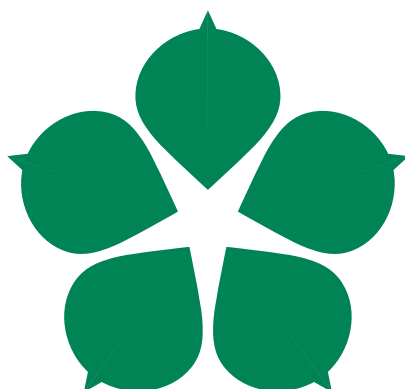


Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích  
Přírodovědecká fakulta



# **Indoor pozicování**

Bakalářská práce

David Langer

Vedoucí práce: Mgr. Jakub Geyer

České Budějovice 2019

## **Bibliografické údaje**

Langer, D., 2019: Indoor pozicování. [Indoor positioning. Bc. Thesis, in Czech.] – 52 p., Faculty of Science, University of South Bohemia, České Budějovice, Czech Republic.

## **Anotace**

Bakalářská práce se zabývá možnostmi lokalizace uvnitř budov. Shrnuje dosavadní technologie a metody určené k indoor lokalizaci. Na základě získaných informací vybírá ideální technologie pro použití v areálu Jihočeské univerzity. Součástí práce je výběr lokalizační techniky podle pokusných měření a následná praktická implementace určení polohy mobilního zařízení pomocí vybraných metod, technik a technologií. Vybrané principy jsou testovány na katedře Aplikované informatiky, porovnány a následně zhodnoceny.

## **Abstract**

This Bachelor thesis deals with the possibilities of localization inside buildings. It summarises existing technologies and methods designed for indoor localization. Based on the information gathered, it selects the ideal technology for use in the campus of the University of South Bohemia. Part of the thesis is the selection of localization techniques according to experimental measurements and the consequent practical implementation of the determination of the mobile device location using selected methods, techniques and technologies. Selected principles are tested at the Department of Applied Informatics, compared and subsequently evaluated.

## **Prohlášení**

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

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

V Českých Budějovicích      dne 17.4.2019

David Langer

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval svému školiteli, Mgr. Jakubu Geyerovi, za odborné vedení, cenné rady a ochotu. Dále bych rád poděkoval své rodině a přítelkyni za jejich trpělivost.

# Obsah

<b>1 Úvod</b>	<b>1</b>
1.1 Cíle práce . . . . .	2
1.2 Související práce . . . . .	2
1.3 Metodika práce . . . . .	2
<b>2 Metody lokalizace</b>	<b>3</b>
2.1 Principy měření vzdálenosti . . . . .	3
2.2 Lokalizační techniky . . . . .	8
2.3 Filtry a algoritmy pro zpřesnění . . . . .	11
<b>3 Přehled technologií</b>	<b>13</b>
3.1 Rádiové technologie . . . . .	14
3.2 Akustické technologie . . . . .	16
3.3 Optické technologie . . . . .	17
3.4 Ostatní technologie . . . . .	18
3.5 Porovnání . . . . .	19
<b>4 Pokusná měření pro výběr lokalizační techniky a technologie</b>	<b>21</b>
4.1 Hodnoty síly signálu . . . . .	21
4.2 Hodnoty magnetického pole . . . . .	26
4.3 Výpočet pohybu zařízení . . . . .	30
<b>5 Představení systému</b>	<b>33</b>
5.1 Tvorba otisků . . . . .	33
5.2 Lokalizační část . . . . .	33
<b>6 Testování</b>	<b>35</b>
6.1 Vytvoření otisků . . . . .	35
6.2 Testování Wi-Fi . . . . .	36
<b>Závěr</b>	<b>43</b>
<b>Přílohy</b>	<b>52</b>

# 1 Úvod

V současné době představuje lokalizace uvnitř budov důležitý progres v určení polohy různých objektů. Zatímco ve venkovních prostorech je za standardní technologii považován Globální polohový systém (GPS), indoorová lokalizace zatím žádný standard nemá.

Technologie vnitřního pozicování nabízejí široké spektrum využití. Na letištích, v nemocnicích a obchodech mohou sloužit k navigaci osob, v muzeích zase například jako náhrada průvodců. Velké sklady tyto technologie využijí k monitorování zboží. Přínosů má ovšem tato lokalizace mnohem více. Z toho důvodu dochází k nárůstu různých metod a technologií sloužících k určení polohy uvnitř budov. Důsledkem toho může být problém při rozhodování o použití ideální technologie. Teoretická část se proto zabývá rozdělením a popisem nejčastěji používaných metod, technik a technologií určených k lokalizaci.

Na základě tohoto porovnání jsou do praktické části vybrány technologie, které jsou vhodné pro použití k navigaci mobilního zařízení v prostorech Jihočeské univerzity a nevyžadují nákup dodatečného hardware. Nejprve jsou provedena různá pokusná měření, která se snaží stanovit, jaké lokalizační techniky s vybranou technologií použít. Tyto technologie jsou společně s vybranými metodami a technikami testovány pomocí vytvořeného software pro zařízení Android. Na závěr jsou podle dosažených výsledků vyzkoušené technologie porovnány a zhodnoceny.

Hlavní motivací ke vzniku této práce je chybějící možnost navigace do učeben v areálu Jihočeské univerzity. Nežádka dochází k situacím, kdy má student problém dostat se do správné místnosti. Z toho důvodu jsou současně tvořeny tři bakalářské práce, které by jako celek měly vytvořit indoorovou a outdoorovou navigační aplikaci. Tato bakalářská práce slouží k vybrání a použití ideální technologie pro určení pozice hledaného zařízení.

## 1.1 Cíle práce

Cílem této práce je vytvoření přehledu metod a technologií, které slouží k lokalizaci uvnitř budov. Z primárních zdrojů nejprve získat základní strukturu teoretické části a následně pomocí různých vědeckých publikací, jež se zabývají indoor pozicováním, vytvořit smysluplný a přehledný celek. Podle těchto informací a pokusných měření vybrat takové metody, techniky a technologie, které je možné aplikovat v prostorách Jihočeské univerzity. Pro tento účel vytvořit software pro zařízení Android, který tyto principy využívá. Výsledky následně porovnat především podle pokrytí a přesnosti lokalizace. Program bude testován ve dvou různých budovách.

## 1.2 Související práce

V minulých letech byla vytvořena řada prací, která se zabývá problematikou indoor pozicování. Struktura teoretické části této práce je tvořena převážně třemi vědeckými publikacemi.

Rainer Mautz ve své publikaci z roku 2012 [1] představuje výčet různých technologií používaných k lokalizaci uvnitř budov. Ke každé technologii navíc přidává seznam již používaných systémů a jejich parametry.

Pánové F.Zafari, A.Gkelias a K.K.Leung ve své práci z roku 2017 [2] popisují množství principů měření vzdálenosti mezi přijímačem a vysílačem. Tyto principy jsou základem pro následné určování polohy.

Práce z roku 2005 [3] od autora U. Ahmad zobrazuje kromě využitých systémů v praxi i soupis technik určených k lokalizaci. Techniky slouží k určení souřadnic hledaného objektu.

## 1.3 Metodika práce

Dle publikací z předešlé podkapitoly je vytvořena kostra rešeršní části, která je vyplněna, nebo případně doplněna, ostatními pracemi, jež se zabývají stejným tématem. Zatímco některé údaje se napříč různými publikacemi liší a je nutné určit jednoznačná fakta, jiné údaje kompletně chybí a je tedy potřeba jejich doplnění.

Teoretická část práce tedy spočívá v nastudování literatury týkající se indoorové lokalizace. Toto studium vede k uspořádání a následnému sestavení informací. Většího zaměření se dočkají ty metody a technologie, které by podle získaných údajů bylo vhodné použít pro lokalizaci na Jihočeské univerzitě. Hlavním a v podstatě jediným zdrojem dat se stal internet, který obsahuje velké množství různých článků a prací. Internet zároveň umožňuje jednoduchý přístup k těmto zdrojům.

Praktická část je založena na vytvoření mobilního softwaru, který využívá technologie pro vnitřní pozicování. Bylo zapotřebí prostudovat dokumentaci Android a použít algoritmy pro lokalizaci, které byly získány v teoretické části.

# 2 Metody lokalizace

V této kapitole jsou představeny metody a techniky určené k lokalizaci uvnitř budovy. Nejprve jsou ukázány principy měření vzdálenosti přijímače od vysílače pomocí rádiového signálu. Dále jsou popsány lokalizační techniky, které již konkrétně slouží k určení polohy objektu. Poslední část se zabývá filtry a algoritmy sloužící ke zpřesnění lokalizace.

## 2.1 Principy měření vzdálenosti

Vypočítání vzdálenosti mezi dvěma uzly je základní problém při určení polohy zařízení. K tomuto účelu je ve vnitřních prostorách používán signál odeslaný z vysílacího uzlu a následně přijatý přijímacím uzlem. Existují tři přístupy k určení vzdálenosti pomocí signálu:

- výpočet síly signálu (RSSI)
- principy založené na čase (ToF, TDoA, RTT, PDoA)
- určení úhlu vyslaného signálu (AoA)

### Indikátor síly přijímaného signálu (RSSI)

RSSI je údaj o síle signálu, který je měřen v momentě příjmu vyslaného signálu. Tento záznam se nachází ve zbývající energii rádiové vlny. V současné době neexistuje žádný standard pro měření síly signálu. Nejčastěji se interpretuje v jednotkách decibel nad miliwattem (dBm) [4].

Síla signálu je ovlivněna třemi základními parametry, mezi které patří ztráta cesty (*path loss*), zeslabování (*fading*) a stínování (*shadowing*). Stínování je zapříčiněno překážkami mezi přijímačem a vysílačem. Zeslabování je zase způsobeno rádiovou frekvencí a zeměpisnou polohou. Tyto parametry se dají velmi těžko započítat do určení hodnoty síly signálu. Pro výpočet RSSI však můžeme použít model ztráty cesty. Tento úbytek je důsledkem šíření elektromagnetické vlny v prostoru a je možné ho vypočítat následujícím způsobem: [5]

$$P_L(d) = P_L(d_0) + 10\eta \lg(d/d_0) + X_\sigma \quad (2.1)$$

- $P_L(d_0)$  představuje ztrátu cesty v jednotkách dBm, kdy vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem je rovna  $d_0$ .
- $d$  je vzdálenost mezi přijímačem a vysílačem v jednotkách kilometrů.
- $\eta$  je exponent, který slouží k měření rychlosti klesání RSSI vzhledem k narůstající vzdálenosti. Hodnota exponentu je přímo závislá na prostředí šíření signálu.



- $d_0$  je vzdálenost, která se nejčastěji rovná jednomu metru.
- $X_\sigma$  reprezentuje standardní odchylku, jejíž střední hodnota je rovna 0. Závisí na stupni tzv. „blednutí“ signálu v daném prostředí.

Hodnota RSSI se poté vypočítá pomocí vzorce:

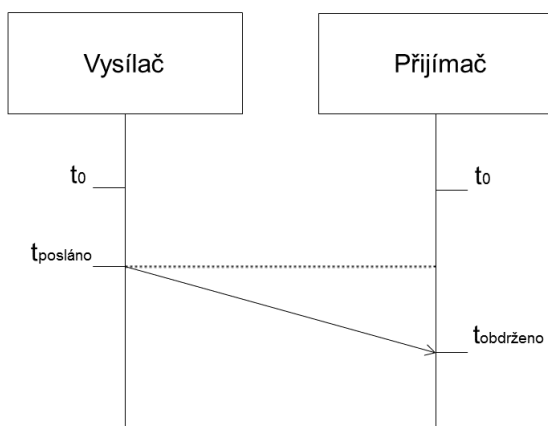
$$RSSI = A - 10n \log d, \quad (2.2)$$

kde  $A$  vychází z modelu útlumu cesty a značí získanou sílu signálu ze vzdálenosti  $d_0$ . Parametry  $A$  a  $n$  jsou ovlivněny působeními, která do výpočtu RSSI nemohly být započteny. Patří mezi ně vícecestné odrazy, difrakce, refrakce, nebo vlhkost vzduchu [6][7].

## Doba letu signálu (ToF)

Metoda doby letu signálu, známá také jako doba přijetí signálu (ToA), je založena na měření přesné doby příchodu signálu z vysílače na přijímač. To je umožněno díky známé hodnotě rychlosti šíření signálu, která je přibližně rovna rychlosti světla ( $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ ) [8].

Tento princip s sebou nese dva základní problémy. Za prvé je nutné synchronizovat přijímač i vysílač na přesný čas. Za druhé je potřeba při každém vyslaném signálu z vysílače přidat časovou známku. Přijímač, který tento signál přijme, pak může podle této známky určit dobu letu signálu [3].



Obrázek 2.1: Měření rozdílu času pomocí doby letu signálu [9].

Pokud známe dobu letu signálu a hodnotu rychlosti světla, můžeme vypočítat vzdálenost přijímače od vysílače:

$$d = c \cdot (t_{obdrženo} - t_{posláno}) \quad (2.3)$$

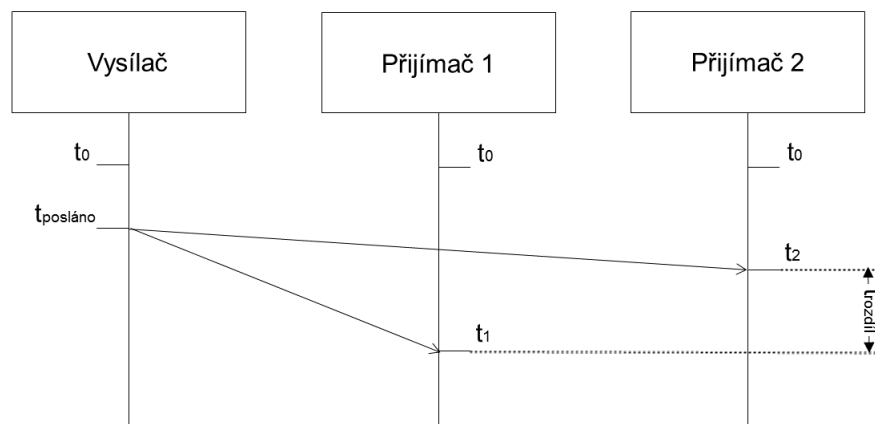
Výhodou použití tohoto typu měření namísto RSSI je znatelně nižší ovlivnění doby letu signálu, pokud jsou na cestě přítomny překážky (lidé, stěny, atd.). Mezi nevýhody by mohl patřit fakt, že rychlost světla je v reálných podmínkách

pomalejší než ve vakuu (např. ve vodě je pomalejší až o 25 % [10]). Ve vzduchu je ovšem rychlost světla pomalejší pouze o 0,3 %, a tedy nepředstavuje příliš velký problém při měření uvnitř budov.

Hlavní překážkou je tedy synchronizace času, která má za důsledek vyšší cenu a složitost systému používající tento princip. Už při minimální odchylce 3ns (333MHz) dochází k rozdílu výpočtu vzdálenosti o 1 metr [9].

## Rozdíl času přijetí signálu (TDoA)

Problém synchronizace řeší metoda rozdílu času přijetí signálu. Ke změření vzdálenosti jsou potřeba minimálně dva přijímací uzly. Na rozdíl od ToF však není potřeba synchronizovat přijímač a vysílač, ale pouze tyto dva přijímače.



Obrázek 2.2: Měření rozdílu času na dvou přijímačích [9].

Výpočtem rozdílu času příchodu signálu na přijímač 1 a 2 je možné vypočítat rozdíl vzdáleností od vysílače:

$$\Delta d = c \cdot t_{rozdil}, \quad (2.4)$$

Ačkoliv tento princip nabízí přesnější určení polohy [11] a odpadá mu složitá synchronizace mezi přijímacím a vysílacím uzlem, stále je potřeba mít sladěné časy na přijímačích. Tento problém řeší Asynchronní rozdíl času přijetí signálu (ATDoA).

## Doba odezvy (RTT)

Doba odezvy vychází z metody ToF a někdy je nazývána jako čas návratu letu (RToF). Vysílací uzel odešle v čase  $t_1$  signál na přijímač, ten ho v  $t_2$  obdrží a v čase  $t_3$  odešle zpět odpověď. Vysílač tento signál obdrží v momentě  $t_4$ . Vzdálenost mezi uzly se poté vypočítá následujícím způsobem: [2]

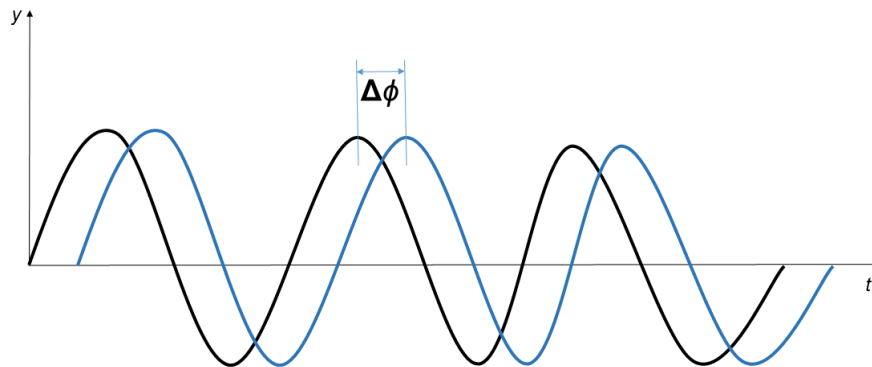
$$d = \frac{(t_4 - t_1) - (t_3 - t_2)}{2} \cdot c \quad (2.5)$$

Výhodou oproti principu ToF je potřeba pouze malé synchronizace. Tím odpadá celková složitost systému, na kterém by byla použita tato metoda.

