

Jihočeská univerzita  
Přírodovědecká fakulta  
Ústav aplikované informatiky

# Autonomní zařízení pro sledování polohy objektů

Bakalářská práce

Autor: Václav Brůžek

Vedoucí práce: Rudolf Vohnout, Ing., Ph.D.

České Budějovice 2016

## **Bibliografické údaje**

Brůžek, V., 2016: Autonomní zařízení pro sledování polohy objektů. [Stand-alone devices for indoor positioning. Bc. Thesis, in Czech.] – 52 p., Faculty of Science, University of South Bohemia, České Budějovice, Czech Republic.

## **Anotace**

Bakalářská práce se zabývá určením polohy ve vnitřních prostorech. Cílem této práce je vytvoření systému na určování polohy neznámého zařízení a jeho nasazení na konkrétní Internet of Things zařízení. K tomuto účelu jsou v této práci používány konkrétní bezdrátové technologie. Systém je následně testován v reálných podmínkách a ohodnocen pomocí jeho střední hodnoty odchylky odhadované pozice od skutečné.

## **Annotation**

This bachelor thesis deals with the position estimate in an indoor environment. The goal of this thesis is to create a system which would be capable of determining the position of unknown device in indoor environment using wireless technologies. This system is later implemented on an Internet of Things devices. System will be tested in real life environment. Performance of the system will be evaluated using mean localization error.

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své bakalářské práce, a to v nezkrácené podobě elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách, a to se zachováním mého autorského práva k odevzdanému textu této kvalifikační práce. Souhlasím dále s tím, aby toutéž elektronickou cestou byly v souladu s uvedeným ustanovením zákona č. 111/1998 Sb. zveřejněny posudky školitele a oponentů práce i záznam o průběhu a výsledku obhajoby kvalifikační práce. Rovněž souhlasím s porovnáním textu mé kvalifikační práce s databází kvalifikačních prací Theses.cz provozovanou Národním registrem vysokoškolských kvalifikačních prací a systémem na odhalování plagiátů.

České Budějovice, 13. dubna 2016

.....

Podpis

# Obsah

1	Úvod.....	7
1.1	Vnitřní lokalizace .....	7
1.2	Rozsah.....	8
1.3	Cíl.....	9
1.4	Metodický postup .....	10
1.5	Výzkumné otázky .....	10
1.6	Struktura práce .....	10
2	Informační základ .....	11
2.1	Technologie podporující lokalizaci .....	11
2.1.1	GPS.....	11
2.1.2	GSM .....	11
2.1.3	Bluetooth.....	12
2.1.4	Wi-Fi .....	12
2.1.5	ZigBee .....	12
2.1.6	Další technologie.....	13
2.2	Definice lokalizace .....	13
2.3	RSS.....	14
2.3.1	Bluetooth.....	15
2.3.2	Wi-Fi .....	15
2.4	Lokalizační přístupy .....	16
2.4.1	Postupy založené na síle signálu.....	16
2.4.2	Postupy založené na čase .....	18
2.4.3	Postupy založené na filtrech.....	18
2.5	Přehled algoritmů .....	18
2.5.1	Ecolocation .....	18
2.5.2	Log-Normal Shadowing.....	20
2.5.3	Fingerprinting.....	20
2.5.4	Trilateration.....	23
2.5.5	Triangulation.....	24
2.5.6	Cell of Origin .....	25
2.5.7	Particle filter.....	25
2.5.8	Zpracování obrazu .....	25
2.6	Chování elektromagnetických vln ve vnitřních prostorech.....	26
2.7	Veřejná data .....	27

3	Realizace .....	28
3.1	Atributy systému .....	28
3.2	Lokalizační parametry .....	28
3.2.1	Ovlivnitelné parametry .....	29
3.2.2	Neovlivnitelné parametry.....	29
3.3	Požadavky na systém.....	30
3.4	Návrh systému .....	31
3.4.1	Zařízení použita v systému.....	31
3.4.2	Udoo Neo.....	31
3.4.3	Lokalizační algoritmy .....	31
3.4.4	Architektura systému .....	32
3.4.5	Délka skenovacího okna .....	33
3.4.6	Použité nástroje .....	34
4	Testování .....	35
4.1	Testovací prostředí .....	35
4.1.1	Délka skenovacího okna u Bluetooth.....	36
4.1.2	Obecná přesnost .....	37
4.1.3	Testovací prostory .....	38
4.1.4	Množství vzorků.....	40
4.1.5	Rozložení sond.....	41
4.1.6	Pohyb.....	41
4.1.7	Typ zdroje.....	43
5	Závěr .....	45
	Seznam obrázků.....	47
	Seznam tabulek .....	47
	Seznam použité literatury.....	48
	Přílohy .....	52
A.	Rozložení sond .....	52
B.	Přiložené CD .....	52

# Abstrakt

Lokalizace ve vnitřních prostorech je problém, který byl v průběhu let často řešen. Na toto téma byla napsána řada prací, které se zabývají tímto problémem a které nabízejí různá řešení tohoto problému. Zatím ale nebyla určena žádná univerzální metoda, která by sloužila jako standard pro určování polohy ve vnitřních prostorech.

Tato práce zkoumá využití technologií Bluetooth a Wi-Fi za daným účelem. Obě tyto technologie mají sadu společných vlastností, díky nimž jsou ideálními kandidáty pro řešení daného problému. Kromě atributů nutných k určení polohy je hlavní výhodou skutečnost, že obě tyto technologie jsou integrovány v širokém spektru zařízení. Díky tomuto faktoru je nasazení lokalizačního systému, využívajícího tyto technologie, jednodušší a to díky využití zařízení, které klienti většinou vlastní.

K určení polohy je v této práci testována sada algoritmů, které byly navrženy a otestovány v předchozích studiích a které byly určeny jako vhodní kandidáti na základě analýzy zkoumaného problému. K účelu lokalizace je používán jako hlavní vstupní faktor RSSi. Na základě testů z reálného prostředí je pro každý zkoumaný algoritmus určena jeho úspěšnost na základě odchylky odhadované pozice od skutečné. Hlavním přínosem této práce je poté zhodnocení použití výše uvedených technologií a existujících postupů jako prostředků k určení polohy ve vnitřních prostorech.

## Klíčová slova:

Wi-Fi, Bluetooth, Vnitřní lokalizace, RSSi, IoT

# Slovník pojmů

RSS - Received Signal Strength

RSSi - Received Signal Strength indicator

GPS - Global Positioning System

FHS - Frequency Hopping Synchronization

IoT - Internet of Things

GSM - Global System for Mobile Communications

TOA - Time of Arrival

TDOA - Time Difference Of Arrival

DTDOA - Differential Time Difference Of Arrival

LNS - Log-Normal Shadowing

AOA - Angle of Arrival

AP - Access Point

LQ - Link Quality

IRR - Inquiry Response Rate

LS - Least Square

NTP - Network Time Protocol

# 1 Úvod

Určení polohy a navigace jsou problémy, kterým muselo lidstvo čelit již od svých počátků. Tento problém nás trápí i v současné době, i když z zcela jiných důvodů. Stejně jako v minulých dobách nás také zajímá: kde jsme, kde jsme byli a kam se chceme dostat. K účelu navigace a určení polohy dnes hlavně používáme GPS, který se stal hlavním prostředkem splňujícím tento účel. Díky naší zvýšené mobilitě je navigace úkon, který někteří musí provádět denně. GPS usnadnil problém s navigací a díky své popularitě se stal častou volbou pro auto navigace. Díky tomu se stal neoficiální standardem pro určení polohy ve venkovních prostorech.

Díky dynamické povaze moderní společnosti a rapidnímu vývoji na poli elektrotechniky vznikla poptávka pro navigaci i na mnohem menším měřítku. Poptávka směřující hlavně na služby používající polohu uživatele jako řídicí faktor. Příkladem této služby může být aplikace zprostředkující uživateli informace o počasí v místě, kde se nachází. I když tato služba konkrétně nepotřebuje vědět naprosto přesnou polohu, existuje velké množství aplikací, které by využily lokalizaci s přesností několika metrů. Příkladem by mohla být aplikace schopná nalézt osobu v početném davu nebo hledání konkrétních osob v rámci kancelářských budov. Tato práce se soustředí přesně na tyto případy tj. lokalizaci ve vnitřních prostorech s přesností na několik metrů. K tomuto účelu je nejprve potřeba stanovit, co vlastně pojem lokalizace znamená. Lokalizace může být tedy definována jako proces určení polohy objektu nebo osoby v daném prostoru.

## 1.1 Vnitřní lokalizace

Lokalizace je vždy vázaná na oblast, nad kterou má být prováděna. Pro GPS je tato oblast planeta Země, která je rozdělena na body s jedinečnou souřadnicí. Pro určení polohy požaduje GPS přímý pohled s alespoň čtyřmi satelity. Díky zastínění signálu konstrukcemi budov se systémy na vnitřní lokalizace nemohou na tuto technologii spolehnout. Během posledních let vznikla řada pozičních systémů využívajících různé bezdrátové technologie. Tyto poziční systémy se většinou soustředí na poskytnutí informací uživateli o věcech nacházejících se v jeho okolí. Ukázka druhého přístupu je možné nalézt v [4], kde autoři navrhují systém pro cílenou reklamu na základě polohy uživatele v obchodě. Poziční systém lze také integrovat do bezpečnostních systémů, kde může plnit úlohu lokalizace osob v zakázaných pásmech nebo sloužit jako detektor přítomnosti vysílajících zařízení v oblastech s rádiovým klidem.



K účelu lokalizace jsou často používané technologie Wi-Fi a Bluetooth. Kromě těchto dvou zástupců jsou také používány například: ZigBee, RFID, ultrazvuk, infračervené záření atd. Všechny tyto metody mají díky svému omezenému dosahu ideální předpoklady pro použití ve vnitřních prostorech.

Podobně jako různé technologie jsou využívány i různé metody ke zjišťování polohy. Těchto metod je řada a budou popsány dále. Zatím ale nevznikl žádný univerzální postup řešení otázky vnitřní lokalizace. Kombinace technologie a lokalizační metody zatím závisí na specifikaci účelu, místě nasazení a zařízeních, na které bude systém nasazen.

V této práci je zkoumáno využití Wi-Fi a Bluetooth. Obě tyto technologie mají své výhody i nevýhody vztahující se k vnitřní lokalizaci. Obě technologie jsou široce rozšířené v různých zařízeních a jejich společné využití zvyšuje počet kompatibilních zařízení a komfort uživatelů. Zařízení jako jsou: chytré telefony, tablety, notebooky a zařízení z rodiny Internet of Things, jsou často těmito technologiemi vybavené. Díky této skutečnosti odpadá nutnost pořizovat speciální vybavení pro uživatele systému, kterým tak stačí použít třeba svůj chytrý telefon. Díky širokému rozšíření obou technologií jsou čipy pro obě technologie relativně levné a k vystavění kontrolní části celého systému stačí běžná zařízení podporující dané technologie. Na druhou stranu obě technologie mají různou délku dosahu a proto se jejich pokrytá oblast, přesnost a spotřeba liší. Navíc díky dynamické povaze a komplexitě vnitřních prostor, pohybu osob, interferenci a ztrátě síly signálu, je lokalizace stále těžký úkol, který i v ideálních případech těžko dosahuje na centimetrové přesnosti.

## 1.2 Rozsah

Jak bylo zmíněno výše, pro každý lokalizační systém je důležitá oblast, na které bude operovat. Tato práce navrhuje systém určený pro lokalizaci ve vnitřních prostorech. Specificky je systém navrhován a testován pro použití v kancelářské budově v rámci jednoho patra, které je transformováno do dvojrozměrného prostoru. Pozice objektu je v něm vyjádřena dvojicí souřadnic  $[x, y]$  a časem  $t$ , který udává, kdy bylo zařízení objeveno. Systému bude nasazen na zařízení z IoT a to díky jejich výkonu, nízké pořizovací ceně a velikosti. Zde navrhovaný systém by plnil úlohu lokalizování uživatelů nacházejících se ve výše zmíněném prostředí. Hlavní předpoklad lokalizace je přítomnost zařízení se zapnutou, alespoň jednou, výše zmíněnou technologií. Pro zvýšení pohodlí uživatelů je systém navržen tak, aby nevyžadoval

připojení k lokalizačnímu systému. Výstupem systému by měla být pozice, ve kterých se uživatelé nacházel v rámci daného časového okna.

Pro zhodnocení úspěšnosti a funkčnosti systému je určena sada parametrů, podle kterých bude systém hodnocen. Tyto parametry jsou: přesnost lokalizace, rychlost reakce systému, kalibrace, oblast pokrytí a rozšiřitelnost.

Cílová přesnost lokalizačního systému v rámci kancelářské budovy musí být taková, aby bylo možné určit přibližnou trasu pohybu osob. V rámci tohoto problému bude uvažována maximální odchylka 5 metrů. Tato hodnota je používaná v [1], [2] a [3] jako maximální přijatelná hodnota. Při použití systému v jiném typu prostředí by odchylka mohla být jiná. Adaptace systému a kalibrace jsou důležité faktory, které ovlivňují jak funkčnost systému, tak i délku jeho nasazení. Adaptace systému na změny je důležitá, protože systém bude fungovat relativně dlouhou dobu a během této doby je pravděpodobné, že se prostředí může změnit. Některé změny prostředí mohou negativně ovlivnit přesnost systému, a proto systém musí být schopný přizpůsobit se nebo kompenzovat tyto změny. Kalibrace systému by měla být minimální pro usnadnění nasazení systému. Změny ve vnitřních prostorech jsou časté hlavně v malém měřítku, přesto systém musí umět kompenzovat i změny ve velkém měřítku. Z toho důvodu je důležité, aby kalibrace po nasazení systému, byla minimální nebo žádná. Dalším požadavkem na systém je oblast, kterou při určitém počtu zařízení, dokáže systém pokrýt. Je důležité stanovit, jaký počet zařízení je potřeba k pokrytí předem neznámé oblasti a jak snadná by byla integrace dalších zařízení do systému kvůli rozšíření jeho působnosti.

### **1.3 Cíl**

Tato práce má za cíl navrhnout, vytvořit a otestovat systém, který bude, na základě sběru veřejných dat z použitých technologií, provádět vnitřní lokalizaci. Důležitým aspektem této práce je zhodnocení stávajících metod lokalizace a použití ideální metody, nebo kombinace metod, pro zadaný scénář. Tato práce si neklade za cíl vytvořit novou metodu sloužící k vnitřní lokalizaci, ale spíše zhodnotit a otestovat nasazení systému s využitím existujících metod v reálných podmínkách. Následné testování tohoto systému bude probíhat v nijak neupraveném prostředí.

## 1.4 Metodický postup

Pro řešení daného problému je na základě studia literatury vybrána sada algoritmů, které díky svým vlastnostem splňují požadavky na daný systém. Tyto algoritmy jsou poté implementovány a na základě měření, provedeném v reálném prostředí, je pomocí statistických testů stanoven nejlepší kandidát pro použití při nasazení systému.

## 1.5 Výzkumné otázky

Na základě výše zmíněných požadavků si tato práce klade sadu výzkumných otázek, na které se bude snažit odpovědět.

