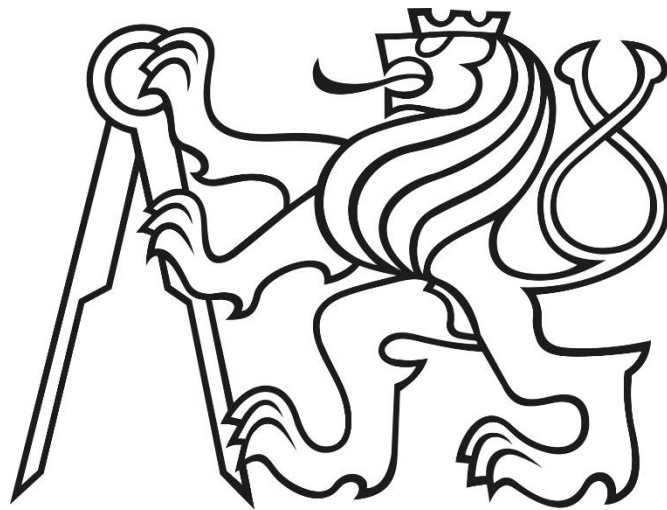


# České vysoké učení technické v Praze Fakulta elektrotechnická

Katedra kybernetiky

Program: Kybernetika a Robotika

Obor: Robotika



## System pro personální lokalizaci Personal Localization System

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Vypracoval: **Richard Bláha**

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Libor Přeučil, CSc.**

Odevzdání práce: květen 2016

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

**Student:** Richard B l á h a  
**Studijní program:** Kybernetika a robotika (bakalářský)  
**Obor:** Robotika  
**Název tématu:** Systém pro personální lokalizaci

### Pokyny pro vypracování:

Za účelem sledování pohybu a přítomnosti osob v prostředí (vnějším i vnitřním) lze využívat principu měření a výpočtu polohy na základě měření síly a kvality signálu z RF tagu, který má sledovaná osoba při sobě. V současné době existuje potřebný HW k měření zmíněných veličin z produkce fa IMA s.r.o., jenž je na pracovišti k dispozici. Cílem práce je jmenovaný systém oživit, zkonfigurovat a provést identifikaci jeho vlastností s cílem následného návrhu, vývoje a experimentální verifikace vhodného algoritmu pro lokalizaci osob. Při vypracování postupujte podle následujících kroků:

1. Seznamte se se systémem fa. IMA pro RF tag-based identifikaci, jenž je na pracovišti k dispozici.
2. Prostudujte předchozí realizovaná řešení (viz. doporučená literatura) směřující k řešení zmíněné úlohy lokalizace/zjišťování přítomnosti osob a identifikujte jeho nedostatky.
3. Navrhněte alternativní postupy, jak chování stávajícího lokalizačního systému zlepšit. Soustřeďte se na využití vhodných heuristik o přípustnosti pohybu, modelu prostředí, popř. dalších odvozených situačních pravidel.
4. Navrhněte pilotní úlohu, systém IMA pro RF tag-based identifikaci pro tento účel zkonfigurujte a proveďte experimentální sběr dat a ověření vlastností Vámi navrženého řešení.
5. Výsledky kvantitativně porovnejte a důkladně zdokumentujte. Z experimentů a demonstrací vytvořte demonstrační video.

### Seznam odborné literatury:

- [1] F. Herranz, A. Llamazares, E. Molinos, M. Ocaña and M. A. Sotelo: WiFi SLAM algorithms: an experimental comparison. *Robotica*, January 2015, DOI: 10.1017/S0263574714001908, Published online: 18 July 2014, pp 1 - 22, viz. [http://journals.cambridge.org/abstract\\_S0263574714001908](http://journals.cambridge.org/abstract_S0263574714001908).
- [2] NXP Laboratories UK Ltd. Data Sheet: JN5148-001-Myy. JenNet, ZigBee PRO and IEEE802.15.4 Module. 2010. url: [http://www.jennic.com/files/product\\_briefs/JN-DS-JN5148MO-1v4.pdf](http://www.jennic.com/files/product_briefs/JN-DS-JN5148MO-1v4.pdf) (navštíveno 03/02/2015).
- [3] M. Stella, M. Russo, and D. Begušić: "RF Localization in Indoor Environment". In: *Radioengineering* 21.2, Published: June 2012.
- [4] V. Mařík et al.: *Umělá inteligence (1)*. 1st ed. Academia, 1993. ISBN: 80-200-0496-3.

**Vedoucí bakalářské práce:** Ing. Libor Přeučil, CSc.

**Platnost zadání:** do konce zimního semestru 2016/2017

L.S.

doc. Dr. Ing. Jan Kybic  
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
děkan

V Praze dne 14. 9. 2015

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne .....

.....

Richard Bláha

**Poděkování:**

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce, panu Ing. Liborovi Přeučilovi, CSc. za jeho ochotu, trpělivost a odborné vedení mé bakalářské práce. Také bych rád poděkoval panu Ing. Havlíkovi a společnosti IMA s.r.o. za dlouhodobé zapůjčení hardwaru, díky kterému bylo možné tuto práci provést. Nakonec bych rád poděkoval mé rodině a všem lidem z mého blízkého okolí, kteří mě celou dobu podporovali.

Richard Bláha

## Anotace

V této práci řeším v průmyslu stále narůstající potřebu spolehlivého a přesného lokalizačního systému pro vnitřní prostředí. Nejdříve ukážeme jednotlivé možnosti navigace, které vzešly z posledních několika let výzkumu. Dále se pokusíme navrhnout naše vlastní řešení pro monitorování pohybu či přítomnosti osob (popřípadě jiných mobilních objektů) v dané místnosti nebo oblasti. Pro náš experiment jsme použili systém zapůjčený společností IMA s.r.o., který je založen na technologii ZigBee, která je nadstavbou standardu IEEE 802.15.4. Při návrhu řešení jsme se zabývali jak intuitivním přístupem využívající výhradně trilateraci, tak i sofistikovanějšími metodami zahrnující heuristiky či klasifikaci dat.

**Klíčová slova:** Systém pro personální lokalizaci, ZigBee, WSN, IEEE 802.15.4, senzorové sítě, trilaterace, heuristiky, klasifikace, bagging, křížová validace

## Annotation

In this work I try to solve the industry's growing need for reliable and accurate positioning system for indoor environments. First, we will show the different possibilities of navigation that emerged from the last few years of research. We will also try to propose our own solution for monitoring the movement or presence humans (or other mobile objects) in a particular room or area. For our experiment, we used a system borrowed from IMA s.r.o., which operates with the ZigBee technology built upon the IEEE 802.15.4 standard. When designing the solutions, we looked at intuitive approach using solely trilateration, and more sophisticated methods, including heuristics and data classification.

**Key terms:** System for personal localization, ZigBee, WSN, IEEE 802.15.4, sensor networks, trilateration, heuristics, classification, bagging, cross-validation

# Obsah

Seznam symbolů a zkratk .....	1
1. Úvod.....	2
1.1. Úvod do práce .....	2
1.2. Historie a vývoj navigace .....	2
1.3. Popis systému GPS .....	6
1.4. Rozvržení práce .....	7
2. Indoorová lokalizace .....	8
2.1. Úvod .....	8
2.2. Společné komponenty systému pro indoorovou lokalizaci.....	8
2.3. Typy systémů pro indoorovou lokalizaci .....	8
2.3.1. Rozdělení podle druhu signálu .....	8
2.3.2. Rozdělení podle měřících principů .....	10
2.4. Protokoly a technické standardy.....	11
2.4.1. Standard IEEE 802.15.4 .....	11
2.4.2. Technologie ZigBee.....	15
3. Lokalizace založená na rádiové technologii.....	19
3.1. Zadání řešeného problému .....	19
3.2. Použitý hardware .....	19
3.2.1. Popis vysílacího zařízení .....	19
3.2.2. Popis senzorového zařízení .....	21
3.3. Předchozí realizovaná řešení pro indoorovou lokalizaci .....	23
3.3.1. Popis metody Smoothing and Mapping .....	24
3.3.2. Metoda „Place of Origin“ .....	24
3.3.3. Trilaterace.....	24
3.4. Použitá metoda .....	25
3.5. Možnosti zlepšení – heuristiky a klasifikace.....	26
3.5.1. Použité heuristiky a jejich popis .....	26
3.5.2. Klasifikace a jejich popis .....	31
3.6. Měření.....	33
3.6.1. Referenční měření.....	34
3.6.2. Experimentální měření.....	37
3.6.3. Postup měření .....	39
3.7. Software .....	39

3.7.1.	Softwarové moduly .....	39
3.7.2.	Software pro klasifikaci dat .....	40
4.	Výsledky .....	41
4.1.	Grafické výsledky trilaterace .....	41
4.1.1.	Měření 1 .....	41
4.1.2.	Měření 2 .....	42
4.2.	Výsledky použití stromu susednosti .....	43
4.2.1.	Měření 1 .....	43
4.2.2.	Měření 2 .....	43
4.3.	Výsledky použití předpokladu maximální rychlosti .....	44
4.3.1.	Měření 1 .....	44
4.3.2.	Měření 2 .....	44
4.4.	Výsledky použití grafu susednosti i filtru rychlosti zároveň .....	45
4.4.1.	Měření 1 .....	45
4.4.2.	Měření 2 .....	45
4.5.	Výsledky klasifikace .....	46
4.5.1.	Měření 1 .....	46
4.5.2.	Měření 2 .....	46
4.6.	Souhrnné výsledky .....	46
4.6.1.	Měření 1 .....	46
4.6.2.	Měření 2 .....	46
5.	Závěr a diskuze .....	47
5.1.	Diskuze nad použitými metodami .....	47
5.2.	Pokračování této práce .....	48
5.3.	Zamýšlené využití systému .....	48
5.4.	Závěr .....	48
	Použitá literatura .....	50
	Přílohy .....	53
	Seznam obrázků .....	53
	Seznam tabulek .....	54
	Příklad přijatých neupravených dat .....	55

# Seznam symbolů a zkratek

ACL	Access Control List
AES	Advanced Encryption Standard
AOA	Angle of Arrival
CAP	Contention Access Period
CFP	Contention Free Period
CSMA-CA	Carrier Sense Multiple Access – Collision Avoidance
DME	Distance Measurement Equipment
DOA	Direction of Arrival
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
EKF	Extended Kalman Filter
FCS	Frame Check Sequence
FFD	Full Functional Device
GPS	Global Positioning System
GTS	Guaranteed Time Slot
ISM	Industrial, scientific and medical
LQI	Link Quality Indication
MAC	Media Access Control
MIC	Message Integrity Code
MFR	MAC Footer
MHR	MAC Header
PAN	Personal Area Network
PHY	Physical Layer
PPDU	PHY Protocol Data Unit
PSDU	PHY Service Data Unit
RF	Radio Frequency
RFID	Reduced – Function Device
SAM	Smoothing and Mapping
SFD	Start of Frame Delimiter
SHR	Synchronization Header
SLAM	Simultaneously Localization And Mapping
SVM	Support Vector Machine
TOA	Time Of Arrival
TDOA	Time Difference Of Arrival
WPAN	Wireless Personal Area Network
WSN	Wireless Sensor Network
ZDO	ZigBee Device Object



# 1. Úvod

## 1.1. Úvod do práce

V dnešní době si většina populace rozvinutých zemí nedokáže představit život bez chytrých systémů a přístrojů. Ať už jsou to počítače, chytré mobilní telefony, čidla proti krádeži nebo například navigační systémy. Všechno to jsou technologie, se kterými se dnes v moderní společnosti každý člověk jistě setká.

My se však budeme zabývat zmíněnou navigací, která je nepostradatelným pomocníkem lidstva obecně už po mnoho staletí. Pro různé účely se mohou hodit odlišné druhy lokalizace a navigace. Nemusí se vždy jednat o GPS, protože například pro cesty do vesmíru je GPS nepoužitelná a dalším příkladem, kdy se na GPS navigaci nedá spoléhat, je při pohybu uvnitř budov či v podzemních komplexech. Pro GPS a jiné navigační a poziční systémy založené na komunikaci se satelity je nutné dobré spojení s družicemi na oběžné dráze, což při pohybu uvnitř budov není zajištěno a právě proto je v těchto situacích výhodné využít systémy pro indoorovou lokalizaci.

Ta je také hlavním tématem této práce, jejímž cílem je navrhnout spolehlivý systém pro personální lokalizaci uvnitř budov a dokázat pomocí něj určit, kde se sledovaný objekt či osoba v oblasti nachází.

## 1.2. Historie a vývoj navigace

V dnešní době je GPS (*Global Positioning System*) navigace nedílnou součástí každodenního života. Začala jako lokalizační a poziční systém vyvíjený pro americkou armádu, ale nyní je nástrojem, který využívají každý den miliony běžných lidí po celém světě. V civilním použití dokáže správnou pozici odhadnout na desítky až jednotky metrů. Přesnost u vojenských či vědeckých aplikací může být ještě větší a může se jednat řádově o centimetrové až dokonce milimetrové odchylky, pokud systém funguje ještě s dalšími rozšiřujícími moduly.

Tak to ale přirozeně nebylo vždy a i jako všechny ostatní obory měla i navigace svůj postupný vývoj. A protože elementárním úkolem moderní navigace je nejdříve objekt co nejlépe lokalizovat, vyvíjela se lokalizace souběžně s navigací.

### 1.2.1. Historické metody navigace

Jak napovídá původ samotného slova, které vzniklo z latinských slov *navis* (lod) a *agere* (vést, hnát, konat), potřeba navigace jako takové se objevila ve chvíli, kdy lidé začali využívat lodě. Na souši je totiž člověk podvědomě automaticky schopný lokalizovat svoji polohu podle svých vrozených smyslů, především zraku. Proto i dávní mořeplavci nejdříve pluli vždy jen podél pevniny, díky které mohli svoji polohu ověřovat. Pokud se ovšem s loděmi dostali do velké vzdálenosti, byli schopní určovat pouze svoji zeměpisnou šířku z pozorování výšky Slunce ve dne a Polárky v noci. Rychlost měřili ze vzájemného pohybu lodi a různých předmětů. Postupem času však začali své metody vylepšovat. [1]

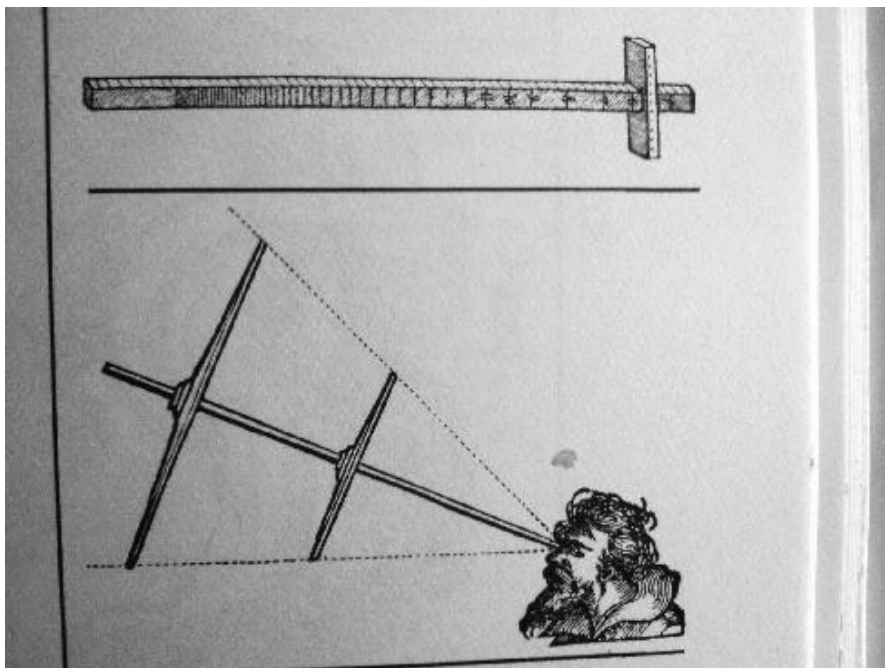
Od 13. století se začal pro navigaci používat magnetický kompas pro určení směru plavby společně s olovními, díky kterým mohli námořníci zjistit hloubku oceánu. Po nějaké době se tak začaly postupně objevovat první námořní nákresy (tzv. *portolánové mapy*) spolu s instrukcemi pro plavbu po známých trasách. Bylo tak možné znát směr plavby z jednoho přístavu do druhého a také hloubku pobřežních vod. [1]



Obrázek 1.2.1 – Ukázka portolánové mapy z 13. století [2]

Kompas ale není ve všech ohledech ideální, neboť směr k severnímu pólu ukazuje nepřesně díky magnetické deklinaci, a navíc je také citlivý na okolní vlivy. Magnet byl tak brzy nahrazen gyroskopem.

Od 15. století pak začínají velké objevy po moři. Portugalci a Španělé plují dál od evropského kontinentu a objevují nová, nepoznaná území. Nejdříve přicházejí na řadu ostrovy Madeira a Azory, následované západním pobřežím Afriky, Mysem Dobré naděje, Amerikou a nakonec Indie s Brazílií. Všechny tyto objevy byly provedeny právě v 15. století, kdy se také začínají vyskytovat první astronomické přístroje pro měření úhlů na obloze nebo výšky nebeských těles nad obzorem. Jako příklad můžeme uvést Jakubovu hůl, námořní astroláb či kvadrant. [1]



Obrázek 1.2.2 – Princip Jakubovy hole [3]

Od 16. století začínají mořeplavci používat skutečné námořní mapy, sloužící jako pomůcka pro přesnější navigaci. Ve století nadcházejícím se objevují první přístroje se zrcadlem, díky kterým je možné pozorovat dva objekty zároveň a zjistit tak úhlovou vzdálenost mezi nimi. Nejúspěšnější z těchto zařízení – sextant – se osvědčil natolik, že se používá do dnešních dob. [1]



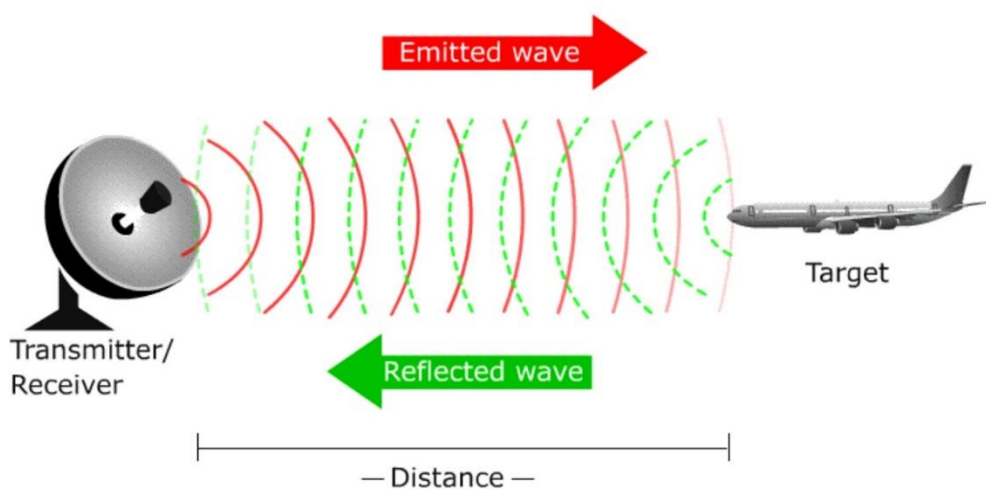
Obrázek 1.2.3 – Sextant [4]

V 18. století vynalezl v Anglii John Harrison přístroj zvaný „námořní chronometr“, který udržuje čas vyplutí a spolu s astronomicky měřeným časem dokáže určit rozdíl zeměpisných délek obou míst. Další významnější vývoj přístrojů používaných pro navigaci přišel až na počátku

20. století, kdy bylo vynalezeno rádio, díky kterému bylo možné námořní chronometr pravidelně srovnávat s rádiovými časovými signály a ještě více tak zpřesnit určení zeměpisné délky. Později byly chronometry nahrazeny stabilnějšími křemennými hodinami. [1]

### 1.2.2. Moderní metody navigace

Hlavní rozvoj moderních metod navigace nastal ve 20. století, hlavně po druhé světové válce, spolu s rozvojem elektrotechniky a elektroniky. Prvním významným přístrojem byl radar, což je zkratka pro „*Radio Detection and Ranging*“. Ten na otočné konstrukci vysílá rádiové vlny a s pomocí jejich odrazu a Dopplerova efektu dokáže vypočítat pozici okolních objektů a překážek, případně směr a rychlost jejich pohybu. [1]



Obrázek 1.2.4 – Princip radaru [5]

Vylepšením radaru vznikl za druhé světové války v USA nový rádiový navigační systém LORAN-C (*Long Range Aid to Navigation*) využívající nízkofrekvenční (90 – 110 kHz) vysílače na pobřeží. Dosah tohoto systému byl až 2 000 km a přesnost se pohybovala mezi desítkami až stovkami metrů. Tento systém přestal být využíván v roce 2010. [1]

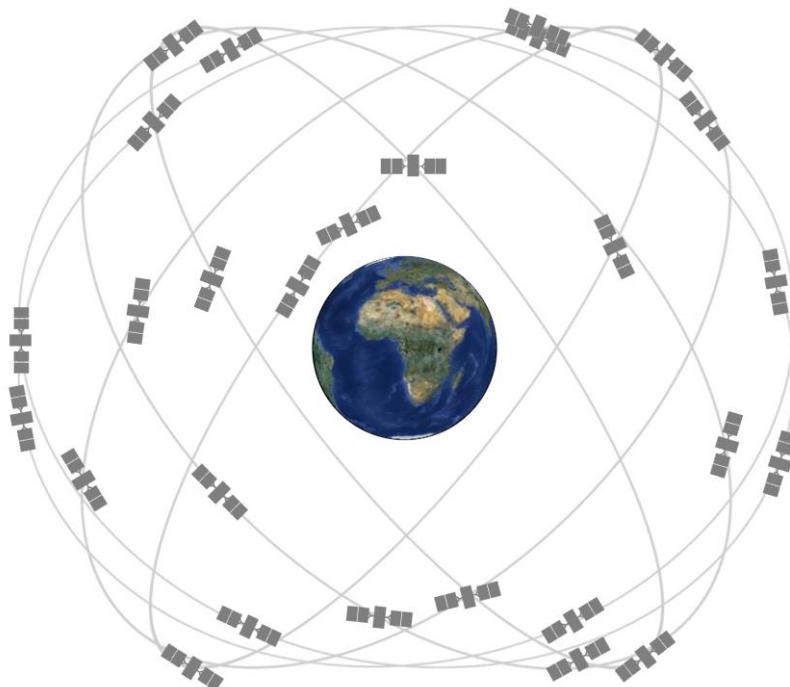
Dalším historickým milníkem v navigaci byl počátek využívání umělých družic Země. Jejich polohy musejí být známy s vysokou přesností a historicky prvním družicovým navigačním systémem byl TRANSIT, který byl vyvinut v USA v 50. letech. Využíval měření Dopplerova posuvu rádiového signálu, přijímaného od nízko letících družic (1 100 km). Přesnost se pohybovala okolo 50 metrů, ale při využívání pro geodetické účely bylo dosaženo přesnosti až několika decimetrů. [6]

Asi neznámějším navigačním systémem je GPS (*Global Positioning System*), který bude podrobněji popsán ve vlastní kapitole.