Jednou z nevýhod je potřeba, aby oba uzly uměly odesílat signál. Tím se zvyšuje celková cena případného systému. Další slabou stránkou může být nepřesné změření zpoždění mezi přijetím signálu a vysláním zpět, které má za efekt nepřesné určení vzdálenosti [12].

## Rozdíl fáze příchodu signálu (PDoA)

Tento princip vypočítává vzdálenost na základě rozdílu fází odeslaných rádiových signálů. Počítá s předpokladem, že se dvě odeslané vlny po přijetí na přijímací uzel liší. Jak je ukázáno na obrázku 2.3, rozdíl fáze ( $\Delta\phi$ ) značí diferenci mezi dvěma sinusoidami [13].



Obrázek 2.3: Rozdíl fáze dvou sinusoid.

K výpočtu vzdálenosti vysílače od přijímače je kromě rozdílu fází potřeba znát i rychlost světla ( $c$ ) a rozdíl frekvencí ( $\Delta f$ ). Ten se jednoduše vypočítá jako  $\Delta f = f_1 - f_2$ . Vzdálenost se pak určí pomocí vzorce: [12]

$$d = \frac{c\phi}{2\pi\Delta f} \quad (2.6)$$

Na základě krátkých vlnových délek rádiových signálů nabízí metoda PDoA relativně vysokou přesnost. Tento postup může být použit společně s některým z předchozích principů pro zpřesnění určení vzdálenosti [2].

Mezi hlavní nevýhody patří fakt, že přijímač nedokáže vypočítat počet vlnových délek při odeslání signálu z vysílače. To vede k nejednoznačnosti lokalizačních systémů. Slabou stránkou této metody je i případná odchylka frekvence, která způsobí posun fáze a tedy nepřesnost ve výsledném měření. Vícecestné odrazy jsou dalším problémem při určování vzdálenosti, protože mohou způsobit chybu ve fázích [12].

## Úhel příchodu signálu (AoA)

Tato metoda vypočítává úhel příchodu signálu z vysílače na přijímač [8]. K tomu je zapotřebí znát rozdíl příchodu signálu na přijímače a vzdálenost mezi nimi. Úhel  $\theta$  je pak vypočítán následujícím způsobem: [14]

$$\theta = \arcsin\left(\frac{\Delta t \cdot c}{d}\right) \quad (2.7)$$

Ke změření úhlu vyslaného signálu se používají tři přístupy. Prvním z nich je použití několika směrových antén, které jsou nastaveny do různých směrů. Tento princip patří mezi nejzákladnější, avšak kvůli potřebě mnoha antén je i jedním z nejdražších. Další možností je použití rotační směrové antény. Zde je však obtížnější přijmout signál. Rotující anténa má za následek i vyšší spotřebu elektrické energie. Posledním přístupem je aplikování sady multiplexních všesměrových antén. Tento princip vychází z myšlenky, že sada těchto antén dokáže napodobit rotační anténu a zároveň předejít problémům s příjmem signálu a vysokou spotřebou energie [15].

Výhodou je vyšší přesnost a nepotřeba přesné synchronizace. Jednou z nevýhod je použití několika antén. To má za následek vyšší cenu hardwarových zařízení. Přesnost lokalizace závisí také na faktorech jako počet, směr a umístění těchto antén [12].

## Porovnání

Princip	Výhody	Nevýhody
RSSI	Snadná implementace, nízká cena, možnost použití s několika technologiemi	Proměnlivost závislá na prostředí, nižší přesnost určení vzdálenosti
ToF	Vyšší přesnost stanovení vzdálenosti	Vyžaduje synchronizaci mezi přijímačem a vysílačem
TDoA	Vyžaduje synchronizaci pouze mezi přijímači	Stále vyžaduje přesnou synchronizaci napříč zařízeními, požaduje větší šířku pásma
RTT	Poskytuje vysokou přesnost při určování polohy	Potřeba určité synchronizace, pomalé zpracování ovlivňuje naměřené hodnoty
PDoA	Může být použit ve spojení s RSSI, ToA, nebo TDoA pro naměření přesnějších hodnot	Překážky způsobují snížení přesnosti
AoA	Vysoká přesnost naměřených hodnot při lokalizaci	Může vyžadovat použití několika směrových antén, přesnost se snižuje při narůstající vzdálenosti mezi vysílačem a přijímačem

Tabulka 2.1: Porovnání principů měření [2]

## 2.2 Lokalizační techniky

V momentě výpočtu vzdálenosti mezi dvěma uzly je potřeba hledaný objekt lokalizovat. K tomu slouží zde popsané techniky. Ty buď naměřené hodnoty z velké části využívají (Trilaterace, Triangulace, Otisky), nebo jim stačí pouze údaje o poloze přijímačů (Blížkost), či počáteční poloze hledaného zařízení (Výpočet pohybu zařízení). Následující část se zabývá popisem těchto technik.

### Trilaterace

Trilaterace měří polohu hledaného objektu na základě vzdálenosti od přijímacích zařízení. Vzdálenost může být vypočítána pomocí některého z principů popsaného výše, tedy ToF, TDoA, RTT, PDoA, nebo RSSI. Tato technika spočívá ve vytvoření kružnice, jejímž středem je přijímač a poloměr je roven naměřené vzdálenosti. Pro určení přesné polohy je nutné přidat dva další přijímače a vytvořit z nich kružnice. V ideálním případě je nalezen průsečík těchto tří kružnic, který určuje polohu vysílacího uzlu. Jak je však znázorněno na obrázku 2.4, častěji je pomocí průsečíků vytvořena menší oblast, v jejímž středu se hledaný objekt nalézá. Ve 3D prostoru je kružnice nahrazena koulí [16].

K výpočtu souřadnic hledaného bodu  $(x, y, z)$  je potřeba znát poloměry kružnic  $(r_1, r_2, r_3)$  a posuny polohy kružnic  $(d, i, j)$ . Posuny jsou vypočítány na základě souřadnic přijímacích bodů. Poloměry jsou zjištěny až při měření vzdálenosti od vysílacího bodu. Pomocí těchto parametrů vypočítáme souřadnice následujícím způsobem: [17]

$$x = \frac{r_1^2 - r_2^2 + d^2}{2d}, \quad (2.8)$$

$$y = \frac{r_2^2 - r_1^2 + d \cdot (r_1^2 - r_3^2 + i^2 + j^2)}{2jd}, \quad (2.9)$$

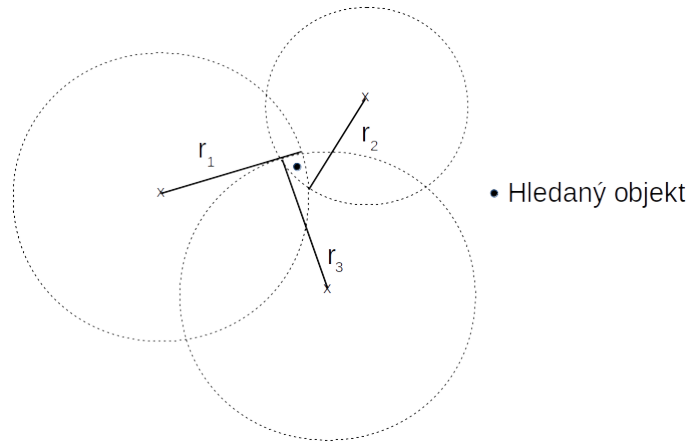
$$z = \sqrt{r_1^2 - x^2 - y^2} \quad (2.10)$$

Výhodou této techniky je fakt, že k lokalizaci nám stačí znát pouze souřadnice přijímacích uzlů. Nevýhody souvisí převážně s výpočtem vzdáleností. Ty jsou často ovlivněny překážkami, které se nachází mezi vysílacím a přijímacím uzlem [18].

### Triangulace

Triangulace získává vzdálenost mezi uzly na základě úhlu vyslaného signálu. Poté je pomocí těchto údajů vypočítána poloha objektu. Úhel je nejčastěji měřen principem AoA.

K výpočtu je potřeba znát minimálně dva body se známými souřadnicemi. V momentě vyslání signálu pod určitým úhlem je vytvořen pomyslný trojúhelník. Pokud je známa vzdálenost mezi dvěma body (přijímači) a úhel vyslaného signálu,



Obrázek 2.4: Hledání objektu podle průsečíků tří kružnic [17].

můžeme pomocí sinové věty dopočítat zbylé úhly a délky stran. Následně lze pomocí těchto údajů určit souřadnice třetího, tedy hledaného bodu [17].

Výhodou triangulace je potřeba méně známých bodů pro výpočet hledaného objektu. Ve 2D prostoru stačí mít dva přijímací uzly. Ve 3D prostoru je však měření znatelně složitější. Nevýhody nejčastěji souvisí s principem měření úhlu příchodu signálu (AoA) a podobně jako u trilaterace i s překážkami mezi uzly [12].

## Blížkost

Blížkost je technika, která určuje polohu vysílače objektu na základě umístění nalezeného přijímače. Hledaný objekt je tedy nastaven na stejné souřadnice, jako přijímací uzel, který zachytil. Nalezení nejbližšího přijímače může být provedeno pomocí nejsilnějšího přijatého signálu.

Jak je již patrné, tato metoda není příliš přesná a velmi závisí na množství přijímačů v místnosti či budově. V ideálním případě může určit, ve které místnosti se hledané zařízení nachází. Blížkost nevyžaduje žádný složitý výpočet polohy a postačí jí pouze známá poloha přijímacích uzlů [3].

## Výpočet pohybu zařízení

Tato metoda vypočítává umístění zařízení pomocí vlastních senzorů. Ke své funkci tedy nepotřebuje žádné další vybavení. Jediným požadavkem je známá počáteční poloha. Měření pohybu zařízení probíhá pomocí těchto senzorů:

- **Akcelerometr**, který slouží ke změření zrychlení. Díky tomu je možné zaznamenat pohyb zařízení a určit uraženou vzdálenost od začátku tohoto pohybu.
- **Gyroskop**, jenž zaznamenává změny rychlosti otáčení, nebo orientace.
- **Magnetometr**, který je na základě měření magnetického pole využíván jako kompas.

S použitím těchto senzorů je možné určit směr a vzdálenost, kterou se objekt pohybuje od počátečního bodu a tím vypočítat jeho aktuální polohu. Senzory ovšem nejsou naprosto přesné a s přibývajícím uraženou vzdáleností stoupá i chybovost této techniky. Ideálnější by tedy bylo použít výpočet pohybu zařízení společně s jinou metodou [1].

## Otisky (Fingerprinting)

Fingerprinting funguje na principu získávání otisků (síla signálu, magnetické pole, apod.) na určitých místech a následném určení polohy podle nejlepší shody. Základem je vytvoření databáze otisků. Tyto otisky jsou v ideálním případě na různých pozicích odlišné. Poté jsou při lokalizaci objektu porovnány aktuální otisky s těmi v databázi a je určena pozice. Technika Fingerprinting se tedy skládá ze dvou částí:

### Offline fáze

Offline fáze, nebo-li fáze trénování, je část, která se zabývá sběrem dat z několika lokací. Mezi měřená data může patřit například síla signálu, čas přijetí signálu, vzdálenost od přijímače, nebo síla magnetického pole. Tyto údaje je vhodné sbírat z většího množství přijímacích uzlů, aby se na různých pozicích lišily. Do databáze jsou tyto informace ukládány společně se souřadnicemi. Výsledkem je mapa otisků, která slouží jako vstupní data pro tzv. online fázi.

Nevýhodou trénovací fáze je časová náročnost. Pro lepší výsledky je potřeba vybrat nejen ideální počet přístupových bodů, ale i optimální počet míst, na kterých budou otisky měřeny. S narůstajícím počtem lokací však narůstá i čas potřebný k vytvoření mapy. Často je nutné mapu otisků aktualizovat a to zejména v případech, kdy dojde k odstranění nebo přesunu některého z přijímacích uzlů.

### Online fáze

Online fáze řeší lokalizaci objektu na základě vytvořené mapy otisků. Vysílací uzel si na začátku naměří potřebné hodnoty, které následně porovná s hodnotami v databázi. Pomocí vzorce 2.11

$$D_j = \sum_{i=1}^m \sqrt{(\text{Hodnota}_{i_{\text{online}}} - \text{Hodnota}_{i_{\text{offline}}})^2}, \quad (2.11)$$

je vypočítána podobnost ( $D_j$ ) mezi výsledky získanými při offline a online fázi, kde  $m$  značí počet naměřených hodnot [19]. Podle shody se následně určí poloha zařízení. Jelikož je však velmi malá pravděpodobnost, že naměřené hodnoty budou stejné jako ty v databázi, používá se několik matematických výpočtů, které se snaží určit nejpodobnější otisk. Patří mezi ně:

- Nejbližší sused (NN)
- K-nejbližších susedů (KNN)
- Vážený počet K-nejbližších susedů (WKNN)

- Rozšířený vážený počet K-nejbližších sousedů (EWKNN)

Metoda nejbližšího souseda určuje polohu na základě nejlepší shody s otiskem v databázi. NN je tedy nejjednodušší, ale zároveň nejméně přesný výpočet a do značné míry závisí na počtu vytvořených otisků. K-nejbližších sousedů si stanoví určitý počet nalezených hodnot, vypočítá z nich průměr, a tím určí souřadnice hledaného zařízení. Metoda WKNN mění získaný průměr podle vypočítané podobnosti. Poslední princip si dynamicky pozměňuje počet výsledků na základě jejich odlišnosti.

## 2.3 Filtry a algoritmy pro zpřesnění

Filtry slouží pro zpřesnění lokalizace objektu. Jsou zapotřebí z důvodu vysoké proměnlivosti získávaných údajů z přijímacích uzlů. V technologiích pro lokalizaci uvnitř budov se filtry nejčastěji používají pro zpracování signálu. Tato část představuje tři filtry:

- Kalmanův filtr
- Rozšířený Kalmanův filtr
- Částicový filtr

### Kalmanův filtr

Kalmanův filtr je rekurzivní algoritmus, který se skládá z několika matematických rovnic. Má za cíl minimalizovat střední kvadratickou odchylku (rozptyl) odhadnutých parametrů. Toho je dosaženo užitím dat z předchozího a současného měření. Kalmanův filtr je nejčastěji používán k lineární predikci [20].

K odhadu stavu se používá následující rovnice:

$$x_k = F_{k-1}x_{k-1} + G_{k-1}u_{k-1} + w_{k-1}, \quad k = 1, \dots \quad (2.12)$$

- $x_k$  je vektor určující stav v čase  $t_k$ . Může jím být například aktuální lokace hledaného zařízení.  $k - 1$  zde značí předchozí stav.
- $u_k$  je řídicí signál.
- $w_k$  představuje šum, který se skládá z řady náhodných proměnných s nejasným časovým průběhem.
- $F_{k-1}$  je přechodová matice stavu z času  $t_{k-1}$  do času  $t_k$ .
- $G_{k-1}$  je matice související se vstupy v čase  $t_{k-1}$  do stavu v čase  $t_k$ .



Výpočet míry pak probíhá tímto způsobem:

$$z_k = H_k x_k + v_k, \quad k = 1, \dots, \quad (2.13)$$

kde  $z_k$  je naměřená hodnota v čase  $t_k$ ,  $H_k$  je pozorovací matice a  $v_k$  je šum, který má podobné vlastnosti jako  $w_k$ , ale nesouvisí s ním [21].

Rovnice Kalmanova filtru se skládají ze dvou fází. První z nich jsou rovnice určené k aktualizaci času. Během nich je odhadnut další stav. Druhou fází jsou rovnice pro aktualizaci měření. Ty upravují stav naměřenými hodnotami [20]. Výhodou Kalmanova filtru je jeho snadná implementace a práce v reálném čase. Nová měření mohou být zpracována v momentě přijetí [22].

## Rozšířený Kalmanův filtr

Zatímco Kalmanův filtr je lineární technika, jeho rozšíření je používáno v případě, kdy je odhad nelineární. Podstatou tohoto filtru je linearizace (nahrazení části křivky přímkou) nelineárních vzorů [23]. Odhad stavu a míry jsou vypočítány:

$$x_k = f(x_{k-1}, u_k) + w_{k1}, \quad (2.14)$$

$$z_k = h(x_k) + v_k, \quad k = 1, \dots, \quad (2.15)$$

kde  $v_k$  a  $w_k$  jsou stejné parametry šumu jako v předchozím případě.  $f$  značí nelineární funkci, která vypočítává odhadovaný stav z předchozího kroku. Parametr  $h$  z tohoto stavu vypočítá odhadovanou míru.