1. JAKÁ JE OPTIMÁLNÍ METODA PRO NASAZENÍ V LOKALIZAČNÍM SYSTÉMU?
2. JAKÝ JE OPTIMÁLNÍ POČET SOND PRO DOSAŽENÍ STANOVENÉ MÍRY PŘESNOSTI?
3. JAKÁ JE MAXIMÁLNÍ PŘESNOST, KTEROU MOHOU TESTOVANÉ METODY DOSÁHNOUT?
4. JAKÉ JE MINIMÁLNÍ MNOŽSTVÍ INFORMACÍ POTŘEBNÉ PRO LOKALIZACI?
5. KTERÉ METODY BUDOU ZKOUMÁNY PRO MOŽNOSTI IMPLEMENTACE?
6. DO JAKÉ MÍRY OVLIVŇUJE ROZLOŽENÍ SOND VÝSLEDNOU PŘESNOST LOKALIZAČNÍHO SYSTÉMU?

## 1.6 Struktura práce

Tato práce se skládá:

**Část 1** slouží jako úvod do tématu a nastínění problému a specifikování požadavků na projekt.

**Část 2** popisuje problematiku z teoretického hlediska. Vysvětluje důležité pojmy potřebné k vysvětlení této práce a představuje existující metody řešení.

**Část 3** ukazuje designové řešení daného problému.

**Část 4** předkládá výsledky všech provedených testů a zodpovídá většinu výzkumných otázek.

**Část 5** stanovuje závěr celé práce a zodpovídá zbylé výzkumné otázky.

## 2 Informační základ

V této části je představen teoretický základ potřebný k vysvětlení všech jevů vyskytujících se v této práci. Nejdříve jsou představeny technologie podporující lokalizaci. Dále je zde popsán RSSi a jeho role v použitých technologiích. Největší část této kapitoly zabírají popisy lokalizačních metody. Nejsou zde popsány všechny existující metody, ale pouze výběr těch nejčastějších. Na závěr jsou představeny faktory, které negativně ovlivňují chování RSSi ve vnitřních prostorech a je zde vysvětlen pojem veřejná data, která slouží k získávání RSSi.

### 2.1 Technologie podporující lokalizaci

#### 2.1.1 GPS

GPS je satelitní navigační systém původně složený z 24 satelitů. Systém je provozován Ministerstvem obrany Spojených států amerických. Původně byl zamýšlen k určení polohy pro armádu, ale v osmdesátých letech minulého století byl otevřen pro veřejnost. Od té doby byl používán v širokém spektru zařízení s různou úrovní přesnosti, která může dosahovat až několika centimetrů. Dnes je GPS standardem pro určení polohy a navigaci ve venkovních prostorech a je standardní součástí auto navigací a chytrých telefonů.

GPS přijímače určují pozici jako 2D pozici skládající se ze zeměpisné šířky a délky. K úspěšnému určení je využíván signál alespoň ze čtyř satelitů. Standardně je používán signál ze čtyř satelitů také kvůli nepřesné synchronizaci času mezi satelity a přijímačem. Po určení polohy uživatele lze kromě polohy určit i směr, rychlost a vzdálenost k cíli. [5]

#### 2.1.2 GSM

GSM je systém pro bezdrátový přenos dat, který je především určen pro přenosná zařízení. GSM se dělí na buňky, kde každá buňka je spravovaná určitým množstvím vysílacích věží. Kromě přenosu dat je také možné tuto technologii využít ke zjištění polohy. V mobilních telefonech se lokalizace často provádí v kombinaci s GPS, pro zpřesnění lokalizace. Kromě určení polohy venkovních prostorech lze GSM použít i k určení polohy ve vnitřních prostorech. K určení polohy signálu se využívá RSSi vysílané mobilní zařízením, které posílá vysílací věž využívá k určení polohy pomocí Trilaterace (viz. 2.5.4).

### 2.1.3 Bluetooth

Bluetooth je bezdrátová technologie určená pro přenos dat na krátkou vzdálenost. Technologie vysílá v rozsahu 2,4GHz a je rozdělena do několika kanálů. Tradičně obsahoval Bluetooth 79 kanálů s 1MHz rozpětím mezi kanály. S příchodem verze Low Energy se počet jejích kanálů snížil na 40 a rozpětí zvýšilo na 2MHz. Bluetooth zařízení jsou dělena do tříd. Tabulka 2.1 ilustruje maximální dosah a výkonový limit pro jednotlivé třídy. Pro určování polohy je většinou také používán RSSI. Bluetooth je používán třeba systémem Bluepass [9], kde cílem této aplikace je najít a být nalezen ostatními jejími uživateli nebo systém BIPS [10], kde systém zjišťuje, odkud se uživatelé přihlásili k systému. Současná verze Bluetooth je 4.2, specifikace minulých i současné verze lze najít na [6].

Třída	Maximální dosah	Maximální vyzářený výkon
Třída 1	100 m	100 mW (20 dBm)
Třída 2	10 m	2.5 mW (4 dBm)
Třída 3	1 m	1 mW (0 dBm)

Tabulka 2.1: Dosah a výkon jednotlivých Bluetooth tříd.

### 2.1.4 Wi-Fi

Wi-Fi je asi nejoblíbenější technologií na poli vnitřní lokalizace. Jedno z prvních řešení tohoto typu byl systém RADAR [11], který používal Fingerprinting (viz 2.5.3) k určení polohy. Toho dosahoval na základě porovnání otisků v databázi s naměřenými hodnotami. Důvod používání Wi-Fi je její rozšíření jako častého mechanismu realizování LAN sítí. Wi-Fi je spravována standardem IEEE 802.11 ve specifikacích a/b/g/n/ac. Wi-Fi operuje ve dvou pásmech: 2,4GHz a 5GHz pásmu. U Wi-Fi, stejně jako u Bluetooth, je často používán RSSI k určování polohy. Výhodou Wi-Fi je její dosah, který ve vnitřních prostorách může být až 30 m [12], při venkovní použití může dosáhnout ještě většího pokrytí v důsledku neohrazeného prostoru.

### 2.1.5 ZigBee

ZigBee je bezdrátová technologie spravovaná standardem IEEE 802.15.4. Operuje v 2.4GHz rozsahu stejně jako Wi-Fi a Bluetooth. ZigBee je pomalejší než Bluetooth a Wi-Fi, ale jeho hlavní výhodou je velice malá spotřeba. Stejně jako u Wi-Fi je možné nečinné zařízení rychle probudit. V mnoha ohledech je tato technologie podobná Bluetooth: je jednoduchá, má menší

datový průchod a většinu času tráví v nečinnosti. Rozsah pokrytí je v rozmezí 10-75 metrů. Příkladem lokalizačního systému může být [7],[8]

### 2.1.6 Další technologie

Další ukázkou lokalizační technologie je infračervené záření. Ukázkou implementace této technologie je systém Active Badge [13], který používá známky, které periodicky vyzařuje unikátní identifikátor uživatele. Systém poté pomocí snímačů zjišťuje segment oblasti, ve které se uživatel nachází. Nevýhodou použití infračerveného záření je nutnost přímého pohledu mezi senzorem a vysílačem.

Podobný systém je Active Bat [14], který používá ultrazvuk. Tento systém používá Multilateration k zjištění polohy uživatele pomocí sady přijímačů a známek. Systém má výhodu velké přesnosti, v rámci centimetrů. Jeho realizace může být ale dosti nákladná.

Podobně jako Active Badge funguje systém Land Marc [15] nebo SpotON RFID [16], které používají RFID známky, které vysílají svůj jedinečný kód a přijímače na základě RSSI určují polohu uživatelů.

## 2.2 Definice lokalizace

Jak už bylo zmíněno v úvodu, lokalizace je proces určení polohy osoby nebo objektu v předem definovaném prostředí. Lokalizace může mít za úkol určení polohy jednotlivce nebo sledování polohy několika objektů najednou. V této práci bude zkoumán druhý případ.

Formálně může být lokalizační proces definován následovně. Necht'  $P$  označuje prostor, ve kterém má být lokalizace prováděna, který se skládá z konečného počtu lokalizovatelných bodů. Při dané množině měření  $M$  během určitého časového okamžiku  $[t_a, t_b]$  a množině cílů  $C$ , je lokalizační proces definován rovnicí 2.1.[2]

$$\tilde{X} = f(C, M) \quad (2.1)$$

Zde  $\tilde{X} = (\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_n)$  je množina odhadovaných lokalit pro každý objekt. Každé  $\tilde{x}_i \in P$ . Funkce  $f$  je lokalizační funkce, která vytváří odhad pozice na základě daných lokalizačních parametrů. Pro množiny skutečných lokalit  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  lze poté určit střední hodnotu odchylky pomocí rovnice 2.2.[2]

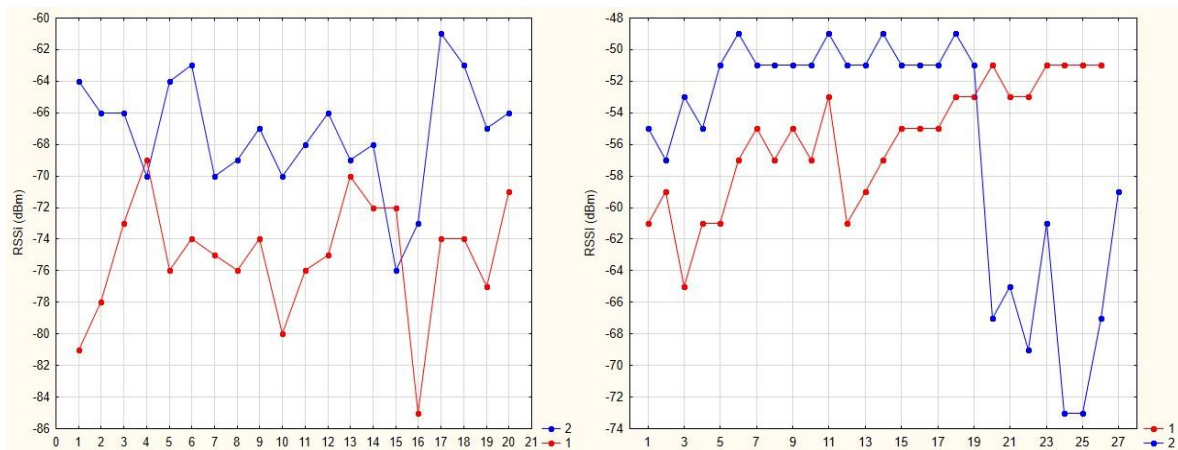
$$\bar{e} = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (\tilde{x}_i - x_i)^2} \quad (2.2)$$

Díky pohybu osob není vždy možné jednoznačně určit jejich přesnou polohu. Proto je určována její střední hodnota v časovém rozmezí  $[t_a, t_b]$ . Díky střední hodnotě chybovosti lze také určovat přesnost lokalizačních algoritmů, jako procentuální rozdíl naměřených hodnot a reálných hodnot. Je nutné si ale uvědomit, že tento postup je náchylný na řadu faktorů: odlehle hodnoty, přesnost odhadu, přesnost měření, množství naměřených vzorků a kalibrace systému.[2]

Lokalizace je v této práci definována jako matematický model, který určuje polohu objektů. Tento matematický model lze poté implementovat na libovolná zařízení.

## 2.3 RSS

RSS značí sílu příchozího signálu. Tato síla je měřena na přijímačích. RSS je reprezentován RSS indikátorem (RSSi). Tento indikátor je vyjádřen osmi bitovým celým číslem a jeho hodnota je často uváděná v dBm. Maximální a minimální hodnoty se liší v závislosti na použité technologii. Obecně tato hodnota určuje vzdálenost vysílače od přijímače a naopak, přičemž platí, že vyšší hodnota značí menší vzdálenost. Hodnotu RSSi ovlivňuje řada jevů, které jsou dále popsány v kapitole 2.6. Kromě těchto negativních jevů má hodnota RSSi tendenci měnit se i pro nepohybující se zařízení na stejném místě. Tento efekt je nepříjemnou vlastností, díky které některé systémy s RSSi nepracují. Obrázek 2.1 ukazuje vývoj hodnoty RSSi pro dvě nepohyblivá zařízení, každé v různé vzdálenosti od měřícího zařízení. Tento obrázek ukazuje vývoj hodnoty RSSi jak pro Wi-Fi, tak pro Bluetooth.



Obrázek 2.1: Vývoj hodnoty RSSI pro Wi-Fi a Bluetooth. Hodnoty Bluetooth jsou na levém obrázku a Wi-Fi na pravém.

### 2.3.1 Bluetooth

U Bluetooth se hodnota RSSI pohybuje v intervalu  $\langle -127, +20 \rangle$  dBm. Hodnota RSSI je nejčastěji získávána během navazování spojení, kdy tato hodnota není nijak ovlivněna Bluetooth mechanismy na šetření spotřeby. Od nástupu Bluetooth 4.0 existuje ve dvou verzích: Classic a Low Energy. V této práci je popisována a využita verze Classic a to hlavně kvůli zpětné kompatibilitě. K vyhledávání je vyhrazeno 32 kanálů. Proces navázání spojení je inicializován master zařízením, které v pseudo náhodném pořadí prochází dvojice frekvencí a vysílá inquiry zprávy. Následně prochází tyto dvojice znovu a poslouchá jejich odpovědi, které vysílají slave Bluetooth zařízení. Těmto zprávám se říká FHS packets (Frequency Hopping Synchronization) a slave zařízení je vysílá se svojí MAC adresou. Tento proces je několikrát opakován v cyklech. Standardní celková délka vyhledání je 10.24s. Z těchto FHS packetů je následně získávána hodnota RSSI.

Kromě RSSI, spojeného s vyhledáním zařízení, je možné použít i alternativní metody k určení polohy. Tyto metody jsou zmíněny v [2]. Za zmínku stojí Link Quality (LQ) a Inquiry Response Rate (IRR). LQ reprezentuje kvalitu spojení a dá se považovat za RSSI pro spárovaná zařízení. LQ je metoda, která potřebuje aktivní spojení pro získávání informací. Díky tomu může snáze dosáhnout většího množství vzorků. IRR je postup, který využívá počet přijatých inquiry response packetů během daného intervalu. [2][1]

### 2.3.2 Wi-Fi

RSSI u Wi-Fi dosahuje hodnot  $\langle 0-255 \rangle$  dBm, často je tato hodnota reprezentovaná zápornou hodnotou. Reprezentace hodnoty se může lišit podle jednotlivých výrobců. Hodnoty RSSI je



potřeba často kalibrovat pro dané prostředí z důvodu často hustého pokrytí Wi-Fi sítí, ve kterých často dochází k interferenci. Získávání hodnoty RSSi u Wi-Fi je jednodušší než u Bluetooth. Důvodem je neovlivnění výsledků pomocí režie spotřeby a možnost získání hodnoty prakticky z jakýchkoliv paketů. Standardně je Wi-Fi RSSi používáno k určení kvality spojení mezi klientem a AP.[3]

## 2.4 Lokalizační přístupy

Lokalizační metody využívají určitý typ média ke zjišťování polohy, často využívaná média jsou vzduch, voda nebo země. V této práci je zkoumáno použití vzduchu jako přenosového média. Oblíbený model u této metody využívá propagaci signálu. Kromě tohoto přístupu je možné využít třeba gyroskop nebo akcelerometr. Příkladem tohoto použití mohou být kontroléry pro herní konzole [19]. Další metodou může být lokalizace na bázi zpracování obrazu, která pracuje s existujícím kamerovým systémem (viz. 2.5.8).