## 1.3. Popis systému GPS

### 1.3.1. Historie GPS

GPS je tzv. PNT (*Positioning Navigation and Timing*) systém vyvinutý v 80. letech primárně pro potřeby armády USA. Hlavním požadavkem při vývoji tohoto systému byla nutnost poskytovat spolehlivé informace na jakémkoliv místě na Zemi a v jejím blízkém okolí v globálním souřadnicovém systému kontinuálně v kteroukoliv denní nebo roční dobu a za jakýchkoliv klimatických a povětrnostních podmínek. V roce 1978 byly vypuštěny první 4 testovací družice a do roku 1979, kdy byla spuštěna druhá testovací fáze, bylo vypuštěno celkem 11 družic. Nyní kolem Země obíhá po oběžné dráze na 31 družic. Ty obíhají po šesti kruhových drahách se sklonem  $55^\circ$  k rovině rovníku a jsou od povrchu Země vzdálené přibližně 20 190 km. Družice se pohybují rychlostí 11 300 km/h a jeden oběh jim trvá 11 hodin a 58 minut. Vše je nastaveno tak, aby v jeden okamžik z jakéhokoli místa na Zemi bylo možné mít spojení minimálně se 4 družicemi. [6]



Obrázek 1.3.1 – Kosmická část systému GPS [7]

GPS vznikl primárně jako vojenský systém, ale v roce 2000 byl zpřístupněn pro veřejnost, přičemž přesnost byla z počátku pro civilní sektor záměrně omezena na přibližně 100 metrů kvůli obavám ze zneužití, kdežto pro vojenské účely byla přesnost až v jednotkách centimetrů.

Celý systém GPS je rozdělen do tří segmentů, přičemž první, kosmický, jsme již zmínili výše. Druhým je segment řídicí, který je tvořen 18 pozemními stanicemi. Hlavní řídicí stanice je na letecké základně v Colorado Springs ve státě Colorado a ostatní jsou rozmístěny rovnoměrně po obvodu Země, většinou blízko rovníku. Pokud družice nad touto stanicí proletí, proběhnou korekce v dráze letu i vysílaného signálu. Řídicí segment má kromě korekcí na starosti i

kompletní správu a údržbu družic a spolupracuje s jejich umístěním na oběžnou dráhu. Třetím a posledním segmentem je uživatelský, kterým jsou všechny přijímače na Zemi. [8]

### 1.3.2. Princip GPS

Základním principem GPS je trilaterace, tedy zjišťování souřadnic a vzdáleností v trojúhelníku. Přesně na tomto principu funguje tzv. vektorování za pomoci DME – *Distance Measurement Equipment* – dálkoměrného zařízení, které se používá při navigaci letadel. Jedná se o dvoucestnou komunikaci, kdy přijímač v letadle vyšle signál a pozemní vysílač mu odpoví. Přijímač následně vydělí dobu trvání  $t$  a vynásobí ji rychlostí světla. [9]

$$d = c * \frac{t}{2} \quad (1)$$

Tím se zjistí vzdálenost letadla vůči danému vysílači. To však pro určení polohy nestačí a je proto nutné získat data alespoň z dalších dvou vysílačů. Ve chvíli, kdy se tak stane, stačí „nakreslit“ tři kružnice se středy v souřadnicích jednotlivých vysílačů a v trojúhelníku, který vznikne průsečíky těchto tří kružnic, se nachází letadlo. Podobný princip je využit i u systému GPS. Družice nahrazují úlohu vysílačů a pozemní zařízení zase úlohu přijímačů. Místo kružnic jsou zde použity tři koule, které se taktéž protínají, a není tak těžké dopočítat pozici přijímače. Čím více vysílačů je v dané chvíli k dispozici, tím přesnější měření bude.

Srdcem každého satelitu jsou atomové hodiny. Ty jsou ve všech satelitech na oběžné dráze nařízeny na časový standard UTC. Součástí vysílaného signálu je časová značka informující o tom, kdy byl signál vyslán. Přijímač z rozdílu časů odeslání ( $t_1$ ) a přijetí ( $t_2$ ) signálu spočítá tzv. pseudovzdálenost.

$$\rho = c(t_1 - t_2) \quad (2)$$

Ta je zatížena mnoha chybami, které jsou zapříčiněny několika faktory. Jsou jimi například změna rychlosti signálu při průchodu atmosférou, působení relativistických jevů a další. Na všechny tyto chyby již dnes existují systémy, které umí provést korekci a dodat tak patřičnou přesnost. [8]

V současném světě jsme ovšem svědky stále rostoucí zástavby, jejímž důsledkem je i narůstající čas strávený v těchto zastřešených a rozlehlých komplexech. Zde GPS bohužel již tak spolehlivá není a proto je pocítována stále větší potřeba pro obdobně spolehlivý systém uvnitř těchto komplexů.

## 1.4. Rozvržení práce

První kapitola se věnovala popisu obecné lokalizace a jejímu vývoji v historickém měřítku. V druhé kapitole si podrobněji popíšeme systémy pro personální lokalizaci a technologii, na které jsou tyto systémy postaveny.

Ve třetí kapitole popíšeme vlastní řešení zadaného problému a případné problémy při řešení. Čtvrtá kapitola obsahuje výsledky našeho experimentu. V páté kapitole je umístěna diskuze a závěr této práce.

## 2. Indoorová lokalizace

### 2.1. Úvod

*Indoor positioning system* neboli česky poziční systém pro krytá prostředí má za úkol lokalizovat objekty či osoby uvnitř budov za pomoci rádiových vln, magnetických polí, zvukových signálů či jiných informací získaných ze senzorů. Na trhu je v aktuální době již několik komerčních systémů, ale neexistuje doposud žádný jednoznačný standard pro tento druh lokalizace.

Rozvoj těchto systémů je důsledkem rozmachu bezdrátových technologií, které za poslední roky dosáhly obrovského pokroku a lze je využívat k mnohým aplikacím. Jako příklad může posloužit chytrá domácnost, kdy se na základě lokalizace osoby spínají a vypínají jednotlivé spotřebiče. Ve světě robotiky, která je nám bližší, se zase může robot autonomně pohybovat po vnitřních prostorech jen za pomoci asistence lokalizačně pozičního systému.

### 2.2. Společné komponenty systému pro indoorovou lokalizaci

V základu se většina bezdrátových pozičních systémů skládá ze dvou oddělených komponent. První komponenta je statická a nekoná pohyb. Druhá je naopak mobilní a je součástí sledovaného objektu.

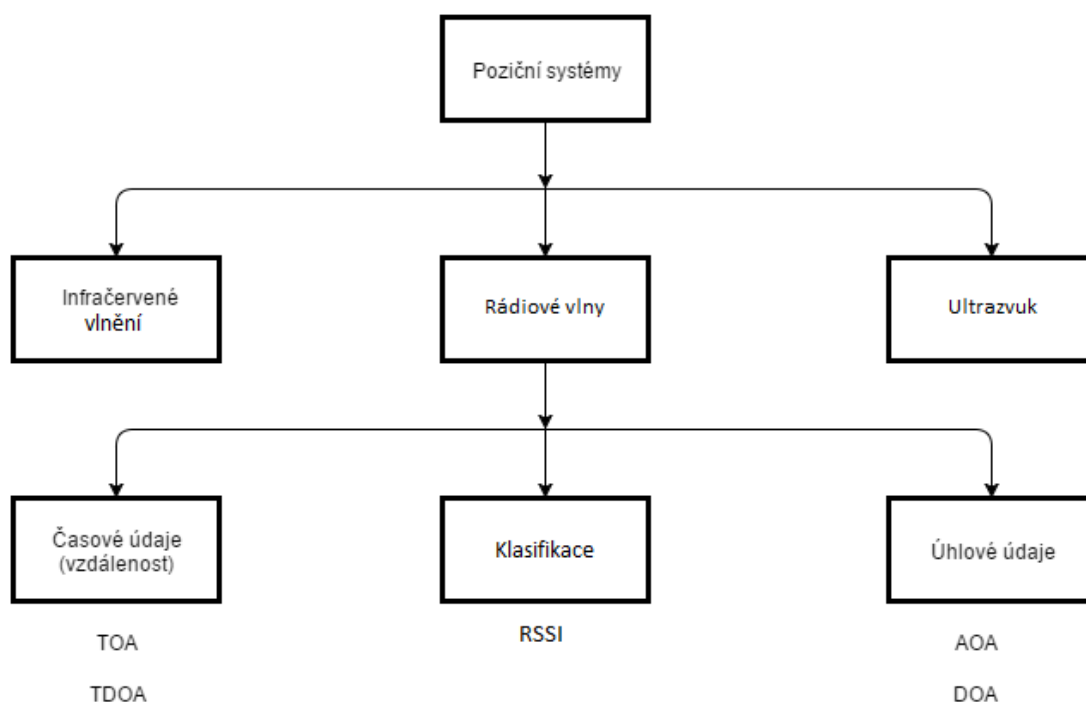
Zpravidla bývá vždy jedna komponenta ta aktivní, která obsluhuje logiku a výpočetní sílu a zpracovává data. V našem případě byla pasivní část zároveň tou mobilní. Pohybující se vysílač tak pouze vysílal, aniž by obstarával zpracování dat. To měla na starost statická část celého systému, kterou byly senzory a centrální počítač, jenž byl se senzory bezdrátově propojen a zajišťoval funkci logické a výpočetní jednotky. Více informací o použitém hardware najdete v kapitole 3.2.

### 2.3. Typy systémů pro indoorovou lokalizaci

Systémy pro lokalizaci uvnitř zastavěných prostředí lze kategorizovat podle několika kategorií.

#### 2.3.1. Rozdělení podle druhu signálu

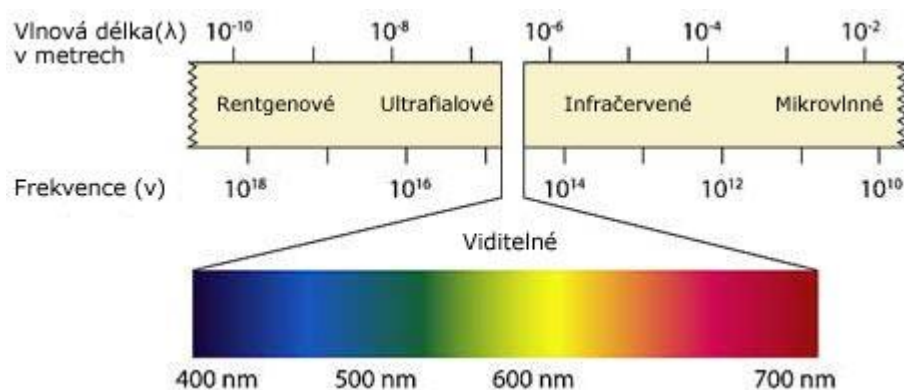
Ať už se rozhodneme pro systém používat jakýkoli druh signálu, vždy je nutné počítat s omezeními a specifickými vlastnostmi, které daný druh signálu nabízí. Latence, difrakce, reflexe a disperze jsou základní jevy, které ovlivňují šíření signálu a které je nutné brát v potaz. Dalšími pak mohou být: efektivní dosah, dostupná šířka pásma, regulační omezení, interference, omezení výkonu, bezpečnost a například také náklady na technologie. Bezdrátové technologie hojně používané pro poziční systémy v zastavěném prostředí pak bývají na bázi infračerveného záření, rádiových vln nebo ultrazvuku. Stručné rozdělení těchto tří hlavních zástupců bezdrátových systémů je následující.



Obrázek 2.3.1 – Základní rozdělení pozičních sensorových bezdrátových systémů [10]

### 2.3.1.1. Infračervené záření

Infračervené záření je elektromagnetický signál o vlnové délce delší, než jaká je charakteristická pro viditelné světlo, ale zároveň kratší než rádiové vlny. Je vyzařováno teplem a není schopné projít zdiemi či jinými překážkami a tak má omezený rozsah využití v zastavěném prostředí.



Obrázek 2.3.2 – Rozdělení vlnového spektra [11]

Kromě toho také vyžaduje sofistikovanější obvody, než které jsou potřeba pro ultrazvukové signály. Záření, které je generováno vnitřním osvětlením, může s infračerveným zářením kolidovat, což stěžuje jeho přesné snímání uvnitř budov. Signál má maximální dosah přibližně pět metrů, což je samo o sobě relativně slabá efektivní vzdálenost. [12]



### 2.3.1.2. Ultrazvuk

Výhodami ultrazvukových zařízení je jejich jednoduchost a velmi příznivá cena. Ultrazvuk je znám pro svoji dobrou odrazivost od překážek. Jeho maximální dosah je pouze mezi třemi a deseti metry, nicméně při měření vykazuje přesnost až 1 cm. [12]

### 2.3.1.3. Rádiový signál

Rádiový signál se na rozdíl od infračerveného a ultrazvukového vyznačuje mnohem lepší průchodností zdi a materiálem obecně. I proto má v zastavěném prostředí mnohem lepší dosah. Navíc je k dispozici několik nelicencovaných pásem, a ve světě bezdrátových technologií je zdaleka nejpoužívanější. Také ZigBee, které bylo při našem měření použito, je zástupcem této technologie.

## 2.3.2. Rozdělení podle měřících principů

Bezdrátové poziční systémy mohou být kromě druhu použitého signálu kategorizovány také podle principu, který je použit pro samotné odvození pozice mobilních objektů. V dnešní době jsou nejpoužívanějšími principy:

- Angle of Arrival (AOA) – také jako Direction of Arrival (DOA)
- Time of Arrival (TOA)
- Time Difference of Arrival (TDOA)
- Práce s kvalitou signálu, tj. například klasifikace

### 2.3.2.1. Měření na základě úhlů

V systémech využívající metody AOA je pozice změřena pomocí goniometrie. Za pomoci směrových antén nebo poli antén se měří úhel vzhledem k bodům na známých pozicích. Průnik několika změřených směrů nám dává dobrý odhad hledané pozice. Přesnost tohoto přístupu je omezena nejen samotnými možnostmi směrových antén, ale také stíněním a vícečetné odrazy signálů. Tuto techniku používá triangulace.

### 2.3.2.2. Měření na základě časových údajů

Metody označované jako TOA a TDOA se spoléhají hlavně na přesnost měření času jak na vysílači, tak přijímači signálu. To je důležité pro výpočet vzdálenosti mezi těmito dvěma objekty, která se určuje právě na základě časových údajů. Kombinováním alespoň tří takto vypočtených vzdáleností od tří referenčních bodů můžeme pomocí trilaterace získat odhad pozice mobilního objektu. Informace o vzdálenosti lze mimo jiné získat také například z informací o útlumu síly signálu.

### 2.3.2.3. Klasifikace

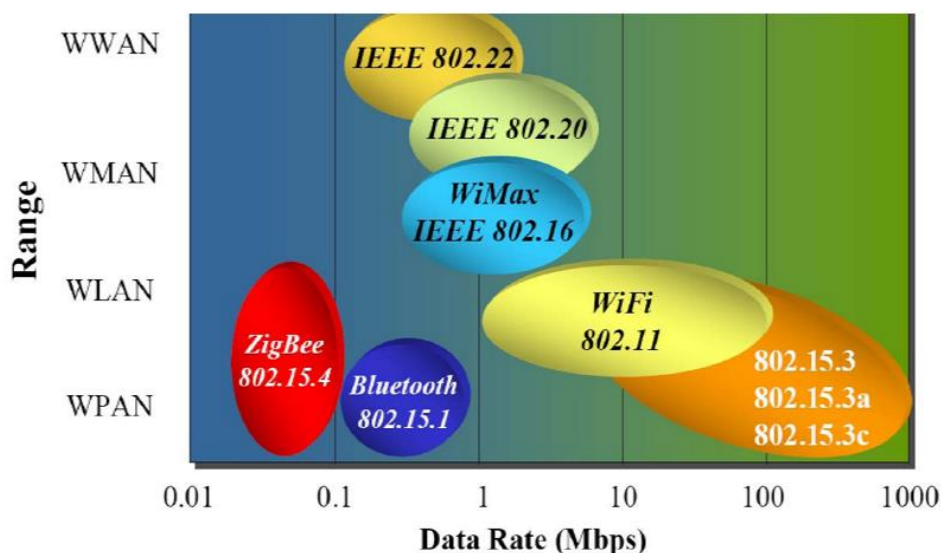
Klasifikace vyžaduje technicky vzato pouze měření RSSI (kvality signálu) či jiných negeometrických dat v různých lokacích tak, aby bylo možné vytvořit databázi tzv. „otisků“ pro jednotlivé lokace. Pro úspěšný odhad není nutné, aby byl mobilní objekt viditelný alespoň třemi senzory. Více informací o metodě je popsáno v sekci 3.5.2.

## 2.4. Protokoly a technické standardy

V posledních několika letech se při stavbě sensorových sítí velmi často skloňují dva technické standardy. Jsou jimi IEEE 802.15.4 a ZigBee. První jmenovaný definuje fyzickou a MAC vrstvu nízkofrekvenčního WPAN (Wireless Personal Area Network). ZigBee je standard, který je založen na IEEE 802.15.4 a dále jej rozšiřuje.

### 2.4.1. Standard IEEE 802.15.4

Popis tohoto standardu byl napsán za použití oficiální dokumentace. [13] Standard IEEE 802.15.4 je jednou z větví IEEE 802.15, která je využívána pro WPAN. První větev 802.15.1 je vyhrazena pro Bluetooth, 802.15.2 pro koexistenci s dalšími službami v bezlicenčních pásmech a třetí větev je pro vysokorychlostní WPAN. Charakteristikou čtvrté větve standardu 802.15 je nízký vysílací výkon (cca 1 mW), krátký dosah (10 – 30 metrů uvnitř budov) a velmi nízká spotřeba.



Obrázek 2.4.1 – Postavení 802.15.4 mezi jinými standardy bezdrátových sítí [14]

Standard IEEE 802.15.4 definuje již od roku 2003 zařízení, která lze použít pro vybudování LR-WPAN (Low-Rate Wireless Personal Area Networks). Jsou to sítě, které využívají malá, levná a nízkenergetická řešení, jež se implementují pro širokou škálu zařízení. Zařízení mohou být typu full-function či reduced-function (FFD či RFD). Druhý zmiňovaný typ lze použít pro jednoduché aplikace, kdy není nutné přenášet větší množství dat a je nutné komunikovat pouze s jedním specifickým FFD. Slouží tak jako koncový uzel. Naopak FFD může pracovat jako koordinátor celé sítě PAN, koordinátor nebo jako jednoduché zařízení typu RFD. Dokáže také komunikovat s dalším zařízením typu FFD či RFD.

LR-WPAN může fungovat ve dvou topologických režimech. Prvním z nich je hvězda, kdy všechny RFD komunikují s jedním kontrolním uzlem, kterým je PAN koordinátor. Ten nejenže komunikaci inicializuje, ale také ji vykonává a nastavuje tak, jak je nutné.

Druhou používanou strukturou je tzv. „peer-to-peer“. Zatímco ve hvězdicové topologii komunikují všechny uzly s jedním centrálním, v topologii typu peer-to-peer mohou komunikovat všechny uzly mezi sebou. Nicméně i zde má celá síť svého hlavního koordinátora. Všechna zařízení v LR-WPAN mají svoji unikátní 64bitovou adresu, která může být využita v rámci dané sítě, a unikátní identifikátor. Kombinace těchto dvou identifikátorů umožňuje fungující komunikaci mezi uzly.

Síť typu LR-WPAN je založena na klasickém modelu o sedmi vrstvách ISO/OSI. Standard IEEE 802.15.4 popisuje pouze fyzickou vrstvu, která obsahuje přijímač s jeho ovládacími mechanismy, a MAC vrstvu, která zajišťuje přístup vyšších vrstev k té fyzické. Fungování těchto vrstev je vysvětleno dále.