## Částicový filtr

Částicový filtr, také nazýván jako Monte Carlo, je stejně jako Rozšířený Kalmanův filtr používán v případě nelineární predikce. Rozdílem je, že částicový filtr nepoužívá techniku linearizace nebo jinou metodu aproximace (určení přibližné hodnoty). Nevýhodou tohoto filtru je výpočetní náročnost [24].

Nejčastěji se částicový filtr používá ke sledování pohyblivého objektu. Principem je výběr určitého počtu tzv. „částic“, kterým je přiřazena váha. Tato váha závisí na pravděpodobnosti přesnosti aktuálně naměřených dat oproti předchozím. Přesnost může být dána například definováním vzdálenosti polohy částice od polohy naměřené některou z technik určené k lokalizaci. Částice mohou mimo váhy obsahovat i souřadnice, směr, nebo rychlost pohybujícího se objektu.

Pro zpřesnění lokalizace tímto filtrem je nejprve vygenerován určitý počet částic. Ty jsou náhodně rozmístěny na pozice, které by mohly určovat polohu objektu. Na základě pohybu objektu je ke každé z částic připojena váha podle naměřených dat. Čím vyšší má částice odhad přesné polohy objektu, tím má její váha vyšší hodnotu. Částice s nejmenší vahou jsou odstraněny a následně jsou vytvořeny nové, které kopírují částice s vysokou vahou. Opakováním těchto kroků je s částečnou přesností monitorována trasa objektu [22],[25].

## 3 Přehled technologií

Hlavním aspektem ke stanovení pozice objektu je použití určité technologie. To zahrnuje výběr potřebného hardwarového vybavení. Technologie se dělí do několika skupin. Patří mezi ně technologie rádiové, akustické, optické a technologie využívající magnetické pole. Na závěr jsou všechny technologie porovnány a je určeno, které jsou vhodné pro použití na Jihočeské univerzitě. Zde jsou nejprve představeny nejdůležitější parametry, dle kterých se jednotlivé technologie porovnávají.

### Přesnost

Přesnost je jeden z hlavních parametrů lokalizačních systémů. Můžeme ji vyjádřit jako vzdálenost naměřené pozice od reálné pozice. Čím nižší vzdálenost, tím vyšší přesnost. Překážky a odrazy jsou ve vnitřních prostorách nejčastější příčiny nepřesnosti. Z toho důvodu je ideální vybrat takovou technologii, která tyto nepřesnosti minimalizuje [26].

### Cena

Cena se skládá z několika částí. Cena lokalizovaného zařízení pro každý koncový objekt či uživatele, cena hardwarového vybavení dané infrastruktury a náklady na instalaci a údržbu vybraného systému. Cenu mohou snížit systémy využívající již připravené infrastruktury nebo systémy, které jsou určené k lokalizaci osob. Ty jsou nejčastěji tvořeny pro pozicování mobilního zařízení a není je tedy potřeba do ceny zahrnovat. Cena se naopak zvyšuje, jestliže je nutné do infrastruktury nainstalovat větší počet drahého vybavení, nebo je-li systém určen k lokalizaci velkého množství objektů (např. zboží ve skladu) [27].

### Rozsah

Dalším důležitým kritériem je rozsah. Ten udává, jak velkou plochu mohou technologie pokrýt. S vyšším rozsahem souvisí nižší počet potřebného vybavení, a tedy úspora v ceně. Zároveň tím ale může být ovlivněna přesnost celého systému [2].

### Složitost

Složitost je nejčastěji spjata s výpočetní náročností algoritmů, které určují polohu objektu. Na mobilní zařízení, která často nedisponují potřebným procesním výkonem, je vhodné implementovat nenáročné algoritmy. Pokud systém vyžaduje vyšší výpočetní náročnost a rychlé výpočty, je žádoucí k těmto výpočtům použít server. Často je ale obtížné určit složitost polohovací techniky. Z toho důvodu může být jako měřítko používáno zpoždění mezi změnou polohy mobilního zařízení a zaznamenání této nové lokace systémem [26].

## 3.1 Rádiové technologie

### Wi-Fi

Wi-Fi je v současné době nejpoužívanější technologie pro lokalizaci uvnitř budov. Je založena na standardech IEEE 802.11 a v současné době pracuje ve dvou pásmech: 2,4GHz a 5GHz. Tato technologie se nejčastěji používá pro bezdrátové internetové připojení. Velké množství budov už tedy obsahuje přístupové body a často není potřeba další instalace. Výhodou je i fakt, že řada zařízení již tuto technologii využívá. Wi-Fi je tedy cenově levná technologie pro vnitřní lokalizaci [15].

Určování polohy probíhá pomocí signálů. Používanými principy měření jsou RSSI, ToF, TDoA a AoA. Nejčastěji využívaným typem je RSSI, protože nevyžaduje úhlové měření, synchronizaci, a je snadný na implementaci. K určení polohy se používá technika trilaterace, triangulace, blízkosti a nejlepší shody otisků.

Výhodou použití technologie Wi-Fi ve vnitřních prostorech je pokrytí, které může dosáhnout hodnoty mezi 50 - 100 metry. Možnost různých překážek mezi hledaným zařízením a přístupovým bodem je další velkou výhodou této technologie. To má však za následek nepřesnosti ve výpočtech, jelikož se tento signál často mění. Technologie Wi-Fi není obecně příliš přesná při určování polohy a značně závisí na zvolených metodách lokalizace [1].

### Bluetooth

Bluetooth je další bezdrátová technologie, která využívá rádiového signálu. Původně byla určena k výměně dat mezi zařízeními na krátké vzdálenosti. V současné době se nejčastěji používá pro bezdrátovou komunikaci mezi zařízeními, u kterých by k tomuto spojení byla potřeba kabelů. Technologie Bluetooth je definována normou IEEE 802.15.1 [28].

Pro vnitřní lokalizaci se tato technologie začala používat s příchodem přijímačů využívajících Bluetooth Low Energy (BLE), které pracují v pásmu 2,4GHz. Tato zařízení jsou obvykle napájena bateriemi a mají nízkou spotřebu a cenu. Nízká spotřeba umožňuje přijímačům pracovat nepřetržitě několik měsíců až let [29]. Bluetooth zařízení jsou rozdělena podle výkonnosti a rozsahu do tří tříd. Zatímco třetí třída umožňuje maximální výkon 1 mW, což odpovídá rozsahu přibližně 1 metr, první třída s výkonem 100 mW dokáže dosáhnout až do vzdálenosti 100 metrů [30].

Techniky lokalizace a principy měření se používají stejně jako u Wi-Fi. Nejčastěji používaným typem je získávání síly signálu. Společnost Apple představila v roce 2013 systém iBeacon určený pro pozicování. Tento systém je postaven na standardu BLE a k lokalizaci je nutné mít iBeacon přijímač i vysílač. Technologie iBeacon zajišťuje rozsah až 50 m a přesnost určení pozice 1-2 m [31].

## ZigBee

ZigBee je bezdrátová rádiová technologie, která se stejně jako Bluetooth využívá ke komunikaci dvou zařízení blízko u sebe. ZigBee je definováno standardem 802.15.4 a běží ve třech bezlicenčních pásmech: 2,4 GHz celosvětově, 915 MHz v USA a 868 MHz v Evropě [15].

ZigBee technologie je na rozdíl od Bluetooth používána tam, kde není potřeba přenosu velkého objemu dat. Díky její snadné implementaci, nízké ceně a spotřebě se v současné době nejčastěji používá pro inteligentní domácnosti, dálková ovládání, nebo ve zdravotnictví [32]. Nevýhodou oproti Wi-Fi a Bluetooth je absence čipu kompatibilního s IEEE 802.15.4 v mobilních zařízeních [33].

Pro potřebu lokalizace spolu mohou senzory v ZigBee síti komunikovat. Počet takto komunikujících senzorů může být i několik tisíc. Jelikož je hodnota přenosové vzdálenosti až 75 m, lze tímto způsobem pokrýt velkou část budovy. Přenos dat mezi senzory je energeticky nenáročný a má malé zpoždění. Stejně jako u předchozích technologií však přesnost určení polohy závisí na okolním prostředí [34].

## RFID

Identifikace na rádiové frekvenci (RFID) je technologie, která využívá rádiových vln k získávání a ukládání dat do mikročipu [27]. RFID se skládá ze čteček a tagů. Tagy kromě mikročipu obsahují i anténu, která slouží k vyslání a příjmu elektromagnetického signálu. Tímto signálem jsou odesílána data (především jedinečné identifikační číslo tagu), která jsou následně přečtena RFID čtečkou. RFID čipy se dělí na pasivní a aktivní [35].

V případě pasivních čipů vysílá čtečka signál periodicky. Jakmile se tag přiblíží ke čtečce na určitou vzdálenost, vyšle čtečka signál, který je přijat anténou tagu. Tag pomocí tohoto signálu nabije vlastní kondenzátor a v momentě nabití vyšle zpět signál, který obsahuje data obsažená v tagu. Pasivní čipy jsou velmi levné a malé, ale pracují pouze na krátkou vzdálenost. Nejčastěji se používají ke kontrole přístupů do budov, nebo pro identifikaci zboží.

Naproti tomu u aktivních čipů obsahují tagy svůj vlastní zdroj a mohou tedy vysílat signál i bez přítomnosti čtečky. Tím se výrazně zvyšuje dosah těchto zařízení, který může dosahovat hodnoty až 80 metrů. Nevýhodou je však vyšší cena a velikost. Právě aktivní čipy se nejčastěji používají k lokalizaci [36].

Určování polohy pomocí RFID probíhá v případě, kdy není potřeba znát neustále pozici hledaného objektu, ale pouze v momentě, kdy se nachází poblíž určitého místa. Lokalizace probíhá dvojím způsobem. První možností je, že hledaný objekt nese tag, který je zachycen čtečkami rozmístěnými v infrastruktuře budovy. Druhou možností je, že se objekt pohybuje společně se čtečkou a vysílá signál, který je přijímán rozmístěnými tagy [35].

## Ultrawideband (UWB)

Ultra-širokopásmová (UWB) technologie odesílá signál současně v několika frekvenčních pásmech od 3,1 GHz do 10,6 GHz. To je významný rozdíl oproti ostatním zde představeným rádiovým technologiím, které pracují v určitých pásmech. Tento signál je navíc odesílán velmi krátkou dobu. UWB technologie dále staví na odesílání ultra krátkých impulzů, které okamžitě zabírají šířku pásma větší než 500 MHz.

Tyto vlastnosti dělají UWB ideální technologií pro vnitřní lokalizaci. Díky krátkému trvání impulzů lze určit, které signály nevychází z vícecestných odrazů. Signál navíc snadno prochází skrz stěny a různá vybavení. Stále jsou však problémem kovové předměty a lidské tělo, které odrazy způsobují [37],[26].

Pro určení vzdálenosti mezi přijímačem a vysílačem se nejčastěji používají metody ToF a TDoA. Většina mobilních telefonů ale neobsahuje potřebný hardware pro lokalizaci pomocí UWB. Je tedy zapotřebí dodatečný nákup tagů a přijímacích senzorů. Tyto komponenty jsou však poměrně drahé. UWB senzory nemají příliš velký rozsah (v současné době přibližně 25 metrů). Na druhou stranu přesnost této technologie je oproti ostatním rádiovým technologiím, které využívají techniku trilaterace, markantní a pohybuje se v řádech centimetrů [12].

## 3.2 Akustické technologie

Akustické technologie používají vedle elektromagnetického signálu i signál zvukový. Využívají skutečnosti, že zvukový signál dorazí na přijímač pomaleji než rádiový signál (přibližně  $10^6$  pomaleji [1]), a lze tedy snadno vypočítat vzdálenost mezi uzly pomocí principu TDoA [35].

### Ultrazvuk

Lokalizace pomocí ultrazvuku probíhá na základě přenášení zvukové vlny na frekvenci vyšší, než je člověk schopen vnímat (tedy více než 20KHz). Je potřeba znát vzdálenost mezi přijímačem a vysílačem. Ta se zjišťuje pomocí principu ToF. Ke konkrétnímu určení souřadnic objektu se používá technika trilaterace, kdy je zapotřebí znát polohy všech přijímačů.

K odstranění nutnosti synchronizace přijímacích a vysílacích uzlů se používá princip TDoA. Vysílač odesílá spolu s rádiovým signálem i ultrazvukový impuls. Pro výpočet vzdálenosti je nutné znát rychlost rádiového signálu a rychlost zvuku. Zatímco rychlost signálu je přibližně rovna rychlosti světla, rychlost zvuku je mírně závislá na okolní teplotě (T) a počítá se následovně:

$$v_z = (331.3 + 0,606 \cdot T)m \cdot s^{-1} \quad (3.1)$$

Rychlost zvuku je teplotou ovlivňována v rámci metrů. Při změně teploty o  $10^\circ\text{C}$  se rychlost změní přibližně o 6 m/s. Vzdálenost přijímače od vysílače je následně vypočtena jako změna příchodu rádiového a ultrazvukového signálu [1].

Nevýhodou této technologie je potřeba přímé viditelnosti vysílače a přijímače. Je tedy nutné instalovat ultrazvukové přijímače do každé místnosti budovy. Na

druhou stranu tato technologie nevyžaduje drahé vybavení a při dostatečném počtu přijímacích uzlů poskytuje relativně vysokou přesnost.

## **Slyšitelný zvuk**

Technologie slyšitelného zvuku využívají podobně jako ultrazvuk zvukový signál. Zde je však použit zvuk na frekvenci, kterou zaznamená lidské ucho, tedy 16-20 MHz. To ale může na člověka působit nepříjemně. Z toho důvodu jsou používány takové zvuky, které jedince neruší a mnohdy je ani nezaznamená. Příkladem může být použití hudby v obchodním centru [1].

Pro indoorovou lokalizaci jsou nejčastěji používány principy ToF a TDoA společně s technikou trilaterace. Výhodou je snadná implementace, protože jako přijímací zařízení postačí mobilní telefon. Další předností je i poměrně vysoká přesnost, která se pohybuje okolo 60 - 90 cm. Nevýhodou je stejně jako u technologie ultrazvuku ovlivnění rychlosti zvuku okolní teplotou [38].

## **3.3 Optické technologie**

### **Infračervené záření**

Určení polohy technologií infračerveného záření probíhá pomocí elektromagnetického záření, které má vlnovou délku delší než 760 nm. Existují dvě metody lokalizace pomocí této technologie.

První metoda požaduje LED diodu vydávající infračervené záření a fototranzistor, který toto záření přijímá. Podle množství přijatého záření je určena vzdálenost mezi těmito dvěma objekty. K pozicování je používána technika trilaterace [39].

Druhá metoda využívá infračervených zařízení, které přijímají tepelné záření. Lokalizace pomocí této techniky je možná, jelikož lidská kůže vyzařuje jinou teplotu než prostředí uvnitř budovy. Předností této metody je nepotřeba, aby hledaný objekt nesl nějaké zařízení. Nevýhodou může být přítomnost jiných objektů, které také vyzařují určité tepelné záření, a tím ovlivňují infračervená zařízení.

Nevýhodami představených metod jsou vyšší cena a nižší rozsah. Infračervené systémy je možné používat pouze v rámci jedné místnosti a pro pokrytí budovy je zapotřebí instalace velkého množství zařízení [40].

### **Viditelné světlo**

Technologie lokalizace pomocí viditelného světla vyžaduje ke své funkčnosti dvě zařízení. LED žárovky jsou používány jako vysílací prvek, mobilní telefon jako nejčastější typ přijímače. Tyto LED žárovky jsou rozmístěny po místnosti a pomocí určité blikající frekvence odesílají informaci o svých souřadnicích. Pro určení vzdálenosti jsou používány principy RSSI, ToF, TDoA, nebo AoA. Mobilní zařízení používá světelné senzory k příjmu informace o souřadnicích a odhadu vzdálenosti hodnotou použitého principu. Poloha přijímacího zařízení je získána

prostřednictvím souřadnic, vzdálenosti, normálového vektoru mobilního telefonu a techniky trilaterace, či triangulace. K výpočtu normálového vektoru jsou používány senzory jako akcelerometr, gyroskop a magnetometr.

Výhodou technologie viditelného světla je nízká cena, vysoká přesnost a silná ochrana proti rušení od okolních vlivů. Je často využívána na místech, kde dochází k velkému rušení rádiového signálu, nebo kde nelze elektromagnetický signál využít. Hlavní nevýhodou je nutnost, aby zařízení mělo přímou viditelnost na vysílací LED žárovky [41].

## 3.4 Ostatní technologie

### Magnetické pole

Současné technologie magnetického pole se dělí na dvě skupiny. První metoda spočívá v umělém vytvoření magnetického pole pomocí cívek se známou polohou. Získáním přijaté síly magnetického pole na zařízení s magnetometrem je prostřednictvím techniky trilaterace odhadnuta poloha hledaného objektu. Výhodou je, že většina překážek toto pole neovlivňuje. Ustává problém mnohocestného šíření a není potřeba, aby na sebe přijímač a cívky viděly. Nevýhodou této metody jsou anomálie způsobené magnetickými poruchami ve vnitřních prostorách [42].