Metody využívající propagaci signálu používají k určení polohy informace získané z přijatých zpráv od cílových objektů. Důležitou informací tvoří síla přijatého signálu dané zprávy, které se říká RSSi, která byla představena v předchozí kapitole. Síla signálu ztrácí na síle exponenciálně při cestě prostorem. Tato funkční závislost mezi vzdáleností a silou signálu nám dává možnost určit vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem. V této části jsou představeny používané možnosti lokalizace.

### 2.4.1 Postupy založené na síle signálu

#### Sousedství

Tento postup využívá sílu signálu k určení relativní vzdálenosti mezi senzorem a cílem. K tomuto určení je zapotřebí změření síly signálu cíle z pohledu senzoru. Sensory, které naměří větší sílu signálu, jsou umístěny blíže k cílovém zařízení než ty, co naměřily menší hodnotu. Systémy, využívající tento postup, spoléhají na vytvoření relativního pořadí senzorů, mezi kterými se cíl nachází. Spíše, než určení přesné pozice, tyto systémy spoléhají na vytvoření geometrického obrazce prostoru, ve kterém je zařízení umístěno. Na základě této oblasti je posléze proveden odhad pozice zařízení.[2]

Pro dosažení přijatelné míry přesnosti, systémy využívající tento postup potřebují nasazení velkého množství senzorů, aby bylo zajištěno husté pokrytí oblasti a minimalizace

výsledných obrazců. Hlavní výhodou tohoto řešení je minimální nutná kalibrace a snadná implementace. Příkladem řešení tohoto typu může být Ecolocation [17] nebo ROCKRSSI [18].

## **Vzdálenost**

Na rozdíl od postupů v předchozí části, metody v této skupině určují polohu pomocí mapování RSSi na vzdálenost, která pak určuje vzdálenosti mezi cílem a senzorem. Předpokladem pro použití tohoto postupu je kalibrace cílového modelu kvůli vlastnostem prostředí. Vlastnosti prostředí, jako je fyzická struktura oblasti nebo síla vysílače, musí být metodě známé. K určení vzdálenosti mezi přijímačem a vysílačem za použití RSSi se často používá Log-Normal Shadowing (LNS).[20] K určení polohy zařízení je možné použít třeba Trilateracion (viz. 2.5.4).

## **Fingerprinting**

Metody využívající vzdálenost nebo příbuzenství spoléhají na fakt, že zmenšení hodnoty RSSi je zapříčiněno zvýšením vzdálenosti. Tento předpoklad je správný v prostředí, kde neexistuje žádný šum. V reálných podmínkách vždy existuje nějaký šum způsobený jinými vysílači, který způsobuje interferenci. Prostor samotné také způsobuje blokování signálů nebo Multipath efekt (viz 2.6). Metody používající Fingerpring proto nepředpokládají vztah mezi vzdáleností a RSSi, ale pracují s hodnotu RSSi, která se váže k určité specifické oblasti. To znamená, že na konkrétním místě bude relativní rozložení RSSi konstantní.[2]

Na základě tohoto předpokladu je vytvářen takzvaný otisk, který slouží jako reprezentace rozdělení RSSi na určitém místě, které konkrétní senzor může zaznamenat. Tento otisk je vytvářen z pohledu konkrétního senzoru a je reprezentován střední hodnotou nebo histogramem hodnot RSSi naměřených na konkrétním místě. Všechny tyto otisky poté tvoří tzv. mapu otisků, ze které se při lokalizaci čtou otisky pro porovnání. K dobré účinnosti je potřeba mít dostatečné množství dat v mapě otisků. Při tvorbě otisků je zapotřebí nalézt ideální mez množství vzorků. Zvyšování množství vzorků přes tuto mez nepřináší lepší výsledky, jak je řečeno v [21].

Velkou nevýhodou tohoto systému je častá nutnost kalibrace. Jakékoliv změny prostředí mění reálnou hodnotu RSSi a záznamy v mapě otisků přestávají souhlasit.

## 2.4.2 Postupy založené na čase

Alternativou k metodám založeným na RSSi je možnost určovat vzdálenost na základě Time Of Arrival (TOA). Pokud  $t_0$  je čas ve kterém byl signál vyslán a  $t_i$  je čas, ve kterém byl signál přijat na senzoru  $i$ , pak dráha  $s$  je určena standardní rovnicí 2.3.[5]

$$s = (t_i - t_0) * v \quad (2.3)$$

V této rovnici je  $v$  rychlost signálu v daném médiu. Výsledná pozice je určena pomocí údajů ze třech senzorů za pomoci Trilateration. Pro úspěšné určování je nutná synchronizace času na senzorech a vysílačích. To může být často problém, proto existuje alternativní metoda zvaná Time Difference Of Arrival (TDOA). Rozdíl mezi metodami je měření  $t_i$  na dvou senzorech a jejich rozdíl je porovnáván s daty z ostatních párů senzorů. Toto řešení požaduje synchronizaci času už pouze mezi senzory [5] Možné řešení tohoto problému se synchronizací řeší Differential Time Difference Of Arrival (DTDOA). Tento postup funguje podobně jako TDOA, ale eliminuje nutnost synchronizace času mezi senzory. Jako kompenzaci představuje vysílací uzel, který vysílá signál, který je opakován lokalizačním cílem. Senzor poté dostává signál od vysílače a lokalizačního cíle a na jejich základu, podobně jako v předchozím případě, určí vzdálenost, přitom vzdálenost mezi senzory a vysílacím uzlem je předem dána. [2]

## 2.4.3 Postupy založené na filtrech

Tyto postupy se skládají převážně z matematických metod, které mají, na základě provedených měření, za úkol nalézt zjistitelné parametry, které by mohly pomoci k přesnějšímu určení polohy. I když se nejedná přímo o postup určený k lokalizaci, přínos těchto postupů může pramenit v nalezení korelací mezi získávanými informacemi a objevení skrytých atributů, které vedou ke zvýšení účinnosti systému. Příklad lze najít v [23], kde systém používá ultrazvuk a Odometry k určování pozice. Existuje celá řada filtrů, mezi známější patří Kalman filtr [24] a Monte Carlo filtr [25].

## 2.5 Přehled algoritmů

### 2.5.1 Ecolocation

Jméno Ecolocation je odvozené z „Error COntrolling LOCALizaTION“ a patří do skupiny algoritmů založených na sousedství. Princip tohoto algoritmu je jednoduchý a jeho implementace je relativně snadná. Výhoda tohoto algoritmu je jeho přesnost a robustnost vůči

vlastnostem okolí. Díky využívání RSSi, pouze jako indikátoru pořadí jednotlivých sond, je méně náchylný ke všem negativní efektům, které jsou zmíněny dále.

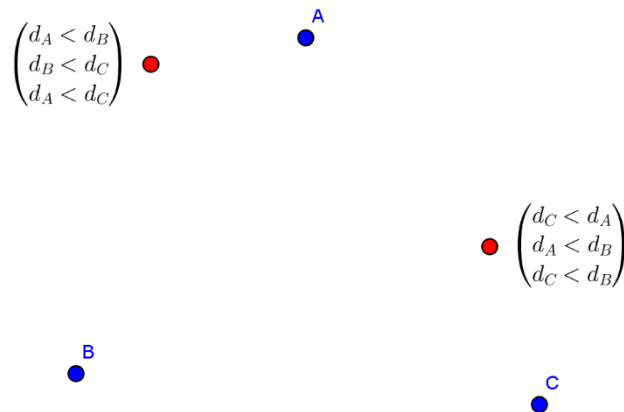
Princip Ecolocation je instalování množiny sond se známou pozicí do lokalizační oblasti. Tyto sondy slouží jako referenční body celého systému. Ukázka lokalizačního prostoru se třemi sondami je na obrázku 2.2. Při detekci zařízení je ze všech sond v okolí lokalizovaného zařízení získáno jeho RSSi. Tyto hodnoty poté složí k sestavení relativní vzdálenosti zařízení od jednotlivých sond. Pokud máme dvě sondy  $a_i$  a  $a_j$ , kde  $i \neq j$ , pozici zařízení  $y$ , pak  $y$  je blíže k  $i$  nebo k  $j$  a to v závislosti na naměřených hodnotách. Z hodnot RSSi od všech sond se sestaví matice  $M$ , kde na každém poli se může vyskytnout číslo 1,0 a -1. Tyto hodnoty jsou určeny rovnicí 2.4.

$$M_{n*n}(i,j) = \begin{cases} 1, & RSSi_i > RSSi_j \\ 0, & RSSi_i = RSSi_j \\ -1, & RSSi_i < RSSi_j \end{cases} \quad (2.4)$$

$$M_{n*n}(i,j) = Ceiling\left(\frac{RSSi_i - RSSi_j}{RSSi_{\Delta MAX}} * x\right) \quad (2.5)$$

V této rovnici označuje  $RSSi_{i,j}$  hodnoty od sondy  $i,j$  a  $n$  je počet sond v dosahu od lokalizačního cíle. Pro každý bod v lokalizačním prostoru je poté určena vzdálenost od každé sondy. Pro každý tento bod je vytvořena matice  $D$ , kde je hodnota každého pole určena rovnicí 2.4, tentokrát ale s tím rozdílem, že místo hodnot RSSi se porovnávají vzdálenosti mezi bodem a každým senzorem. V momentě kdy je matice vytvořena je porovnána s maticí  $M$ . Pokud se hodnoty na stejných polích rovnají, konkrétnímu bodu je zvýšena hodnota  $X$ , která určuje počet stejných hodnot. Po porovnání všech bodů s maticí  $M$  jsou body s nejvyšší hodnotou  $X$  určeny jako kandidáti na pozici zařízení. Pokud existuje více bodů se stejnou hodnotou  $X$  pak výsledná pozice je určena pomocí centroidu. Detailní popis zmíněného algoritmu je možné nalézt v [17].

Ani tento postup není úplně imunní k rušení, proto je v [42] navrženo rozšíření stávajícího algoritmu o váhy. Tyto váhy jsou připočítány ke každému určení hodnoty v maticích  $M$  a  $D$ . Rovnice 2.5 ukazuje proces určení hodnoty v maticích  $M$ , kde se porovnávají hodnoty RSSi. Matice  $D$  používá stejný vzorec, ale hodnoty RSSi jsou znovu nahrazeny vzdálenostmi. Číslo  $x$  určuje váhu, která je určena experimentálně.



Obrázek 2.2: Lokalizační prostor rozdělený pomocí 3 sond A, B a C.

## 2.5.2 Log-Normal Shadowing

Jak bylo zmíněno dříve, tento postup se hlavně používá na určení vzdálenosti mezi dvěma vysílači a to pomocí převádění RSSi na vzdálenost. Ke správnému určení vzdálenosti je nutné provést testovací měření, pomocí kterého jsou algoritmu předány vlastnosti prostředí. Tento algoritmus je popsán rovnicí 2.6.

$$P_d = P_0 - 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma \quad (2.6)$$

V této rovnici  $P_d$  označuje přijatou sílu signálu vysílače naměřenou na senzoru, který je vzdálený  $d$  od daného vysílače. Tento model předpokládá exponenciální ztrátu hodnoty signálu RSSi při průchodu prostorem s parametrem  $n$  (path loss exponent). Ve vakuu nebo v neohrazeném prostoru je hodnota  $n = 2$ . V kancelářských budovách je  $n > 2$  díky přítomnosti zdí a dalších materiálů, které zapříčiní rychlejší pokles hodnoty RSSi. Díky těmto parametrům je hodnota  $n$  určována empiricky. Dalším parametrem je  $P_0$ , což je síla signálu na referenční vzdálenosti  $d_0$  (většinou 1). Tento parametr silně závisí na orientaci antény u přijímače i vysílače a je potřeba ji nastavovat speciálně pro každé zařízení. Jako poslední je do rovnice přidána náhodná hodnota  $X_\sigma$ , což je hodnota s nulovou střední hodnotou a směrodatnou odchylkou  $\sigma$ . Tato proměnná reprezentuje odchylku v měření a je vyjádřena v dBm.[2]

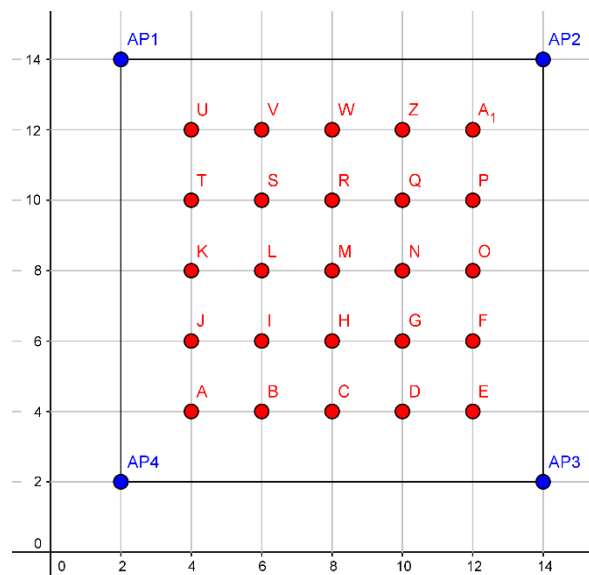
## 2.5.3 Fingerprinting

Fingerprinting je jednoduchá metoda, která spočívá v iterativním měření vzorků RSSi na konkrétním místě po stanovenou dobu  $d$ . Po nasbírání dostatečného množství vzorků je

vytvořen otisk, který je zanesen do mapy otisků, obsahující ostatní otisky pro všechny body v lokalizační oblasti. Ukázka prostoru rozděleného otisky je na obrázku 2.3. Této fázi se taky říká fáze učení, protože připomíná učení systému pomocí dat z dané oblasti. V momentě zkonstruování mapy celé měřené oblasti systém přechází do fáze, ve které sleduje polohy zařízení. V této fázi jsou po stejnou dobu  $d$  měřeny hodnoty RSSi od uživatelů. Tyto údaje jsou porovnávány s mapou otisků. Poloha zařízení je následně přiřazena otisku, s nejpodobnější hodnotou v mapě otisků. Častým algoritmem používaným v tomto případě je k-NN u kterého se počítá vážený průměr pozice otisku. Krom k-NN je možné použít například Bayesovský klasifikátor [28][29], rozhodovací stromy [30], neuronové sítě [31][32] a mnohé další [33][34]. Z těchto přístupů přináší k-NN, ve většině případů, nejlepší výsledky. V této práci bude krom k-NN ukázán ještě Bayesovský klasifikátor a neuronové sítě.