#### 2.4.1.1. Fyzická vrstva

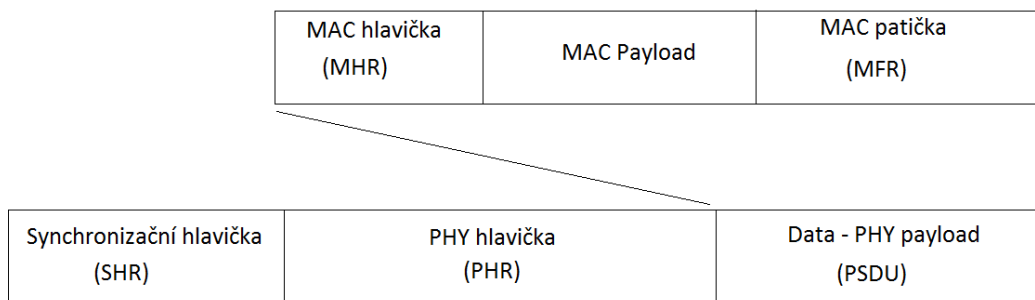
Fyzická vrstva standardu IEEE 802.15.4 poskytuje dvě služby. První má na starost ovládání samotného fyzického aparátu. Druhá služba obstarávající data zajišťuje vysílání a přijímání PDU. Dohromady zajišťuje fyzická vrstva aktivaci a deaktivaci rádiového vysílače, LQI, výběr kanálů a odesílání a přijímání paketů přes fyzické médium.

Komunikace probíhá v bezlicenčních pásmech. Pro Evropu je to 868 – 868,6 MHz, pro Severní Ameriku 902 – 928 MHz a pro zbytek světa 2400 – 2483,5 MHz. Všechna patří pod pásmo ISM a využívají tzv. DSSS – techniku přímého rozprostřeného spektra. Každé z těchto zmiňovaných šířkových pásem podporuje jinou rychlost přenosu dat a používá jiné techniky modulace a počet kanálů. Navíc pokud systém nepoužívá 2450MHz frekvenci, operuje zároveň jak na frekvenci 868 MHz, tak na frekvenci 902 MHz. Tabulka níže uvádí souhrn informací o těchto třech šířkových pásmech.

Fyzická vrstva	Frekvenční pásmo	Modulace	Bit Rate	Počet kanálů
868 / 915	868 – 868,6	BPSK	20	1
	902 - 928	BPSK	40	10
2450	2400 – 2483,5	O-QPSK	250	16

Tabulka 1 – Používaná frekvenční pásma pro 802.15.4

V rámci komunikace mezi uzly se pracuje s tzv. PDU, což je hlavní datová jednotka fyzické vrstvy. Ta se skládá z několika částí. Začíná se částí SHR, která obsahuje preambuli a SFD. Preambule má 32 bitů a slouží k synchronizaci přijímačů. SFD (Start of Frame Delimiter) je naopak osmibitový a definuje začátek rámce. Následuje PHY hlavička (PHR), která je také osmibitová a nese informaci o délce celého rámce. Poslední částí je PSDU, která nese informaci pro cílový uzel. Její součástí je i paket MAC vrstvy.



Obrázek 2.4.2 – Schéma PPDU

### 2.4.1.2. MAC vrstva

MAC vrstva definuje samotný komunikační protokol, jež má na starosti následující úkoly:

- Tvorbu synchronizačních rámců (pokud je zařízením koordinátor)
- Synchronizaci těchto rámců
- Posílání MAC rámců s využitím fyzické vrstvy
- Pomoc při asociování a disociování PAN sítě
- Zabezpečení přístroje
- Údržbu GTS mechanismu
- Poskytování potvrzení, že spojení mezi dvěma zařízeními na této vrstvě je spolehlivé

Existují tři typy zařízení. Prvním z nich je koordinátor, který udržuje informaci o celé síti. Dále je to FFD (Full Function Device), které může komunikovat s jakýmkoliv zařízením v síti a převzít úlohu koordinátora. Může tak být v rámci této vrstvy zodpovědné za úkoly vypsané výše. Posledním typem zařízení je RFD (Reduced Function Device), které má jednodušší implementaci a může komunikovat pouze s FFD v rámci hvězdicové topologie. Nemůže být koordinátorem sítě a je typické pro koncová zařízení.

Standard IEEE 802.15.4 definuje čtyři různé rámcové typy: synchronizační (BEACON), datový, potvrzovací a příkazový. Každý z nich začíná hlavičkou MHR (MAC Header), která obsahuje kontrolní součet, pořadové číslo a informační pole. Následuje MSDU, které nese samotná data. Pouze potvrzovací rámeček žádná data nese. Každý rámeček je zakončen MFR (MAC Footer), jehož součástí je i FCS. FCS (Frame Check Sequence) kontroluje, zda jsou všechny příchozí pakety bez chyby.

Tabulky níže prezentují ony čtyři zmíněné typy MAC rámců. Synchronizační rámeček typu BEACON je periodicky vysílán PAN koordinátorem. Slouží k synchronizaci síťových zařízení a signalizuje jim, kdy je ideální čas pro komunikaci. Využíván je hlavně při konfiguraci sítě v módu BEACON enable, v němž umožňuje uvádění klientských zařízení do spánkových režimů s extrémně sníženou spotřebou energie.

Octets: 2	1	4/10	2	Variable	Variable	Variable	2
Frame Control	Sequence Number	Addressing Fields	Super frame Specification	GTS fields	Pending Addressing Fields	Bacon Payload	FCS
MHR			MAC Payload				MFR

Tabulka 2 – Schéma synchronizačního rámce

Datový rámec ve standardu IEEE 802.15.4 poskytuje 104 bytů pro přenos užitečné informace pro všechny datové přenosy v rámci tohoto standardu.

Octets: 2	1		Variable	2
Frame Control	Sequence Number	Addressing Field	Data Payload	FCS
MHR			MAC Payload	MFR

Tabulka 3 – Schéma datového rámce

Dalším typem je potvrzovací rámec. Díky němu získá odesílatel od příjemce potvrzení, že paket došel v pořádku. Je využitelný pouze na úrovni této vrstvy a je vysílán v tzv. „mrtvém čase“ ihned po přenosu paketu.

Octets: 2	1	2
Frame Control	Sequence Number	FCS
MHR		MFR

Tabulka 4 – Schéma potvrzovacího rámce

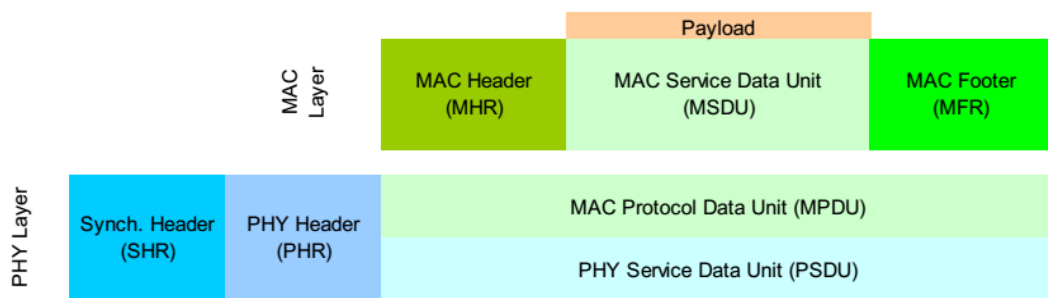
Posledním rámcem je příkazový rámec, který slouží k centralizované konfiguraci, nastavení a řízení klientských zařízení v síti ZigBee.

Octets: 2	1		1	Variable	2
Frame Control	Sequence Number	Addressing Fields	Command Frame Identifier	Command Payload	FCS
MHR			MAC Payload		MFR

Tabulka 5 – Schéma příkazového rámce

Pro přístup k fyzickému kanálu jsou definovány dva typy přístupu: mód bez signalizace (bez BEACON rámce – BEACON disable) a mód se signalizací (s BEACON rámcem – BEACON enable). Mód bez signalizace využívá klasickou metodu CSMA-CA. Zařízení, které chce vysílat, zkouší obsazenost kanálu a pokud je volný, vyšle data. Pokud ne, testuje dále. Mód se signalizací je založen na implementaci struktury super rámce (super-frame). Super rámec je ohraničen značkami a je rozdělen do 16 stejně velkých časových slotů, přičemž veškerá komunikace v síti musí proběhnout v tomto časovém rozmezí. Struktura super rámce se dělí na aktivní a neaktivní část. Během neaktivní části mohou zařízení přejít do režimu spánku, ale musí být připraveny pro příjem synchronizačního BEACON rámce na začátku další periody.

Aktivní část se dělí dále na CAP a CFP. Během CAP mohou komunikovat všechna zařízení, která se délkou signálu vejdu do časových slotů. Pro aplikace, které musí mít malou latenci nebo speciální šířku dat, může koordinátor této aplikaci věnovat část super rámce. Vyhrazené místo se pak nazývá GTS (Guaranteed Time Slots). Koordinátor může přidělit až 7 GTS, které jsou vyhrazeny v části CFP. Mód se signalizací umožňuje snížení spotřeby energie. Přijímače jsou aktivní pouze během vysílání signalizace nebo v době příjmu jim určených dat. Signalizační zpráva obsahuje adresu příjemce a tím je možné konkrétní přijímač aktivovat pro příjem dat. Interval mezi signalizačními zprávami může být v rozmezí od 15 ms do 252 s. Záleží na požadované latenci a energetických nárocích.



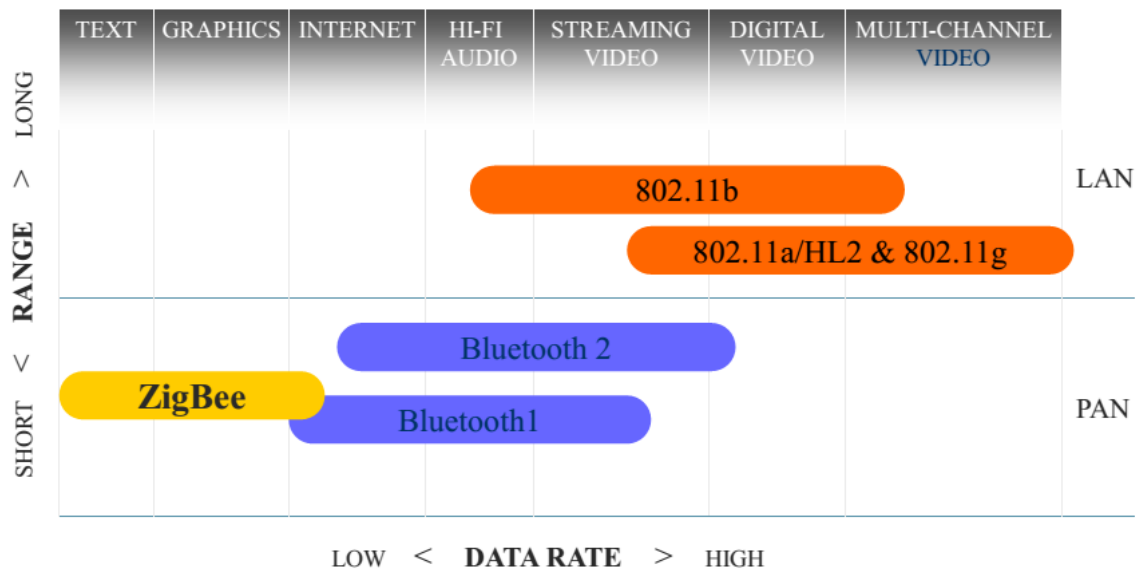
Obrázek 2.4.3 – Schéma rámce MAC vrstvy a fyzické vrstvy [14]

Norma IEEE 802.15.4 stanovuje standardy fyzické vrstvy a MAC vrstvy pro nízkonákladové a nízkoenergetické sítě s vysokou hustotou uzlů. Navíc kromě charakterizace těchto dvou vrstev poskytuje IEEE 802.14.5 dobrý základ pro bezpečnost včetně schopnosti udržet ACL a použití symetrické kryptografie pro šifrování dat. Algoritmus, který je pro šifrování použit, je AES. Nicméně pokud se jedná o samotnou bezpečnost, velmi záleží i na vyšších vrstvách komunikačního protokolu. Tyto vyšší vrstvy mají na starost ověřování zařízení a správu klíčů. V další sekci si vysvětlíme princip standardu ZigBee, který IEEE 802.15.4 rozšiřuje a poskytuje další možnosti.

## 2.4.2. Technologie ZigBee

Aliance ZigBee byla v roce 2002 založena jako rapidně se rozvíjející, celosvětové a neziskové průmyslové konsorcium, jehož misí je definovat spolehlivý, nákladově efektivní, nízkoenergetický, bezdrátově propojený a na monitoring a kontrolu produktů založený otevřený globální standard. Konsorcium je složeno z předních světových výrobců polovodičových

součástí, technologických prodejců a koncových uživatelů. Následující popis vychází z oficiálních specifikací tohoto standardu. [15]

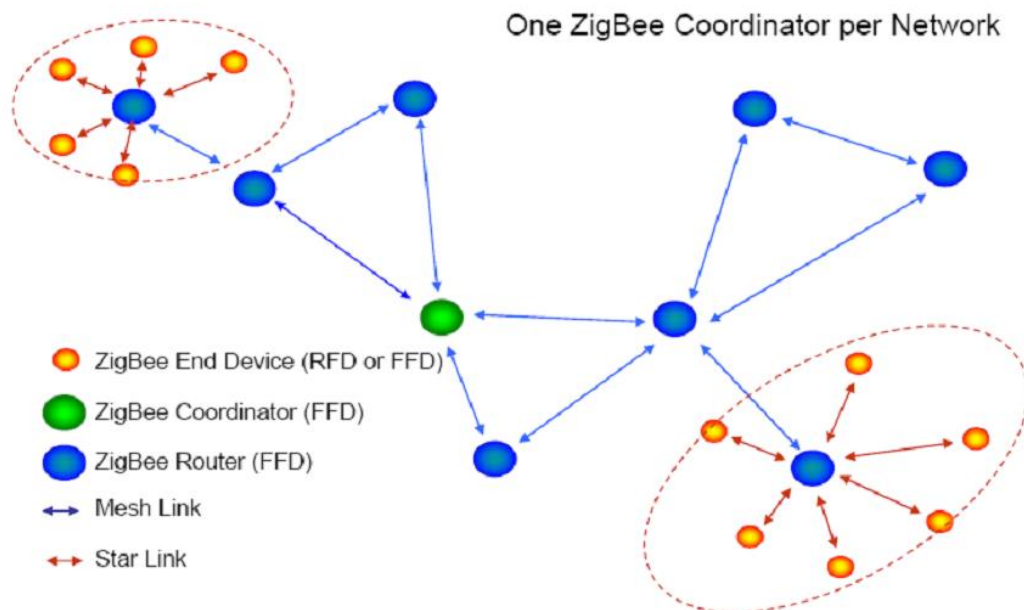


Obrázek 2.4.4 – Postavení ZigBee mezi ostatními sítěmi [14]

Hlavními atributy ZigBee jsou jeho jednoduchost, dlouhá výdrž zařízení na baterii, spolehlivost a nízká cena. Jeho maximální dosah uvnitř budov se pohybuje mezi 10 a 30 metry a vysílací výkon je 1 mW. Z AA baterií lze díky vysokému poměru mezi dobou „spánku“ a aktivitou získat pro jeden uzel až dva roky životnosti. [14]

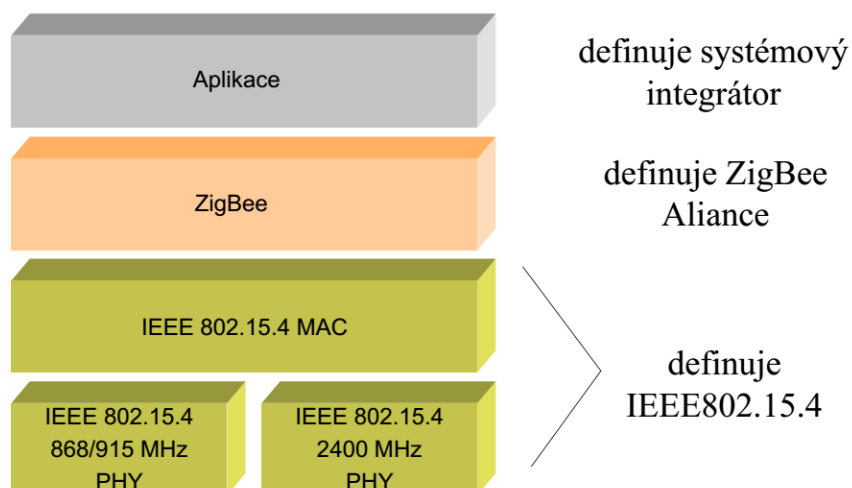
ZigBee dále rozvíjí IEEE 802.15.4 tým, že přidává strukturu pro síť, zabezpečení a aplikační vrstvu. U síťové vrstvy to je především možnost vytvářet několik druhů síťových topologií: hvězda (star), smíšená topologie (mesh) a stromová topologie (cluster tree). Dále je síťová vrstva zodpovědná za úspěšné postavení nové sítě, úspěšnou konfiguraci nově připojených zařízení, správné přiřazení adres (které jsou standardně 64bitové, popřípadě 16bitové), synchronizaci v rámci dané sítě, zabezpečení spojení a správné směrování zpráv.

Standard ZigBee také rozšiřuje pojem fyzických zařízení (RFD, FFD) pomocí notace „logických zařízení“. „ZigBee koordinátor“ je prvním typem logických zařízení. Je zodpovědný za inicializaci, udržování a řízení sítě. Pod tímto koordinátorem je dále tzv. „ZigBee router“, který zajišťuje kontrolu správného směrování zpráv mezi jednotlivými uzly. Posledním v této kategorii „logických zařízení“ je tzv. „ZigBee End Device“, které se chová jako koncový bod síťové struktury.



Obrázek 2.4.5 – Ukázka topologií sítí ZigBee [14]

Oficiální specifikace ZigBee z roku 2012 shrnují bezpečnostní prvky, které tento standard umožňuje: vytvoření bezpečnostního klíče, jeho přenos, ochranu jednotlivých rámců a také správu zařízení. ZigBee staví svůj bezpečnostní mechanismus na užívání symetrického šifrování. Jednotlivé bezpečnostní služby závisí na přiřazené vrstvě, přičemž je pokryta síťová a aplikační vrstva. Navíc pokud je nutné zabezpečit i jednotlivé rámce MAC, dokáže to spojová vrstva zařídit. Také je podporováno zabezpečení spojení z jednoho uzlu do druhého, a zdrojové a cílové zařízení tak sdílejí stejný klíč.



Obrázek 2.4.6 – Struktura ZigBee [14]



Ve spojové vrstvě IEEE 802.15.4 zajišťuje AES mechanismus řádnou ochranu a garantuje jak důvěryhodnost a integritu, tak i autentičnost jednotlivých rámců. Informace, zda je rámeček šifrován, je indikována pomocí pomocného pole v záhlaví rámce. Integrita rámců je podpořena za pomoci výpočtů a použití MIC na konci rámce. Pro různé situace zabezpečení používá spojová vrstva také různé módy samotného AES: pro šifrování je používáno v tzv. Counter (CTR) módu, přičemž pro integraci je to typ CBC-MAC. K dispozici je i jejich kombinace (CCM), která umožňuje jak šifrování, tak i integritu. [12]

V síťové vrstvě se pro šifrování používá technologie odvozená od CCM, která nese označení CCM\*. Protože síťová vrstva používá pouze tento jediný mód, je pro všechny druhy zabezpečení použitý jeden klíč. Formát zasílaných zpráv je velice podobný MAC rámcům. Ačkoliv je síťová vrstva zodpovědná za ochranu přenosů dat v rámci této vrstvy, vyšší vrstvy dále specifikují klíče a volby CCM\* pro každý rámeček.

Bezpečnost v nejvyšší vrstvě, kterou je ta aplikační, je zajištěna opět podobně jako ve dvou výše zmíněných. Používají se tzv. „link key“ nebo „network key“, aby se posílané zprávy ochránily a zapouzdřily do sady podobné síťovému formátu. Dále má aplikační vrstva na starosti zajištění ZDO a aplikací obstarávající správu zařízení, tvorbu klíčů a jejich přenos.

Kromě toho obsahuje aplikační vrstva také výrobcem specifikované aplikační objekty, ZDO a sub-vrstvu. Ta kromě zabezpečení spojuje zařízení na základě jejich povinností a potřeb, udržuje tabulky popisující tato spojení a předává mezi nimi zprávy. Také navíc odhaluje sousední zařízení vzhledem k jednotlivým uzlům. ZDO je zodpovědné za určování povinností jednotlivých zařízení v síti a podporu ochrany. Sub-vrstva, která implementuje reálné aplikace, je přitom výrobcem definovaný aplikační objekt.

Specifikace ZigBee jsou velkým krokem ke standardizaci bezdrátových senzorových sítí. Pokrývají všechny vrstvy normy ISO/OSI od fyzické po aplikační s tím, že pro vývojáře jsou nabízeny návody, jak ZigBee využít co nejlépe.

## 3. Lokalizace založená na rádiové technologii

Návrh na toto téma vyplynul z reálné potřeby, neboť společnost IMA s.r.o. (Institut Mikroelektronických Aplikací), která provozuje v rámci ČVUT vstupní bezkontaktní čtečky, vyvíjela platformu pro sledování pohybu osob uvnitř budov. Ta by měla být schopná rozpoznat, ve které místnosti se sledovaná osoba (popřípadě objekt) aktuálně nachází. Společnost IMA vyvinula vlastní hardware potřebný k měření a ten nám poskytla pro naše experimenty.