Tyto anomálie řeší druhá skupina, která je využívá k vytvoření mapy magnetických otisků. Spoléhá na fakt, že v budově, která obsahuje různé ocelové konstrukce, elektrická zařízení, dráty a trubky, dochází k výraznému kolísání magnetického pole. Díky tomu lze v ideálním případě na každém místě budovy naměřit různé hodnoty intenzity magnetického pole. Tyto intenzity jsou naměřeny pomocí magnetometru a následně lze technikou otisků odhadnout polohu zařízení. Přesnost lokalizace však silně závisí na rozmanitosti naměřených hodnot. Platí tedy, že čím více anomálií, tím pestřejší je výsledná mapa otisků [43].

### Počítačové vidění

Počítačové vidění používá k určení polohy kameru, kterou nese hledané zařízení. Touto kamerou je snímáno okolní prostředí a následně porovnáváno s již vytvořenými fotografiemi v databázi. Technologie tedy využívá princip nejlepší shody otisků. Je samozřejmě malá pravděpodobnost, že budou pořízené fotografie stejné, nebo velmi podobné, jako ty z databáze. Z toho důvodu jsou snímky z kamery nejprve analyzovány a následně jsou určeny specifické prvky, které obrázky odlišují. Tyto prvky by měly být pro dané místo určující (například dveře se v budově nachází několikrát a nejsou dobrým poznávacím prvkem).

Výhodou technologie počítačového vidění jsou nízké požadavky na implementaci, protože stačí pouze zařízení s kamerou. Jednou z hlavních nevýhod je použití pro navigaci mobilního zařízení. Uživatel by stále musel snímat okolní prostředí a zároveň takovým způsobem, aby zaznamenal specifické objekty. Další nevýhody souvisí především s technikou otisků. Ta zahrnuje zdlouhavé vytvoření databáze. Zároveň musí být v databázi dostatek fotografií, jinak nemusí být lokalizace vůbec provedena [44].

### 3.5 Porovnání

Následující tabulka porovnává technologie na základě využití v areálu Jihočeské univerzity. Ke každému případu přidává důvod, zda by se měla daná technologie využít, či nikoliv. Hlavním kritériem je především nákup dodatečného hardware a využití pro navigaci osob pomocí mobilních telefonů.

Technologie	Využití na JCU	Důvod
Wi-Fi	Ano	Ačkoliv nenabízí příliš vysokou přesnost a je značně závislá na okolním prostředí, nevyžaduje instalaci dodatečného hardware, jelikož se v areálu JU vyskytuje velký počet přístupových bodů.
Bluetooth	Ne	Je energeticky méně náročná, než technologie Wi-Fi, ale jinak má podobné vlastnosti a s nimi spojené nevýhody. Důležitým záporem je absence BLE beaconů, kterých by musel být pro pokrytí nakoupen vysoký počet.
ZigBee	Ne	Má podobné vlastnosti jako Bluetooth. Opět potřeba nákupu hardware, velkou nevýhodou je absence čipu kompatibilního s IEEE 802.15.4 v mobilních zařízeních.
RFID	Ne	Mimo nutnosti instalace RFID čteček je záparem i malý dosah.
UWB	Ne	Ultrawideband nabízí ze všech technologií využívajících rádiový signál nejlepší přesnost a nejmenší rušení okolními vlivy. V současné době ovšem mobilní zařízení nedisponují potřebným hardwarem a je tedy nezbytné dokoupit UWB přijímače i vysílače. Tato zařízení jsou navíc stále podstatně dražší než například BLE beacony. V budoucnu to ovšem může být ideální technologie pro indoor lokalizaci využívaná v areálu JU.
Ultrazvuk	Ne	Technologie využívající ultrazvuk nabízí poměrně vysokou přesnost a nepříliš drahé vybavení. Na druhou stranu vyžaduje, aby se mezi přijímačem a vysílačem nenacházely žádné překážky. Z toho důvodu by musela být tato zařízení instalována do každé místnosti.



Slyšitelný zvuk	Ne	Tato technologie nabízí relativně snadnou implementaci a vysokou přesnost. Jako vysílač může být použito jakékoliv zařízení, které dokáže vydávat zvuk na frekvenci mezi 16-20 MHz. Hlavní nevýhoda vyplývá z názvu technologie. Bylo by zapotřebí mít v různých oblastech budovy nainstalováno několik zařízení, která například přehrávají hudbu. Na akademické půdě, kde často probíhá výuka, je to však nemístné.
Infračervené světlo	Ne	Infračervené světlo, podobně jako ultrazvuk, nabízí relativně vyšší přesnost lokalizace, avšak opět ke svému využití požaduje přímou viditelnost mezi vysílačem a přijímačem.
Viditelné světlo	Ne	Technologie viditelného světla nabízí vyšší přesnost, nízkou cenu a není náchylná na rušení okolními vlivy. Nevýhodou pro použití na Jihočeské univerzitě je opět potřeba přímé viditelnosti přijímacích a vysílacích zařízení a dále nákup potřebného hardwaru do všech místností.
Magnetické pole	Ano	Silně závisí na okolním prostředí. Nicméně budovy v areálu JU obsahují vysoký počet různých objektů (zejména kovových konstrukcí), které v budově vytvoří anomálie. Na různých místech budovy tedy lze naměřit různé intenzity magnetického pole a tím získat jedinečný otisk daného místa. K lokalizaci tedy bude potřeba pouze mobilní zařízení.
Počítačové vidění	Ne	Přestože nevyžaduje nákup dalšího hardwaru a k lokalizaci by bylo zapotřebí pouze mobilní zařízení, závisí úspěšnost této technologie na interakci uživatele. Je vyžadováno, aby uživatel pro určení jeho pozice používal mobilní kameru. Pokud špatně nasnímá okolní prostředí, bude lokalizace neúspěšná.

Tabulka 3.1: Porovnání technologií podle využitelnosti v areálu JU.

# 4 Pokusná měření pro výběr lokalizační techniky a technologie

V předešlé kapitole byly na základě použitelnosti v prostorách Jihočeské univerzity vybrány k testování technologie Wi-Fi a technologie magnetického pole. U první jmenované může být k lokalizaci využito nejen určení vzdálenosti mezi mobilním zařízením a přístupovým bodem, ale i vytvoření mapy otisků na základě těchto údajů. Při výběru principu určení vzdálenosti je brán ohled na snadnou implementaci a použitelnost pro většinu typů mobilních telefonů. Principy založené na čase jsou nežádoucí kvůli potřebě synchronizace. Princip úhlu příchodu signálu zase vyžaduje přítomnost několika antén na přijímacím zařízení. K výpočtu vzdálenosti je tedy nejvhodnější použít princip RSSI. Dle tohoto výběru je z lokalizačních technik možnost použití trilaterace, blízkosti, nebo otisků. Blízkost však nenabízí dostatečnou přesnost, jelikož tento údaj roste zároveň s počtem přístupových bodů. S Wi-Fi technologií je tedy možné využít dvě techniky:

- Technika trilaterace s využitím principu RSSI
- Technika nejlepší shody otisků s využitím principu RSSI

Pro magnetické pole je vybrán princip, ve kterém není potřeba dalších zařízení a lokalizace probíhá pouze pomocí telefonu. Využívá se tedy anomálií, které způsobují odlišné hodnoty intenzity magnetického pole na různých místech. Z toho důvodu je pro tuto technologii použita:

- Technika nejlepší shody otisků s využitím hodnot magnetického pole

Výpočet pohybu zařízení je technika, která ke své funkčnosti vyžaduje pouze mobilní zařízení a jeho senzory. V následující části bude testována přesnost této techniky a následně míra její chybovosti při narůstající vzdálenosti.

Tato kapitola má několik účelů. Nejprve pro Wi-Fi technologii vybrat techniku, která nabízí vyšší přesnost a spolehlivost. Dále pro technologii magnetického pole určit, zda se ve vybrané budově Jihočeské univerzity nachází dostatek anomálií a je tedy možné použít techniku nejlepší shody otisků. Na závěr pomocí testů určit, zda může být k lokalizaci využita technika výpočtu pohybu zařízení.

## 4.1 Hodnoty síly signálu

### Síla signálu na různých mobilních zařízeních

Jedním z hlavních parametrů při rozhodování o použitelnosti Wi-Fi technologie pro indoor lokalizaci je, aby naměřené hodnoty síly signálu na všech mobilních zařízeních byly co nejvíce podobné. To znamená, že pokud se naměřené hodnoty z jednoho typu telefonu budou výrazně lišit od hodnot jiného typu, není tento princip vhodný pro navigační aplikaci. K pokusným měřením jsou vybrána následující zařízení:

	<b>Doogee X5</b>	<b>Xiaomi Redmi Note 4</b>	<b>Hammer Energy 3G</b>
Operační systém	Android 4.3 (Jelly Bean)	Android 7.0 (Nougat)	Android 6.0 (Marshmallow)
Procesor	Quad-core 1.3GHz ARM Cortex-A7	Octa-core 2.0GHz Cortex-A53	Quad-Core 1.45GHz ARM Cortex-A53
RAM	1GB	3GB	2GB
WLAN	802.11 a/b/g/n/ac	802.11 a/b/g/n	802.11 b/g/n

Tabulka 4.1: Mobilní telefony a jejich základní parametry. Tato zařízení jsou použita pro měření rozdílů síly signálu.

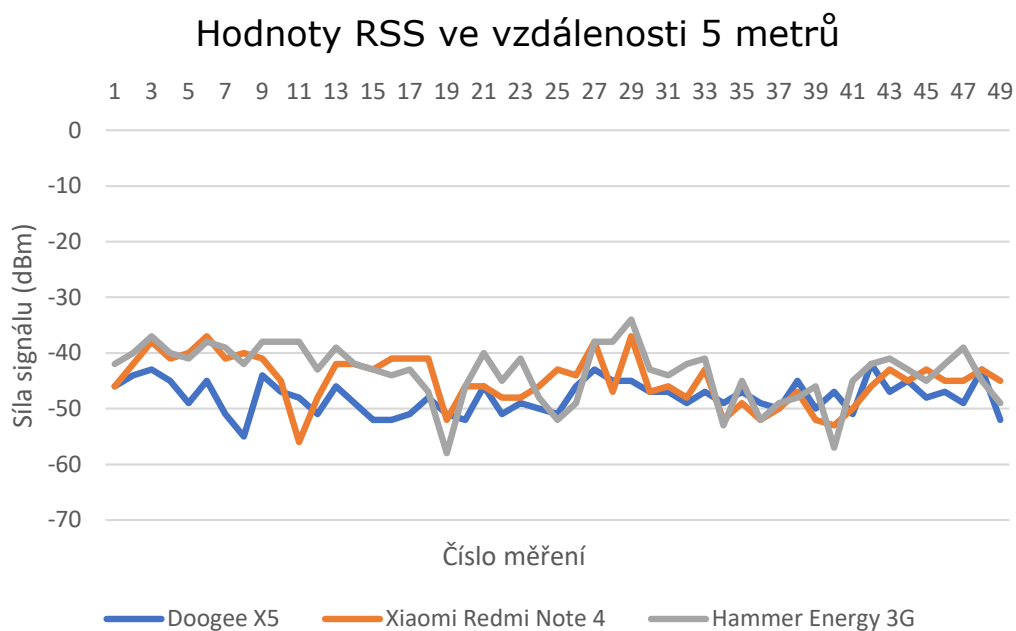
U všech mobilních telefonů je měření prováděno ve stejný čas, pod stejným úhlem vzhledem k přístupovému bodu a ve stejné vzdálenosti od tohoto bodu. Mezi přístupovým bodem a mobilními zařízeními je přímá viditelnost a nenachází se tedy mezi nimi žádné překážky. Měření hodnoty síly signálu je prováděno na čtyřech různých pozicích ve vzdálenostech 5, 10, 15 a 20 metrů od přístupového bodu. Na každé pozici je měření provedeno padesátkrát a následně je z těchto hodnot vypočten medián.

<b>Vzdálenost (m)</b>	<b>Doogee <math>\tilde{x}</math> (dBm)</b>	<b>Xiaomi <math>\tilde{x}</math> (dBm)</b>	<b>Hammer <math>\tilde{x}</math> (dBm)</b>
5	48	45	43
10	56	55	54
15	55	55	54
20	68	65	65

Tabulka 4.2: Tabulka znázorňující vypočítané hodnoty mediánů u jednotlivých zařízení v určité vzdálenosti a stejném časovém intervalu.

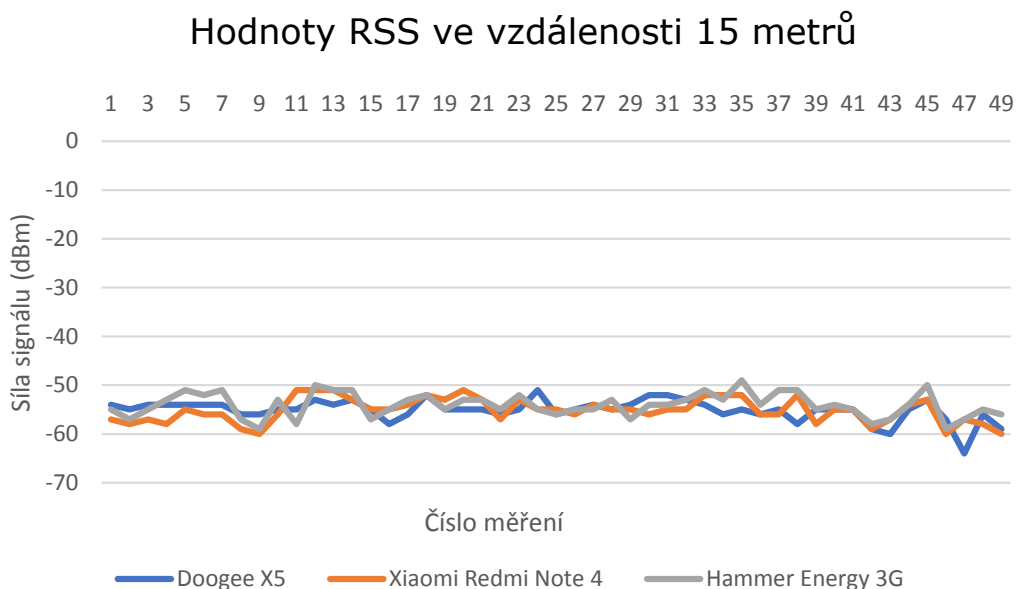
Z výsledků tabulky 4.2 je patrné, že na různých mobilních zařízeních jsou ve stejném časovém intervalu naměřeny různé hodnoty síly signálu. Největším rozdílem jsou hodnoty mediánů mezi telefonem Doogee X5 a Xiaomi Redmi Note 4 ve vzdálenosti 5 metrů od přístupového bodu. Zajímavým úkazem je narůstající podobnost mediánů od 5 do 15 metrů a zároveň velmi podobné hodnoty u dvou různých vzdáleností. Podrobnější výsledky jsou znázorněny v následujícím grafu.

Graf na obrázku 4.1 lépe vyobrazuje drobné rozdíly a především výkyvy v RSS hodnotách napříč zařízeními v jednom okamžiku měření. Právě vzdálenost 5 metrů vykazuje největší rozdíl nejen mezi hodnotami jednoho zařízení, ale i mezi dvěma zařízeními. Zatímco ve dvacátém měření na telefonu Hammer Energy byla hodnota síly signálu -58 dBm, o devět měření později tato hodnota stoupla na -34 dBm. Maximální rozdíl napříč dvěma zařízeními v jednom momentě je dvanácté měření. Rozdíl RSS hodnot mezi zařízeními Xiaomi a Hammer je 18dBm.



Obrázek 4.1: Graf zobrazující průběh RSS hodnot na třech zařízeních vzdálených 5 metrů od přístupového bodu.

Nejlépeších výsledků je dosaženo při měření ve vzdálenosti 15 metrů. Jak ukazuje obrázek 4.2, hodnoty napříč zařízeními byly v jednotlivých měřeních velmi podobné. Maximálního rozdílu dosahuje mobilní telefon Doogee mezi 25. a 48. měřením s 13 dBm. Dvakrát mezi dvěma zařízeními dochází k rozdílu 7 dBm.



Obrázek 4.2: Graf zobrazující průběh RSS hodnot na třech zařízeních vzdálených 15 metrů od přístupového bodu.