Otisky jsou často reprezentovány jako vektor každého AP (Access Point) v systému a střední hodnotou RSSi. Další možnosti reprezentace RSS jsou pomocí mediánu, variace nebo množinou histogramů RSSi. K určení polohy se kromě k-NN může použít i Eukleidovská vzdálenost, např. v [11]. Rovnice 2.7 představuje funkci  $f$  pro výpočet pozice  $(a, b)$ , kde  $n$  je počet AP.

$$f(a, b) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (b_i - a_i)^2} \quad (2.7)$$



Obrázek 2.3: Použití metody Fingerprinting v lokalizačním prostoru pro čtyři AP.

## k-NN

$k$ -NN je klasifikátor, který porovnává trénovací data se vstupem. Tento algoritmus je známý svou přesností a snadnou implementací a právě díky tomu je často používán. K určení výstupu porovnává vstupní vektor a trénovací data pomocí metody na určení vzdálenosti. Často se k tomuto účelu používá Eukleidovská vzdálenost. Počet  $k$  instancí, které jsou nejpodobnější vstupu, jsou vybrány a každé instanci je přidán hlas, který instance automaticky dává své třídě. Třída s nejvíce hlasy je poté vybrána jako výstup. Výhoda  $k$ -NN je ve snadné implementaci a dobrých výsledcích. Nevýhoda tohoto klasifikátoru je přidělení hlasu každé instanci, bez ohledu na její vzdálenost od vstupu. Proto je často používaná verze, která přiřazuje váhy instanci na základě jejich vzdálenosti od vstupu. Výhodou tohoto přístupu je hlasování pouze instancí, které jsou nejbližší ke vstupu.[45]

## Naivní Bayesovský klasifikátor

Naivní Bayesovský klasifikátor je založený na Bayesovské statistice. Jmenovitě na výpočtu pravděpodobnosti jevu  $A$  za podmínky  $B$ . V případě použití spolu s Fingerprinting lze toto aplikovat na pravděpodobnost výskytu otisku  $A$  v třídě  $B$ , kde třída je pozice vyjádřená jako množina měření RSSi na konkrétním místě. Tomuto klasifikátoru se říká naivní, protože předpokládá nezávislost hodnot ve vstupní množině. Standardní rovnice pro podmíněnou pravděpodobnost je upravena do tvaru 2.8 pro zadaný problém.

$$P(B|A) = P(B) * \prod_i P(x_i|B) \quad (2.8)$$

Ke klasifikaci  $A$  je následně určena třída s nejvyšší pravděpodobností. Klasifikátor určí správnou hodnotu za předpokladu, že správná třída má i nejvyšší pravděpodobnost.[45]

## Neuronové sítě

Neuronové sítě představují možnost jak zlepšit úroveň účinnosti lokalizace a to díky eliminaci účinků rušení a šumu ve vnitřních prostorách. Neuronové sítě využívají nasbíraná data k učení celého systému. Tyto data mohou být nasbírány manuálně nebo předpovězeny matematickým modelem.[32] Při zastarávání informací v databázi jsou k přetrénování sítě používány různé modely. V [35] jsou takové modely zkoumány. Postup lokalizace se liší podle každého řešení, některé neuronové sítě využívají  $k$ -NN k lokalizaci [35], některé používají jiný model [31].

## 2.5.4 Trilateration

Trilateration je známá a ověřená metoda k určování polohy. K určení polohy využívá 3 referenční body se známou polohou a vzdálenost cíle od každého referenčního bodu. Při použití více než 3 bodů je tato metoda přejmenována na Multilateration. Vzdálenost cíle od referenčního bodu je často určena pomocí rovnice 2.6. Tyto referenční body slouží jako středy kružnic s poloměrem odpovídajícím vzdálenosti od cíle. Ve 2D prostoru s  $n$  referenčními body lze určit reálnou pozici  $(x, y)$  pomocí rovnice 2.9. V rovnici 2.9  $d'_i$  udává vzdálenost neznámého bodu k referenčnímu bodu  $i$ , kde  $i \in \{1, \dots, n\}$  se souřadnicemi  $(x_i, y_i)$ , [40]

$$d'_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} \quad (2.9)$$

Díky negativním efektům vztahujícím se k chování rádiových vln ve vnitřních prostorech (viz 2.6), je nutné výsledek optimalizovat. K tomuto účelu bude v této práci představena optimalizace metodou nejmenších čtverců (LS) a MinMax (MM) algoritmem. Pro optimalizaci pomocí LS je potřeba v rovnici 2.9 odečíst  $n$ -tou rovnicí od každé další. Tento postup je dán rovnicí 2.10.[43]

$$\begin{cases} 2(x_1 - x_n)x + 2(y_1 - y_n)y = (x_1^2 - x_n^2) + (y_1^2 - y_n^2) - (d_1^2 - d_n^2) \\ \vdots \\ 2(x_{n-1} - x_n)x + 2(y_{n-1} - y_n)y = (x_{n-1}^2 - x_n^2) + (y_{n-1}^2 - y_n^2) - (d_{n-1}^2 - d_n^2) \end{cases} \quad (2.10)$$

Rovnice 2.10 je převedena do maticového tvaru  $AX = B$ , kde matice  $A, X$  a  $B$  jsou určeny pomocí předpisu 2.11. S použitím LS je možné získat rovnici  $X = (A^T A)^{-1} A^T B$ . Vyřešením této rovnice je možné získat pozici zařízení  $(x_0, y_0)$ . [43]

$$A = 2 * \begin{bmatrix} x_1 - x_n & y_1 - y_n \\ \vdots & \vdots \\ x_{n-1} - x_n & y_{n-1} - y_n \end{bmatrix}$$

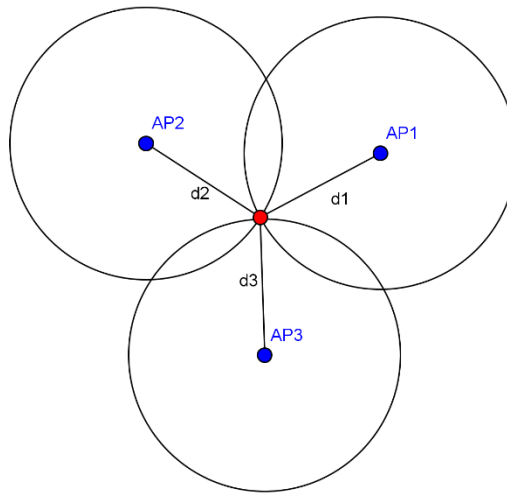
$$B = \begin{bmatrix} (x_1^2 - x_n^2) + (y_1^2 - y_n^2) - (d_1^2 - d_n^2) \\ \vdots \\ (x_{n-1}^2 - x_n^2) + (y_{n-1}^2 - y_n^2) - (d_{n-1}^2 - d_n^2) \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

$$X = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$$

V [44] je používán MinMax algoritmus, který předpokládá, že bod, který je blízko vzdáleností k referenčním bodům, je také blízko k průsečíku všech vzdáleností. V každém kroku algoritmu je zapamatována největší hodnota, koncovou pozicí bude bod s nejmenší zapamatovanou vzdáleností.[44]



Na obrázku 2.4 je ukázka lokalizace pro 3 referenční body. V případě bezdrátové lokalizace slouží jako referenční body vysílací věže nebo AP. Na průsečíku všech kruhů se poté nachází lokalizované zařízení. Častým jevem je množina více průsečíků kružnic, která často vytvoří jen určitou geometrickou oblast. Řešením tohoto problému může být zmíněná optimalizace, zprůměrování vzdáleností nebo adaptování fází učení systému před fází nasazení. Příkladem použití může být [27].



Obrázek 2.4: Ukázka ideální lokalizace pomocí metody Trilateration.

## 2.5.5 Triangulation

Tento postup využívá k určení polohy úhel svíraný vyslaným signálem ke kontrolní stanici. Tato metoda patří do rodiny metod Angle of Arrival (AOA). K určení úhlu je zapotřebí vybavit zařízení směrovými anténami, kompasem, alespoň dvěma ultrazvukovými přijímači nebo sadou nesměrových antén. Pokud je možné určit příchozí úhel, je možné odvodit jednoduchý vztah pro výpočet vzdálenosti. V případě 2D prostoru je potřeba znát souřadnice dvou známých vysílačů  $(x_1, y_1)$  a  $(x_2, y_2)$ . Pozice  $(x, y)$  je následně možné určit pomocí rovnic 2.12-13, kde  $\theta_1$  a  $\theta_2$  jsou příchozí úhly svírané s vysílacími stanicemi.[1]

$$\tan(\theta_1) = \frac{y - y_1}{x - x_1} \quad (2.12)$$

$$\tan(\theta_2) = \frac{y - y_1}{x - x_1}$$

$$y_i - x_i \tan(\theta_i) = y - x \tan(\theta_i) \quad (2.13)$$

Další metodou je použití tři kontrolních stanic, kde tyto stanice tvoří vrcholy trojúhelníku. Při znalosti pozic kontrolních stanic a přichozích úhlů lze určit polohu zařízení uvnitř trojúhelníku.

### **2.5.6 Cell of Origin**

Podobně jako Fingerprinting (viz. 2.5.3), tento přístup používá dvě fáze: fázi trénování a fáze provozní. Ve fázi trénování se sledovaný prostor rozdělí do buněk, kde se každé buňce přiřadí alespoň jeden vysílač. Do databáze systému se zavedou kombinace buňky a jejích vysílačů. Každá buňka může být určena nejen přítomností konkrétní množiny vysílačů, ale i silou jejich jednotlivých signálů. Koexistence některých věží pro více buněk je často řešena přidáním priorit a rolí. Ve fázi provozní, sledované objekty skenují oblast kolem sebe a ukládají si data o okolních vysílačích. Tyto informace jsou poté odesílány kontrolnímu systému, který na základě porovnání údajů z databáze určí polohu uživatele. [1]

### **2.5.7 Particle filter**

Princip tohoto filtru je náhodné generování velkého množství částic, které v tomto případě odpovídají pozicím v lokalizačním prostoru. Na základě limitů prostoru (částice nacházející se mimo vymezený prostor, ve stěnách atd.) lze vypustit částice, které nepomáhají určení pozice a k lokalizaci použít pouze ty, které pomáhají. Filtrování částic probíhá na základě určité sady parametrů a částicím jsou přiřazeny váhy podle toho, jak berou tuto sadu parametrů v potaz. Postupně tak v systému zůstanou pouze částice, které přímo přispívají k lokalizaci. Při inicializaci jsou částice generovány náhodně a náhodně rozdělovány v lokalizované oblasti. Postupně jsou ale vytvářeny pouze částice, které kopírují předchozí vytvořené částice s vysokou váhou. Pokud počet částic klesne na nízkou hodnotu, nové částice jsou náhodně dodány. Příklad tohoto postupu ve spojení s Fingerprinting lze najít v [37].

Kromě lokalizace je tento postup možné použít k vytváření plánů prostředí, ve kterém je lokalizace prováděna. V [47] je tento postup zkoumán, spolu s Triangulation, k tomuto účelu.

### **2.5.8 Zpracování obrazu**

Určování polohy může probíhat také za pomoci manipulace s obrazem a zjišťováním informací v něm obsažených. Systém založený na tomto principu se skládá z mnoha částí, které mají na starost zachytávání obrazu, jeho zpracování, určení lokalizačních informací a

samotnou lokalizaci. Systém získává obraz ze senzoru, který je poté transformován do digitální podoby. Obrazy v digitální podobě jsou zpracovávány a analyzovány, v digitálních obrazech jsou hledány markanty, podle kterých se posléze určuje lokalita. Ukázkou toho systému může být [36].

## 2.6 Chování elektromagnetických vln ve vnitřních prostorách

Při cestě, v jakémkoliv médiu a při průchodu materiály, se vlastnosti a směr elektromagnetických vln mění. Kromě změny směru dochází i ke ztrátě výkonu. Kromě efektů popsaných dále, efekt ztráty signálu nastává i přirozeně ve volném prostoru a to díky vzdálenosti, kterou signál projde. Důvodem je exponenciální snižování síly signálů při průchodu prostorem.

Šíření elektromagnetických vln od antény vysílače se dá přirovnat k šíření seismických vln od epicentra zemětřesení. Elektromagnetické vlny se také rozšiřují od středu, ve kterém se ale v tomto případě nachází vysílač. Při průchodu pevnými objekty nebo při dosažení určité vzdálenosti se tento pohyb může změnit.

Při šíření může docházet k různým efektům zhoršujícím kvalitu signálu. Jedním z nich je pohlcení signálu. Tento efekt nastává při ztrátě signálu v momentě, kdy se signál neodrazí, neprojde skrz nebo neobejde objekt, pak je 100% signálu pohlceno. Většina materiálů pohlcuje část energie záření do určitého množství. Kromě materiálů prostředí je v [5] naznačeno, že díky obsahu vody v lidské těle dochází k zhoršení signálu při zvýšeném počtu osob.

Kromě pohlcení signálu může nastat také jeho odrazení, rozptýlení, lom nebo difrakce. Odrazení nastává v momentě, kdy vlna narazí do většího objektu a je změněn její směr. Ve vnitřních prostorách k tomuto efektu dochází na stěnách, dveřích a všech kovových površích. Rozptýlení se dá popsat jako několikanásobné odrazení. Příčina tohoto efektu je naražení do objektu s větší vlnovou délkou, než má vlastní vlna. Kromě odrazení a pohlcení může také docházet k lomu vlny. K tomuto efektu dochází při průchodu materiálem s jinou hustotou. Difrakce, na rozdíl od lomu, neohýbá vlnu při průchodu materiálem, ale ohýbá vlnu okolo procházejícího objektu. Difrakce potom popisuje ohnutí a šíření vlny okolo objektu. Podmínky pro tento efekt závisí na materiálu, velikosti a tvaru objektu. Všechny tyto efekty negativně přispívají ke ztrátě signálu, což vyústí ve snížení hodnoty síly signálu. Díky odrazení nebo lomu dochází k rozdělení signálu, kterému se říká Multipath. Tento efekt popisuje situaci, kdy na přijímač dorazí signál ze dvou cest ve stejnou dobu nebo v rozmezí několika

milisekund. Podrobný popis všech těchto jevů a dalšího chování elektromagnetických vln lze najít v [41].[39]

## 2.7 Veřejná data

Lokalizační systém, navrhovaný v této práci, využívá k určení polohy veřejná data. Tento pojem by mohl být definován jako kolekce dat, která je volně dostupná komukoliv. Tato práce využívá tato data k lokalizaci a identifikaci osoby resp. zařízení. Tato data jsou používány z důvodů jejich všeobecné dostupnosti a dovolují systému fungovat bez nutnosti interakce uživatelů se systémem. K lokalizaci je zapotřebí pouze zařízení s povolenou, alespoň jednou, ze zkoumaných technologií. Zařízení samo už se poté postará o vysílání informací potřebných k lokalizaci. V této práci jsou zkoumány dvě technologie, obě jsou jiné a z obou jsou informace získávány jiným způsobem:

- U Wi-Fi jsou veřejná data zastoupena management rámcí. Tyto rámce běžně slouží ke správě spojení mezi klientem a AP. Kromě management rámců existují ještě další dva typy rámců: control a data. Typ resp. podtyp každého rámce je možné zjistit z hlavičky 802.11 rámce v poli Frame Control. Zde jsou ale využívány pouze management rámce a to hlavně *probe\_request*, který klient vysílá při vyhledání AP. Tento rámec je vysílán i po připojení klienta k AP, tudíž není potřeba mít obavu o ztrátu připojených klientů.
- U Bluetooth jsou používány informace spojené s vyhledáváním zařízení. Tento postup byl již nastíněn v 2.3.1.