### 3.1. Zadání řešeného problému

Cílem této práce bylo seznámit se se zapůjčeným systémem pro RF tag-based identifikaci (kapitola 3.2), prostudovat předchozí realizovaná řešení a identifikovat jeho nedostatky (kapitola 3.3). Následně měly být navrženy alternativní postupy, jak chování stávajícího lokalizačního systému zlepšit. Soustředit jsme se přitom měli na využití vhodných heuristik o přípustnosti pohybu, modelu prostředí, popř. dalších odvozených situačních pravidel. (kapitola 3.4 a 3.5)

Závěrem jsme měli navrhnout pilotní úlohu, zkonfigurovat zapůjčený systém a provést experimentální sběr dat a ověření námi navrženého řešení. (3.6)

Výsledky mají být kvantitativně porovnány a důkladně zdokumentovány.

### 3.2. Použitý hardware

Při metodách indoorové lokalizace jsou nejčastěji použity dva typy zařízení. Prvním je vysílač signálu a druhým je jeho přijímač. Nakonfigurovány v síti mohou být různě. Vysílačem může být jak koncový prvek, tak koordinátor sítě.

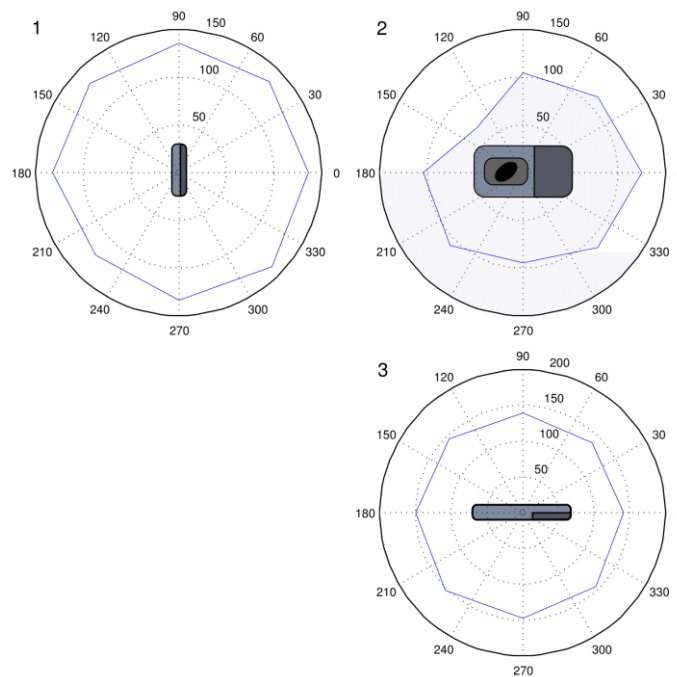
#### 3.2.1. Popis vysílacího zařízení

Vysílačem je přenosné zařízení kompaktních rozměrů, poháněné bateriovým napájením. Opakovací frekvenci vysílání je možné nastavit. Zapůjčené vysílače měly opakovací frekvenci 1 Hz a 4 Hz. Každý vysílač vysílá svůj vlastní identifikační kód a indikátor stavu tlačítka, které je součástí vysílače.

Při měření je důležitá nezávislost kvality signálu na směrové orientaci vysílače, protože při nošení lidmi není reálně možné zajistit konstantní natočení vysílače vůči přijímacím anténám po celou dobu měření. Z měření z roku 2015 [16] si lze prohlédnout naměřené výsledky kvality signálu v závislosti na relativním natočení vysílače vůči přijímači.



Obrázek 3.2.1 – Vysílač



Obrázek 3.2.2 – Vyzařovací diagramy vysílače pro tři různé polohy [16]

Signál byl měřen ve třech pozicích vysílače ve vzdálenosti jeden metr od přijímače. V každé pozici byl ve svislé ose rotován okolo svého středu po 45° a kvalita signálu byla měřena po dobu dvou minut pro každé natočení, během nichž bylo naměřeno průměrně 120 hodnot. Tyto naměřené hodnoty byly zprůměrovány a vyobrazeny v polárním grafu. [16]

Každý vysílač má svůj vlastní specifický kód, díky kterému je přijímač schopný signál přiřadit správnému vysílači. Informace ze všech přijímačů se posílají dále do hlavní řídicí jednotky, která data kompletuje a posílá dál.

### 3.2.2. Popis sensorového zařízení

Přijímače sloužily jako stacionární základny, které je možné rozmístit v rámci sledované oblasti. Jedinou omezující vlastností byla nutnost elektrického napájení a bylo tak nutné hledat místa poblíž zdroje energie.

Součástí přijímače jsou dvě čtvrt vlnné antény navzájem orientované kolmo pro maximální pokrytí v obou polarizačních rovinách. Pokud bychom použili pouze jednu anténu, přijímač by byl velmi náchylný na změnu směru vzájemné orientace antén, protože polarizace vlny by byla lineární. Naměřená data by tak nebyla příliš kvalitní.



Obrázek 3.2.3 – Přijímač typu 1



Obrázek 3.2.4 – Přijímač typu 2

K sensorům se připojí hlavní řídicí jednotka, která slouží jako koordinátor celé sítě. Po zprovoznění všech sensorů tento hlavní počítač inicializuje stavbu sítě a její kompletní konfiguraci. Všechny pasivní senzory přijatý neupravený signál posílají do této řídicí jednotky,

kteřá data zpracuje a posílá je dál. Řídící jednotka pracuje v reálném čase a data neukládá. Je proto připojena do datové sítě, v jejímž rámci odesílá přijatá data. Tato data lze pomocí jiného zařízení ukládat a zpracovávat.

### 3.2.2.1. Formát přijatých dat

Přijatá data vypadají následovně:

```
1218184113.166395 D LQ 00A4 004A 6E4A 90 0
1218184115.158527 D LQ 00A4 004A 436D 8A 1
```

Jelikož jsme bohužel nedostali podrobnější popis zapůjčené technologie, neznáme význam druhého a třetího sloupce. Na výsledky měření ovšem nemají žádný zásadní vliv.

První sloupec obsahuje časovou informaci. Čtvrtý sloupec identifikuje senzor, který signál přijal. Pátý sloupec obsahuje identifikační číslo vysílače. V šestém sloupci je informace o aktuálním datovém paketu. Sedmý sloupec zobrazuje **kvalitu přijatého signálu** a poslední sloupec indikuje stav tlačítka. Pokud je tlačítko stisknuté, v posledním sloupci je číslo jedna. Tolik dat ale pro náš experiment není nutné a proto ponecháme pouze část.

```
18    00A4  004E  54
18    009C  004E  8D
18    00AD  004E  60
18    00A7  004E  5A
18    00C5  004E  30
```

Nyní první sloupec udává aktuální vteřinu, druhý sloupec ID přijímače, třetí sloupec ID vysílače a posledním sloupcem je vyjádřena kvalita signálu v šestnáctkové soustavě. Ostatní data byla pro toto měření irelevantní.

#### První měření

Během prvního měření byl pro uchování dat použit jiný software<sup>1</sup>. Data proto byla ukládána v odlišném formátu:

```
1547, '2014-12-12 11:44:29', 1, 78, 170, 27670, 33, 0, 1218189770.001566, 5
1548, '2014-12-12 11:44:29', 1, 78, 167, 27673, 78, 0, 1218189770.062931, 5
1549, '2014-12-12 11:44:29', 2, 74, 173, 28953, 96, 0, 1218189770.112347, 2
1550, '2014-12-12 11:44:29', 2, 74, 171, 28953, 48, 0, 1218189770.12849, 2
```

Formát dat je: ID, datum a čas, ID vysílače, číslo vysílače, číslo přijímače, označení datového paketu, **kvalita signálu**, stav tlačítka, časová známka, aktuální místnost v daném okamžiku.

---

<sup>1</sup> Bc. Jana Trejbala

Formát jsme ještě více upravili a zjednodušili, neboť předchozí formát pro nás obsahoval několik nerelevantních informací. Data použitá z prvního měření tak mají podobu:

29	1	170	27670	<b>33</b>	5
29	2	173	28953	<b>96</b>	2

První sloupec znamená číslo vteřiny v rámci aktuální minuty. Druhý sloupec informuje o ID vysílače, třetí je informace o ID přijímače. Čtvrtý sloupec pojednává o označení datového paketu, pátý sloupec je síla signálu v desítkové soustavě. V posledním sloupci je stejně jako v předchozím formátu aktuální místnost, ve které se vysílač v daném okamžiku nalézal.

#### *Vlivy ovlivňující kvalitu signálu*

Kvalita signálu není konstantní, a pokud navíc měříme v budově, kde je mnoho překážek, může kvalita opravdu hodně kolísat.

Mezi vlivy, které kvalitu signálu ovlivňují, může patřit přítomnost či nepřítomnost osoby, její natočení, denní čas, stavební materiál, vzdálenost od vysílače, typ rádiového signálu či technická zařízení uvnitř měřeného prostoru. Faktorů může být velmi mnoho a téměř vše se může podepsat na výsledné kvalitě signálu. Není zároveň možné všechny negativní vlivy eliminovat.

- **Různorodost vysílačů:** Různé vysílače se mohou chovat odlišně dokonce i v případech, kdy jsou nakonfigurovány stejně. V praxi to často znamená, že když vysílač je nakonfigurovaný na posílání signálu na určité úrovni  $d$  dB, vysílá jej na úrovni velice blízké této hladině. To může změnit sílu přijímaného signálu, což dále může vést k méně přesnému odhadu hledané pozice.
- **Různorodost přijímačů:** Různá může být i citlivost jednotlivých přijímačů. Může se tak stát, že hodnota RSSI, která byla zachycena různými přijímači, může být jiná i ve chvíli, kdy byly všechny parametry, které přijímaný signál ovlivňují, stejné.
- **Dopad prostředí na šíření signálu:** V zastavěném prostředí bývá vysílaný signál často odražen zdmi anebo také jinými objekty v místnosti jako například nábytek. Může se díky tomu také stát, že původní a odražený signál dorazí k přijímači ve stejný čas a ten pak není schopen tyto signály navzájem rozlišit a změří intenzitu přijímaného signálu pro obě varianty. Stejně tak dobře se ale může signál při průchodu prostředím a mnohačetných odrazech zpozdít a dorazit k přijímači později a se značným útlumem, což má za následek špatné vyhodnocení.

Pokud tedy provádíme měření v indoorovém prostředí, je nutné počítat s určitou nepřesností a možnou odchylkou od prostředí ideálního.

### 3.3. Předchozí realizovaná řešení pro indoorovou lokalizaci

Problematika lokalizace objektů uvnitř budov prochází neustálým vývojem již několik let. Za tu dobu tak bylo navrženo mnoho metod, které lze pro podobné úlohy použít. Níže jsou uvedeny tři z nich.

### 3.3.1. Popis metody Smoothing and Mapping

První metodou, kterou bylo v plánu pro tuto práci použít, byla metoda SAM (Smoothing and Mapping). Metoda vykázala v experimentálním srovnání algoritmů použitých pro typ úlohy SLAM nejlepší výsledky a z velké části by se jednalo o ideální metodu pro náš problém. [17] Metoda SAM dokáže bez předchozích znalostí prostředí postavit dráhu trajektorie objektu a určit polohu přijímačů.

SAM využívá optimalizačního problému, což znamená, že při inicializaci algoritmu se nejdříve provede úvodní odhad trajektorie, který se následně iteračně upravuje na základě přibývajících dat. Problém je modelován pomocí faktorových grafů [18] a cílem je získat maximální pravděpodobnost modelu, který je reprezentován:

$$\begin{aligned} P(x_{1:k}, m | z_{1:n}, u_{1:k}) &= \Phi_0(x_0) \prod_{k=1}^K \psi_{(k-1,k)}(x_{k-1}, x_k) \prod_{n=1}^N \psi_{(k_n, b_n)}(x_{k_n}, m_{b_n}) \quad (3) \\ &= \prod_{k=1}^K P(x_k | x_{k-1}, u_k) P(z_n | x_k, m) \end{aligned}$$

Stav robota v  $i$ -tém čase je značen jako  $x_i$  ( $k = 1 \dots K$ ), stav beaconu jako  $m_b$  ( $b = 1 \dots B$ ), měření jako  $z_n$  ( $n = 1 \dots N$ ) a údaje z odometrie jako  $u_{1:k}$ .  $\Phi_0(x_0)$  představuje unární faktor pro první pozici v grafu. Binární faktory  $\psi_{(k-1,k)}(x_{k-1}, x_k)$  popisují úspěšnost odhadu aktuální pozice a faktory  $\psi_{(k_n, b_n)}(x_{k_n}, m_{b_n})$  nesou informaci o měřeních mezi pozicemi a přijímači.

Pro vlastní implementaci jsou důležité dvě sady dat. První jsou data získané přijímači. Ta informují o vzdálenosti vysílače od přijímačů. Druhou sadou dat jsou data z odometrie. To je proces, který převádí informace ze senzorů robota na relativní změnu polohy. Abychom mohli tato data získat, potřebovali bychom senzory pro změnu natočení objektu či jeho aktuální rychlosti. Ty bohužel k dispozici nemáme, a proto nebylo možné tuto metodu použít.

### 3.3.2. Metoda „Place of Origin“

Mnohem jednodušší metodou je metoda přezdívaná „místo původu“. Ta polohu objektu odhaduje v místě přijímače, který signál z vysílače slyší nejlépe. Využívá tak data pouze z onoho jednoho přijímače. [18]

Této metody se používá v technologii iBeacons od společnosti Apple, která používá standard Bluetooth Low Energy (BLE) k tomu, aby mohla zasílat informační zprávy mobilním telefonům, které jsou v okolí. Využití je zřejmé i v indoorové lokalizaci. Problém ovšem je, že technologie iBeacons má pouze malý dosah, a tak lze objekt přiřadit k danému přijímači jen, pokud je v jeho blízké vzdálenosti. Pokud jsou stacionární přijímače daleko od sebe, nejsme schopni rozpoznat, kde se objekt nachází.

### 3.3.3. Trilaterace

Trilaterace je jedna z nejstarších metod a i v dnešní době najde mnoho uplatnění. Mobilní operátoři ji používají pro lokalizaci mobilních telefonů na základě dat ze stacionárních vysílacích stanic. Pokud signál z telefonu zachytí více stanic, lze trilateraci využít k určení přibližné polohy.

Trilaterace rozšiřuje předchozí metodu tím, že pracuje se všemi dostupnými přijímači v okolí.

I tak má ale své nedostatky. Pro jejich lepší identifikaci jsme se rozhodli tuto metodu implementovat a následně se ji pokusit vylepšit různými pravidly.

### 3.4. Použitá metoda

Trilaterace je technika hojně používaná v oboru lokalizace pro určení absolutní či relativní polohy. Využívá se například při zjišťování polohy mobilního telefonu nebo GPS zařízení. Na rozdíl od triangulace nevyužívá znalosti úhlů, ale vzdáleností. Při určování polohy se využívají především trojúhelníky, kružnice a koule.

Ve 2D prostoru platí, že pokud máme bod ve vzdálenosti  $r$  od středu  $S[m, n]$ , můžeme hledaný bod nalézt na množině dané předpisem:

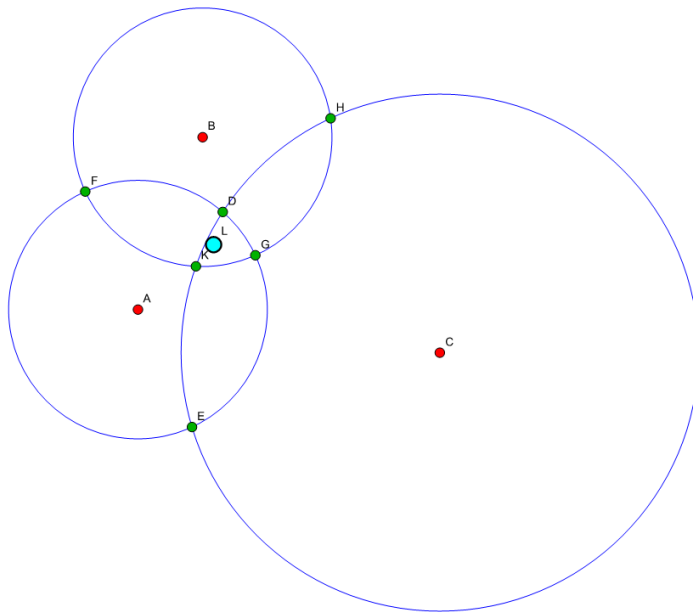
$$(x - m)^2 + (y - n)^2 = r^2 \quad (4)$$

Hledaný bod leží na kružnici s poloměrem  $r$  a středem se souřadnicemi  $[m, n]$ . Pokud teoretické středy nahradíme reálnými senzory v prostoru, můžeme využít techniku k určení polohy v reálném prostředí. Stačí znát informaci, která nám udává vzdálenost sledovaného objektu od senzoru a jeho souřadnice.

Pokud máme k dispozici alespoň tři senzory, tedy tři vzniklé kružnice, postupujeme následovně:

1. Zjistit vzdálenost vysílače od konkrétního senzoru
2. Vykreslit pro konkrétní sensor kružnici o poloměru rovnající se vzdálenosti (modrá)
3. Vykreslit kružnici o poloměru rovnající se vzdálenosti pro všechny senzory, které signál zaznamenaly
4. Získat průsečíky vykreslených kružnic (zelené body)
5. Zprůměrovat polohu průsečíků (tyrkysový bod)





Obrázek 3.4.1 – Základní princip trilaterace a průměrování průsečíků: Vykreslené kružnice představují vypočítanou vzdálenost od červených přijímačů. Tyrkysový bod je průměrem vzniklých průsečíků.

Nevýhodou může být paradoxně stav, kdy je signál pro konkrétní přijímač tak dobrý, že se po přepočtu na vzdálenost vykreslí kružnice o tak malém průměru, že nedojde k protnutí kružnic ze vzdálenějších přijímačů. Pokud se kružnice neprotnou, nedojde k odhadu pozice.

## 3.5. Možnosti zlepšení – heuristiky a klasifikace

### 3.5.1. Použité heuristiky a jejich popis

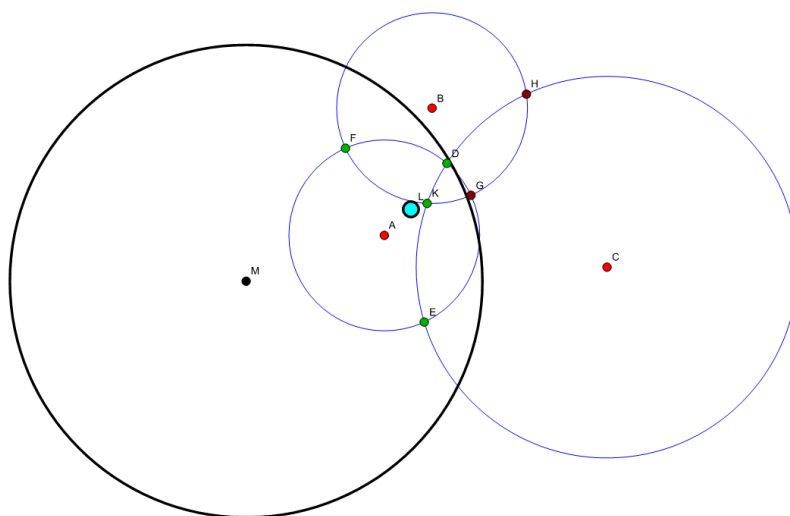
Pokud by měření probíhalo vždy separátně pro jednu konkrétní místnost, trilaterace sama o sobě by po kalibraci fungovala relativně dobře. Když bychom ale chtěli měřit kontinuální pohyb po celé oblasti, kdy se objekt pohybuje po celé její ploše nepřetržitě i několik desítek minut, kvalita signálu se rychle mění a výsledné spočítané pozice by byly nepřesné. Více informací o vlivech na kvalitu signálu lze najít v kapitole 3.2.2.2. Abychom dosáhli lepších výsledků při tomto kontinuálním měření, navrhli jsme několik heuristik, které měly výsledky zlepšit. Při našem experimentu byla použita tato konkrétní pravidla:

#### 1. Předpoklad maximální rychlosti

První pravidlo aplikované pro filtrování možných odhadů polohy je rychlost. Můžeme předpokládat, že člověk může mít při běžné chůzi určitou maximální rychlost. Je samozřejmě možné, že může dojít ke změně chůze v běh, ale v nemocničním či korporátním prostředí lze tyto situace považovat za výjimečné a pro jednoduchost našeho řešení je zanedbáme. Za maximální rychlost pohybu budeme považovat hranici 2 m/s, která byla při měření dodržena. Tuto hranici lze v našem programu měnit.

Omezení maximální rychlosti pohybu je nastaveno tak, že po výpočtu všech průsečíků se odfiltrují ty, které jsou za daný okamžik od předchozí zprůměrované pozice vzdálené dále, než povoluje filtr rychlosti. Pokud je například filtr nastavený na 2 m/s a časový úsek je 1 vteřina, nemůže vzniknout průsečík vzdálený od předchozího více než dva metry. Pokud některý z průsečíků toto nespĺňuje, je odfiltrován.

Ze zbývajících průsečíků se opět vypočítá průměrná pozice, která se vykreslí jako výsledná pro daný krok měření. Pravidlo je znázorněno na obrázku níže. Kružnice černé barvy představuje maximální vzdálenost od posledního průsečíku, kterou je podle tohoto přístupu možné za daný časový úsek urazit. Průsečíky, které jsou vně vykreslené oblasti, jsou tak odfiltrovány. Jedná se o variantu částicového filtru, který je aplikován v reálném čase za běhu programu.