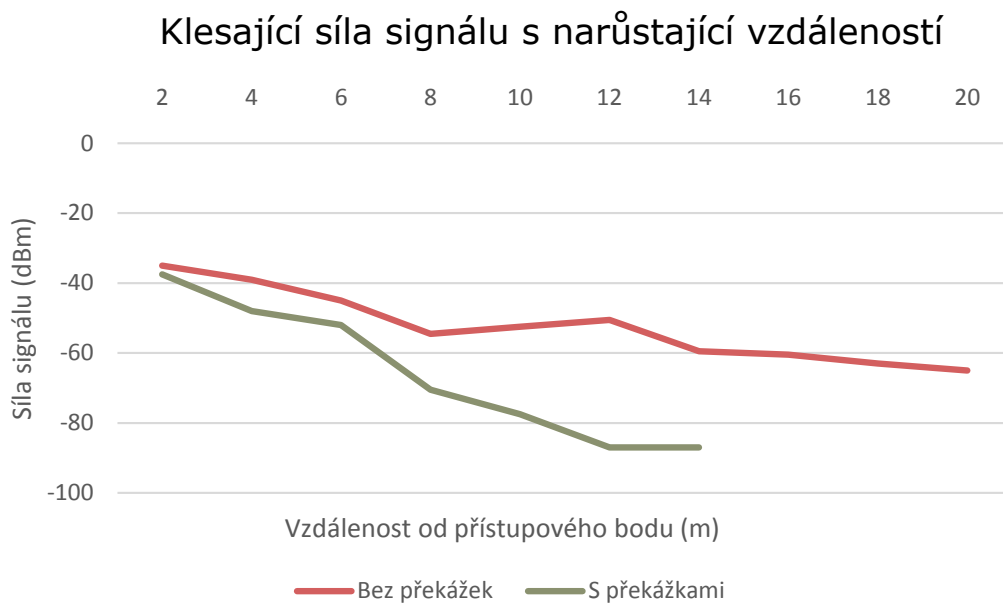
Výsledky měření ukazují, že ačkoliv jsou v určitých momentech rozdíly naměřených RSS hodnot na různých zařízeních rozdílné, v delším časovém intervalu se hodnoty podobají. Měření může být ovlivněno několika vlivy. Mezi hlavní patří rozdílné čipsety, umístění Wi-Fi antén v zařízení, nebo okolní prostředí. V době měření je v blízkosti mobilních telefonů přítomna osoba měřitele, která může tyto hodnoty také ovlivnit. Pro obecnější výsledky by bylo zapotřebí použít větší množství mobilních zařízení, nebo mezi telefony a přístupový bod umístit překážky.

Z tohoto zkoumání lze vyvodit, že Wi-Fi technologii lze použít pro lokalizační aplikaci napříč různými mobilními telefony.

### Vztah mezi narůstající vzdáleností a silou signálu

Jedním z hlavních kritérií při výběru mezi technikou trilaterace a nejlepší shody otisků je vztah mezi narůstající vzdáleností a silou signálu. Pokud tento růst není lineární, dochází při přepočtu na vzdálenost k velkým odchylkám. Zároveň je důležité, aby rozdíl nárůstu RSS mezi měřením s překážkami a bez překážek byl minimální. V budovách se často nachází velký počet zdí a jiných překážek. Při lokalizaci mobilního zařízení však nemůžeme určit, kolik překážek se mezi telefonem a přístupovým bodem nachází.

Měření jsou prováděna na dvou místech s různými podmínkami. Hodnoty síly signálu jsou získávány od vzdálenosti 2 do 20 metrů a měření je prováděno každé dva metry desetkrát. Z těchto hodnot je poté vypočten medián. V prvním případě jsou RSS hodnoty měřeny v místnosti, kde se mezi mobilním telefonem a Wi-Fi přístupovým bodem nenachází žádné překážky. Ve druhé situaci postupně roste počet překážek mezi mobilním zařízením a přístupovým bodem. Ve vzdálenosti dvou metrů slouží jako překážka dřevěné dveře. Následně se v osmi a dvanácti metrech nachází 40 cm široké zdi.



Obrázek 4.3: Klesající síla signálu s narůstající vzdáleností.

Na obrázku 4.3 je možné sledovat několik údajů. Nejpatrnějším je znatelný rozdíl síly signálu při přidání překážek mezi mobilní telefon a přístupový bod. Zatímco do šesti metrů vzdálenosti je průměrný rozdíl hodnot přibližně 6 dBm, od osmi metrů se tento rozdíl začíná zvyšovat a ve vzdálenosti 12 metrů je roven 37 dBm. Od 14 metrů již nebyl přístupový bod viditelný a měření zde tedy končí. To je nejspíše způsobeno narůstajícím počtem překážek a nedostatečně výkonným přístupovým bodem.

Dalším údajem je lineárnosti klesání vzhledem k narůstající vzdálenosti. Již v předchozím měření bylo možné sledovat, že mezi vzdáleností 5 a 10 metrů byly minimální rozdíly síly signálu. Tentokrát je dokonce hodnota u měření bez překážek mezi 8 a 12 metry vyšší. Ve výsledku je však toto klesání až na jednu odchylku poměrně lineární. Hlavním problémem je tedy měření s překážkami, kdy s narůstající vzdáleností dochází k nerovnoměrnému klesání síly signálu.

Pro tato zkoumání je využit pouze jeden mobilní telefon. Pro obecnější výsledky by bylo zapotřebí využít větší počet zařízení. Zkoumání vlivu podle určitého počtu překážek by také mohlo být přínosné. V reálných podmínkách se však může, stejně jako v tomto zkoumání, měnit počet překážek libovolně.

Výsledkem tohoto zkoumání je závěr, že pro Wi-Fi technologii není ve vnitřních prostorách vhodné využít metodu trilaterace.

## Změny síly v čase

Dalším parametrem pro indoorovou lokalizaci pomocí Wi-Fi technologie je neměnnost síly signálu v čase. To znamená, že pokud na stejném místě naměříme hodnoty RSS ráno a večer, budou tyto hodnoty maximálně podobné. Pro tento účel jsou v budově C měřeny hodnoty síly signálu ze tří různých přístupových bodů. Tato měření jsou prováděna ze stejného místa každé dvě hodiny, vždy po dobu jedné minuty. Z výsledků je vypočítán medián.

Čas	eduroam 08:81:f4:5b:bb:c4	JU_wireless 08:81:f4:5b:bb:c0	eduroam 08:81:f4:5b:bb:c3
9:00	-49	-48	-57
11:00	-48	-49,5	-57
13:00	-48	-48	-56
15:00	-48	-49	-58

Tabulka 4.3: Tabulka zobrazující rozdíly mezi hodnotami síly signálu během dne. Tyto hodnoty jsou měřeny jedním zařízením vždy ze stejné pozice.

Výsledky z tabulky 4.3 ukazují, že hodnoty síly signálu se napříč dnem téměř neliší. Nejvyšší naměřený rozdíl je u přístupového bodu eduroam(08:81:f4:5b:bb:c3) mezi 13:00 a 15:00. Tento rozdíl je roven 2 dBm. V obecném měřítku lze tedy konstatovat, že přesnost lokalizace zařízení pomocí RSS otisků by měla být nezávislá na denní době.

## 4.2 Hodnoty magnetického pole

### Výběr hodnot otisku magnetického pole

Magnetometrem, který měří magnetické pole na mobilním zařízení, mohou být získány pouze tři hodnoty. Hodnoty X a Y, které značí složky vektoru ve směru k severu, respektive k východu, a hodnota Z, jenž označuje vertikální složku vektoru magnetického pole. Z těchto hodnot lze vypočítat celkovou intenzitu vektoru magnetického pole (H).

Následující část zjišťuje, které z těchto hodnot lze využít jako jednoznačný otisk. To znamená, že by se vybrané hodnoty měly při změně úhlu nebo směru lišit minimálně. Jsou vybrány čtyři různé rotace zařízení - 0° (horizontální poloha), 30°, 60° a 90° (vertikální poloha). Po změření údajů ze všech úhlů je zařízení otočeno o 180° ve směru hodinových ručiček a hodnoty jsou měřeny znovu. Tato měření jsou v tabulce označena jako „otočeno“. Údaje z magnetometru jsou na stejné pozici získávány po dobu deseti sekund. Z výsledků je vypočítán medián.

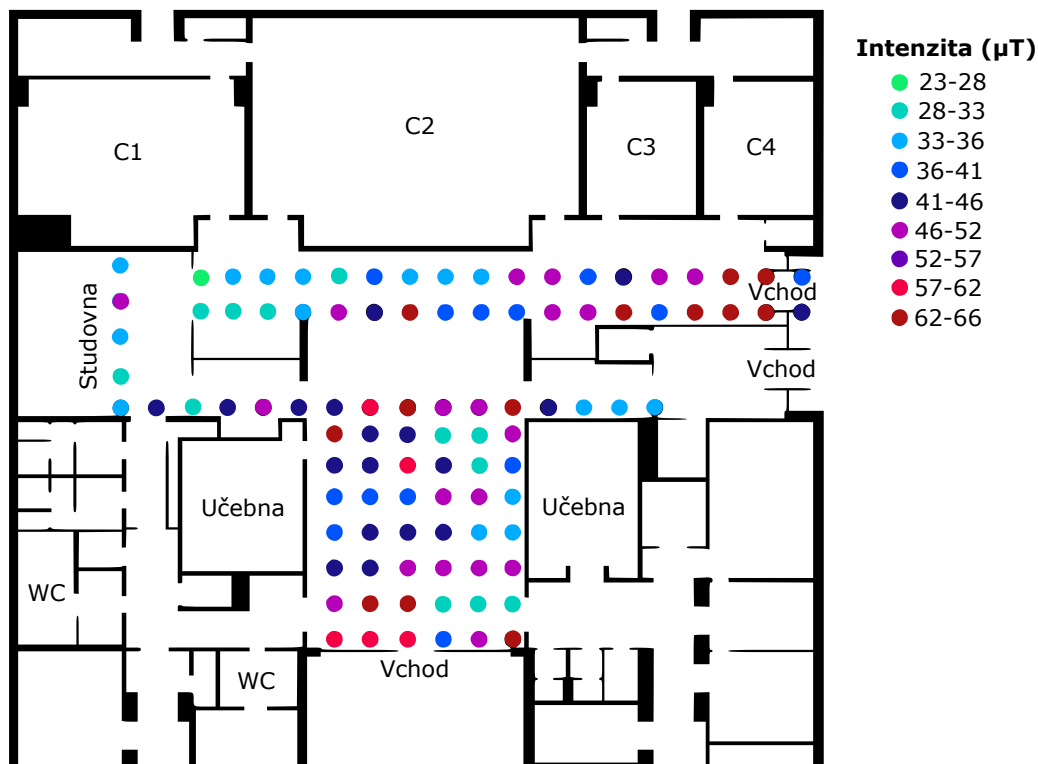
	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>	<b>Intenzita</b>
0°	-21.348	18.612	-59.074	65.286
30°	-16.397	-13.697	-61.775	65.385
60°	-11.297	-32.402	-57.275	66.709
90°	-10.247	-61.328	-26.675	66.481
0° (otočeno)	15.551	-26.947	-59.074	66.696
30° (otočeno)	16.151	-54.826	-38.374	68.626
60° (otočeno)	17.051	-64.097	-14.673	67.949
90° (otočeno)	17.352	-59.762	15.025	64.330

Tabulka 4.4: Tabulka zobrazující data získaná z magnetometru.

Z tabulky 4.4 je patrné, že pouze intenzita magnetického pole může být použita jako jednoznačný otisk určitého místa. Největší rozdíl mezi mediány intenzit je roven  $4,294 \mu T$ , Pokud jsou však všechny mediány zprůměrovány, je získána intenzita  $66,432 \mu T$ . Této hodnotě jsou okolní intenzity podstatně blíže a maximální rozdíl je  $2,194 \mu T$ . Při vytváření magnetických otisků je tedy optimální počítat intenzitu několikrát v různých úhlech držení telefonu a z těchto výsledků vypočítat střední hodnotu.

### Jednoznačnost magnetických otisků

Důležitým faktorem pro použití techniky otisků magnetického pole je různorodost naměřených hodnot napříč budovou. K těmto účelům je na několika místech v přízemí budovy C měřena intenzita magnetického pole. Aby byla získána skutečná střední hodnota daného místa, je na každé pozici prováděno měření mobilním zařízením směřujícím na 4 strany budovy. Vždy pod úhlem 0° a 90° po dobu 10 sekund. Dohromady je tedy na každém místě získána intenzita osmkrát. Z výsledků je následně vypočítán medián.



Obrázek 4.4: Naměřené hodnoty intenzity magnetického pole v budově C.

Na obrázku 5.1 je možné vidět, že se hodnoty, vzdálené od sebe 1,8 metrů, často liší. Tím je v určitém rádiu každé místo jedinečné. Na druhou stranu existují místa, kde se především v jedné řadě nacházejí pouze hodnoty z jednoho rozmezí. Největším problémem je ale skutečnost, že se stejné hodnoty nacházejí i několik desítek metrů od sebe.

Jednou z možností, jak vyřešit tento problém, je použít tuto technologii společně s jinou a magnetické pole tak využít pouze ke zpřesnění výsledné pozice. Další možností je sledovat intenzity v určitém čase, ve kterém se zařízení pohybuje. Výslednou pozici následně určit až z tohoto vytvořeného vzoru.

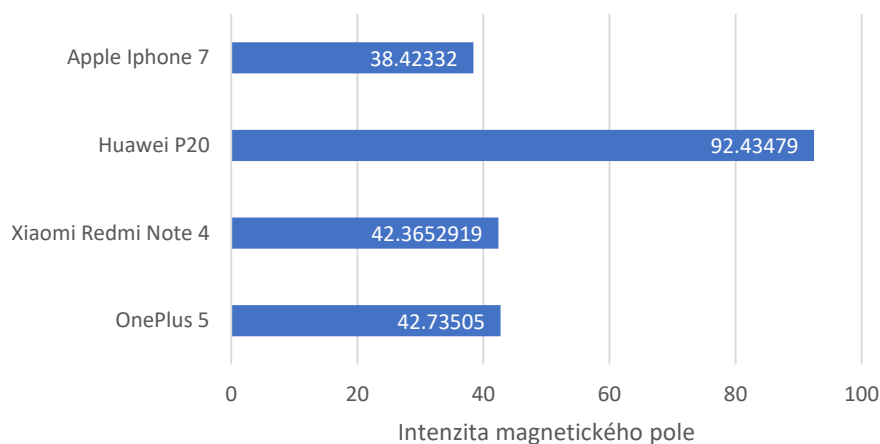
### Intenzita magnetického pole na různých zařízeních

Dalším důležitým faktorem pro použití technologie magnetického pole je naměření stejných hodnot na vícero zařízeních. Jsou vybrána čtyři zařízení, kterými je na stejné pozici po dobu 10 sekund získávána intenzita magnetického pole:

- Xiaomi Redmi Note 4 - magnetometr YAS537
- OnePlus 5 - magnetometr AK09911
- Huawei P20 Lite - magnetometr AKM09918
- Apple iPhone 7 - magnetometr AK09911



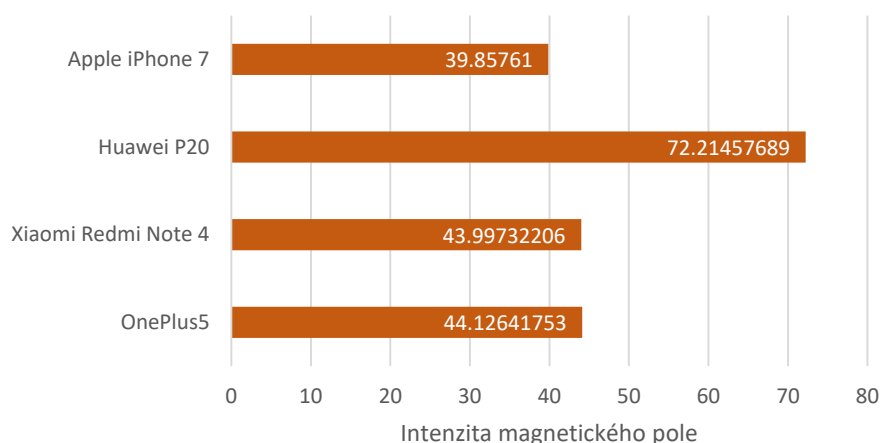
### Intenzita magnetického pole na různých zařízeních



Obrázek 4.5: Naměřená intenzita magnetického pole na čtyřech zařízeních ze stejné pozice.

Výsledky z obrázku 4.5 ukazují, že naměřená intenzita magnetického pole se napříč zařízeními liší. Zatímco mezi telefony Xiaomi a OnePlus je rozdíl minimální, zařízení od Applu ukazuje hodnotu o  $4 \mu T$  nižší, přestože má stejný typ magnetometru, jako OnePlus 5. Huawei P20 vykazuje naprosto odlišné hodnoty. To je nejspíše způsobeno nezkalibrovaným magnetometrem. Po pokusu o kalibraci však toto zařízení ukazuje, že již zkalibrované je. Nutno podotknout, že Apple i Xiaomi také původně ukazovaly naprosto odlišné hodnoty, než které jsou zobrazeny v tabulce a bylo nutné jejich magnetometry nejprve zkalibrovat.