## 3 Realizace

V této částice je představeno řešení navrhovaného systému společně s parametry, které musí systém splňovat. Kromě obecných požadavků je zde nastíněn běh celého systému a design jeho jednotlivých částí. Cíl následujících sekcí je seznámení s navržením systému.

### 3.1 Atributy systému

Vhodnost použití lokalizačního systému se určuje pomocí sady atributů. Tato sada určuje do jaké míry je lokalizační systém vhodný pro danou oblast. V této práci je používána následující sada atributů:

- **Přesnost** Hlavní parametr systému, který udává průměrnou hodnotu rozdílu odhadovaná pozice a reálné pozice, tzn. střední hodnotu chybovosti lokalizačního odhadu. V této práci je používán pojem systém s velkou přesností, což znamená systém s malou střední hodnotou chybovosti.
- **Rychlost reakce systému** Udává rychlost, s jakou systém dokáže reagovat na přítomnost lokalizovaného zařízení.
- **Kalibrace** K dosažení vysoké přesnosti některé systémy vyžadují častou kalibraci. Množství úsilí vydaného na kalibraci systému může mít vliv na vhodnost použití celého systému. Důležitým faktorem je, jestli je kalibraci nutno provést jednou nebo pravidelně.
- **Adaptace** Změny v lokalizačním prostoru mohou ovlivnit přesnost. Je důležité, aby systém dokázal kompenzovat tyto změny, což také následně snižuje nutnost kalibrace.
- **Oblast pokrytí** Lokalizační systém potřebuje k určení polohy určité množství senzorů, které dokáží spravovat danou oblast. Celková cena systému je malá, pokud lokalizační systém dokáže s malým počtem zařízení spravovat velkou oblast.
- **Rozšiřitelnost** Při nedostatečné pokrytí celé oblasti je potřeba zajistit, aby bylo možné do systému snadno přidat další zařízení pro pokrytí celé lokalizační oblasti.

### 3.2 Lokalizační parametry

Úspěšnost lokalizačního systému závisí, kromě atributů popsanych v předchozí sekci, ještě na sadě parametrů. Tyto parametry se dají rozdělit do dvou skupin ovlivnitelné a neovlivnitelné.

### 3.2.1 Ovlivnitelné parametry

Sadu parametrů, kterou je možné nastavit a je systému známá nebo se dá předpovědět. Tato sada parametrů souvisí s nastavením sond a je proto možné jí často určit. Sadu je možné poté brát v potaz při lokalizaci.

- **Lokalizační okno** Časové okno, během kterého je nasbíráno dostatečné množství informací k lokalizaci. Obecně platí, že s větší velikostí okna je docíleno vyšší lokalizační přesnosti díky ustálení hodnoty RSSI. Na druhou stranu příliš velké okno může zapříčinit ztrátu rychlosti reakce systému.
- **Počet sond** Při větším množství sond, náležících k určité oblasti, systém dokáže získat více informací a určit pozici zařízení s větší přesností. Je možné předpokládat, že lokalizační přesnost poroste s větším množstvím sond.
- **Rozložení sond v lokalizačním prostoru.** Rozložení systému je třeba dobře rozmyslet, kvůli možným hluchým místům a oblastem, které systém nedokáže určit. Pro ideální rozložení sond bylo v dřívějších pracích určeno ideální rovnoměrné rozložení sond v lokalizačním prostoru.[2]

### 3.2.2 Neovlivnitelné parametry

Sada parametrů, která není systému známá a systém nad ní nemá žádnou kontrolu. Lokalizační systém proto tyto parametry považuje za neznámé nebo náhodné a jejich hodnotu může pouze odhadnout. Vzhledem k možnosti ovlivnění přesnosti je nutné, aby systém tyto parametry dovedl kompenzovat.

- **Typ zařízení** Díky heterogenní množině zařízení je nutné předpokládat, že každé zařízení má jiný radiační vzor a to díky různým anténám od různých dodavatelů. Při použití nesměrových antén hraje roli i obal zařízení a materiál, ze kterého je vyrobený. Další rozdíl může být v různé síle signálů vysílaných různými zařízeními. Senzor poté může měřit stejné hodnoty pro zařízení v různých vzdálenostech.
- **Orientace zařízení** Lokalizace osob probíhá pomocí lokalizace zařízení s aktivní specifikovanou technologií. Vzhledem k tomu, že uživatelé mohou zařízení nosit kdekoliv a mít ho v jakémkoliv úhlu, systém nemůže tuto skutečnost kompenzovat. Kromě úhlu je systému neznámá i výška zařízení, kterou systém nedokáže určit bez použití směrových antén. I když lokalizační systém nepracuje s výškou, tento efekt ovlivní naměřené hodnoty. Orientace zařízení také hraje roli díky neuniformnosti

radiačního vzoru, který je spíše funkcí vzdálenosti a úhlu mezi vysílačem a přijímačem.[2]

- **Struktura prostředí** Struktura prostředí má na chování elektromagnetických vln ve vnitřních prostorech velký vliv (viz. 2.6). Vzhledem k povaze změn, které mohou být skoro náhodné, je třeba tyto změny kompenzovat nebo minimalizovat.

### 3.3 Požadavky na systém

Na základě cíle práce, lokalizačních parametrů a představených atributů systému, lze určit konkrétní požadavky, které musí navrhovaný lokalizační systém splňovat.

- Lokalizační systém musí být schopný určit pohyb osoby s rozumnou odchylkou. Rozumnou odchylkou se myslí taková chyba měření, která nezabrání určení trasy pohybu v objektu. V této práci je maximální průměrná chyba stanovena na 5 metrů.
- Kalibrace systému musí být minimální. Vzhledem k oblasti nasazení a počtu zařízení je nutné zabezpečit, aby nebyla nutná složitá a dlouhá kalibrace systému.
- Systém musí být schopný přizpůsobit se změnám prostředí. Vzhledem k dynamickému charakteru vnitřních prostor je potřeba zabezpečit, aby se systém byl schopný adaptovat změnám prostředí. Pokud by toho systém nebyl schopný, mohlo by časem dojít k výraznému poklesu lokalizační přesnosti.
- Jediným požadavkem pro určení polohy je nutná přítomnost zařízení se zapnutou alespoň jednou zkoumanou technologií. Důvod pro zvolení tohoto požadavku je hlavně pohodlí uživatelů systému. Pokud uživatel nebude mít u sebe žádné zařízení se zapnutou alespoň jednou technologií, nebude systémem lokalizován.
- Lokalizační systém je nastaven pro operování v rámci jednoho patra. Tento scénář zjednodušuje situaci, přestože lokalizační systém by v realitě fungoval na více patrech. Tento přístup ale není v této práci řešen.
- Systém určuje pozici v dvojdimenzionálním prostoru rovnoběžném s podlahou. To znamená, že lokalita je vyjádřena dvojicí souřadnic  $x$  a  $y$  s nulovou hodnotou  $z$ .
- Systém využívá k určení polohy pouze veřejná data.

## 3.4 Návrh systému

Na základě požadavků na systém a atributů systému byl navržen a implementován lokalizační systém, jehož detaily budou představeny v následujících podkapitolách. V této podsekcí budou představeny části, ze kterých se systém skládá a design celého systému. V této části je systém představen pouze z designového pohledu a obecně popsané funkčnosti.

### 3.4.1 Zařízení použitá v systému

Tento systém je určen pro implementaci na zařízení z IoT. Tato platforma je zvolena díky výkonu, velikosti, ceně a dostupnosti. Toto zařízení bude reprezentovat Udoo Neo Extended. Tento lokalizační systém je navrhován, aby byl plně autonomní, proto kromě zařízení Udoo není třeba do tohoto systému začleňovat žádné další členy.

### 3.4.2 Udoo Neo

Důvod pro výběr tohoto zařízení je jeho velikost a přítomnost obou testovaných technologií. Kromě toho má zařízení dostatečný výkon k tomu, aby mohlo nést celou váhu systému. Vzhledem k požadavku na autonomnost systému, Udoo Neo vykonává jak běh lokalizačních algoritmů, tak funguje jako sonda pro sběr veřejných dat. Pro funkčnost systému není nutné nasazení právě na zařízení Udoo Neo. Systém je navržen, aby byl co nejvíce flexibilní, proto je možné tento systém nasadit na jakémkoliv zařízení z IoT, které splňuje minimální požadavky.

### 3.4.3 Lokalizační algoritmy

V části s teoretickým návrhem byly představeny algoritmy, které byly již dříve navrženy a otestovány. Z této množiny algoritmů byly vybrány tyto: Ecolocation a Multilateration. Oba tyto algoritmy zastupují dva hlavní přístupy a to je kalibrovaná a nekalibrovaná lokalizace. Kalibrovaná lokalizace má výhodu vyšší přesnosti. Její velkou nevýhodou je náchylnost na negativní vliv prostředí a parametry lokalizovaných zařízení, která může nakonec zhoršit konečný výsledek. Nekalibrovaná lokalizace naopak má teoreticky horší přesnost, ale menší náchylnost na parametry prostředí a parametry lokalizovaných zařízení.

K těmto dvěma algoritmům byl přidán ještě algoritmus Proximity. Tento algoritmus nebyl představen v přechozí části a to vzhledem k svojí jednoduchosti. Proximity by se dala považovat za zjednodušený případ Ecolocation a to díky podobnému určení polohy. Tento



algoritmus přiřadí lokalizovanému zařízení souřadnice sondy, která naměřil největší sílu signálu. V případě více stejných hodnot je určen jejich centroid. Tento algoritmus je začleněn kvůli jeho jednoduchosti a díky relativně dobrým výsledkům, které podával v [17].

Vzhledem k nutnosti optimalizovat výsledek, který udává Multilateration, je nutné začlenit optimalizační metody představené v 2.5.4. U Ecolocation jsou vybrány dvě verze: standardní (classic) i vážená (weighted). Seznam testovaných algoritmů může sloužit jako odpověď na výzkumnou otázku č. 5. A to, jaké algoritmy budou testovány:

- Multilateration (LS)
- Multilateration (MM)
- Ecolocation (classic)
- Ecolocation (weighted)
- Proximity

#### **3.4.4 Architektura systému**

Systém je navržen a implementován v jazyce Python a to konkrétně pro verzi 2.7. Systém jako takový je rozdělený do několika procesů, které se starají o jeho plnou funkčnost. Mezi hlavní části patří procesy *WFScanner* a *BTScanner*, které se starají o hledání zařízení v lokalizačním prostoru a získávání hodnoty RSSi nalezených zařízení. Následně jsou hodnoty rozesílány mezi ostatní členy systému. O přijímání informací od ostatních členů systému se stará proces *Server*. Všechny procesy v navrhovaném systému pracují se sdílenou frontou, která slouží jako mechanismus předávání lokalizačních informací. Všechny procesy, až doteď zmíněné, pouze na tuto frontu informace dodávaly. Proces *System* informace z fronty odebírá a následně je analyzuje. Na jejich základě provádí odhad pozice zařízení. Interakce mezi procesy je navržena pomocí návrhového vzoru Producer-Consumer.

Pro řádné fungování systému je nutné, aby všechny zařízení byly připojené ke stejné síti s přístupem k Internetu. Tento požadavek je nutný kvůli rozesílání informací a také potřebě získávat přesný čas. Všechna zařízení jsou součástí multicast skupiny a ve které jsou vyměňovány lokalizační informace. Vzhledem k povaze lokalizačních informací jsou všechny zprávy šifrovány pomocí AES.

Všechny odhady lokalizace jsou ukládány a v periodických intervalech zakreslovány do plánu lokalizačních prostor. Každý den, po skončení běhu systému, jsou všechny zakreslené

pozice odeslány ke zpracování a odstraněny ze zařízení. K odesílání je používán protokol FTPS.

Jak již bylo řečeno dříve, systém musí být připojen k Internetu a to hlavně díky nutnosti synchronizace času pomocí NTP. Systém nemá žádný vlastní mechanismus na získávání času, pouze využívá služby NTP, jako zdroje relativně přesného času.

Díky parametrům cílové oblasti není nutné, aby proces fungoval 24 hodin denně. Nastavená doba spuštění a ukončení systému jsou definovány podle otevíracích hodin cílové oblasti.

Systém ke svému úspěšnému nasazení potřebuje, aby zařízení, na které je systém nasazen, splňovala tyto požadavky: zařízení musí podporovat Bluetooth Classic a vytvoření monitor modu na Wi-Fi interface. Oba tyto kroky jsou nutné k zajištění získání hodnot RSSI. Pro získání času pomocí NTP a výměnu informací mezi ostatními členy systému je nutné připojení ke stejné síti s přístupem k Internetu.

### **3.4.5 Délka skenovacího okna**

Systém provádí skenování lokalizačního prostoru v předem stanovených oknech s pevnou délkou. U Wi-Fi je tato délka stanovena na 1 sekundu, na jehož konci jsou všechny naměřené hodnoty zprůměrovány. Tato hodnota byla stanovena hlavně kvůli vyrušení vyslání velkého množství *probe\_request* rámců, které nastává při zapnutí Wi-Fi. Tento efekt by měl za následek několikanásobné měření pro zařízení na stejném místě. Při použití tohoto postupu nedochází k příliš velkému zkreslení a je možné pracovat s mnohem přesnějšími hodnotami, které minimalizují změny v hodnotách RSSI.

U Bluetooth je tento problém složitější. Jak již bylo zmíněno dříve, tak velikost skenovacího okna může být až 10.24 sekundy, což je příliš dlouho v situaci, kdy systém musí sledovat i pohybující se cíle. Naštěstí je pro realizace Bluetooth skenování používána knihovna PyBluez, která umožňuje nastavení délky okna. V rámci této práce byla délka okna pro Bluetooth stanovena na 5 sekund, na základě testu, jehož výsledky je možné najít dále.

Vzhledem k přítomnosti pohybujících se osob je nutné, aby systém používal k lokalizování pouze vzorky ze stejného časového okna. K tomu je nutná synchronizace času. Díky velikosti okna 5 a 1 sekunda je proto určení vzorku z jiného časového okna relativně snadné a není nutné nijak zohledňovat zpoždění NTP.

Samotné určení lokalizace probíhá při výskytu vzorku od zařízení z okna  $n + 1$ . Vzorky z okna  $n$  poté slouží k určení pozice zařízení z času  $n$ . Pokud je počet vzorků větší nebo rovný minimálnímu počtu potřebnému k lokalizaci, je následně proveden odhad pozice neznámého zařízení. K určení odhadu je nutné, aby lokalizační data obsahovala informace alespoň ze tří sond. V předem určených intervalech jsou analyzovány všechny vzorky, kvůli nalezení hodnot z posledního časového okna. K určení odhadu pozice neznámého zařízení jsou používány pouze informace z jednoho měřicího okna, tento postup je dále testován. Důvod pro použití tohoto postupu je nutnost pokrýt pohybující se objekty. V případě, že by měření bylo příliš dlouhé, vzrůstala by šance, že by byly použity informace z úplně jiného bodu v lokalizačním prostoru, což by mělo za následek znehodnocení výsledků.