Obrázek 3.5.1 – Princip filtrace na základě maximální rychlosti: Černá kružnice představuje maximální povolenou vzdálenost od posledního průsečíku. Tyrkysový bod je průměrem průsečíků, který splňují limit maximální vzdálenosti

## 2. Nепrostupné části prostředí

Je častým jevem, že elementární odhad polohy pouze na základě síly signálu z jednotlivých přijímačů uvede polohu v jiné místnosti, než ve které byl při měření vysílač. Abychom tyto případy minimalizovali, zavedli jsme další pravidlo, které praví, že pokud je aktuální odhad pozice v jiné místnosti, než v jaké byl poslední odhad a zároveň neprošel přes oblast dveří, jedná se o chybné vykreslení.

Při našem experimentu měl tento filtr za dopad extrémně velký útlum finálního počtu zobrazených pozic, neboť pouze v minoritních případech se stalo, že se vykreslovaná data vykreslila přes oblast dveří. Filtr byl z algoritmu odstraněn, neboť byl vyhodnocen jako neefektivní.

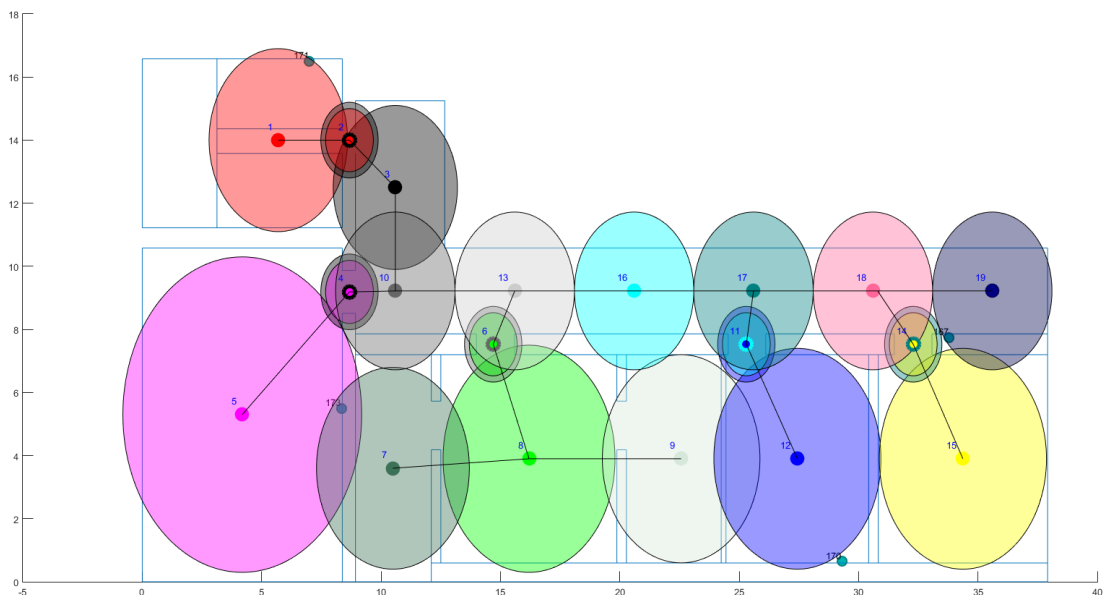
### 3. Posloupnost pohybu

Chceme-li zobrazovat postupný pohyb sledovaného objektu, je vhodné předpokládat, že pohyb je veden po racionální trajektorii a nevykazuje ve většině situací nahodilé a nelogické změny. Ukáže-li software, že sledovaný objekt se přemístil z jedné místnosti do druhé, ale neprošel okolo přijímače signálu, který je v polovině cesty, je pohyb považován za chybný. Všechny trajektorie, které software ve výsledku ukáže, by měly být logicky vedené a vést z jedné místnosti do druhé tak, jak na sebe místnosti ve skutečnosti navazují.

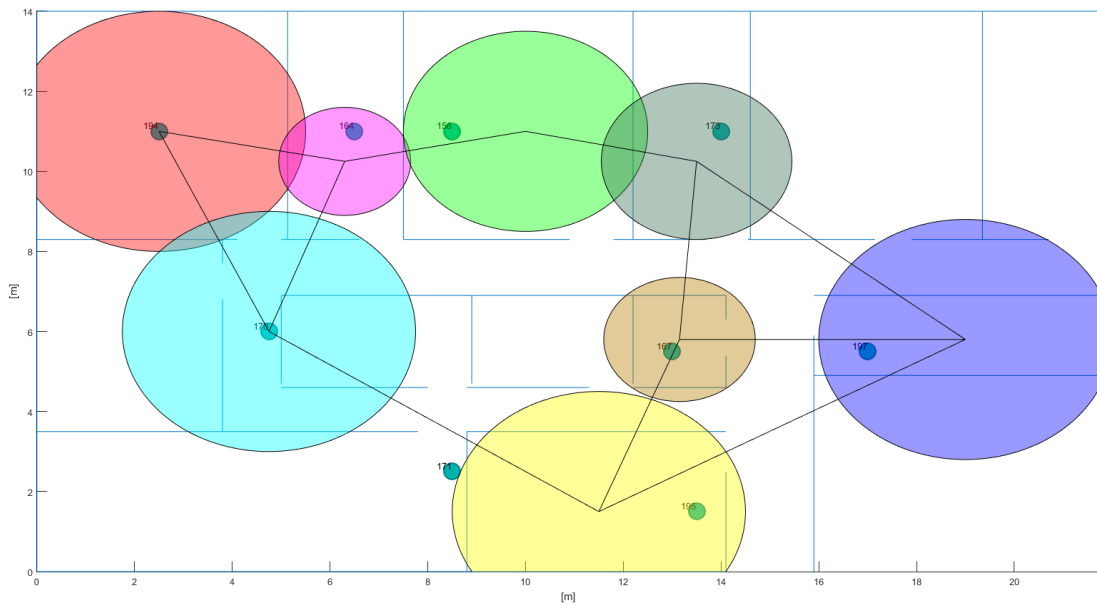
Aby bylo možné posloupnost pohybu realizovat, byl do modelu prostředí implementován graf sousednosti oblastí. Každý uzel grafu představuje jednu konkrétní oblast. Zpravidla každá místnost je značena jedním uzlem a průchod mezi místnostmi je taktéž označen uzlem. Pouze chodba je rozdělena na více kompaktních oblastí. Tento graf s sebou přináší možnost sledovat zmiňovanou posloupnost pohybu.

Metoda je použita až po provedení hlavního algoritmu. Má za cíl přiřadit vykreslená data k jednotlivým oblastem na základě relativní vzdálenosti a sousednosti.

Součástí tohoto přístupu je také vykreslení tzv. „jader“ oblastí. Ty jsou ve výsledcích vyobrazeny jako barevné čtverce. Jádrem konkrétní oblasti má přiřazenou barvu oblasti a zastupuje průměrnou polohu všech průsečíků, které systém k dané oblasti přiřadil.

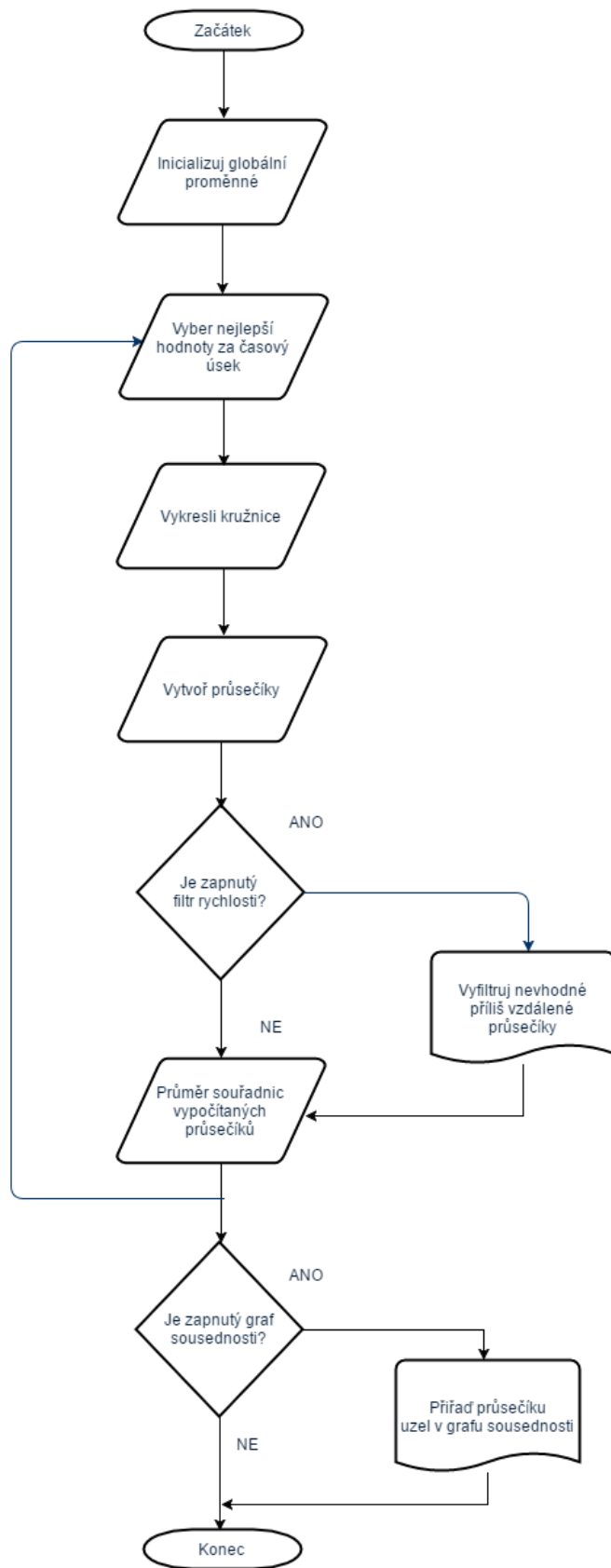


Obrázek 3.5.2 – Graf sousednosti oblastí v prvním měření



Obrázek 3.5.3 – Graf sousednosti oblastí pro druhé měření

Při druhém měření nedošlo k rozdělení chodby na více kompaktních oblastí, neboť to nebylo díky dostupnějšímu stavebnímu materiálu nutné.



Obrázek 3.5.4 – Vývojový diagram chodu algoritmu

### 3.5.2. Klasifikace a jejich popis

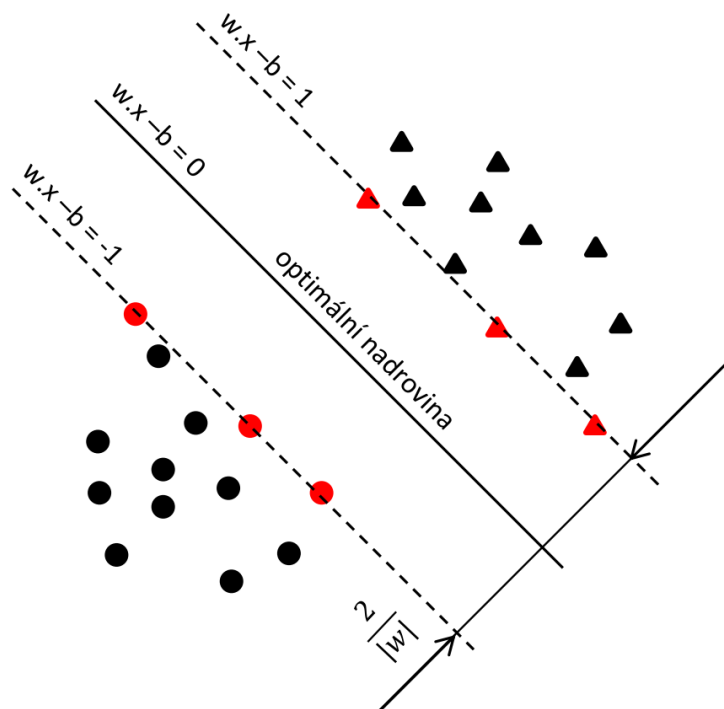
Druhým přístupem pro práci s daty byla klasifikace. Klasifikace je procesem tzv. data miningu, který je zaměřen na konstrukci a využití modelů pro třídění dat založené na jejich informačním obsahu. V dnešní době je to jedna z předních technik používaných při práci s daty. Skládá se ze dvou kroků:

1. *Učení*: Tvorba klasifikačního modelu schopného klasifikovat data pomocí trénovacích dat (vzorků dat, u nichž známe výsledek klasifikace, tj. třídu, do které patří – místnost, ve které byla daná data naměřena)
2. *Klasifikace*: Použití modelu pro klasifikaci nových dat, tj. jejich zařazení do tříd (určení, o kterou místnost se jedná)

#### 3.5.2.1. SVM klasifikace

Metoda SVM (Support Vector Machines), do češtiny často překládána jako metoda podpůrných vektorů, nabízí velmi progresivní a novou metodu z oblasti strojového učení. Je zástupcem adaptivních technik klasifikace.

V úloze klasifikace SVM hledá nadrovinu, která v prostoru příznaků optimálně rozděluje trénovací data. Optimální nadrovina je taková, že body leží v opačných poloprostorech a hodnota minima vzdálenosti bodů od roviny je co největší. V okolí nadroviny je tak na obě strany co nejširší pruh bez bodů. Popis nadroviny je popisován pouze nejbližšími body, které tvoří *podpůrné vektory*.



Obrázek 3.5.5 – Základní princip binárního klasifikátoru SVM [20]

Určení optimální nadroviny je realizováno rozhodovací funkcí:

$$f(x) = \text{sign}(w' + b) \quad (5)$$

Kde  $w$  je vektor nadroviny,  $x$  je množina bodů a  $b$  je posun nadroviny od počátku souřadnic. Všechny body, pro které je výsledek rozhodovací funkce větší nebo rovno 1 patří do jedné třídy. Ostatní body patří do třídy druhé.

Metoda je ovšem binární a data jsou rozdělena do dvou tříd pomocí lineární funkce v prostoru příznaků. Data jsou ale málokdy dobře separovatelná pouze do dvou tříd a ještě navíc tak, aby je bylo možné rozdělit přímkou. Následuje aplikace tzv. jádrové transformace, která je součástí SVM. Ta dokáže rozšířit dimenzionalitu prostoru příznaků, díky čemuž je možné převést původně lineárně neseparovatelnou úlohu na úlohu lineárně separovatelnou, na kterou lze dále aplikovat optimalizační algoritmus pro nalezení rozdělující nadroviny. [21]

### 3.5.2.2. Klasifikace metodou KNN

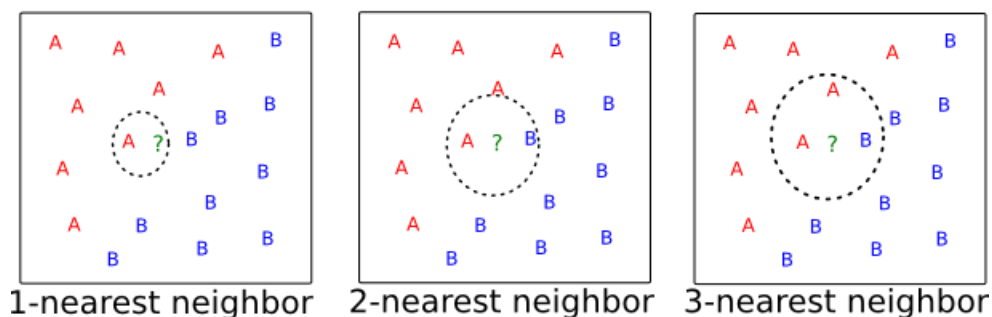
Dalším typem klasifikátoru je klasifikace podle  $k$  nejbližších sousedů. Je to metoda založená na vzdálenosti v prostoru příznakových hodnot využívající skutečnosti, že pokud jsou dva záznamy klasifikovány do stejné třídy, musí mít něco společného, tj. musí si být podobné. Vlastní klasifikace pak spočívá ve volbě vhodné metriky podobnosti záznamů. Analyzovaný záznam je klasifikován do třídy, která obsahuje nejbližší záznamy. [22]

Předpokládejme trénovací množinu  $\{(x_i, \omega_i)\}_{i=1 \dots K}$ , kde  $x_i$  je vzorek, kterému je přiřazena třída  $\omega_i$  a  $K$  je velikost trénovací množiny. Pro neznámý prvek  $x$  hledáme  $x_k$  takové, že

$$\|x'_k - x\| = \min \|x'_i - x\|_{i=1 \dots K} \quad (6)$$

Prvek  $x$  zařadíme do třídy, do které patří  $x'_k$ . To platí pro parametr  $k = 1$ . Pokud by byl parametr  $k$  nastaven vyšší, prvku  $x$  by byla přiřazena třída, která by byla nejvíce zastoupena v  $k$  nejbližších prvcích trénovací množiny.

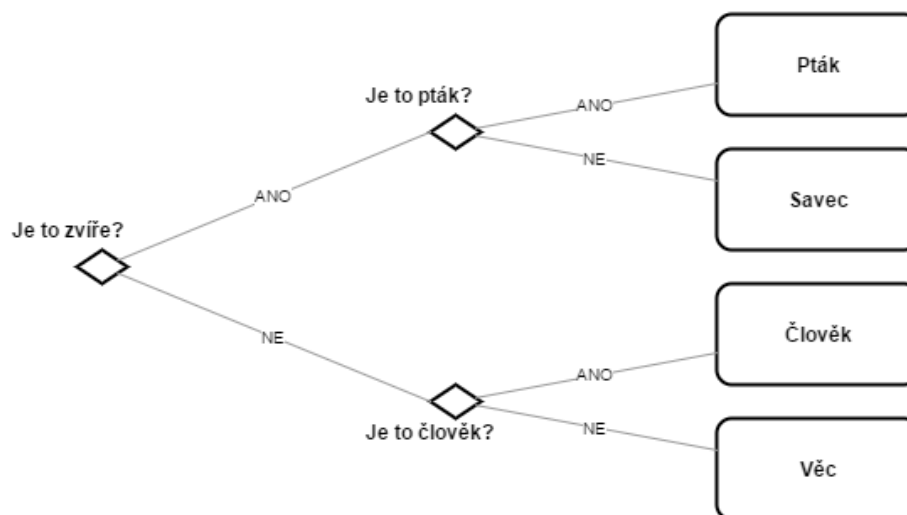
### 1st, 2nd, and 3rd Nearest Neighbors of a Test Instance



Obrázek 3.5.6 – Příklad chování klasifikátoru K-NN pro různý počet sousedů (parametr  $K$ ) [23]

### 3.5.2.3. Ensemble metody

Jedním z typu klasifikačních modelů je rozhodovací strom. Mějme databázi  $D = \{\vec{t}_1, \dots, \vec{t}_n\}$ , kde  $\vec{t}_i = \{t_{i1}, \dots, t_{in}\}$ . Dále mějme atributy  $\{A_1, \dots, A_n\}$  a množinu  $C = \{C_1, \dots, C_m\}$ . Rozhodovací strom pro  $D$  poté můžeme definovat jako strom, kde každý nelistový uzel představuje test na hodnotu atributu  $A_i$  a větve vedoucí z tohoto uzlu možné výsledky testu. Listové uzly jsou jednotlivé identifikátory tříd  $C_j$ , tedy výsledky klasifikace. [24]



Obrázek 3.5.7 – Velice jednoduchý příklad rozhodovacího stromu

Rozhodovací stromy jsou často jednoduché na implementaci, ale jednoduchost bývá vykoupena horšími výsledky. My jsme se rozhodli použít tzv. ensemble metodu. Princip těchto metod je založen na kombinaci více klasifikačních modelů.

Jedna z používaných technik je tzv. bagging (bootstrap aggregating). Bagging využívá podobného principu jako technika křížové validace. Na rozdíl od ní ale nepoužívá disjunktní podmnožiny. Naopak náhodným výběrem s vrácením vytvoří  $x$  podmnožin. Na každé z těchto podmnožin je stejným klasifikátorem natrénován klasifikační model. [25] Pokud je oním klasifikátorem rozhodovací strom, technika se nazývá Bagged Trees.

Při testování každý z natrénovaných modelů přiřadí vzorku určitou třídu. Každý model má stejnou váhu a testovacímu vzorku se přiřadí ta třída, která byla mezi modely nejčastěji přiřazena.

#### 3.5.2.4. Implementace klasifikátorů

Popsané klasifikátory jsou implementovány v prostředí MATLAB v podobě nástroje Classification Learner. [19]

Při jejich trénování jsme použili techniku křížové validace  $k$ -fold. Ta rozdělí vstupní množinu dat na  $k$  disjunktních podmnožin. Jedna podmnožina slouží jako testovací, ostatní naopak jako trénovací. Klasifikátor natrénuje model na trénovacích množinách a pomocí testovací množiny otestuje přesnost přiřazení tříd. Proces se opakuje  $k$ -krát, přičemž pro testování slouží vždy jiná množina.

Při každé iteraci se zaznamená relativní chyba přiřazení. Výsledná chyba celého procesu se spočítá jako aritmetický průměr všech relativních chyb. Při našem testování byl parametr křížové validace  $k = 5$ .

Klasifikátor	SVM	KNN	Bagged Trees
Úspěšnost klasifikace	89%	74%	94%

Tabulka 6 – Úspěšnost klasifikace na trénovacích datech pro tři různé klasifikační metody



## 3.6. Měření

Nejdříve bylo nutné zařízení otestovat a zkalibrovat výpočetní software, především závislost kvality signálu na vzdálenosti.