### Intenzita magnetického pole po otočení zařízení

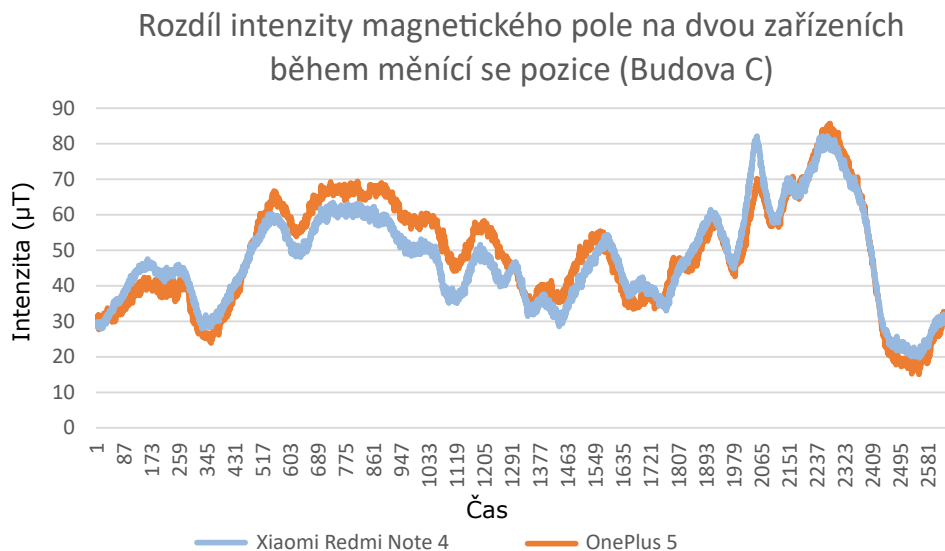


Obrázek 4.6: Naměřená intenzita magnetického pole po otočení zařízení.

Druhé měření je prováděno po otočení všech zařízení o  $180^\circ$  po směru hodinových ručiček. Na obrázku 4.6 je možné vidět, že na stejné pozici, pouze po otočení telefonu, se hodnoty liší přibližně o  $1,5 \mu T$ . U nekalibrovaného zařízení je tato hodnota o  $20 \mu T$  nižší.

Dalším úkazem, který lze z těchto měření vyčíst, jsou rozdíly naměřené intenzity v intervalu deseti sekund. Například v prvním případě je u telefonu Xiaomi získána ve čtvrté sekundě měření hodnota  $45,11 \mu T$ . O sedm desetin sekundy později je intenzita rovna  $39,63 \mu T$ . U zařízení OnePlus je rozdíl ve čtyřech sekundách měření dokonce  $7,22 \mu T$ . Nižší rozdíly v časovém intervalu jsou získány na zařízeních Huawei a Apple. Zde je naměřena difference pouze  $2,49$ , respektive  $2,18 \mu T$ .

Z předchozích pokusů je zjištěno, že nejpodobnější hodnoty jsou získány na zařízeních Xiaomi a OnePlus. Je testováno, jak se liší intenzita magnetického pole, pokud se oba telefony ve stejný čas pohybují po stejné trase.



Obrázek 4.7: Rozdíl v intenzitě magnetického pole na dvou zařízeních během měnící se pozice.

Ačkoliv je v předchozím měření mezi těmito zařízeními naměřena podobná hodnota, výsledek z grafu na obrázku 4.7 ukazuje, že při pohybu se tyto hodnoty liší a to v průměru o  $4,96 \mu T$ . Největší rozdíl v jednom momentě je roven  $13,32 \mu T$ .

## Shrnutí

Výsledkem předchozích měření je zjištění, že technologie využívající magnetické pole není příliš vhodná pro použití k indoorové lokalizaci. Je to dáno především rozdílnými hodnotami napříč zařízeními, potřebou kalibrace magnetometru, rozdíly v naměřené intenzitě při rotaci zařízení a v neposlední řadě vysokou diferencí mezi získanými hodnotami u pohybujících se telefonů.

## 4.3 Výpočet pohybu zařízení

### Detekce kroků

Detekce kroků je jedním ze dvou hlavních parametrů pro použití techniky výpočtu pohybu zařízení. K určení, zda uživatel vykonal krok, se využívá senzor akcelerometr.

Prvním problémem, který se naskytá ještě před testem detekce, je stanovení délky kroku uživatele. Tato délka závisí především na výšce osoby. Proto by ideálně musel být tento údaj od uživatele zjištěn. Na druhou stranu ani známá délka kroku nezaručí, že uživatel bude vykonávat pouze konstantně dlouhý krok.

Druhým problémem je samotná detekce. Velký počet vyzkoušených aplikací pro detekci kroků počítá s umístěním senzoru v kapse u kalhot, případně ve formě chytrých hodinek na ruce. Uživatel využívající lokalizační aplikaci nicméně většinu času drží telefon takovým způsobem, aby viděl na obrazovku. V takovém případě je pro zaznamenání kroku potřeba implementovat vyšší citlivost. V momentě, kdy uživatel vloží zařízení zpět do kapsy, se může stát, že bude vypočítán mnohem vyšší počet kroků, než uživatel skutečně vykonal.

Pro testování detekce je určena délka kroku 0,6m. Jsou testovány dva typy pohybu. V prvním případě je z počáteční pozice do vzdáleností 6, 12 a 18 metrů proveden potřebný počet kroků. Každý krok má vzdálenost přibližně 60 centimetrů, čehož je dosaženo pomocí předem vyznačených bodů. Mobilní zařízení je po celou dobu drženo v ruce v horizontální poloze.

Reálná vzdálenost	Reálný počet kroků	Průměrná naměřená vzdálenost	Průměrný naměřený počet kroků
6 m	10	4,68 m	7,8
12 m	20	9,24 m	15,4
18 m	30	14,04 m	23,4

Tabulka 4.5: Tabulka představující přesnost detekce kroků a vzdálenosti při jednoznačné délce kroku.

Ve druhém případě je testování prováděno pouze s bodem určujícím konečnou vzdálenost. Zařízení je opět drženo vertikálně, avšak tentokrát se testovaná osoba pohybuje přirozeně a délka kroku je předem neznáma.

Výsledky z tabulek 4.5 a 4.6 vypovídají o tom, že chyba narůstá s přibývajícím vzdáleností. Přesto se u prvního pokusu držela tato chybovost pod hodnotou 4 metry. Ze druhé tabulky je však patrné, že při větší délce kroku, než která je stanovena (0,6 m), výrazně klesá přesnost určení. To je způsobeno sníženým počtem kroků potřebných k dosažení cílové vzdálenosti.

Řešením pro spolehlivější detekci v případě známé délky kroku se nabízí zvýšení citlivosti. Tím by mohlo být lépe určeno, zda byl krok vykonán. Bohužel už

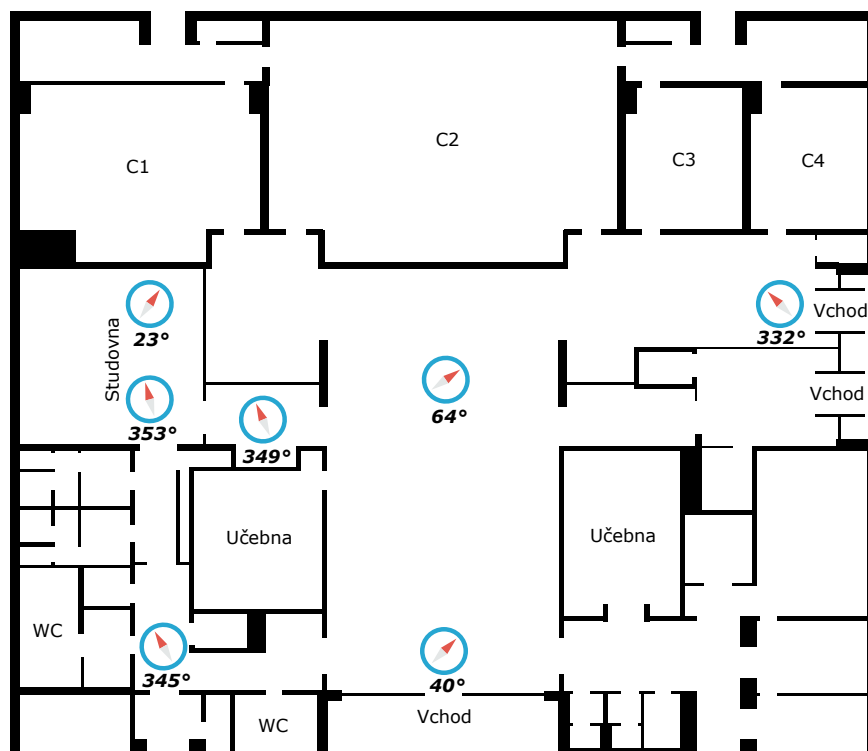
Reálná vzdálenost	Přibližný počet kroků	Průměrná naměřená vzdálenost	Průměrný naměřený počet kroků
6 m	7	2,04 m	3,4
12 m	15	4,8 m	8
18 m	24	9,68 m	16,13

Tabulka 4.6: Tabulka představující přesnost detekce kroků a vzdálenosti při nejednoznačné délce kroku.

v předchozích pokusech byla tato citlivost výrazně zvýšena, aby mohlo být detekováno i zařízení, které nevykonává typický houpavý pohyb. Při zvýšení senzitivity naopak dochází k detekci kroku už jen při minimálním pohybu telefonu.

## Určení směru

K určení směru pohybu je zapotřebí kompas. Mobilní zařízení tedy musí obsahovat magnetometr. V budovách s různými kovovými konstrukcemi se ovšem předpokládá kolísání magnetického pole. Toho je využito pro použití otisků magnetického pole, avšak přesnost kompasu je tím snížena. K otestování, jak velké rozdíly kompas ukazuje, je využito několik míst v budově C. Na každém z těchto míst je zařízení nastaveno tak, aby ukazovalo přímo na severní část budovy. Kompas je na začátku měření zkalibrován.



Obrázek 4.8: Hodnoty naměřené kompasem směřujícím na stejnou světovou stranu v různých místech budovy C.

Obrázek 4.8 ukazuje, že rozdíly mezi naměřenými hodnotami pomocí kompasu jsou napříč budovou výrazně rozdílné. Ve studovně je na bodech vzdálených 8 metrů naměřen rozdíl  $26^\circ$ . Maximální rozdíl činí  $88^\circ$ . Pro přesnější výsledky by bylo nezbytné provést měření na více bodech budovy. Nicméně jako obecný přehled o tom, že rozdíly jsou opravdu veliké, toto měření postačí.

Z výsledků předchozích měření je zjištěno, že technika výpočtu pohybu zařízení není ideální pro indoorové pozicování. Mohou za to rozdílné hodnoty naměřené kompasem i problém s detekcí kroků a jejich vzdáleností.

# 5 Představení systému

Na základě rešeršní části a pokusných měření je pro lokalizační systém vybrána technologie Wi-Fi. Je u ní využita technika nejlepší shody otisků. Aplikace je tvořena pro systém Android.

## 5.1 Tvorba otisků

Základem pro vybranou technologii je vytvoření mapy otisků. K tomuto účelu je vytvořena samostatná aktivita, do které se nahrává mapa podlaží. Mapy jsou vyžadovány ve formátu SVG. Ke zpracování a vykreslení mapy slouží knihovna SVGMapView. Pro výběr pozice ke změření aktuálního otisku může být použito kliknutí na příslušné místo na mapě, nebo zapsání souřadnic do políček v horní části obrazovky. Poté je umožněno spustit měření Wi-Fi otisku.

V případě Wi-Fi je měření všech dostupných přístupových bodů s jejich RSS hodnotami prováděno desetkrát, avšak ke zkrácení potřebného času k tvorbě mapy otisků může být tento počet změněn v nastavení. U jednotlivých přístupových bodů je z těchto hodnot vypočten medián. Přístupové body s hodnotou síly signálu nižší než -80 dBm jsou vynechány. Následně jsou s příslušnými souřadnicemi uloženy do databáze vybrané BSSID přístupových bodů s jejich hodnotami RSS. Do databáze je společně s otisky ukládán i název vybrané mapy.

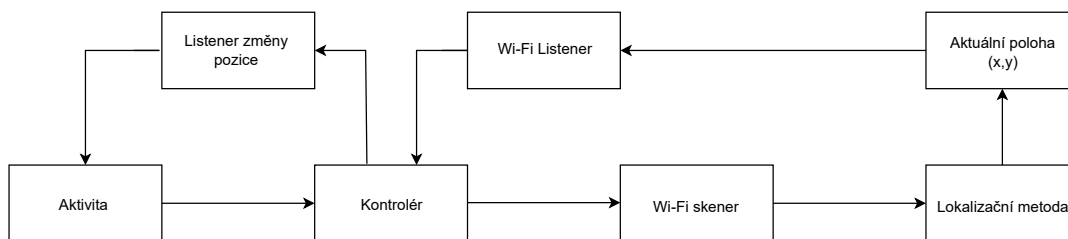
## 5.2 Lokalizační část

Lokalizace mobilního zařízení probíhá podle nastavených parametrů. V nastavení aplikace je možné vybrat metodu techniky otisků, počet  $K$  (množství vybraných nejbližších otisků) a počet přístupových bodů, které budou po získání dat z Wi-Fi skeneru porovnány s daty uloženými.

Při otevření příslušné aktivity je spuštěno skenování Wi-Fi sítí. Po obdržení jsou údaje porovnány s údaji získanými z databáze. Pomocí metody nejbližšího souseda (NN) je vybrána mapa podlaží. Následně je tato mapa načtena a aktuální poloha zařízení je nastavena podle vybrané metody lokalizace.

V nastavení je umožněno vybrat si mezi třemi metodami lokalizace techniky nejlepší shody otisků. Jsou jimi metoda nejbližšího souseda (NN),  $K$ -nejbližšího souseda (KNN), nebo váženého počtu  $K$ -nejbližších sousedů (WKNN). Počet  $K$  je automaticky nastaven na hodnotu 5 a počet vybraných přístupových bodů je nastaven na všechny.

Pro všechny metody je nejprve spočtena míra podobnosti oproti datům z databáze (vzorec 2.11). V případě metody NN jsou vybrány souřadnice, na kterých mají Wi-Fi informace nejnížší míru podobnosti. Metoda KNN vybere  $K$  nejpodobnějších souřadnic a z nich vypočítá průměr, který představuje výslednou polohu. Z důvodu možných odlehlých hodnot lze využít metodu WKNN, která vypočítaný průměr souřadnic mění podle příslušné podobnosti. Poloha je aktualizována v závislosti na intervalu mezi přijetím nových dat z Wi-Fi skeneru.



Obrázek 5.1: Architektura lokalizační části systému.

- Aktivita - Okno, které zobrazuje aktuální polohu zařízení na určitém podlaží.
- Kontrolér - Získává souřadnice současné pozice a odesílá je aktivitě.
- Wi-Fi skener - Periodicky skenuje okolní Wi-Fi síť.
- Lokalizační metoda - Používá vybranou metodu techniky otisků k výpočtu souřadnic.

# 6 Testování

Tato část se zabývá testováním vytvořeného systému. Jsou prováděny různé průzkumy, které se snaží určit, jak dosáhnout vyšší přesnosti, či jaký vliv mají na výslednou přesnost změny polohy, nebo odstranění přístupových bodů. Všechny testy jsou prováděny v prvním podlaží budovy C a ve třetím podlaží Biologického centra AV.

## 6.1 Vytvoření otisků

K lokalizaci je nejprve nutné vytvořit mapu Wi-Fi otisků. V budově AV jsou od sebe otisky jednoho typu vzdáleny 60 centimetrů. V budově C je tato vzdálenost rovna 180 centimetrům. Tyto dva různé typy vzdáleností jsou vybrány pro určení, zda přesnost lokalizace závisí na počtu vytvořených otisků.

Tvorba otisků probíhá na předem vyznačených bodech. Wi-Fi otisk je na každé pozici skenován desetkrát. Doba vytvoření otisku na jednom místě závisí na intervalu Wi-Fi skenu daného zařízení a na počtu nastavených skenování. U měření Wi-Fi otisků jsou ukládány pouze hodnoty vyšší než -80 dBm. Z výsledků jsou uloženy mediánové hodnoty.

Před reálným tvořením je nejprve testováno, do jaké míry se otisky vytvořené na různých zařízeních liší. Pro tento účel je použito pět různých zařízení: Hammer Energy 3G, Doogee X5, Xiaomi Redmi Note 4, OnePlus 5 a Lenovo Tab 2. Otisky jsou na všech zařízeních získávány ze stejné pozice. U každého zařízení je nejprve vypočten průměr nalezených přístupových bodů. Dále je ze všech zařízení vypočtena průměrná hodnota síly signálu z náhodně vybraného přístupového bodu, který zaznamenala všechna zařízení (není vybrán nejsilnější, ani nejslabší signál). Z této hodnoty je následně vypočten rozdíl oproti skutečné hodnotě z jednoho zařízení.