### 3.4.6 Použité nástroje

Tento systém využívá k nalezení zařízení dvě knihovny: Scapy a PyBluez. Scapy je knihovna, která podporuje širokou sadu klasických nástrojů vztahujících se k provozu na síti. Jedním ze specializovanějších je možnost odposlechnů na síti. Tuto specializovanou funkci využívá právě tento systém, který pomocí monitor mode interface zachytává *probe\_request* rámce a z nich extrahuje MAC adresu a RSSI.

Knihovna PyBluez byla již dříve zmíněna jako knihovna, zde použitá, pro získávání informací pomocí Bluetooth. Za účelem zrychlení vývoje celého systému je v této práci využíván ukázkový příklad knihovny PyBluez, jako prostředku pro získávání hodnot RSSI. Všechny ukázkové příklady, včetně samotné knihovny, lze nalézt na [45].

## 4 Testování

Po představení návrhu systému jsou v této sekci předkládány výsledky testů, které byly prováděny. Podstatnou část této kapitoly zabírá hodnocení implementovaných algoritmů v dále zmíněných scénářích. Kromě hodnocení algoritmů je zde představen i test, jehož účelem bylo zjištění optimální délky okna použitého u Bluetooth.

### 4.1 Testovací prostředí

Všechny testy, které zde budou představeny, byly provedeny na dvou místech. První z nich je Hardwarová laboratoř (HL), nacházející se v Biologickém centru AV. Druhé místo byly prostory Oddělení robotiky a embedded systémů ústavu Aplikované informatiky v budově C Přírodovědecké fakulty. HL byla vybrána jako čistě testovací prostředí, ve kterém se ověřovala funkčnost systému ve skoro ideálním prostředí. Oblast v budově C byla vybrána, kvůli její struktuře, která odpovídá průměrnému rozložení kancelářských prostor, pro které je tento systém navrhován. V obou oblastech byly stanoveny měřící body, na kterých byly testy prováděny. V HL to bylo 90 bodů a v budově C jich bylo 52. Rozměry jednotlivých oblastí byly následující:

- HL - 8.1 m x 9.2 m
- C - 10.8 m x 9 m

Při testování v budově C došlo k nečekaným komplikacím, které vedly k testování pouze jednoho scénáře rozložení sond v následně zmenšené oblasti. Nicméně data z tohoto redukovaného scénáře byla stejně zohledněna. Při zkoumání výsledků z této oblasti je potřeba přihlídnout k tomuto faktu.

Za účelem nalezení minimálního množství sond, potřebných k fungování systému pro specifickou oblast, byly testy prováděny pouze s maximálně 5 sondami. Testy tedy probíhaly ve zmenšeném měřítku za účelem nalezení optimálního počtu sond pro dané oblasti, které by byly posléze znásobeny, aby bylo dosaženo pokrytí celé cílové oblasti.

V každé z testovacích místností byly sondy rozmístěny do různých vzorců, tato rozložení je možné nalézt v přílohách. Pro každou oblast byly určeny body, na kterých bude pro každé rozložení sond probíhat měření. Důležitou otázkou je, jak dokáže systém zaznamenávat pohybující se cíle. V [2] pracuji s myšlenkou, že není možné sledovat pohyblivé cíle pomocí Bluetooth a to hlavně díky nedostatečnému množství informací nutných

k lokalizaci a velké délce skenovacího okna. Tato práce se ale věnuje testování pohyblivých cílů a to hlavně díky použití kratšího skenovacího okna a testu, jestli systém dokáže určit polohu uživatele alespoň s rozumnou přesností. Testy s pohyblivým cílem byly prováděny ve třech rychlostech: 3, 4 a 5 km/h.

Testování probíhalo na různých zařízeních, kvůli možnosti eliminace zkreslení výsledků při použití pouze jednoho. Testovací subjekty byly: Apple iPad, Nexus 7 a Samsung Galaxy S2. Tato zařízení byla vybrána jako typičtí zástupci cílových zařízení, které se můžou vyskytovat v cílových prostorách. Díky možnosti zkreslení výsledků úhlem, pod jakým je zařízení svíráno a výškou, ve které se zařízení nachází, nejsou tyto hodnoty uvažovány a testování bylo prováděno s pomocí náhodných úhlů a výšek.

K určení přesnosti algoritmů byla pro každý bod spočtena Eukleidovská vzdálenost skutečné pozice zařízení a její pozice odhadované systémem. Tato odchylka zde reprezentuje chybovost systému. Výsledná odchylka každé metody je vyjádřena v metrech.

#### 4.1.1 Délka skenovacího okna u Bluetooth

Jak již bylo zmíněno v části 3.4.5, délka skenovacího okna u Bluetooth může být příliš dlouhá. V této době by mohlo často docházet ke ztrátám klientů. Proto je zde představen test, který popisuje nastavení délky okna. Test byl prováděn v HL s jednou sondou a pěti cílovými zařízeními. Umístění cílových zařízení popisuje tabulka 4.1, ve které lze najít číslo cílového zařízení, vzdálenost od sondy a překážky mezi sondou a konkrétním zařízením. Výsledky jsou poté zobrazeny v tabulce 4.2, která ukazuje délku skenovacího okna a úspěšnost, s jakou každá z nich dokáže nalézt všechna zařízení pro scénáře s/bez pohybujícího se cíle.

Číslo zařízení	Vzdálenost	Překážky
1	14 cm	Žádné
2	2.6 m	Dveře - 4 cm
3	4 m	Zed' - 12 cm
4	5.2 m	Několik zdí
5	7.4 m	Několik zdí

Tabulka 4.1: Rozložení zařízení pro test délky Bluetooth skenovacího okna.

Délka skenovacího okna	Úspěšnost	Pohybující se cíl
4s	82 %	ano
4s	79 %	ne
5s	90 %	ano
5s	95 %	ne

Tabulka 4.2: Výsledky testu délky skenovacího okna.

Na základě tohoto testu bylo nastavena délka skenovacího okna na 5 sekund. Nižší hodnoty nepřinášely už žádné zlepšení, pro 3s byla naměřená úspěšnost 58 % při testu s nepohyblivým cílem. Zajímavé je u tohoto testu zlepšení u 4 sekundové délky, její úspěšnost je spíše důsledkem malé množiny nasbíraných dat a charakteristice vyhledávání pomocí Bluetooth.

#### 4.1.2 Obecná přesnost

Zde je předložen výsledek testů nad všemi daty pro každou testovanou metodu. Hodnoty udávají přesnost každého algoritmu za použití všech dat, kde jediným třídícím parametrem je typ testované metody. Tabulka 4.3 ukazuje střední hodnotu a směrodatnou odchylku každé metody.

Metoda	$\bar{e}$	$\sigma$
Proximity	2.89	1.79
Ecolocation (classic)	3.42	1.63
Ecolocation (weighted)	3.52	1.65
Multilateration (MM)	2.58	1.05
Multilateration (LS)	2.82	1.23

Tabulka 4.3: Výsledky každé metody za použití všech dat.

Pouze na základě středních hodnot je možné určit, že kalibrované metody jsou úspěšnější než nekalibrované. Výsledek není nijak překvapivý, protože tyto metody berou v úvahu charaktery prostředí a mohou tudíž udávat lepší výsledky. Metody byly v této práci kalibrovány pouze hodnotami  $n$  a  $P_0$  a to za účelem minimalizování kalibračních nároků při nasazování systému. Pro dosažení ještě lepších výsledků je možné v cílové oblasti použít kalibrační body, jako je použito v [44], které dále zpřesňují výsledek za cenu náročnější vstupní kalibrace. V této práci není tento způsob zkoumán také z důvodu nutné re kalibrace, při změnách prostředí. MinMax metoda vyšla z tohoto testu jako lepší v porovnání s LS. Tento výsledek je zajímavý hlavně díky relativní jednoduchosti samotného algoritmu.

Díky relativně malým testovaným oblastem má také algoritmus Proximity přijatelnou odchylku, protože jednotlivé sondy nejsou od sebe vzdáleny příliš daleko a průměrná chyba je proto nízká.

Algoritmy Ecolocation mají sice nejhorší úspěšnost, ale jejich dosažený výsledek není vůbec špatný. Vzhledem ke skutečnosti, že jediné informace, které tyto metody mají, jsou polohy dalších sond, je nutné říci, že jejich přesnost je velmi dobrá. Zajímavé je, že verze s použitými váhami dopadla hůře než klasická metoda.

Na základě procházení nasbíraných dat je nutné specifikovat jeden problém týkajících se dobré úspěšnosti metod Multilateration. Obrázek 4.1 ukazuje zjednodušené schéma HL, do kterého byly zakresleny odhadované a skutečné pozice při použití algoritmů Ecolocation (classic) a Multilateration (MM). Na základě tohoto obrázku je možno vidět, že Ecolocation se snaží co nejvěrněji určovat pozice cílových zařízení. U Multilateration jsou ale všechny výsledky promítány do určité oblasti uprostřed lokalizační oblasti. Tento efekt je stejný i při minimalizaci pomocí LS. Tento výsledek tu není ukázán, protože by byl velmi podobný tomu při použití MM. Obě metody, proto díky zprůměrování výsledků z celého měření, dosáhnou velmi dobré průměrné odchylky.

### 4.1.3 Testovací prostory

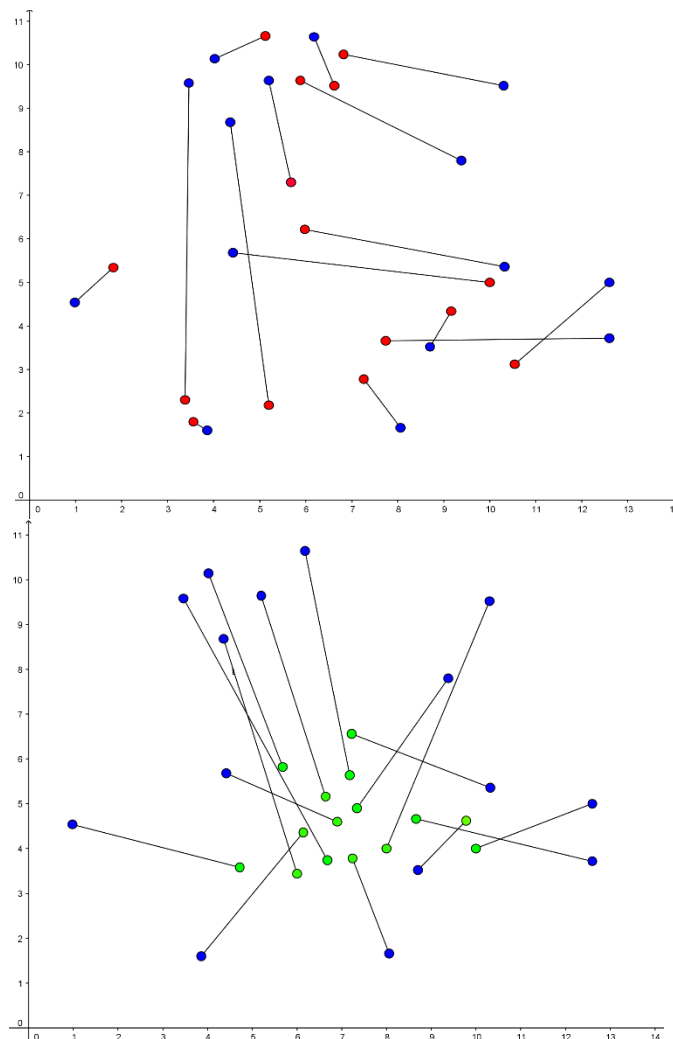
V této kapitole je výkonnost systému představena s ohledem na místo, kde byly testy prováděny. Jak již bylo zmíněno dříve, testy byly prováděny v budově C Přírodovědecké fakulty a v Biologickém centru AV. Tabulka 4.4 ukazuje výkon každé metody v závislosti na místě testování.

Metoda	Místo		BC AV		C	
	$\bar{e}$	$\sigma$	$\bar{e}$	$\sigma$	$\bar{e}$	$\sigma$
Proximity	<b>2.88</b>	<b>1.80</b>	3.56	1.40		
Ecolocation (classic)	3.43	1.63	<b>3.10</b>	<b>2.06</b>		
Ecolocation (weighted)	3.52	1.64	<b>3.32</b>	<b>2.05</b>		
Multilateration (MM)	<b>2.28</b>	<b>1</b>	2.70	2.36		
Multilateration (LS)	<b>2.80</b>	<b>1.18</b>	3.50	2.69		

Tabulka 4.4: Tabulka odchylek testovaných metod pro danou oblast.

V tabulce jsou nejmenší hodnoty vyznačeny tučně. Tento postup je nadále používán u většiny následujících tabulek. Jak je možné vidět z předchozí tabulky, přesnost většiny

algoritmů klesla. U Proximity je důvodem zvýšení vzdáleností mezi jednotlivými sondami a větším testovým prostředím. U metod Multilateration je důvodem mnohem komplexnější prostředí v budově C. V těchto prostorách byl systém testován mezi několika zdmi a mnohem více zhuštěným prostorem, než tomu bylo v BC AV. Z těchto důvodů je možné říci, že kalibrace, která byla prováděna, nedokázala úplně odstranit vliv prostředí a to právě díky jeho různorodosti. U metod Ecolocation je zlepšení možné díky nevýznamnému ovlivnění výsledků jevy zmíněnými výše. Zlepšení výsledků je také možné přičíst menší množině dat nasbíraných v budově C. Tyto výsledky jsou přesto uvažovány a to díky stejným podmínkám pro všechny metody.



Obrázek 4.1: Odhadované(červená/zelená) a skutečné(modrá) pozice daných algoritmů. Horní obrázek jsou odhady pozic Eco, dolní obrázek pro Multi.



#### 4.1.4 Množství vzorků

Jak bylo řečeno dříve, k určení odhadu polohy je nutné mít lokalizační informace alespoň ze tří sond. V této části je testována úspěšnost algoritmů při použití dat z daného počtu sond. Tabulka 4.5 ukazuje úspěšnost algoritmů při použití dat ze tří, čtyř a pěti sond.

Počet vzorků Metoda	3		4		5	
	$\bar{e}$	$\sigma$	$\bar{e}$	$\sigma$	$\bar{e}$	$\sigma$
Proximity	3	1.82	2.87	1.8	<b>2.62</b>	<b>1.69</b>
Ecolocation (classic)	3.46	1.68	3.54	1.63	<b>3.19</b>	<b>1.51</b>
Ecolocation (weighted)	3.5	1.69	3.71	1.66	<b>3.35</b>	<b>1.52</b>
Multilateration (MM)	2.58	1.08	2.7	0.99	<b>2.48</b>	<b>1.02</b>
Multilateration (LS)	2.83	1.28	3.08	1.28	<b>2.49</b>	<b>0.95</b>

Tabulka 4.5: Úspěšnost jednotlivých algoritmů při použití dat od různého počtu sond.