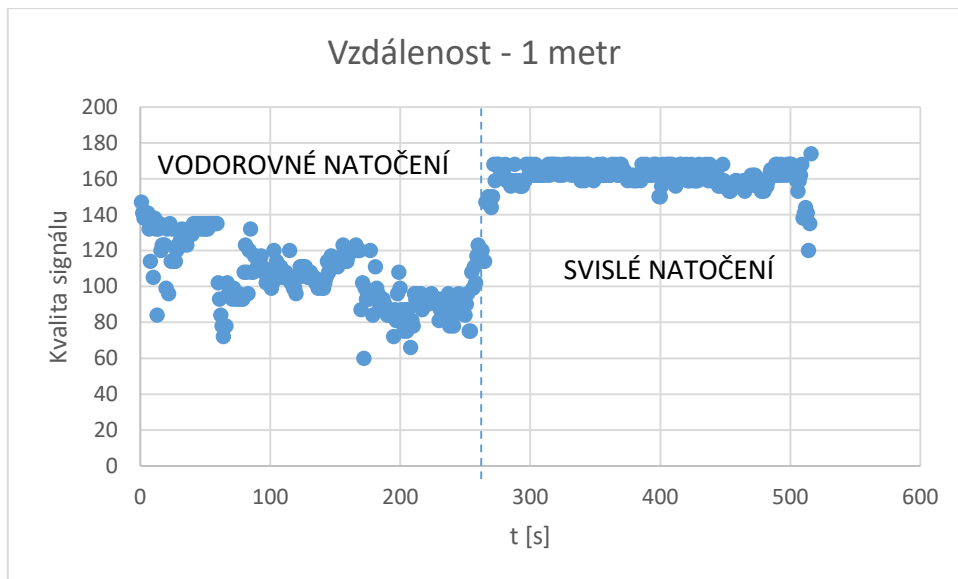
### 3.6.1. Referenční měření

Pro tento účel jsme se pokusili navodit téměř ideální podmínky, a proto jsme se rozhodli měřit na louce, abychom co nejvíce eliminovali překážky a jiné vlivy, které by mohly kvalitu signálu ovlivnit.

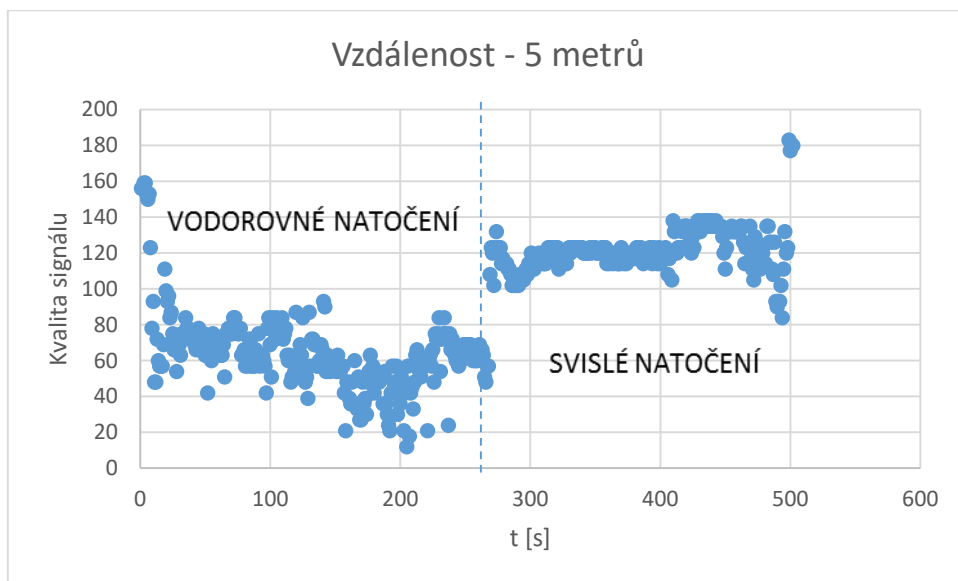


Obrázek 3.6.1 – Instalace zařízení v průběhu referenční měření

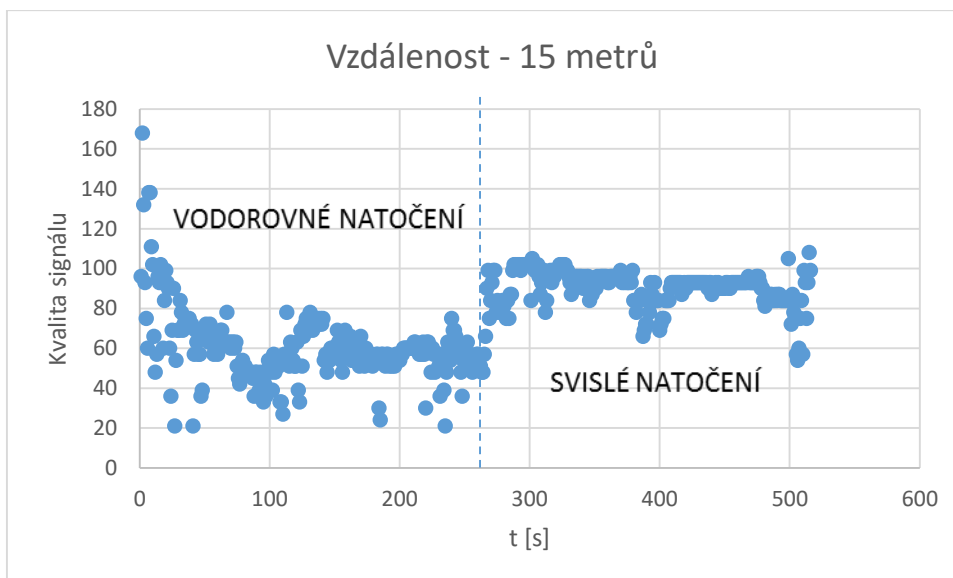
Měření probíhalo pro několik vzdáleností, při kterých se měnilo natočení vysílače vůči přijímači. První natočení bylo ve vodorovné pozici, druhé v poloze vertikální, kdy byla horní část vysílače natočena směrem k přijímači. Měření pro jedno natočení trvalo 4 minuty, což při opakovací frekvenci 1 Hz znamená 240 naměřených hodnot. Měření probíhala pro vzdálenosti 1, 2, 3, 4, 5, 7, 9 a 15 metrů. Příklady závislosti kvality signálu na vzdálenosti jsou vyobrazeny na následujících obrázcích.



Obrázek 3.6.2 – Vykreslené naměřené hodnoty pro vodorovné a svislé natočení vysílače při referenčním měření pro vzdálenost 1 metr



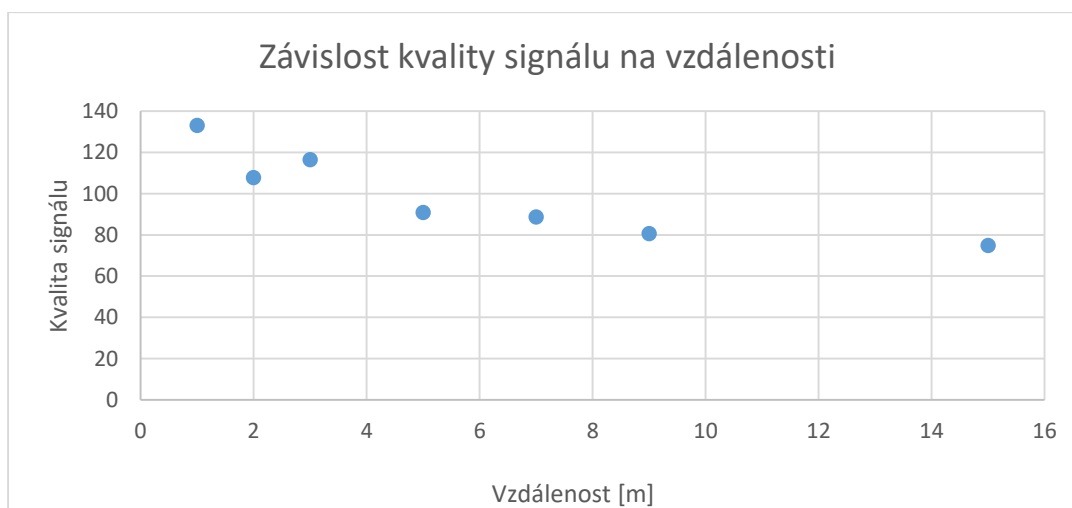
Obrázek 3.6.3 – Vykreslené naměřené hodnoty pro vodorovné a svislé natočení vysílače při referenčním měření pro vzdálenost 5 metrů



Obrázek 3.6.4 – Vykreslené naměřené hodnoty pro vodorovné a svislé natočení vysílače při referenčním měření pro vzdálenost 15 metrů

Intenzita elektromagnetického pole bodového náboje klesá obecně s kvadrátem vzdálenosti. Domníváme se ovšem, že naměřenou kvalitou signálu je výsledná kompozice intenzity signálu, odstupu signálu od šumu a zahrnuta jsou také procenta ztracených paketů. Proto nemusí pokles kvality signálu korespondovat s obecným předpokladem. Podrobný popis výpočtu kvality signálu jsme bohužel nedostali, proto bylo provedeno referenční měření. To nám poskytne lepší představu o závislosti mezi vzdáleností a útlumem kvality. Pro konkrétní vzdálenost byl vždy vynesena do grafu průměr naměřených hodnot. Takto byla provedena všechna měření a získané diskrétní hodnoty byly aproximovány spojitou křivkou, jejíž předpis je:

$$y = 140,2e^{-0.092x} \quad (7)$$



Obrázek 3.6.5 – Závislost kvality naměřeného signálu na vzdálenosti při referenčním měření

Na grafech je možné si povšimnout významného rozdílu mezi hodnotami pro různá vzájemná natočení antén. Pokud byl vysílač natočen horizontálně a kolmo k přijímači, data jsou méně kvalitní a více variabilní. Naopak pokud je vysílač natočen přímo k přijímači, signál je kvalitnější. Výsledky měření korespondují s vyzařovacím diagram (obrázek 15 v kapitole 3.2.1). Je ovšem nutné brát na vědomí, že zatímco bylo referenční měření prováděno ve víceméně ideálním prostředí, kde byl přímý kontakt mezi vysílačem a přijímačem a v okolí bylo minimum rušivých prvků, tak v budově, kde byly prováděny experimenty, bylo prostředí zcela odlišné a bylo přítomno rušení.

I proto byla při vzniku vztahu pro přepočítání kvality signálu na vzdálenost brána v potaz všechna data a ne pouze ta lepší. V reálném měření tak budou data bližší kvalitě signálu naměřeného v budovách, než byla kvalita v ideálním prostředí při natočení vysílače směrem k přijímači.

Přesto bylo po prvních pokusech uvnitř budov zjištěno, že přepočtená vzdálenost neodpovídá reálné a proto byl vzorec pro přepočítání experimentálně upraven:

$$y = 101.95e^{-0.0344471x} \quad (8)$$

### 3.6.2. Experimentální měření

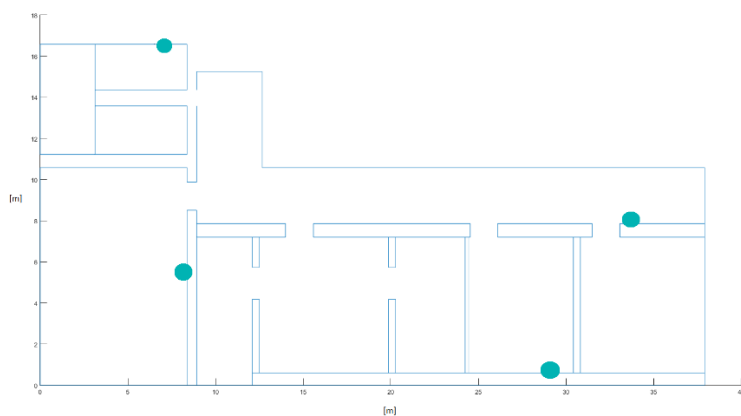
#### 3.6.2.1. Měření 1 – budova E na Karlově náměstí

První měření probíhalo v budově E na Karlově náměstí. Budova má velmi silné, cihlové zdi, které mají velký vliv na útlum signálu mezi místnostmi. Ty jsou navíc často plné různých výpočetních technik, která šíření signálu také významně ovlivňuje.

Sbírání dat probíhalo kontinuálně po celou dobu tohoto experimentu. Měřicí vysílač byl nahodile přemísťován po oblasti několik desítek minut. Během tohoto měření byl použit software pro zaznamenávání aktuální polohy.

Při měření byly použity dva vysílače. Jeden vysílač vysílal s opakovací frekvencí 1 Hz a druhý s opakovací frekvencí 4 Hz. Pro následné zpracování dat byl vybrán vysílač s vyšší frekvencí, neboť pro účely experimentu je lepší mít více dat.

Senzory byly rozmístěny následovně.



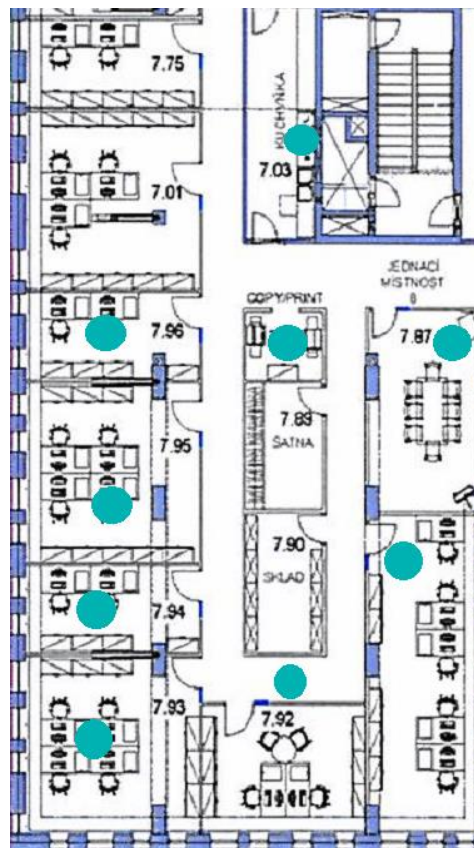
Obrázek 3.6.6 – Rozmístění přijímačů pro první měření

### 3.6.2.2. Měření 2 – Budova BloX

Druhé měření bylo provedeno v prostředí moderní administrativní budovy. Pro účely tohoto měření bylo od společnosti IMA s.r.o. půjčeno dalších 5 senzorů, které jsme použili společně se senzory použitými v měření prvním. Díky této zápůjčce jsme mohli využít dohromady 9 přijímačů (při prvním měření byly k dispozici pouze 4).

Místnosti jsou mezi sebou navzájem odděleny mnohem slabšími zdmi, než v případě měření 1. Zdi jsou většinou ze sádkartonového materiálu a jedinou výjimku tvoří zdi nosné. Přibližně polovina místností, které byly pro druhé měření použity, nebyly zařízeny, což průběh celého měření značně usnadnilo.

Plánek prostředí s umístěním přijímačů je přiložen níže:



Obrázek 3.6.7 – Rozmístění přijímačů pro druhé měření

Dohromady bylo při tomto měření využito osm místností a chodba. Díky dostatečnému počtu zapůjčených zařízení bylo možné do každé místnosti umístit jeden senzor. Celkově bylo provedeno několik různých měření, která měla otestovat vliv několika faktorů na přesnost měření.

### 3.6.3. Postup měření

Postup celého měření je následující:

1. Postavení sítě senzorů. Tedy rozmístění senzorů a nakonfigurování řídicí jednotky společně s externím zařízením pro ukládání dat.
2. Provedení měření.
3. Předzpracování dat
4. Použití vlastního softwaru

## 3.7. Software

Software pro tuto práci je napsán v prostředí MATLAB. Jeho cílem je zpracovat vstupní data a získat pomocí nich odhad aktuální pozice. Program je složen z několika modulů, jejichž využití je možné nastavit podle potřeby. Vstupními daty jsou informace z přijímačů (viz. kapitola 3.2.2.1). Výstupní data tvoří souřadnice průsečíků, respektive výsledky klasifikace.

### 3.7.1. Softwarové moduly

#### *Inicializace modelu*

Tento modul slouží k inicializaci modelu prostředí, jehož součástí jsou například souřadnice zdí, souřadnice senzorů či informace o grafu sousednosti. V rámci tohoto modulu se také nastavuje maximální povolená rychlost pro filtr rychlosti a délka časového úseku.

#### *Úvodní předzpracování vstupních dat*

Data se nejdříve rozdělí podle vysílače. Data pocházející z vysílače s opakovací frekvencí 1 Hz se odfiltrují a dále se pracuje s daty z vysílače s opakovací frekvencí 4 Hz (lze i naopak). Následuje přepočítání kvality signálu na vzdálenost. K tomu slouží vztah získaný z dat naměřených v rámci referenčního měření.

#### *Úprava dat na jednotlivé časové úseky*

V tomto modulu dochází k upravení hodnot na jednotlivé časové úseky. Jejich délka byla nastavena již v prvním modulu programu. Jelikož jsme se rozhodli pro zachování signálu s maximální kvalitou signálu za daný časový úsek, vybíráme pro každý senzor data, která byla přijata s maximální kvalitou.

Vteřina	Přepočítaná vzdálenost od vysílače pro konkrétní přijímače [m]								
	1. senzor	2. senzor	3. senzor	4. senzor	5. senzor	6. senzor	7. senzor	8. senzor	9. senzor
1	100,5	24,0	59,0	6,1	1,0	1,4	7,1	76,3	24,0
2	76,3	36,7	13,6	6,1	1,0	0,9	2,2	46,2	36,7

Tabulka 7 – Ukázka přijatých dat po úpravě pro časový úsek 1 vteřiny

#### *Výpočet průsečíků*

Tento modul je hlavní kostrou celého programu. Zajišťuje samotný výpočet průsečíků. Začíná tím, že modul nahraje všechna data za jednu vteřinu (zadaný časový úsek). Následně

vykreslí kružnice se středy v souřadnicích přijímačů a o průměrech rovnajících se vypočtené vzdálenosti.

Během výpočtu lze nastavovat jeho průběh. Výpočet lze například aplikovat pouze pro první tři senzory, které zaznamenaly signál s největší kvalitou signálu. Výpočet lze také ovlivnit tím, zda je zapnutý filtr rychlosti či nikoliv.

#### *Přiřazení průsečíků k jednotlivým oblastem*

Tento modul je zodpovědný přiřazení vykreslených průsečíků k jednotlivým oblastem. To je provedeno na základě relativní vzdálenosti průsečíků od středů oblastí a sousednosti. Více informací je popsáno v sekci 3.5.1.

#### *Filtrace rychlostí*

Úkolem tohoto modulu je aplikování filtru rychlosti při měření kontinuálního pohybu. Jeho popis je uveden v sekci 3.5.1.

#### *Vykreslení dat*

Tento modul zajišťuje vykreslování dat. Je složen z několika metod, které plní různé funkce. Mezi nimi například vykreslování dat najednou, vykreslování postupné či obarvování vykreslovaných bodů.

### **3.7.2. Software pro klasifikaci dat**

Pro účely trilaterace, heuristik a následného vykreslení dat byl použit software vytvořený konkrétně pro tuto práci. Pro klasifikaci byl použit nástroj Classification Learner, který slouží k trénování klasifikačních modelů v prostředí MATLAB.

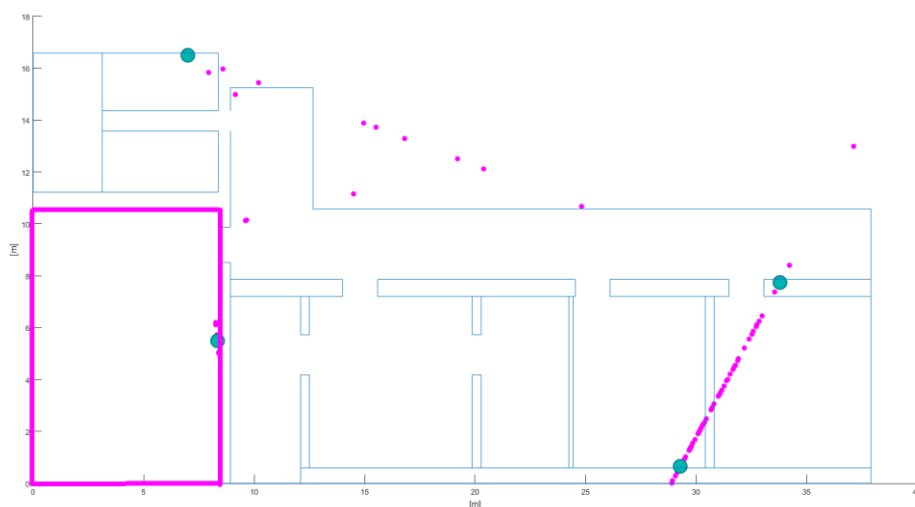
## 4. Výsledky

### 4.1. Příklady grafických výsledků trilaterace

Na obrázcích níže je vyobrazeno vykreslení průsečíků na základě dat, která byla naměřena v konkrétních místnostech. Vykreslená data jsou výsledkem čisté trilaterace bez aplikace heuristik. Pro přehlednost jsou místnosti graficky zvýrazněny.