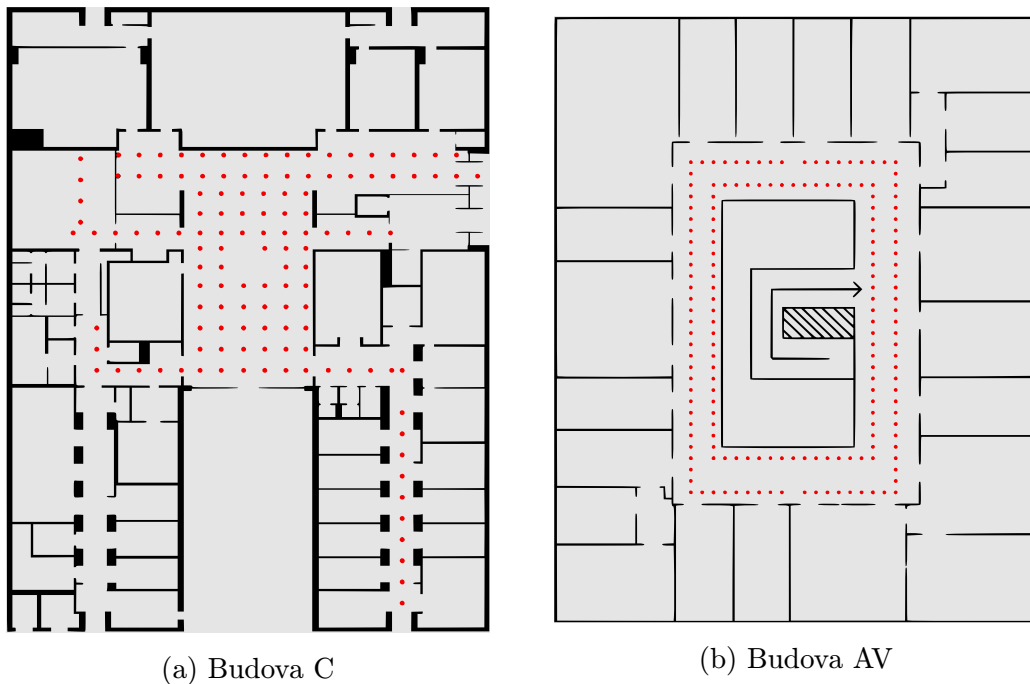
Zařízení	Průměrně nalezených AP	Rozdíl od průměrného RSS ze stejného BSSID (dBm)
Hammer	14	5
Doogee	15	6
Xiaomi	20	2
OnePlus	19	1
Lenovo	17	2

Tabulka 6.1: Tabulka zobrazující průměrnou hodnotu nalezených přístupových bodů a rozdíl v naměřené hodnotě síly signálu na jednotlivých zařízeních.



Tabulka 6.1 ukazuje, že průměr naměřených přístupových bodů se na různých zařízeních liší. Maximální rozdíl je mezi zařízeními Hammer a Xiaomi. Hammer zaznamenal průměrně o 6 přístupových bodů méně. Podobné odchylky jsou naměřeny i v rozdílu od průměrné síly signálu z jednoho přístupového bodu.

K vytvoření otisků je vybráno zařízení, které mělo nejvyšší průměrnou hodnotu nalezených přístupových bodů, tedy Xiaomi Redmi Note 4. V obou budovách jsou otisky získávány pouze na chodbách a zároveň v místech, do kterých je volný přístup. V budově C je vytvořeno 128 Wi-Fi otisků a v budově AV 178 otisků. Výsledky jsou znázorněny na obrázku 6.1.



Obrázek 6.1: Otisky vytvořené v prvním podlaží budovy C a ve třetím podlaží budovy AV.

## 6.2 Testování Wi-Fi

V této sekci je testována přesnost lokalizace pomocí Wi-Fi otisků. Je použito zařízení Xiaomi Redmi Note 4. U většiny testů probíhá určení pozice na několika místech pomocí metod NN, KNN a WKNN. Výsledky u každé z metod jsou následně zprůměrovány.

### Počet použitých přístupových bodů

První z testů se zabývá určením, zda přesnost lokalizace závisí na počtu přístupových bodů, které jsou vybrány k porovnání s uloženými otisky. Aby mohl být pro jednotlivé budovy vybrán příslušný počet přístupových bodů k testování, je nutné zjistit informace o množství uložených přístupových bodů na jednotlivých pozicích.

V budově C je maximální počet přístupových bodů na jedné lokaci 42 a minimální 12. Průměrně je zde naměřeno 29 přístupových bodů. Maximální hodnota je naměřena u vchodu z jižní strany budovy, minimální v chodbě u toalet. Zajímavostí je, že tyto dvě pozice jsou od sebe vzdáleny pouze 10,7 metru. V budově AV je maximum 20, minimum 8 a průměr 13 přístupových bodů.

Na základě tohoto zjištění jsou k testování vybrány počty 3, 5, 7, 9, nebo všechny získané přístupové body. V budově C je testování prováděno na třech pozicích, vždy na místě již dříve vytvořeného otisku.

- Pozice 1 - nachází se vedle automatu blízko dveří do studovny. V blízké oblasti se příliš otisků nenachází, nicméně v delší vzdálenosti je tento bod ze dvou stran obklopen vysokým shlukem otisků.
- Pozice 2 - bod mezi schodištěm a vstupními dveřmi do budovy. V blízkém okolí se ze všech stran nachází vysoký počet otisků.
- Pozice 3 - místo v chodbě s kanceláři blízko vchodu. Nachází se zde pouze jedna řada otisků. Velký shluk otisků se od tohoto bodu nachází v poměrně velké vzdálenosti.

V budově AV jsou pozice vybrány na třech různých chodbách. Pro každý počet a každou metodu je měření provedeno pětkrát, z výsledků je následně vypočítán průměr. Přístupové body jsou vybírány podle podobnosti. Počet K je nastaven na hodnotu 5.

Budova C - chyba (m)									
Počet	Pozice 1			Pozice 2			Pozice 3		
	NN	KNN	WKNN	NN	KNN	WKNN	NN	KNN	WKNN
3	6.65	6.63	5.07	12.35	2.71	1.93	2.88	2.96	3.15
5	5.36	7.34	7.11	19.35	3.67	1.78	1.80	3.31	1.61
7	8.03	7.34	5.02	14.94	1.10	1.13	15.71	5.89	5.46
9	10.58	4.98	3.15	4.67	1.14	1.29	13.10	6.34	6.43
Vše	0.72	3.83	2.46	5.02	0.81	1.38	2.88	4.57	3.84

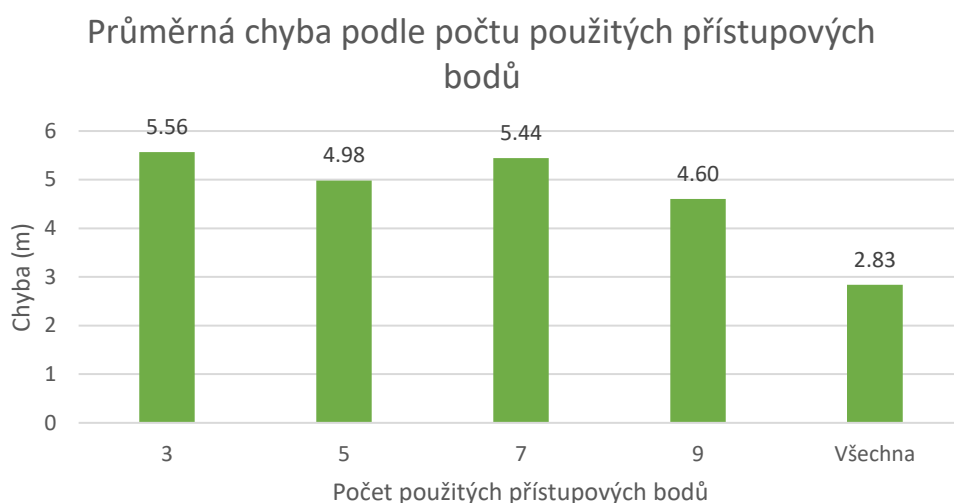
Tabulka 6.2: Průměrné chyby (m) na různých pozicích v budově C podle použité metody a počtu přístupových bodů.

Z výsledků tabulek 6.2 a 6.3 lze vyčíst několik informací. Hlavním cílem tohoto testování je určení vhodné počtu přístupových bodů k porovnání s mapou otisků. Nejnižší průměrné chyby je dosaženo, pokud jsou k porovnání vybrány všechny obdržené přístupové body. Tuto skutečnost lze lépe vidět na obrázku 6.2

Dalším důležitým zjištěním je fakt, že na různých pozicích je dosaženo odlišných výsledků. Například v budově C je mezi pozicemi jedna a dva při použití metody NN rozdíl v průměrné chybě 14 metrů. Metoda NN má obecně vyšší přesnost v místech, kde se nenachází velký shluk otisků. Naopak metodám KNN a WKNN v těchto místech přesnost roste. Na druhé pozici v budově C si pro

Budova AV - chyba (m)									
Počet	Pozice 1			Pozice 2			Pozice 3		
	NN	KNN	WKNN	NN	KNN	WKNN	NN	KNN	WKNN
3	4.35	3.82	4.12	6.61	10.59	4.13	6.36	10.09	5.81
5	5.18	4.65	5.01	3.69	1.86	3.04	5.68	3.64	5.60
7	4.58	4.26	4.17	1.78	2.74	2.74	3.30	4.40	5.40
9	5.54	3.83	4.12	4.02	3.31	2.38	3.68	2.19	2.08
Všechny	1.80	2.55	1.92	4.38	3.06	2.26	3.59	3.14	2.84

Tabulka 6.3: Průměrné chyby (m) na různých pozicích v budově AV podle použité metody a počtu přístupových bodů.



Obrázek 6.2: Průměrná chyba podle počtu použitých přístupových bodů.

všechny počty přístupových bodů drží metoda WKNN průměrnou chybu pod 2 metry.

V budově C je pro všechny počty přístupových bodů a všechny metody průměrná chyba 5,27 m. Ta je způsobena především vysokými odchylkami při použití metody NN. V budově AV je průměrná chyba 4,09 m. Druhá jmenovaná tedy dosahuje vyšší přesnosti. To může být zapříčiněno vyšší komplexností budovy C, nebo počtem a rozmístěním otisků. První podlaží budovy C je otevřený prostor a otisky tam tedy nemusí být tak jedinečné jako v případě třetího podlaží budovy AV.

### Počet K-nejbližších sousedů

Protože jsou pro lokalizaci využity metody KNN a WKNN, je důležité určit ideální počet K. U předchozího testu je počet K nastaven na 5. V tomto testu jsou použity hodnoty 3, 5 a 7. Je zjišťováno, který počet nabízí nejpřesnější výsledky.

Tabulky 6.4 a 6.5 ukazují, že nejpřesnějších výsledků je dosaženo s počtem pěti K. Zde však rozdíl výběru neovlivňuje konečnou přesnost takovým způsobem jako počet přístupových bodů. Průměrná chyba pro tři K je 3,87 m, pro pět K 3,09 m a

Budova C - chyba (m)						
Počet K	Pozice 1		Pozice 2		Pozice 3	
	KNN	WKNN	KNN	WKNN	KNN	WKNN
3	5.05	3.74	3.22	1.01	4.47	8.39
5	3.34	3.64	1.45	1.90	4.76	5.22
7	3.37	3.56	2.69	1.69	6.79	6.25

Tabulka 6.4: Průměrné chyby (m) na různých pozicích v budově C podle použité metody a počtu K.

Budova AV - chyba (m)						
Počet K	Pozice 1		Pozice 2		Pozice 3	
	KNN	WKNN	KNN	WKNN	KNN	WKNN
3	2.36	2.65	3.25	3.55	4.87	3.95
5	2.02	1.75	3.07	2.29	3.97	3.69
7	2.06	1.93	3.22	2.62	4.12	3.93

Tabulka 6.5: Průměrné chyby (m) na různých pozicích v budově AV podle použité metody a počtu K.

pro sedm K 3,51 m. Lepších výsledků opět dosahuje metoda WKNN a průměrně nižší chyby jsou získány v budově AV.

Následující testy využívají parametry, které v předchozích dvou měřeních přinesly nejlepší výsledky. K lokalizaci jsou použity všechny přístupové body a počet pět K.

### **Odstranění, nebo změna polohy přístupových bodů**

Často může docházet k situacím, kdy dojde k odstranění nebo přesunutí přístupového bodu. Z toho důvodu je testováno, jaký bude mít tato událost vliv na přesnost lokalizace.

Nejprve je změřena průměrná chybovost u metod NN, KNN a WKNN, pokud je počet K nastaven na 5 a jsou použity všechny přístupové body. Následně jsou na každé pozici vybrány dva přístupové body s nejnižší průměrnou silou signálu. Pomocí nich jsou testovány 4 různé scénáře:

- Odstranění jednoho nejbližšího přístupového bodu
- Odstranění dvou nejbližších přístupových bodů
- Změna polohy jednoho nejbližšího přístupového bodu
- Změna polohy dvou nejbližších přístupových bodů

Budova C - chyba (m)						
Scénář	Pozice 1			Pozice 2		
	NN	KNN	WKNN	NN	KNN	WKNN
Původní	1.74	3.86	3.16	15.93	2.41	1.77
Odstranění jednoho	5.63	3.06	2.92	11.86	3.34	2.45
Odstranění dvou	4.98	4.25	3.64	4.15	1.41	1.75
Změna jednoho	6.96	2.92	2.71	23.20	6.58	7.90
Změna dvou	9.94	8.60	6.97	23.20	7.76	8.32

Tabulka 6.6: Průměrné chyby (m) na dvou pozicích v budově C podle použitého scénáře.

Budova AV - chyba (m)						
Scénář	Pozice 1			Pozice 2		
	NN	KNN	WKNN	NN	KNN	WKNN
Původní	3.08	1.58	1.28	4.17	3.03	2.37
Odstranění jednoho	2.63	1.07	2.40	2.96	2.87	2.81
Odstranění dvou	2.84	2.97	1.44	2.54	2.87	2.86
Změna jednoho	2.21	1.64	1.52	3.74	2.65	2.77
Změna dvou	3.73	2.74	2.52	3.38	2.30	2.66

Tabulka 6.7: Průměrné chyby (m) na dvou pozicích v budově AV podle použitého scénáře.

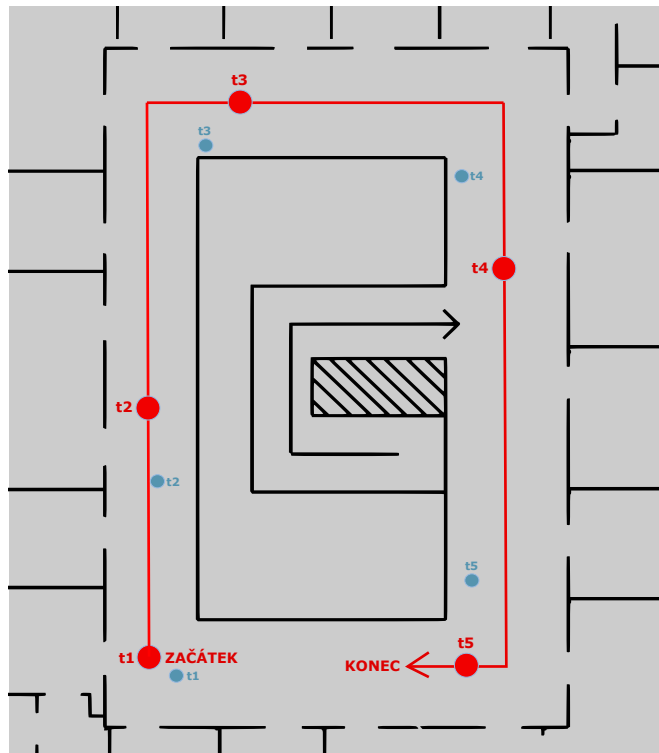
Tabulky 6.6 a 6.7 ukazují, že přesnost lokalizace, pokud jsou odstraněny, nebo přesunuty přístupové body, závisí na typu budovy i konkrétní pozici. V budově C mají nejčastěji tyto změny vliv na metodu NN. Zatímco na první pozici chybovost roste, na pozici 2 při odstranění dvou přístupových bodů dokáže metoda NN určit polohu mnohem přesněji. K tomu dochází odstraněním podobného otisku, který se nachází na druhé straně budovy. U metod KNN a WKNN chybovost roste zejména při změně polohy přístupových bodů.

Ve třetím podlaží budovy AV jsou rozdíly minimální. Ačkoliv zde zařízení naskenuje průměrně méně přístupových bodů, umožňuje tvar tohoto podlaží více zjednotřit otisky a tím předejít změnám při odstranění či změně.

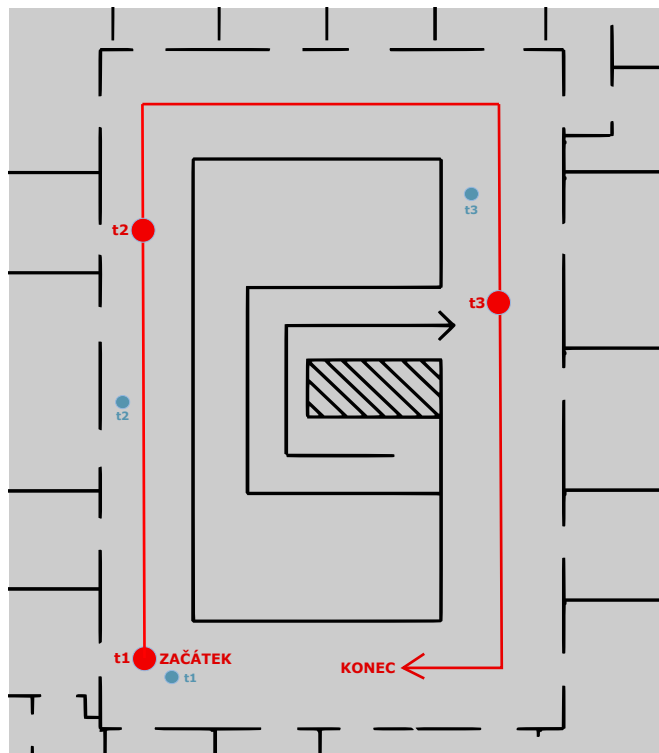
## Pohybující se zařízení

Veškeré testování dosud probíhalo pouze pro počáteční načtení pozice. Tato část se zabývá určením, s jakou velkou přesností je zařízení lokalizováno v pohybu. Jsou testovány dvě různé rychlosti, pomalá chůze (přibližně 3,6 km/h) a rychlá chůze (přibližně 5,4 km/h). K určení výsledné lokace je použita metoda WKNN. Měření je prováděno ve třetím podlaží budovy AV.