Z tabulky 4.5 vyplývá, že úspěšnost všech algoritmů je nejlepší při použití dat z největšího množství sond. Pro Multilateration (MM) je rozdíl mezi množství dat minimální. Stabilní zlepšování úspěšnosti u Proximity je způsobená zvyšováním množství sond v lokalizačním prostoru, což má za následek zmenšování vzdáleností každého bodu v lokalizačním prostoru od některé ze sond. U metod Ecolocation je možné vidět podobný efekt jako u Multilateration (LS), kde při použití třech vzorků je možné dosáhnout druhého nejlepšího výsledku. Obecně je možné říct, že většina zkoumaných metod dosáhne dobrých výsledků i při použití minimálního množství sond. Tato skutečnost může hrát důležitou roli při nasazování systému díky možnosti snížení pořizovacích nákladů.

Na základě dat, prezentovaných v této kapitole, lze odpovědět na výzkumné otázky č. 2: **Optimální počet sond je pět.** Dalo by se ale říci, že všechny zkoumané počty použitých vzorků podaly průměrné výsledky menší, než byla maximální stanovená hranice. Jak již bylo řečeno výše, výsledky při použití pouze tří sond, resp. tří vzorků, jsou velmi dobré a při nasazování systému je nutné tento počet zvážit.

Na základě průměrných výsledků při použití pěti sond je možné odpovědět na otázku č. 3, protože v této tabulce je možné nalézt maximální možné přesnosti každého algoritmu. **Tabulka 4.5 tedy slouží jako odpověď na výzkumnou otázku 3.**

### 4.1.5 Rozložení sond

Při určování polohy je důležité rozložení sond v lokalizačním prostoru. V této části jsou představeny pozice sond při testech a výsledky jednotlivých scénářů. V přílohách je možné nalézt ukázky všech pozicí sond, ve kterých byly testy prováděny. Díky velkému množství testovaných scénářů zde nejsou ukázány výsledky jednotlivého scénáře a každé metody. Místo toho je zde ukázána průměrná hodnota odchylky pro každý scénář. Jednotlivé hodnoty jsou v tabulce 4.6. Čistě na základě těchto dat je možné říci, že na rozložení záleží. Je nutné si ale všimnout, že výsledky pro scénáře 3, 5 a 6 jsou velmi podobné. Dobrý výsledek scénáře 4 je možno přičíst malému množství vzorků v tomto scénáři. Tento fakt byl zjištěn příliš pozdě na to, aby bylo možné měření zopakovat. Proto výsledek scénáře 4 nebude uvažován. Obecně je možné říci, že rozložení sond systému závisí na charakteristice nasazovaného prostředí. Pro maximální pokrytí je nutné určit nejčastější možnosti výskytu a podle nich určit pozice sond systému. Kromě pravděpodobnosti výskytu také záleží na materiálové struktuře prostředí.

Scénář	$\bar{e}$	$\sigma$
1	3.7	1.77
3	2.95	1.47
4	1.87	1.05
5	3.11	1.55
6	3.08	2.05

Tabulka 4.6: Průměrná odchylka všech metod pro každý scénář.

Díky výsledkům je možné odpovědět na výzkumnou otázku č. 6: **Pokud vyloučíme hodnotu scénáře 4 jako zkreslenou, můžeme říci, že zbylé hodnoty se od sebe výrazně neliší.** Jestli je tento efekt způsoben dobrým rozložením sond při testech, zůstává otázkou. Proto, na základě testovaných scénářů, lze pouze říci, že mezi testovanými scénáři není výrazný rozdíl. To znamená, že testované scénáře přispívají malou měrou do výsledné úspěšnosti.

### 4.1.6 Pohyb

Pro úspěšné nasazení celého systému je nutné otestovat, jak systém dokáže určit polohu pohybujících se osob. Pro nepohybující se cíle je možné předpokládat vyšší průměrnou úspěšnost a to díky menší změně hodnoty RSSi. Důležitým faktorem je zdroj signálu. U Wi-Fi je větší pravděpodobnost, že bude pohybující se zařízení úspěšně lokalizováno než u

Bluetooth. Důvod byl v této práci již zmíněn a tím je délka skenovacího okna. Na základě provedených testů se dá říci, že systém určuje pozici uživatele o několik sekund zpět, proto je zde určovaná odchylka ne od bodu, ale od trasy, kterou cíl prošel. Tento přístup má výhodu v eliminaci, dříve zmíněného, zpoždovacího efektu. Dalo by se ale říct, že takto dochází ke zlepšování odchylky, která by měla být jinak mnohem větší. Hlavní důvod pro použití této metody hodnocení je spíše určení trasy pohybujícího objektu než jeho přesné pozice, protože její určení by bylo vždy nepřesné. V tabulce 4.7 jsou zobrazeny výsledky pro každou metodu na základě typu pohybu cíle. Je možné vidět, že díky použití dříve zmíněného modelu hodnocení vede, u metod Ecolocation, ke zlepšení průměrné odchylky při sledování pohybujícího se cíle. Naproti tomu u metod Multilateration je výsledek stejný pro oba typy pohybu.

Metoda	Cíl		Statický		Dynamický	
	$\bar{e}$	$\sigma$	$\bar{e}$	$\sigma$	$\bar{e}$	$\sigma$
Proximity	<b>2.58</b>	<b>1.81</b>	3.02	1.74		
Ecolocation (classic)	3.50	1.64	<b>3.16</b>	<b>1.60</b>		
Ecolocation (weighted)	3.61	1.65	<b>3.22</b>	<b>1.63</b>		
Multilateration (MM)	2.58	1.07	<b>2.58</b>	<b>0.98</b>		
Multilateration (LS)	2.82	1.24	<b>2.82</b>	<b>1.21</b>		

Tabulka 4.7: Určení průměrné odchylky každé metody pro určitý typ pohybu lokalizačního cíle.

Při testování pohybujícího se cíle byly použity různé rychlosti, s jakou se lokalizovaný objekt pohyboval. Tabulka 4.8 ukazuje přesnost každé testované metody v závislosti na rychlosti pohybujícího se cíle, kde 3 km/h (s), 4 km/h (m) a 5 km/h (f).

Metoda	Rychlost pohybu		s		m		f	
	$\bar{e}$	$\sigma$	$\bar{e}$	$\sigma$	$\bar{e}$	$\sigma$	$\bar{e}$	$\sigma$
Proximity	<b>3.04</b>	<b>1.74</b>	3.14	1.74	2.76	1.73		
Ecolocation (classic)	3.22	1.62	<b>3.05</b>	<b>1.49</b>	3.1	1.62		
Ecolocation (weighted)	3.27	1.63	<b>3.06</b>	<b>1.52</b>	3.22	1.69		
Multilateration (MM)	2.56	0.61	<b>2.41</b>	<b>0.96</b>	2.65	0.93		
Multilateration (LS)	<b>2.66</b>	<b>0.79</b>	2.88	1.51	2.81	0.86		

Tabulka 4.8: Odchylka každé metody vzhledem k rychlosti pohybujícího se cíle.

Při pohledu na výsledky v tabulce 4.8 je možné vidět, že výsledky pro každou metodu jsou velmi podobné. Tudíž je možné říci, že není výrazný rozdíl v rychlosti, jako spíše mezi

pohybujícím se a nepohybujícím se cílem. Tabulka 4.9 slouží jako ilustrace počtu nasbíraných vzorků v jednom časovém intervalu pro každou rychlost pohybu a danou technologii. Z ní je jasně vidět, že počet vzorků je mnohem větší při použití Wi-Fi než použití Bluetooth. Tato situace není nijak překvapivá vzhledem k faktu, že Wi-Fi, za stejnou dobu, dokáže teoreticky získat 5 krát více vzorků. Co se střední hodnoty týče, ta zůstává velmi podobná pro všechny rychlosti.

Zdroj dat	Wi-Fi			Bluetooth		
	s	m	f	s	m	f
Počet vzorků	185	180	170	85	66	29
$\bar{e}$	3.07	2.81	2.92	2.7	3.18	2.84

Tabulka 4.9: Počet vzorků a střední hodnota odchylky pro každou rychlost objektu při použití konkrétní technologie.

Při navrhování celého systému bylo nutné zohledňovat lokalizování pohybujících se osob, protože právě tento typ cílů je nejobtížnější na určování. V této práci je navrhován systém, který k určování polohy používá pouze data z jednoho časového okamžiku k určení polohy všech objektů. Všechny provedené testy se držely této myšlenky a díky zatím prezentovaným výsledkům je možné říci, že žádná testovaná metoda nepřekročila dříve stanovenou maximální hodnotu. Na základě tohoto faktu je možné odpovědět na výzkumnou otázku č. 4. **Minimální množství informací k určení polohy jsou data z jednoho časového okna pro každou testovanou technologii.**

#### 4.1.7 Typ zdroje

V této práci jsou používány Wi-Fi a Bluetooth k určení polohy. Zde je ukázán rozdíl mezi těmito technologiemi. Rozdíl je spíše ilustrační, protože obě zmíněné technologie budou použity a to díky vlastnostem zmíněným dříve. Tabulka 4.10 ukazuje střední hodnotu odchylky pro každou metodu při použití dat z dané technologie.

Metoda	Zdroj dat	Wi-Fi		Bluetooth	
		$\bar{e}$	$\sigma$	$\bar{e}$	$\sigma$
Proximity		3.03	1.86	<b>2.57</b>	<b>1.60</b>
Ecolocation (classic)		3.52	1.59	<b>3.19</b>	<b>1.71</b>
Ecolocation (weighted)		3.59	1.58	<b>3.36</b>	<b>1.78</b>
Multilateration (MM)		2.60	1.01	<b>2.55</b>	<b>1.12</b>
Multilateration (LS)		<b>2.63</b>	<b>1</b>	3.23	1.57

Tabulka 4.10: Odchylky pro každou metodu při použití dat z dané technologie.

Pro úplnost je zde ještě přidána tabulka 4.11, která ukazuje výsledky každé metody, při použití dat z obou zkoumaných technologií, v závislosti na oblasti, kde byly testy prováděny. Z prezentovaných dat je možné vidět horší výkonost algoritmu Proximity v budově C oproti HL. Ostatní metody naproti tomu podaly lepší výsledky v budově C při použití dat Wi-Fi. Při použití dat z Bluetooth byl výsledek stejný jako pro algoritmus Proximity.

Metoda	Místo Zdroj dat	BC AV				C			
		Wi-Fi		BT		Wi-Fi		BT	
		$\bar{e}$	$\sigma$	$\bar{e}$	$\sigma$	$\bar{e}$	$\sigma$	$\bar{e}$	$\sigma$
Proximity		3.03	1.86	2.51	1.59	3.06	1.27	3.71	1.47
Ecolocation (classic)		3.53	1.59	3.19	1.16	3.06	2.54	3.11	2.12
Ecolocation (weighted)		3.6	1.58	3.35	1.77	2.83	2.3	3.47	2.08
Multilateration (MM)		2.6	1.01	2.52	0.99	1.86	1.67	2.96	2.55
Multilateration (LS)		2.64	0.99	3.19	1.47	1.9	1.47	3.98	2.81

Tabulka 4.11: Průměrné hodnoty každé metody v závislosti na technologii a zkoumané oblasti.

## 5 Závěr

Cílem této práce bylo navrhnout, implementovat a otestovat systém pro určování polohy ve vnitřních prostorech. K tomuto účelu byly využívány technologie Bluetooth a Wi-Fi. Pro funkčnost systému bylo důležité nevyužívat žádná další zařízení ke snížení nákladů. Systém používá pouze svá zařízení k vyhledávání neznámých. K určování pozic poté používají své informace a informace ostatních členů systému. Informace potřebné k lokalizaci byly získávány pouze z veřejně dostupných dat každé testované technologie. K ukládání pozic jednotlivých sledovaných objektů je využíváno zakreslování daných pozic do plánů oblastí, ve kterých je systém nasazen.

Na základě testů je zvolen algoritmus pro nasazení v cílové oblasti. Ze všech testovaných algoritmů tato práce navrhuje použití Ecolocation (classic). Důvodů pro výběr tohoto algoritmu je několik. Mezi jeho hlavní kvality patří uspokojivá přesnost v testech pro pohybuující se i nepohybuující se cíle, možnost, do určité míry, ignorovat negativní efekty prostředí a jeho snadné nasazení. Jediné, co ke svému fungování potřebuje, jsou pozice ostatních členů systému a velikost oblasti.

Použití algoritmu Proximity je možné pouze v případě nasazení relativně velkého množství sond do cílové oblasti. Tento požadavek je hlavní důvod, proč tento algoritmus nevybrat. Na druhou stranu, díky své jednoduchosti, by bylo možné tento algoritmus nasadit na mnohem méně výkonná zařízení. To by teoreticky snížilo náklady na postavený systém a učinilo by z Proximity vhodného kandidáta.

Během většiny testů podávala verze Ecolocation (weighted) stejné nebo horší výsledky než klasická verze, proto není tento algoritmus uvažován jako vhodný kandidát.

Oba Multilateration algoritmy podávaly během testů nejlepší průměrné výkony. Jak ale bylo ukázáno v části 4.1.2, jejich výsledky byly nashromážděny pouze v určité oblasti, což jim poskytlo takovou přesnost, jaké dosáhly. Kromě toho je nasazení těchto algoritmů náročné z pohledu kalibrace, kdy na každém konkrétním zařízení je potřeba provádět kalibraci před nasazováním. Další problém může nastat při kombinování technologií Bluetooth a Wi-Fi. Obě tyto technologie mají různé hodnoty RSSi na referenčních vzdálenostech. To vyžaduje průměrování výsledných naměřených hodnot pro každou technologii. Tato skutečnost do značné míry komplikuje určování polohy, vezeme-li v úvahu, že RSSi je přímo mapováno na vzdálenost.

Výsledkem provedeného rozboru je odpověď na výzkumnou otázku č. 1: **Optimální metoda pro nasazení v koncovém systému je Ecolocation (classic).**

Na základě atributů (ve 3.1) a požadavků na systém (ve 3.3) je možné provést hodnocení samotného systému.

Průměrná přesnost systému, při nasazení výše zmíněného algoritmu a při použití všech testovacích dat, je 3.42m. Nejlepší průměrná hodnota, při použití dat z pěti sond, je 3.19m což je méně než maximální přípustná míra. Rychlost reakce systému závisí na zdroji dat. Obecně lze říci, že doba určení polohy zařízení je zaokrouhlena na konec okna, ve kterém se toto zařízení vyskytlo. Tyto hodnoty se liší podle konkrétní technologie. Pro Bluetooth jsou zařízení objevovány každých 5s, pro Wi-Fi je tato doba 1s. Kalibrace, při použití této metody, spočívá v určení velikosti lokalizační oblasti a určení pozice každé sondy v dané oblasti. Vzhledem tomu, že algoritmus faktor prostředí nebere v úvahu, je tento atribut splněn. Oblast pokrytí je rovna velikostem testovaných prostor. Maximální pokrytá oblast v této práci není testována. Rozšíření spočívá pouze v určení, kde se nové zařízení nachází, nic dalšího není nutné zjišťovat. Systém k určení polohy nepotřebuje jiné než veřejné informace, ze kterých je získáváno RSSi a MAC adresa, která slouží k identifikaci zařízení.

