem Google play pre operačný systém Android a App Store pre zariadenia s operačným systémom iOS. Taktiež prebehol návrh vylepšenia aplikácie pre praktické použitie za pomoci databázy, ktorá bude obsahovať hodnoty polohy modemov a ich kalibračné údaje. Výsledná aplikácia môže slúžiť ako mapa pre zákazníka v nákupnom centre, zatiaľ čo samotné nákupné centrum by potom vedelo získavať dáta o polohe užívateľa, ktoré môžu byť použité na zefektívnenie uloženia produktov so zámerom zvýšenia ziskov.

LITERATÚRA

- [1] BANTZ, David. IBM WATSON RESEARCH CENTER. Industrial Scientific and Medical (ISM) Bands [online]. 1994 [cit. 2023-12-04]. Dostupné z: <http://www.wirelesscommunication.nl/reference/chaptr01/dtmmsyst/ism.htm/>
- [2] CISCO. What Is Wi-Fi? [online]. [cit. 2023-12-09]. Dostupné z: <https://www.cisco.com/c/en/us/products/wireless/what-is-wifi.html>
- [3] BHARDWAJ, Rashmi. IPWITHEASE. 2.4 GHz vs 5 GHz: Which Wi-Fi should I use? [online]. [cit. 2023-12-09]. Dostupné z: <https://ipwithease.com/2-4-ghz-vs-5-ghz>
- [4] STONE, Mark. SAMSUNG. What is ultra-wideband, and how does it work? [online]. 2021 [cit. 2023-12-08]. Dostupné z: <https://insights.samsung.com/2021/08/25/what-is-ultra-wideband-and-how-does-it-work-3/>
- [5] P.MCDERMOTT-WELLS. What is Bluetooth? IEEE Potentials. 2004, 23(5), 33-35. ISSN 1558-1772.
- [6] PROCTOR, Bob. LINK LABS. Bluetooth Vs. Bluetooth Low Energy: What's The Difference? [online]. 2023 [cit. 2023-12-08]. Dostupné z: <https://www.link-labs.com/blog/bluetooth-vs-bluetooth-low-energy>
- [7] FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. Satellite Navigation - GPS - How It Works [online]. 2022 [cit. 2023-12-09]. Dostupné z: https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ato/service_units/techo/ps/navservices/gnss/gps/howitworks
- [8] SARLIN, Paul-Edouard, Ajaykumar UNAGAR, Mans LARSSON, Hugo GERMAIN a Carl TOFT. Back to the Feature: Learning Robust Camera Localization from Pixels to Pose. IEEE [online]. 2021, 2021, 11 [cit. 2023-12-23]. Dostupné z: https://openaccess.thecvf.com/content/CVPR2021/papers/Sarlin_Back_to_the_Feature_Learning_Robust_Camera_Localization_From_Pixels_CVPR_2021_paper.pdf
- [9] INTERGOVERNMENTAL COMMITTEE ON SURVEYING AND MAPPING. Surveying Methods [online]. [cit. 2023-12-23]. Dostupné z: <https://www.icsm.gov.au/education/fundamentals-mapping/surveying-mapping/surveying-methods>
- [10] Neenu. PRODYOGI. Trilateration Surveying - Working, Applications & Advantages [online]. 2021 [cit. 2023-12-23]. Dostupné z: https://www.prodyogi.com/2021/08/trilateration-surveying.html?utm_content=cmp-true
- [11] POINTR. Location fingerprinting - what is it, and should you choose it as your IPS technology? [online]. 2023 [cit. 2023-12-23]. Dostupné z: <https://www.pointr.tech/blog/location-fingerprinting-what-is-it-should-you-choose-it>