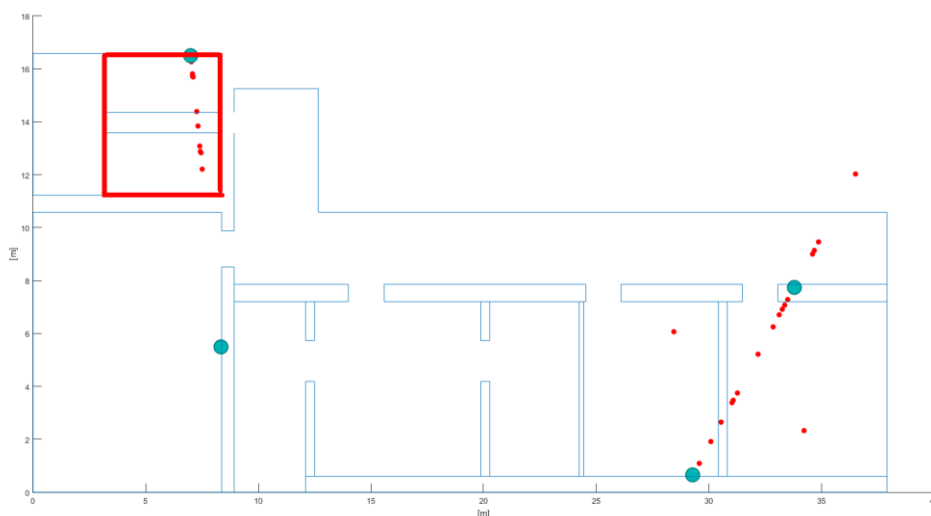
#### 4.1.1. Měření 1

##### První místnost – příklad nepříznivé situace



Obrázek 4.1.1 – Vykreslení výsledků pro data naměřená v místnosti 1. Příklad nepříznivé situace – měřená oblast se nachází na okraji sledovaného prostředí a podmínky pro úspěšný výpočet jsou horší. Zelené body představují polohu senzorů.

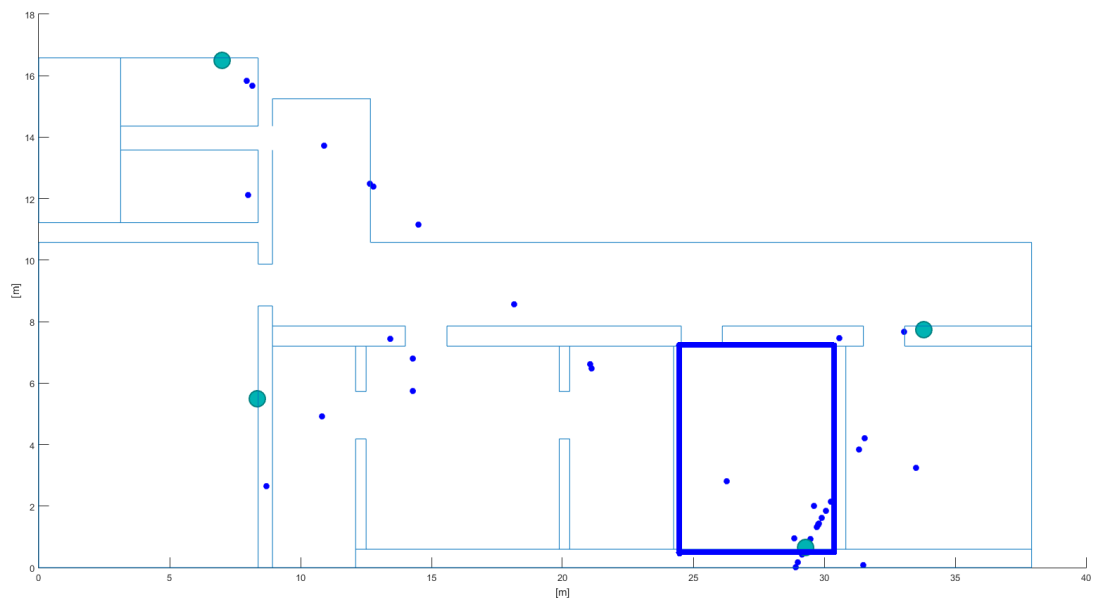
##### Druhá místnost



Obrázek 4.1.2 – Vykreslení výsledků pro data naměřená v místnosti 2. Zelené body představují polohu senzorů

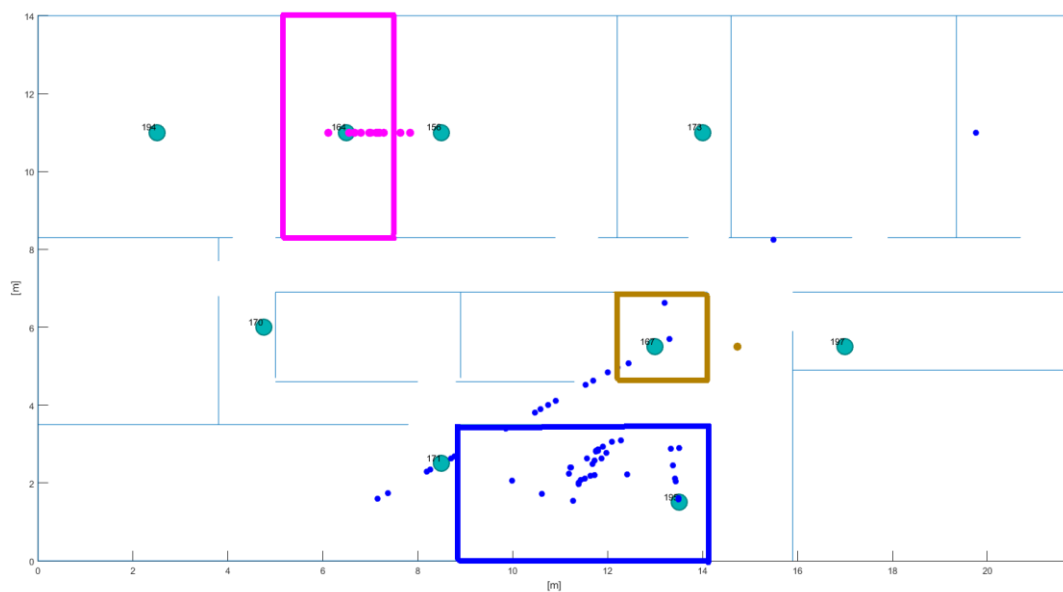


### Třetí místnost



Obrázek 4.1.3 – Vykreslení výsledků pro data naměřená v místnosti 3. Zelené body představují polohu senzorů

### 4.1.2. Měření 2

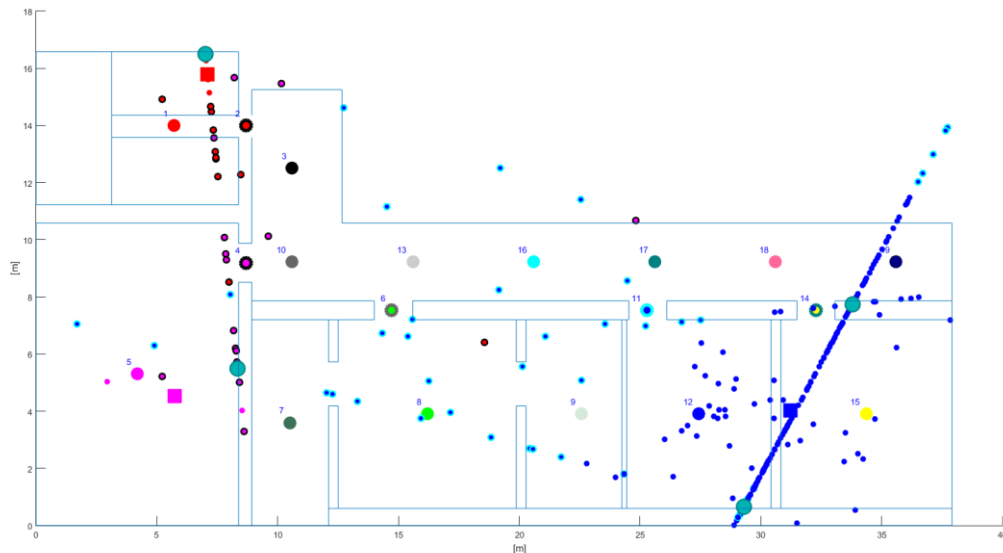


Obrázek 4.1.4 - Vykreslení výsledků trilaterace pro druhé měření. Zelené body představují polohu senzorů. Body náleží místnosti označené shodnou barvou.

## 4.2. Výsledky použití stromu sousednosti

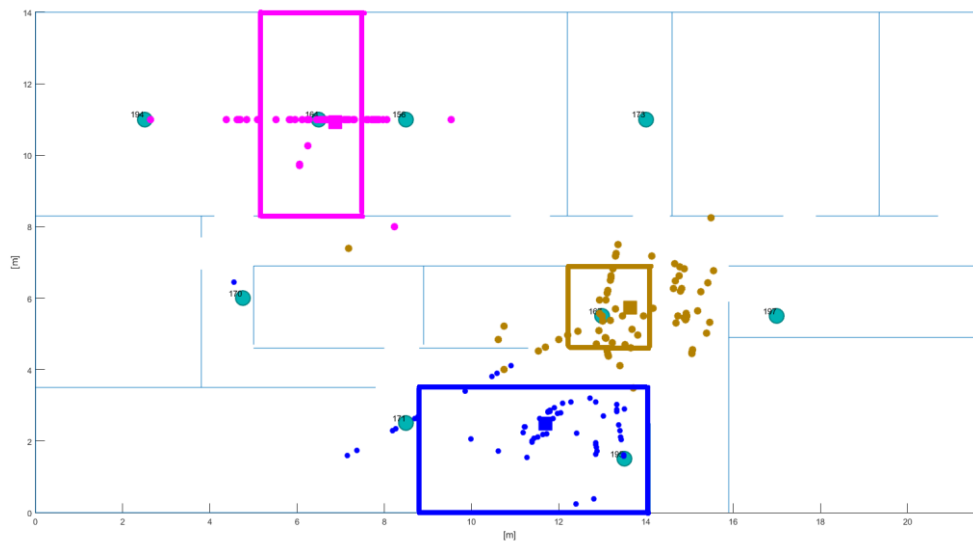
Druhá sekce obsahuje výsledky po aplikaci heuristiky využívající graf sousednosti oblastí. Použitá heuristika po vykreslení všechna data přiřadí jednotlivým uzlům grafu na základě grafu sousednosti a relativní vzdálenosti dat od středů oblastí.

### 4.2.1. Měření 1



Obrázek 4.2.1 – Výsledek přiřazení dat k jednotlivým uzlům grafu na základě grafu sousednosti oblastí. Vykreslená data jsou přiřazena vždy k uzlu stejné barvy. Dvojbarevné uzly představují oblast dveří dané místnosti.

### 4.2.2. Měření 2

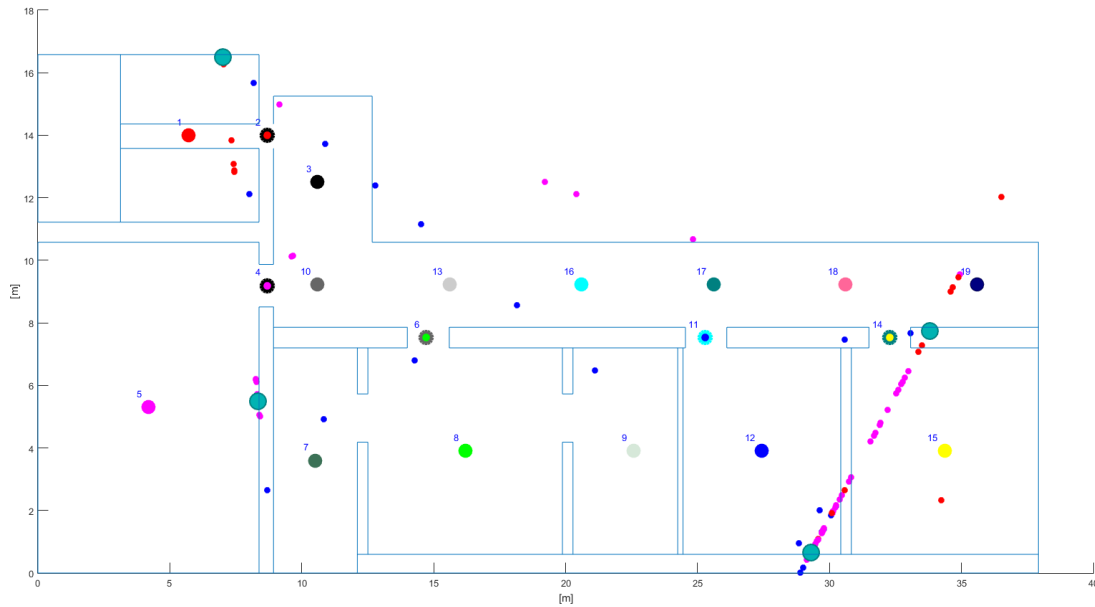


Obrázek 4.2.2 – Vykreslení dat přiřazených k jednotlivým místnostem na základě použití grafu sousednosti oblastí. Data přiřazená ke konkrétní místnosti jsou označena stejnou barvou jako místnost.

### 4.3. Výsledky použití předpokladu maximální rychlosti

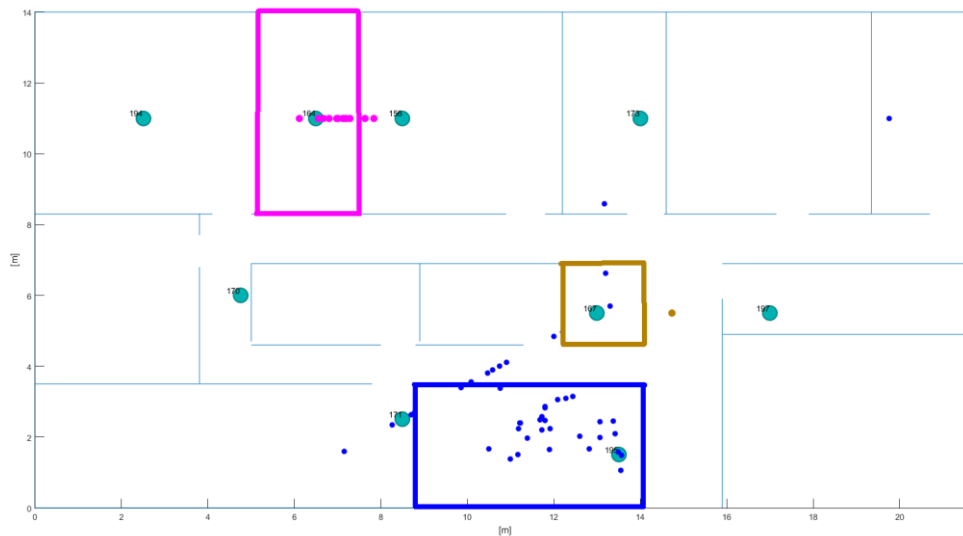
Třetí sekce zobrazuje vykreslená data po aplikaci částicového filtru využívající předpoklad maximální rychlosti.

#### 4.3.1. Měření 1



Obrázek 4.3.1 – Vykreslená data pro první měření po použití filtru rychlosti. Zelené body jsou přijímače. Barevné číslované body jsou uzly grafu sousednosti. Body znázorňují příslušnost ke konkrétním uzlům na základě barvou.

#### 4.3.2. Měření 2

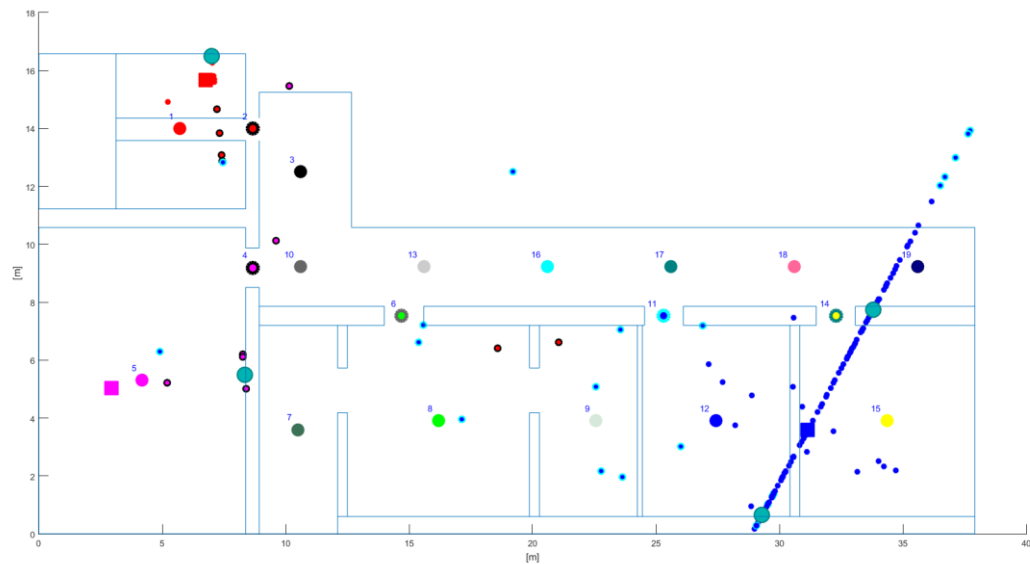


Obrázek 4.3.2 – Znázornění výsledků pro druhé měření po použití filtru rychlosti. Data přísluší k místnostem se shodnou barvou. Zelené body jsou přijímače.

## 4.4. Výsledky použití grafu sousednosti i filtru rychlosti zároveň

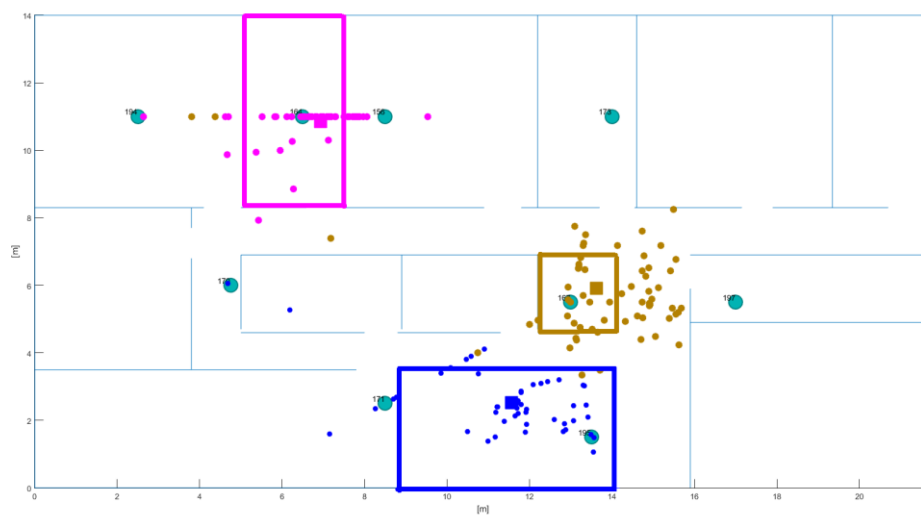
V této sekci jsou vyobrazeny výsledky po použití obou heuristik zároveň.

### 4.4.1. Měření 1



Obrázek 4.4.1 – Grafické znázornění výsledků pro první měření po uplatnění filtru rychlosti a grafu sousednosti oblastí. Body přísluší k uzlům grafu sousednosti se stejnou barvou. Zelené body představují průsečíky.

### 4.4.2. Měření 2



Obrázek 4.4.2 – Výsledky pro druhé měření po použití obou heuristik zároveň. Body přísluší k místnosti se shodnou barvou. Zelené body jsou přijímače.

## 4.5. Výsledky klasifikace

### 4.5.1. Měření 1

	Místnost 1	Místnost 2	Místnost 3	Chodba
Úspěšnost přiřazení	89 %	15%	25%	26%

Tabulka 8 – Úspěšnost přiřazení naměřených dat k jednotlivým místnostem (1. měření)

### 4.5.2. Měření 2

Místnost	703	787	788	792	793	794	795	796
Úspěšnost přiřazení	96%	94%	96%	100%	96%	98%	94%	86%

Tabulka 9 – Úspěšnost přiřazení naměřených dat k jednotlivým místnostem při druhém měření

## 4.6. Souhrnné výsledky

### 4.6.1. Měření 1

Úspěšnost odhadu správné polohy vysílače				
	Místnost 1	Místnost 2	Místnost 3	Chodba
Trilaterace	3%	33%	25%	26%
Graf susednosti	3%	33%	63%	14%
Graf + filtr	3%	35%	45%	22%
Filtr rychlosti	4%	35%	28%	25%
Klasifikace	89%	15%	25%	26%

Tabulka 10 – Procentuální úspěšnost odhadnutí správné polohy vysílače pro jednotlivé metody (1. měření)

### 4.6.2. Měření 2

Úspěšnost odhadu správné polohy vysílače								
	703	787	788	792	793	794	795	796
Trilaterace	12%	76%	0%	26%	16%	88%	93%	5%
Graf susednosti	14%	83%	100%	32%	14%	100%	47%	14%
Filtr rychlosti	13%	82%	0%	33%	18%	88%	96%	5%
Graf + Filtr	13%	86%	100%	26%	15%	100%	46%	16%
Klasifikace	96%	94%	96%	100%	96%	98%	94%	86%

Tabulka 11 – Procentuální úspěšnost odhadnutí správné polohy vysílače pro jednotlivé metody (2. měření)

## 5. Závěr a diskuze

### 5.1. Diskuze nad použitými metodami

V rámci této práce bylo navrženo a vyzkoušeno několik různých metod pro získání výsledných hodnot. První z nich byla trilaterace, která je ve venkovním prostředí používána v mnoha případech. Proto jsme se rozhodli tuto metodu vyzkoušet. Pro odhad pozice byla používána data ze tří přijímačů, které signál zaznamenaly s nejvyšší kvalitou. Tím se zajistilo, že jsou pro vytvoření odhadu vzata opravdu ta nejlepší zachycená data.

Jak je možné vidět na výsledcích, ne vždy se lze na tuto metodu spoléhat. Pokud je málo přijímačů a mnoho rušivých elementů, jako jsou silné zdi nebo množství techniky či lidí, spolehlivost je negativně ovlivněna. Pokud jsou ovšem senzory rozmístěny rovnoměrně ve větším množství a prostředí je prostupnější, výsledky mohou být o poznání spolehlivější. I když například nejsou v případě druhého měření vykresleny přímo v konkrétní oblasti, odhad je vždy velmi blízko.