## Seznam obrázků

Obrázek 2.1: Vývoj hodnoty RSSi .....	15
Obrázek 2.2: Ecolocation: lokalizační prostor .....	20
Obrázek 2.3: Použití Fingerprinting.....	21
Obrázek 2.4: Ukázka Trilateration.....	24
Obrázek 4.1: Odhadované a skutečné pozice algoritmů .....	39
Rozložení sond při testech.....	52

## Seznam tabulek

Tabulka 2.1: Dosah a výkon Bluetooth.....	12
Tabulka 4.1: Rozložení zařízení při testu.....	36
Tabulka 4.2: Výsledky testu skenovacího okna .....	37
Tabulka 4.3: Průměrný výsledek každé metody.....	37
Tabulka 4.4: Odchylky pro testované oblasti.....	38
Tabulka 4.5: Odchylka algoritmů při různém množství vzorků.....	40
Tabulka 4.6: Průměrný výsledek pro každý scénář .....	41
Tabulka 4.7: Odchylka v závislosti na typu pohybu.....	42
Tabulka 4.8: Odchylka v závislosti na rychlosti.....	42
Tabulka 4.9: Počet vzorků pro testované rychlosti.....	43
Tabulka 4.10: Průměrné hodnoty v závislosti na testovaných technologiích .....	44
Tabulka 4.11: Průměrné hodnoty v závislosti na testovaných technologiích a budově .....	44



## Seznam použité literatury

- [1] E. Dahlgren and H. Mahmood. Evaluation of indoor positioning based on Bluetooth Smart technology. Master Thesis, Chalmers University of Technology, Göteborg. 2014, 94 p.
- [2] D. Scheerens. Practical Indoor Localization using Bluetooth. Master Thesis, University of Twente, Enschede. 2012, 91 p.
- [3] Ching, Jeleen Chua, Carolyn Domingo, Kyla Iglesia, Courtney Ngo and Nellie Chua. Mobile Indoor Positioning Using Wi-fi Localization and Image Processing. In *Proceedings in Information and Communications Technology Theory and Practice of Computation*, 2013, p. 242-56.
- [4] O. Rashid, P. Coulton and R. Edwards. Implementing location based information/advertising for existing mobile phone users in indoor/urban environments. *Mobile Business, 2005. ICMB 2005*. International Conference, Jul 2005, p. 377- 383.
- [5] B. Hu. Wi-Fi Based Indoor Positioning System Using Smartphones. Master Thesis, Royal Melbourne Institute of Technology University, Melbourne, 2013, 80 p.
- [6] Bluetooth SIG, Radio architecture [cit. 2016-01-29], URL:<<https://www.bluetooth.com/specifications/adopted-specifications>>.
- [7] M. Dominguez-Duran, D. Claros, C. Urdiales and F. Coslado. Dynamic calibration and zero configuration positioning system for WSN. In *Electrotechnical Conference, 2008. MELECON 2008. The 14th IEEE Mediterranean, Ajaccio*, 2008, p. 145-150.
- [8] S. Coleri, ZigBee/IEEE 802.15.4 summary [online]. California, USA: Berkeley University of California; Sep. 2004, [cit. 2016-01-29]. URL: <<http://pages.cs.wisc.edu/~suman/courses/838/papers/zigbee.pdf>>.
- [9] J. J. M. Diaz, R. d. A. Maués, R. B. Soares, E. F. Nakamura and C. M. S. Figueiredo. Bluepass: An indoor Bluetooth-based localization system for mobile applications. In *Computers and Communications (ISCC), 2010 IEEE Symposium on, Riccione, Italy*, 2010, p. 778-783.
- [10] G. Anastasi, R. Bandelloni, M. Conti, F. Delmastro, E. Gregorim and G. Mainetto. Experimenting an indoor bluetooth-based positioning service. *Distributed Computing Systems Workshops, 2003. Proceedings. 23rd International Conference*, 2003, p. 480-483.
- [11] P. Bahl and V N. Padmanabhan. RADAR: An in building RF based user location and tracking system. *Proceedings of the 19th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2000)*.
- [12] V. Chandermouli. A detailed study on wireless LAN technologies [online]. Texas, USA: The University of Texas [cit. 2016-01-29]. URL: <<http://www.uta.edu/oit/policy/ns/docs/wireless-paper-vijay.pdf>>.
- [13] R. Want, A. Hopper and V. Falcao. The active badge location system. *ACM Transactions on Information Systems*, 1992.
- [14] A. Harter, A. Hopper, P. Steggles, A. Ward and P. Webster. The anatomy of a Context-Aware Application. *Wireless Networks* 8. 2002, p.187-197.

- [15] L. M. Ni, Yunhao Liu, Yiu Cho Lau and A. P. Patil. LANDMARC: indoor location sensing using active RFID. *Pervasive Computing and Communications, 2003. (PerCom 2003). Proceedings of the First IEEE International Conference on, Fort Worth, TX, 2003*, p. 407-415.
- [16] Z.Xiong, Z.Song, A.Sclera, E.Ferrea, F.Sottile, P.Brizzi, R.Tomasi and M.A.Spirito. Hybrid WSN and RFID Indoor positioning and Tracking System. *EURASIP Journal on Embedded System by Springer-Link 2013, 2013*.
- [17] K. Yedavalli, B. Krishnamachari, S. Ravula and B. Srinivasan. Ecolocation: a sequence based technique for rf localization in wireless sensor networks. In *Fourth International Symposium on Information Processing in Sensor Networks, 2005. IPSN 2005.*, p. 285-292, Apr 2005.
- [18] Chong Liu, Kui Wu and Tian He, Sensor localization with Ring Overlapping based on Comparison of Received Signal Strength Indicator. *Mobile Ad-hoc and Sensor Systems, 2004 IEEE International Conference, 2004*, p. 516-518.
- [19] Kolář M., 2015: Gesty ovládané výukové objekty [Gesture controlled learning objects. Bc. Thesis, in Czech] - 44 p., Faculty of Science, The University of South Bohemia, České Budějovice, Czech Republic.
- [20] H. Hashemi, The indoor radio propagation channel. In *Proceedings of the IEEE, volume. Jul. 1993*, p. 943-968.
- [21] A. K. M. M. Hossain, H. N. Van, Y. Jin and W. S. Soh. Indoor Localization Using Multiple Wireless Technologies. *Mobile Adhoc and Sensor Systems, 2007. MASS 2007. IEEE International Conference on, Pisa, 2007*, p. 1-8.
- [22] B. Li, Y. Wang, H. K. Lee, A. Dempster and C. Rizos, Method for yielding a database of location fingerprints in WLAN. In *IEE Proceedings - Communications, vol. 152, no. 5*. Oct. 2005, p. 580-586.
- [23] H. Bao and W. C. Wong. An indoor dead-reckoning algorithm with map matching. *Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 2013 9th International, Sardinia, 2013*, p. 1534-1539.
- [24] M. S. Grewal and A. P. Andrews. Kalman Filtering: theory and practice using MATLAB. John Wiley & Sons, 2008, 3<sup>rd</sup> edition, 575 p.
- [25] A. Haug. Bayesian estimation for target tracking, Part III: Monte Carlo filters. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics 4*, 2012, p.498-512.
- [26] A. K. M. M. Hossain and W. S. Soh. A Comprehensive Study of Bluetooth Signal Parameters for Localization. *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2007. PIMRC 2007. IEEE 18th International Symposium, Athens, 2007*, p. 1-5.
- [27] F. Herranz, M. Ocana, L. Bergasa, M.Sotelo, D. Llorca and I. Parra. Studying on wifi range-only sensor and its application to localization and mapping systems. In *Ieee ICRA 2010 workshops, 2010*, p. 115–120.

- [28] D. Madigan, E. Einahrawy, R.P. Martin, W. Ju, P. Krishnan and A. S. Krishnakumar, Bayesian indoor positioning systems. In *Proceedings of the IEEE 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2005)*, 2005, p. 1217-1227.
- [29] V. Honkavirta, T. Perala, S. Ali-Loytty, R. Piche. A Comparative Survey of WLAN Location Fingerprinting Methods. In *Proceedings of the 6th Workshop on Positioning, Navigation, and Communication 2009 (WPNC'09)*, 2009, p. 243-251.
- [30] O. M. Badawy and M. A. B. Hasan. Decision Tree Approach to Estimate User Location in WLAN Based on Location Fingerprinting. In *Radio Science Conference, 2007. NRSC 2007. National, Cairo*, 2007, p. 1-10.
- [31] R. Battiti, A. Villani and T. Le Nhat. Neural network models for intelligent networks: deriving the location from signal patterns, In *Proceedings of AINS2002*, UCLA, 2002.
- [32] K. Derr and M. Manic, Wireless based object tracking based on neural networks. In *Proceedings of 3rd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA'08)*, 2008, p. 308-313.
- [33] Widyawan, M. Klepal and D. Pesch. Influence of Predicted and Measured Fingerprint on the Accuracy of RSSI-based Indoor Location Systems. In *Proceedings of 4th Workshop on Positioning, Navigation, and Communication 2007 (WPNC'07)*, 2007, p. 145-151.
- [34] J. Yim, S. Jeong, K. Gwon and J. Joo. Improvement of Kalman filters for WLAN based indoor tracking. *Expert Systems with Applications*, 37, 2010, p. 426-433.
- [35] Laoudias, Christos, Eliades, Demetrios G., Kemppe, Paul, Panayiotou, Christos G., Polycarpou and M. Marios. Indoor Localization Using Neural Networks with Location Fingerprints Artificial Neural Networks. *ICANN 2009: 19th International Conference, Limassol, Cyprus, September 14-17, 2009, Proceedings, Part II*, 2009, p. 954-963.
- [36] J. Zhi Liang, N. Corso, E. Turner and A. Zakhor. Image Based Localization in Indoor Environments. *Computing for Geospatial Research and Application (COM.Geo), Fourth International Conference*, 2013.
- [37] Nan Zhu, Hongbo Zhao, Wenquan Feng, Zulin Wang, A novel particle filter approach for indoor positioning by fusing WiFi and inertial sensors. *Chinese Journal of Aeronautics, Volume 28, Issue 6*, Dec 2015, p. 1725-1734
- [38] F. Gustafsson and F. Gunnarsson. Localization in sensor networks based on log range observations. *Information Fusion, 2007 10th International Conference, Quebec*, 2007, p. 1-8.
- [39] A. D.Velasco and S. M. Delgado. Indoor Positioning using the Android Platform. Blekinge Institute of Technology, Suecia, 2014, 33 p.
- [40] Xiuyan Zhu and Yuan Feng. RSSI-based Algorithm for Indoor Localization. In *Communications and Network*. [online] 2013, pp. 37-42. [cit. 20.3.2016], URL: <<http://www.scirp.org/journal/cn/>>.
- [41] John S. Seybold. Introduction to RF Propagation. John Wiley & Sons, 352 p., Sep 2005.
- [42] Amar H. Patel. Indoor localization in wireless sensor networks. Rutgers, The State University of New Jersey, 2008, 84 p.

- [43] X.Chen, J. Chen, J. He and B. Lei. An Improved Localization Algorithm for Wireless Sensor Network Based on the Selection of Benchmark Anchor Node. *Journal of Networks, North America* 7, 2012.
- [44] M. Cypriani, F. Lassabe, P. Canalda and F. Spies, Wi-Fi-based indoor positioning: Basic techniques, hybrid algorithms and open software platform. *Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 2010 International Conference Zurich*, 2010, p. 1-10.
- [45] Github.com. [online]. [cit. 20. 3. 2016]. URL: <<https://github.com/karulis/pybluez>>.
- [46] Anja Bekkelien. Bluetooth indoor positioning. Master's thesis, University of Geneva. 49 p., 2012.
- [47] E. Turner and A. Zakhor. Floor plan generation and room labeling of indoor environments from laser range data. *Computer Graphics Theory and Applications (GRAPP), 2014 International Conference on*, Lisbon, Portugal, 2014, p. 1-12.

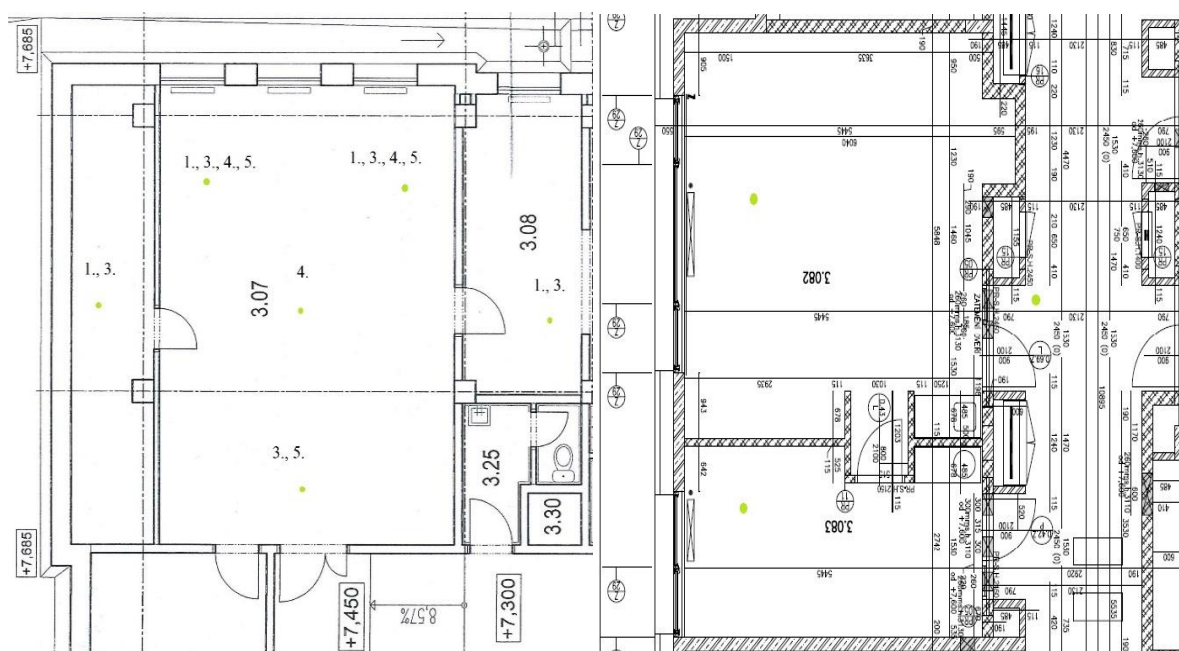
# Přílohy

## A. Rozložení sond

Na následujícím obrázku je možno vidět všechny scénáře rozložení sond.

Pro HL jsou všechny scénáře zakresleny do jednoho obrázku. Každému bodu je přiděleno číslo scénáře, jehož se bod účastní.

V budově C byl realizován pouze jeden scénář a to číslo 6.



*Rozložení sond pro každý testovaný scénář. Vlevo HL, vpravo oblast v budově C.*

## B. Příložené CD

Příložené CD obsahuje elektronickou verzi této práce ve formátu PDF, zdrojový kód celého systému, data ze všech testů ve formátu csv, bash skript pro instalování potřebných knihoven a nastavení zařízení pro běh systému.