- [12] BLUEIOT. An Ultimate Guide to Blueiot AoA Technology: Definition, Applications, and Trends [online]. 2023 [cit. 2023-12-23]. Dostupné z: <https://www.blueiot.com/an-ultimate-guide-to-blueiot-aoa-technology.html/>
- [13] APPLE. Swift [online]. 2023 [cit. 2023-12-24]. Dostupné z: <https://developer.apple.com/swift/>
- [14] ANDROID. Develop Android apps with Kotlin [online]. [cit. 2023-12-24]. Dostupné z: <https://developer.android.com/kotlin>
- [15] JAVA. What is Java technology and why do I need it? [online]. [cit. 2023-12-24]. Dostupné z: https://www.java.com/en/download/help/whatis_java.html
- [16] MOZILLA. JavaScript [online]. [cit. 2023-12-24]. Dostupné z: https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/JavaScript/Language_overview
- [17] GOOGLE. Dart [online]. [cit. 2023-12-24]. Dostupné z: <https://dart.dev/>
- [18] META PLATFORMS, INC. *React Native Learn once, write anywhere.* [online]. [cit. 2023-12-24]. Dostupné z: <https://reactnative.dev/>
- [19] GOOGLE. Build for any screen [online]. [cit. 2023-12-24]. Dostupné z: <https://flutter.dev/>
- [20] IEEE. 802.15.1 IEEE Standard for Information technology— Telecommunications and information exchange between systems— Local and metropolitan area networks— Specific requirements. 2. 3 Park Avenue, New York, NY 10016-5997, USA, 2005.
- [21] HE, Hanry. MOKO SMART. Bluetooth AoA and AoD: A Deep Dive into Bluetooth Direction Finding [online]. 2023 [cit. 2024-01-01]. Dostupné z: <https://www.mokosmart.com/bluetooth-aoa-and-aod-for-bluetooth-direction-finding/>
- [22] 101COMPUTING. *Cell Phone Trilateration Algorithm* [online]. 2019 [cit. 2024-04-23]. Dostupné z: <https://www.101computing.net/cell-phone-trilateration-algorithm/>
- [23] VARANAI, Lukáš. *Lokalizace polohy a počítání osob s využitím radiových sítí.* Brno, 2024. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/155571>. Semestrální práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce Soběslav Valach.
- [24] NORDIC SEMICONDUCTOR. Installing the nRF Sniffer [online]. 2022 [cit. 2024-04-28]. Dostupné z: https://infocenter.nordicsemi.com/index.jsp?topic=%2Fug_sniffer_ble%2FUG%2Fsniffer_ble%2Finstalling_sniffer.html
- [25] WIRESHARK FOUNDATION. Wireshark [online]. 2006 [cit. 2024-04-28]. Dostupné z: <https://www.wireshark.org/>

ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK

Skratky:

BLE	Bluetooth Low Energy
UWB	Ultra-wideband
GPS	Global Positioning System
ISM	industrial, scientific and medical
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
FFC	Federal Communications Commission
TOF	Time-of-flight
ID	Identification
AoA	Angle of Arrive
AoD	Angle of Departure
JVM	Java Virtual Machine
LM	Link Manager
LMP	Link Manager Protocol
RF	Radio Frequency
LC	Link Controller
ACL	Asynchronous Connection-oriented logical transport
LT_ADDR	Link Type Address
SCO	Synchronous Connection-oriented
eSCO	extended SCO
ASB	ActiveSlave
PSB	Parked Slave
CAC	Channel Access Code
L2CAP	Logical Link Control and Adaptation Protocol
SDU	Service Data Unit
CPU	Central Processing Unit
GPU	Graphics Processing Unit
FPS	Frame Per Second
JDK	Java Development Kit
SDK	Software Development Kit
API	Application Programming Interface

Symboly:

<i>RSSI</i>	Received Signal Strength Indicator	(dBm)
<i>TX</i>	Transmit Power	(dBm)

ZOZNAM PRÍLOH

PRÍLOHA A – OBSAH PRILOŽENÉHO PAMÄŤOVÉHO MÉDIA	49
---	-----------

Príloha A – Obsah priloženého pamäťového média

Priložené pamäťové médium obsahuje elektronickú verziu bakalárskej práce vo formáte PDF s názvom “BP_varanai_2024“.

Na disku sa nachádza zdrojový kód aplikácie na meranie polohy pre mobilné telefóny. Príloha taktiež obsahuje kódy softvérového rozhrania MATLAB pre kalibráciu systému a vykresľovanie polohy. Poslednou prílohou sú namerané hodnoty vo vonkajšom a vnútornom prostredí.