Obecně horší spolehlivost vykreslení je u oblastí, které se nachází na okraji sledovaného prostředí. Důvodem je podstata fungování trilaterace, která lépe funguje, pokud je vysílač mezi třemi a více přijímači. Pokud se vyskytuje na okraji měřeného prostředí, podmínky pro výpočet jsou horší.

Nevzhledné přímky, které jsou viditelné hlavně u prvního měření součástí výsledků, jsou důsledkem výše zmíněných příčin a použitého algoritmu. Tím, že signál podléhal v prostředí velkému útlumu, zpravidla velmi zřídka byl zachycen všemi čtyřmi přijímači. Daleko častěji byl přijat pouze dvěma senzory. Jelikož algoritmus vykresluje průměrnou hodnotu spočítaných průsečíků, vykreslované body se v průběhu času začnou hromadit na přímce vedoucí mezi dvěma zainteresovanými přijímači. Ve výsledcích 1. měření se tak zřetelně zobrazuje například přímka mezi přijímači v pravé části mapy.

Použité heuristiky mají na výsledek menší vliv, než bylo očekáváno. Obecně se dá ovšem říci, že heuristiky výsledky vylepšují. Především částicový filtr založený na předpokladu maximální rychlosti nabízí plošné zlepšení v řádu jednotek procent. Graf sousednosti a následné přiřazení průsečíků jednotlivým místnostem je více variabilní. Pro většinu měření nabízí zlepšení až v řádu desítek procent. Najdeme ale i taková měření, pro která je výsledek po použití této heuristiky horší.

Nejlepší výsledky nabízí klasifikace, zejména pokud je využito více přijímačů. Přesnost klasifikace je tak v druhém měření velmi vysoká. U prvního měření je přesnost naopak více variabilní. Lze tak vyvodit, že prostředí a počet přijímačů mají zásadní vliv na přesnost všech použitých metod.

## 5.2. Pokračování této práce

Jako pokračování této práce navrhujeme vyzkoušet některou z metod, které se dostávají v této oblasti do popředí. Stále častěji používaným typem metod je metoda SLAM (Simultaneous Localization And Mapping). Jak název napovídá, tato metody dokáže simultánně lokalizovat objekt a postavit model prostředí, ve kterém se objekt pohybuje. Je proto výhodné tento typ algoritmu použít pro úlohy, kdy měříme v neznámém prostředí. K řešení těchto úloh se nejčastěji využívá Kalmanova filtru [26] nebo částicového filtru s mnoha rozšířeními.

Druhou metodou, která stojí za zmínku, je metoda SAM (Smoothing and Mapping), která je alternativou k metodám používající částicové filtry. Metoda SAM nejdříve odhadne trajektorii, kterou následně upravuje (vyhlazuje – odtud název metody) do podoby, která je nejpravděpodobnější (více v sekci 3.3.1).

Úlohy typu SLAM nebo SAM ovšem vyžadují data z odometrie. Jsou to data ze senzorů, které jsou součástí sledovaného objektu a poskytují informace o relativní změně polohy za jednotku času. Tedy relativní posun či relativní natočení. Tato data jsme bohužel k dispozici neměli.

Pokud by bylo možné spojit například jednu ze zmiňovaných metod s postupem, který byl aplikován v této práci, věříme, že úspěšnost odhadu pozice by byla ještě vyšší a přesnější. Implementace metod SLAM a SAM ovšem byla nad rámec této práce a tak je ponechán prostor například pro diplomovou práci.

## 5.3. Zamýšlené využití systému

Možných využití podobného systému je mnoho. Nabízí se například použití podobné technologie v chytré domácnosti. Domácí spotřebiče se mohou spínat na základě aktuální polohy osoby. Dalším příkladem využití může být instalace systému v nemocničním prostředí. Pokud by interní systém zachytil problém u jednoho z pacientů, mohl by upozornit personál, který je konkrétní místnosti nejbližší.

## 5.4. Závěr

Při řešení práce jsme se seznámili se systémem společnosti IMA s.r.o. pro RF tag-based identifikaci, což bylo provedeno v kapitole 3.2.

Dále jsme prostudovali některé z již realizovaných a používaných metod směřujících k řešení této úlohy. Jelikož je těchto řešení nespočet, vybrali jsme tři, které jsme blíže popsali v kapitole 3.3.1

V návaznosti na to jsme implementovali metodu trilaterace. Pro vylepšení výsledků byly navrženy alternativní postupy, a to zejména heuristiky využívající model prostředí a předpoklad maximální rychlosti (kapitola 3.4 a 3.5). Závěrem jsme vyzkoušeli metodu klasifikace, která přinesla mnohem lepší výsledky.

Dále byla navržena pilotní úloha a zapůjčený systém od společnosti IMA byl přizpůsoben pro experimentální sběr dat. Pro kalibraci posloužilo referenční měření, které bylo provedeno na místě s minimem negativních vlivů. Následně byla provedena dvě měření v odlišných podmínkách. (kapitola 3.6)

Výsledky měření jsme kvantitativně porovnali a zdokumentovali. Výsledkům se věnuje celá kapitola 4. Fotografie a demonstrační video z experimentů jsou přiloženy na CD.

Během této práce jsem měl možnost pracovat s reálným systémem pro sběr dat a následně jej použít pro implementaci vlastního algoritmu. Také jsem získal mnoho nových informací o bezdrátových senzorových technologiích. Práce ve mně probudila hlubší zájem o dané téma. Byla tak pro mě velkým přínosem jak po informační, tak praktické stránce.



## Použitá literatura

- [1] VONDRÁK, Jan. Historie navigace - od kvadrantu k GNSS: History of Navigation - from Quadrant to GNNS. *Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*. 2013, **58**(1), 11-20. ISSN 00322423.
- [2] Carte Pisane. In: *WikiMedia* [online]. b.r. [cit. 2016-04-16]. Dostupné z: [https://i0.wp.com/upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/bb/Carte\\_Pisane\\_Portolan.jpg](https://i0.wp.com/upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/bb/Carte_Pisane_Portolan.jpg)
- [3] *Několik pomůcek k orientaci na Zemi i na obloze* [online]. b.r. [cit. 2016-05-02]. Dostupné z: [http://vnuf.cz/sbornik\\_old/Veletrh\\_12/12\\_05\\_Dirlbeck.html](http://vnuf.cz/sbornik_old/Veletrh_12/12_05_Dirlbeck.html)
- [4] *Obrázek sextantu* [online]. In: . b.r. [cit. 2016-05-02]. Dostupné z: <http://www.ballastpoint.com/wp-content/uploads/2013/09/ballast-point-sextant.png>
- [5] SkyRadar. *SkyRadar* [online]. b.r. [cit. 2016-04-16]. Dostupné z: [http://www.skyradar.com/wp-content/uploads/2014/11/radar\\_animation\\_01.gif](http://www.skyradar.com/wp-content/uploads/2014/11/radar_animation_01.gif)
- [6] *GPS HISTORY, CHRONOLOGY, AND BUDGETS* [online]. 2004, 2004-04-02 [cit. 2015-12-14]. Dostupné z: [https://www.cs.cmu.edu/~sensing-sensors/readings/GPS\\_History-MR614.appb.pdf](https://www.cs.cmu.edu/~sensing-sensors/readings/GPS_History-MR614.appb.pdf)
- [7] Space Segment. *GPS.gov* [online]. b.r. [cit. 2016-05-02]. Dostupné z: <http://www.gps.gov/systems/gps/space/>
- [8] RAPANT, Petr. *Družicové polohové systémy*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2002. ISBN 8024801248.
- [9] KOUKOLNÍK, Kamil. *Jak pracuje GPS* [online]. 2006, 2006 [cit. 2015-12-14]. Dostupné z: [http://radio.feld.cvut.cz/personal/mikulak/MK/MK06\\_semestralky/JakPracujeGPS\\_KoukolikK.pdf](http://radio.feld.cvut.cz/personal/mikulak/MK/MK06_semestralky/JakPracujeGPS_KoukolikK.pdf)
- [10] KAEMARUNGSU, Kamol. *Design of Indoor positioning system based on location fingerprint technique* [online]. University of Pittsburgh, 2005 [cit. 2016-05-02]. Dostupné z: <http://d-scholarship.pitt.edu/6395/1/dissertation28Feb05.pdf>. University of Pittsburgh.
- [11] *Spektrum světla: Obrázek spektra světla* [online]. In: . b.r. [cit. 2016-04-17]. Dostupné z: <http://www.netcam.cz/encyklopedie-ip-zabezpeceni/img/svetelne-spektrum.jpg>
- [12] TADAKAMADLA, Shashank. *Indoor Local Positioning System for ZigBee based on RSSI*. Mid Sweden University, 2006. Diplomová práce. Mid Sweden University, The Department of Information Technology and Media. Vedoucí práce Bengt Oelmann.

- [13] *IEEE Std 802.15.4-2011, IEEE Standard for Local and metropolitan area networks—Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)*. 2011. ISBN 978-0-7381-6684-1 STDPD97126.
- [14] Bezdrátové technologie (WiFi, Bluetooth, ZigBee): Přednáška předmětu DSY. In: *Katedra měření FEL ČVUT* [online]. b.r. [cit. 2016-04-19]. Dostupné z: [http://measure.fel.cvut.cz/system/files/files/cs/vyuka/predmety/A3B38DSY/11\\_Wireless\\_cz.pdf](http://measure.fel.cvut.cz/system/files/files/cs/vyuka/predmety/A3B38DSY/11_Wireless_cz.pdf)
- [15] *ZigBee Specification* [online]. In: . ZigBee Alliance, 2012 [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: <http://www.zigbee.org/download/standards-zigbee-specification/>
- [16] URBANÍK, Libor. *Methods for People Localization Based on Radio Signals*. Prague, 2014. Bakalářská práce. ČVUT. Vedoucí práce Ing. Libor Přeučil, CSc.
- [17] HERRANZ, F., A. LLAMAZARES, E. MOLINOS, M. OCAÑA a M. A. SOTELO WiFi SLAM algorithms: an experimental comparison. In: *Robotica* [online]. 2016, **34**(04), s. 837-858 [cit. 2016-05-06]. DOI: 10.1017/S0263574714001908. ISSN 0263-5747. Dostupné z: [http://www.journals.cambridge.org/abstract\\_S0263574714001908](http://www.journals.cambridge.org/abstract_S0263574714001908)
- [18] *Factor graphs and algorithms*. In: *Proceedings of the Annual Allerton Conference on Communication Control and Computing*. p. 666-680. [online]. FREY, Brendan J., Frank R. KSCHISCHANG, Niclas WIBERG a Hans-Andrea LOELIGER. UNIVERSITY OF ILLINOIS, 1997 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://www.psi.toronto.edu/~psi/pubs2/1999%20and%20before/134.pdf>
- [19] STRNAD, Pavel. *Systémy pro navigaci uvnitř budov, implementace a realizace* [online]. 2014 [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: <https://www.vse.cz/vskp/id/1248646>. Bakalářská práce. Vysoká škola ekonomická v Praze. Vedoucí práce Ing. Tomáš Bruckner, Ph.D.
- [20] HRALA, Michal. *Automatická klasifikace dokumentů s podobným obsahem* [online]. PLZEŇ, 2012 [cit. 7. 5. 2016]. Dostupné z: <https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/3054/diplomova%20prace.pdf?sequence=1>. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Ing. Pavlu Král, Ph.D.
- [21] SCHÖLKOPF, Bernhard a Alexander SMOLA. *Learning with kernels: support vector machines, regularization, optimization, and beyond*. Cambridge, Mass.: MIT Press, c2002, xviii, 626 p. Adaptive computation and machine learning. ISBN 0-262-19475-9.
- [22] RYCHLÝ, Marek. *Klasifikace a predikce* [online]. In: . b.r. [cit. 2016-04-23]. Dostupné z: <http://www.fit.vutbr.cz/~rychly/docs/classification-and-prediction/classification-and-prediction.pdf>
- [23] Obrázek k-NN klasifikátoru. In: *Trevor Whitney > Data Mining > Classification* [online]. b.r. [cit. 2016-05-07]. Dostupné z: <http://trevorwhitney.com/images/knn.png>

- [24] MRÁZOVÁ, CSC., Doc. RNDr. Iveta. *Dobývání znalostí: Přednáška rozhodovací stromy* [online]. In: . b.r. [cit. 2016-04-23]. Dostupné z:  
[http://ksvi.mff.cuni.cz/~mraz/datamining/lecture/Dobyvani\\_Znalosti\\_Prednaska\\_Rozhodovaci\\_stromy.pdf](http://ksvi.mff.cuni.cz/~mraz/datamining/lecture/Dobyvani_Znalosti_Prednaska_Rozhodovaci_stromy.pdf)
- [25] BREIMAN, Leo. Bagging predictors. *Machine Learning* [online]. 1996, **24**(2), 123-140 [cit. 2016-04-23]. DOI: 10.1007/BF00058655. ISSN 08856125. Dostupné z:  
<http://link.springer.com/10.1007/BF00058655>
- [26] *Classification Learner* [online]. b.r. [cit. 2016-05-09]. Dostupné z:  
<http://www.mathworks.com/products/statistics/classification-learner/>
- [27] Kalman filter. *Wikipedia* [online]. b.r. [cit. 2016-05-15]. Dostupné z:  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Kalman\\_filter](https://en.wikipedia.org/wiki/Kalman_filter)

# Přílohy

## Seznam obrázků

Obrázek 1.2.1 – Ukázka portolánové mapy z 13. století [2] .....	3
Obrázek 1.2.2 – Princip Jakubovy hole [3] .....	4
Obrázek 1.2.3 – Sextant [4] .....	4
Obrázek 1.2.4 – Princip radaru [5] .....	5
Obrázek 1.3.1 – Kosmická část systému GPS [7] .....	6
Obrázek 2.3.1 – Základní rozdělení pozičních sensorových bezdrátových systémů [10] .....	9
Obrázek 2.3.2 – Rozdělení vlnového spektra [11] .....	9
Obrázek 2.4.1 – Postavení 802.15.4 mezi jinými standardy bezdrátových sítí [14] .....	11
Obrázek 2.4.2 – Schéma PPDU .....	13
Obrázek 2.4.3 – Schéma rámce MAC vrstvy a fyzické vrstvy [14] .....	15
Obrázek 2.4.4 – Postavení ZigBee mezi ostatními sítěmi [14] .....	16
Obrázek 2.4.5 – Ukázka topologií sítí ZigBee [14] .....	17
Obrázek 2.4.6 – Struktura ZigBee [14] .....	17
Obrázek 3.2.1 – Vysílač .....	20
Obrázek 3.2.2 – Vyzařovací diagramy vysílače pro tři různé polohy [16] .....	20
Obrázek 3.2.3 – Přijímač typu 1 .....	21
Obrázek 3.2.4 – Přijímač typu 2 .....	21
Obrázek 3.4.1 – Základní princip trilaterace a průměrování průsečíků: Vykreslené kružnice představují vypočítanou vzdálenost od červených přijímačů. Tyrkysový bod je průměrem vzniklých průsečíků. ....	26
Obrázek 3.5.1 – Princip filtrace na základě maximální rychlosti: Černá kružnice představuje maximální povolenou vzdálenost od posledního průsečíku. Tyrkysový bod je průměrem průsečíků, který splňují limit maximální vzdálenosti .....	27
Obrázek 3.5.2 – Graf susednosti oblastí v prvním měření .....	28
Obrázek 3.5.3 – Graf susednosti oblastí pro druhé měření .....	29
Obrázek 3.5.4 – Vývojový diagram chodu algoritmu .....	30
Obrázek 3.5.5 – Základní princip binárního klasifikátoru SVM [20] .....	31
Obrázek 3.5.6 – Příklad chování klasifikátoru K-NN pro různý počet susedů (parametr K) [23] .....	32
Obrázek 3.5.7 – Velice jednoduchý příklad rozhodovacího stromu .....	33
Obrázek 3.6.1 – Instalace zařízení v průběhu referenčního měření .....	34
Obrázek 3.6.2 – Vykreslené naměřené hodnoty pro vodorovné a svislé natočení vysílače při referenčním měření pro vzdálenost 1 metr .....	35
Obrázek 3.6.3 – Vykreslené naměřené hodnoty pro vodorovné a svislé natočení vysílače při referenčním měření pro vzdálenost 5 metrů .....	35
Obrázek 3.6.4 – Vykreslené naměřené hodnoty pro vodorovné a svislé natočení vysílače při referenčním měření pro vzdálenost 15 metrů .....	36
Obrázek 3.6.5 – Závislost kvality naměřeného signálu na vzdálenosti při referenčním měření .....	36
Obrázek 3.6.6 – Rozmístění přijímačů pro první měření .....	37

Obrázek 3.6.7 – Rozmístění přijímačů pro druhé měření .....	38
Obrázek 4.1.1 – Vykreslení výsledků pro data naměřená v místnosti 1. Příklad nepříznivé situace – měřená oblast se nachází na okraji sledovaného prostředí a podmínky pro úspěšný výpočet jsou horší. Zelené body představují polohu senzorů.....	41
Obrázek 4.1.2 – Vykreslení výsledků pro data naměřená v místnosti 2. Zelené body představují polohu senzorů.....	41
Obrázek 4.1.3 – Vykreslení výsledků pro data naměřená v místnosti 3. Zelené body představují polohu senzorů.....	42
Obrázek 4.1.4 - Vykreslení výsledků trilaterace pro druhé měření. Zelené body představují polohu senzorů. Body náleží místnosti označené shodnou barvou.....	42
Obrázek 4.2.1 – Výsledek přiřazení dat k jednotlivým uzlům grafu na základě grafu sousednosti oblastí. Vykreslená data jsou přiřazena vždy k uzlu stejné barvy. Dvojbarevné uzly představují oblast dveří dané místnosti. ....	43
Obrázek 4.2.2 – Vykreslení dat přiřazených k jednotlivým místnostem na základě použití grafu sousednosti oblastí. Data přiřazená ke konkrétní místnosti jsou označena stejnou barvou jako místnost.....	43
Obrázek 4.3.1 – Vykreslená data pro první měření po použití filtru rychlosti. Zelené body jsou přijímače. Barevné číslované body jsou uzly grafu sousednosti. Body znázorňují příslušnost ke konkrétním uzlům na základě barvou. ....	44
Obrázek 4.3.2 – Znázornění výsledků pro druhé měření po použití filtru rychlosti. Data přísluší k místnostem se shodnou barvou. Zelené body jsou přijímače. ....	44
Obrázek 4.4.1 – Grafické znázornění výsledků pro první měření po uplatnění filtru rychlosti a grafu sousednosti oblastí. Body přísluší k uzlům grafu sousednosti se stejnou barvou. Zelené body představují průsečíky. ....	45
Obrázek 4.4.2 – Výsledky pro druhé měření po použití obou heuristik zároveň. Body přísluší k místnosti se shodnou barvou. Zelené body jsou přijímače.....	45

## Seznam tabulek

Tabulka 1 – Používaná frekvenční pásma pro 802.15.4 .....	12
Tabulka 2 – Schéma synchronizačního rámce.....	14
Tabulka 3 – Schéma datového rámce .....	14
Tabulka 4 – Schéma potvrzovacího rámce.....	14
Tabulka 5 – Schéma příkazového rámce .....	14
Tabulka 6 – Úspěšnost klasifikace na trénovacích datech pro tři různé klasifikační metody .....	33
Tabulka 7 – Ukázka přijatých dat po úpravě pro časový úsek 1 vteřiny.....	39
Tabulka 8 – Úspěšnost přiřazení naměřených dat k jednotlivým místnostem (1. měření) .....	46
Tabulka 9 – Úspěšnost přiřazení naměřených dat k jednotlivým místnostem při druhém měření .....	46
Tabulka 10 – Procentuální úspěšnost odhadnutí správné polohy vysílače pro jednotlivé metody (1. měření).....	46
Tabulka 11 – Procentuální úspěšnost odhadnutí správné polohy vysílače pro jednotlivé metody (2. měření).....	46

## Příklad přijatých neupravených dat

1218188718.49197 LQ 00A4 004E 4ECE 54 0  
1218188718.49933 # NWK: Data Ind (009D, 00BE)  
1218188718.502545 # NWK: filter passed  
1218188718.505786 LQ 009C 004E 4ECE 8D 0  
1218188718.50977 # NWK: Data Ind (009D, 00BE)  
1218188718.51375 # NWK: Data Ind (009D, 00BE)  
1218188718.517732 # NWK: Data Ind (009D, 00BE)  
1218188718.521062 # NWK: Scan Ind (00A9)  
1218188718.525148 # NWK: Routing|Beaconing (00)  
1218188718.527146 # NWK: Dcfm  
1218188718.529626 # NWK: success  
1218188718.532116 # NWK: beacon  
1218188718.536251 # NWK: Data Ind (00AE, 008A)  
1218188718.53955 # NWK: filter passed  
1218188718.542753 LQ 00AD 004E 4ECE 60 0  
1218188718.546721 # NWK: Data Ind (00A8, 0086)  
1218188718.550036 # NWK: filter passed  
1218188718.553253 LQ 00A7 004E 4ECE 5A 0  
1218188718.557213 # NWK: Data Ind (00AE, 008A)  
1218188718.560468 # NWK: Scan Ind (009D)  
1218188718.564547 # NWK: Routing|Beaconing (00)  
1218188718.5665 # NWK: Dcfm  
1218188718.56904 # NWK: success  
1218188718.57139 # NWK: beacon  
1218188718.57405 # NWK: Packet (02)  
1218188718.577848 # NWK: Data Ind (00AE, 008B)  
1218188718.580993 # NWK: filter passed  
1218188718.584128 LQ 00C5 004E 4ECE 30 0  
1218188718.588115 # NWK: Data Ind (00A3, 00C7)