Obrázky 6.3 a 6.4 ukazují, že s narůstající rychlostí pohybu klesá přesnost lokalizace a zároveň počet naměřených bodů. V prvním případě jsou od začátku pohybu naměřeny čtyři pozice, ve druhém pouze tři. Pokud není počítán startovní bod, je průměrná chybovost při rychlosti 3,6 km/h rovna přibližně 3,12 m. Při rychlosti 5,4 km/h je průměrná chyba přibližně 4,65 m.



Obrázek 6.3: Naměřené body po trase při rychlosti přibližně 3,6 km/h.



Obrázek 6.4: Naměřené body po trase při rychlosti přibližně 5,4 km/h.

## Typ zařízení

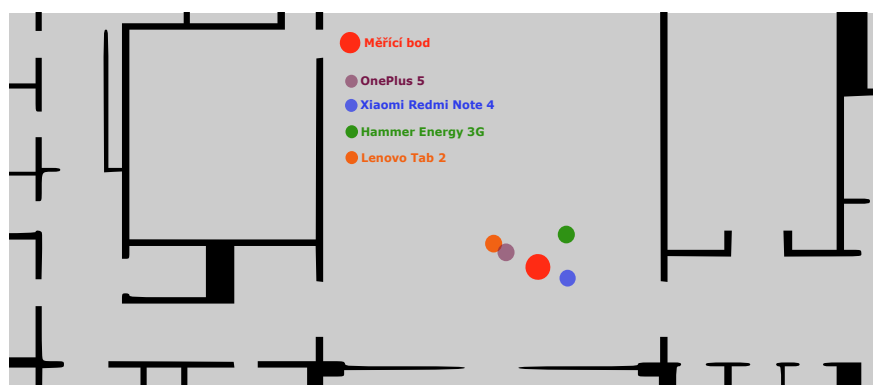
Posledním testem Wi-Fi technologie je zjištění, jak se přesnost pozicování liší napříč různými zařízeními. Jsou použita čtyři různá zařízení. Měření probíhá na jedné pozici v budově C a v budově AV.

Zařízení	Průměrná chyba v budově AV (m)	Průměrná chyba v budově C (m)
OnePlus 5	1.80	1.84
Xiaomi Redmi Note 4	1.85	1.37
Hammer Energy 3G	1.77	2.38
Lenovo Tab 2	2.53	2.68

Tabulka 6.8: Průměrné chyby ve dvou budovách na různých typech zařízení



Obrázek 6.5: Průměrné polohy naměřené na různých zařízeních v budově AV.



Obrázek 6.6: Průměrné polohy naměřené na různých zařízeních v budově C.

Tabulka 6.8 a obrázky 6.5 a 6.6 ukazují, že rozdíly v naměřené průměrné chybě napříč zařízeními jsou minimální. Zatímco v budově AV se naměřené souřadnice nachází blízko u sebe, v budově C jsou rozprostřeny okolo měřícího bodu. To je pravděpodobně dáno různorodostí daných podlaží a množstvím vytvořených otisků v okolí.

# Závěr

Cílem této práce bylo vytvořit souhrn dostupných metod a technologií určených k lokalizaci uvnitř budov. Pro využití v areálu Jihočeské univerzity byly na základě tohoto přehledu vybrány technologie Wi-Fi a technologie využívající magnetické pole Země. Jedním z požadavků totiž bylo, aby žádná z těchto technologií nevyžadovala nákup dodatečného hardware. Z lokalizačních technik byly zvoleny trilaterace, otisky a výpočet pohybu zařízení.

Byla provedena série pokusných měření pro všechny vybrané technologie. Bylo zjištěno, že technika výpočtu pohybu zařízení (využívající akcelerometr a magnetometr) je ve vnitřních prostorách nepřesná. Může za to nejednoznačné určení pohybu uživatele při téměř stabilním držení telefonu a především rozdílné hodnoty naměřené kompasem v různých částech budovy.

Pro technologii magnetického pole byla již na počátku vybrána technika nejlepší shody otisků. Jako jediný jednoznačný magnetický otisk byla vybrána intenzita magnetického pole. Z různých měření však vyplynulo, že tato technologie není k lokalizaci uvnitř budov vhodná. Může za to potřeba kalibrace magnetometru, rozdílné hodnoty napříč zařízeními při statickém i nestatickém měření a velké rozdíly hodnot v krátkém časovém intervalu. Intenzita magnetického pole není na všech místech budovy jedinečná a tyto odchylky na různých zařízeních by mohly způsobit nárůst v chybovosti.

U technologie Wi-Fi bylo zkoumáno, zda použít techniku trilaterace, nebo otisků. Po zjištění, že zdi v budově silně ovlivňují naměřenou sílu signálu, byla vybrána technika otisků. U trilaterace by při převodu síly signálu na vzdálenost docházelo k velkým odchylkám. Dalším důležitým zjištěním byly minimální rozdíly naměřených hodnot napříč zařízeními. Jelikož byly z každé pozice naměřeny hodnoty z minimálně devíti přístupových bodů, nejsou tyto rozdíly takovým problémem, jako v případě použití pouze jedné hodnoty u technologie magnetického pole.

K testování byly vybrány dvě různé oblasti. První podlaží budovy C a třetí podlaží budovy AV. Následně bylo provedeno pět různých testů. Ty se zaměřily na určení rozdílu přesnosti lokalizace při použití určitého počtu přístupových bodů, vybraného počtu  $K$  nejbližších sousedů a při odstranění nebo změně polohy přístupových bodů. Poslední dva testy zkoumaly chybovost, pokud se zařízení pohybuje a rozdíl v přesnosti určení pozice při použití různých zařízení. Pro část testů byly zároveň porovnávány tři různé algoritmy - NN, KNN a WKNN.

Výsledky ukázaly, že nejnižší průměrné chyby je dosaženo při použití všech získaných přístupových bodů, počtu pěti  $K$  a metody WKNN. Průměrná chyba se zároveň lišila dle budovy a vybrané pozice. Ve třetím podlaží budovy AV bylo dosaženo lepších výsledků, než v prvním podlaží budovy C. Průměrná chybovost při odstranění nebo změně polohy přístupových bodů opět závisela na výběru budovy a konkrétní pozici. Při pohybu zařízení stoupala chybovost s narůstající rychlostí. Měření rozdílu napříč různými zařízeními ukázalo, že rozdíly v průměrné chybě nejsou větší než 1,31 metru.



Nejllepších výsledků bylo dosaženo pomocí algoritmu WKNN. Průměrná chyba této metody napříč oběma budovami byla 2,76 metru. Pro obecnější výsledky by bylo zapotřebí testovat vybranou technologii ve více budovách a pomocí většího množství zařízení. Dále by bylo nutné provést větší počet testů, a to i s odstupem několika týdnů, či měsíců.

Hlavní nevýhodou použití technologie Wi-Fi s pomocí techniky otisků je samotná tvorba mapy otisků. Ta zabere poměrně mnoho času v případě, že bude tvořena pro všechny budovy Jihočeské univerzity. Řešením by mohlo být autonomní robotické vozítko, které by se konstantně pohybovalo po naplánované trase a zaznamenávalo potřebná data. Aby mohla být databáze následně aktualizována, bylo by možné využít každého uživatele, který je lokalizován. Jeho načtená pozice a data z přístupových bodů by se porovnála s databází a v případě podobnosti by se automaticky aktualizovala nebo zpřesňovala.

V úvodu práce zaznělo, že pro lokalizaci uvnitř budov stále neexistuje jasný standard. Výčet různých technologií a metod pro indoor pozicování v rešeršní části tento fakt jen potvrdil. Ačkoliv práce nepřinesla nové nebo vylepšené způsoby lokalizace, což ani nebylo jejím cílem, zjistila, že pro potřeby navigace v budovách Jihočeské univerzity je v případě potřeby okamžitého nasazení ideální technologie využívající sílu signálu z Wi-Fi přístupových bodů. Jelikož každá z budov obsahuje určitý počet přístupových bodů, nevyžaduje tato technologie nákup dodatečného hardware, funguje pro všechna zařízení s Wi-Fi síťovou kartou, nepotřebuje přímou viditelnost mezi přijímačem a vysílačem a rozdíly v naměřených hodnotách napříč různými zařízeními jsou minimální.

# Seznam použité literatury

- [1] MAUTZ, R. Indoor positioning technologies. *ETH Zurich, Department of Civil, Environmental and Geomatic Engineering* [online]. 2012 [cit. 2019-02-16]. Dostupné na: <https://www.research-collection.ethz.ch/bitstream/handle/54888>.
- [2] ZAFARI, F., GKELIAS, A. a LEUNG, K. A survey of indoor localization systems and technologies. *ArXiv* [online]. 2017 [cit. 2019-02-18]. Dostupné na: <https://arxiv.org/pdf/1709.01015.pdf>.
- [3] AHMAD, U. IBeacon Localization. *Technische Universiteit Eindhoven* [online]. 2015 [cit. 2019-02-21]. Dostupné na: <https://pure.tue.nl/ws/files/47037214/799564-1.pdf>.
- [4] BARSOCCHI, P., LENZI, S., CHESSA, S. et al. A Novel Approach to Indoor RSSI Localization by Automatic Calibration of the Wireless Propagation Model. In *VTC Spring 2009 - IEEE 69th Vehicular Technology Conference* [online]. April 2009 [cit. 2019-02-23]. S. 1–5. Dostupné na: <https://www.researchgate.net/publication/224504639>. ISSN 1550-2252.
- [5] HEURTEFEUX, K. a VALOIS, F. Is RSSI a Good Choice for Localization in Wireless Sensor Network? In *2012 IEEE 26th International Conference on Advanced Information Networking and Applications* [online]. March 2012 [cit. 2019-02-18]. S. 732–739. Dostupné na: <https://www.researchgate.net/publication/254028520>. ISSN 2332-5658.
- [6] ZHENG, J., WU, C., CHU, H. et al. An Improved RSSI Measurement In Wireless Sensor Networks. *Procedia Engineering* [online]. 2011 [cit. 2019-02-23]. S. 876 – 880. Dostupné na: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705811016638>. ISSN 1877-7058.
- [7] HEADQUARTERS, A. *Wi-Fi Location-Based Services 4.1 Design Guide* [online]. 2008 [cit. 2019-02-23]. Dostupné na: <http://www.virtualdoxx.com/materials/wifi/whitepaperwikipedia.pdf>.
- [8] NICHOLAUS, M. a MINGA, D. A Comparison Review of Indoor Positioning Techniques. *International Journal of Computer (IJC)* [online]. 2016 [cit. 2019-02-23]. S. 42–49. Dostupné na: <https://www.researchgate.net/publication/301887283>.
- [9] ARCE, M. *Time-of-flight in Wireless Networks as Information Source for Positioning* [online]. 2011 [cit. 2019-02-23]. Dostupné na: <https://books.google.cz/books?id=k46AMwEACAAJ>.
- [10] TYSON, R. *Lighter Side of Adaptive Optics* [online]. 2009 [cit. 2019-02-23]. Press Monographs. Dostupné na: <https://books.google.cz/books?id=UhhCyNJAJdIC>. ISBN 9780819475619.

- [11] SHEN, G., ZETIK, R. a THOMA, R. S. Performance comparison of TOA and TDOA based location estimation algorithms in LOS environment. In IEEE. *Positioning, Navigation and Communication, 2008. WPNC 2008. 5th Workshop on* [online]. 2008 [cit. 2019-02-23]. S. 71–78. Dostupné na: <https://www.researchgate.net/publication/4331583>.
- [12] CHEN, Y. Evaluating Off-the-shelf Hardware for Indoor Positioning. [online]. 2017 [cit. 2019-02-23]. Dostupné na: <http://lup.lub.lu.se/luur/8906239>.
- [13] ASHOK, A. *Digital Signal Processing. A Modern Introduction* [online]. 2006 [cit. 2019-02-23]. Dostupné na: <http://dea.unsj.edu.ar/sredes/Biblioauxi/321089007-Analog-and-Digital-Signal-Processing-by-Ambardar.pdf>.
- [14] ZHANG, W. a MCMURDIE, A. Acoustic Based Angle-Of-Arrival Estimation in the Presence of Interference. [online]. [cit. 2019-02-23]. Dostupné na: <https://pdfs.semanticscholar.org/d967/78da8cf.pdf>.
- [15] KÁRNÍK, J. a STREIT, J. Summary of available indoor location techniques. *IFAC-PapersOnLine* [online]. 2016 [cit. 2019-02-23]. S. 311–317. Dostupné na: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S240589631632691X>.
- [16] SVALASTOG, M. S. Indoor positioning-technologies, services and architectures. [online]. 2007 [cit. 2019-02-23]. Dostupné na: <https://www.duo.uio.no/bitstream/handle/10852/9742/Svalastog.pdf>.
- [17] JURAČKA, J. Výzkum systému GPS pro lokalizaci bezdrátových senzorových uzlů. [online]. 2012 [cit. 2019-02-23]. Dostupné na: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/24828/DPJurackaJan.pdf>.
- [18] CURRAN, K., FUREY, E., LUNNEY, T. et al. An evaluation of indoor location determination technologies. *Journal of Location Based Services* [online]. 2011 [cit. 2019-02-23]. S. 61–78. Dostupné na: <https://www.researchgate.net/publication/220232962>.
- [19] WANG, Y., WU, X. a CHENG, L. A Novel Non-Line-of-Sight Indoor Localization Method for Wireless Sensor Networks. *Journal of Sensors* [online]. 2018 [cit. 2019-02-23]. Dostupné na: <https://www.hindawi.com/journals/js/2018/3715372/>.
- [20] BISHOP, G., WELCH, G. et al. An introduction to the Kalman filter. *Proc of SIGGRAPH, Course* [online]. 2006, 27599-3175 [cit. 2019-02-23]. S. 59. Dostupné na: <https://www.cs.unc.edu/welch/media/pdf/kalmanintro.pdf>.
- [21] LEPPÄKOSKI, H. Novel Methods for Personal Indoor Positioning. *Tampereen teknillinen yliopisto. Julkaisu-Tampere University of Technology. Publication; 1330* [online]. 2015 [cit. 2019-02-23]. Dostupné na: <https://tutcris.tut.fi/portal/files/3706935/leppakoski1330.pdf>.

- [22] ENGSTRÖM, H. a HELANDER, F. Evaluation and testing of techniques for indoor positioning. *Citeseer* [online]. 2015 [cit. 2019-02-23]. Dostupné na: <https://www.eit.lth.se/srapport.php?uid=901>.
- [23] DO GAN, M. Indoor localization and tracking based od RSSI and accelerometer measurement. [online]. 2015 [cit. 2019-02-23]. Dostupné na: <http://etd.lib.metu.edu.tr/upload/12619543/index.pdf>.
- [24] DOUCET, A. a JOHANSEN, A. M. A tutorial on particle filtering and smoothing: Fifteen years later. *Handbook of nonlinear filtering* [online]. 2009, 656-704 [cit. 2019-02-23]. S. 3. Dostupné na: <https://www.stats.ox.ac.uk/~doucet/doucetjohansentutorialPF2011.pdf>.
- [25] ZHU, N., ZHAO, H., FENG, W. et al. A novel particle filter approach for indoor positioning by fusing WiFi and inertial sensors. *Chinese Journal of Aeronautics* [online]. 2015 [cit. 2019-02-23]. S. 1725 – 1734. Dostupné na: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1000936115001995>. ISSN 1000-9361.
- [26] LIU, H., DARABI, H., BANERJEE, P. et al. Survey of wireless indoor positioning techniques and systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)* [online]. 2007 [cit. 2019-02-23]. S. 1067–1080. Dostupné na: <http://www.pitt.edu/~dtipper/2011/Survey1.pdf>.
- [27] GU, Y., LO, A. a NIEMEGEREERS, I. A survey of indoor positioning systems for wireless personal networks. *IEEE Communications surveys & tutorials* [online]. 2009 [cit. 2019-02-23]. S. 13–32. Dostupné na: <https://www.csd.uoc.gr/~hy439/papers/gu2009pdf.pdf>.
- [28] BISDIKIAN, C. An overview of the Bluetooth wireless technology. *IEEE Communications magazine* [online]. 2001 [cit. 2019-02-23]. S. 86–94. Dostupné na: <http://async.org.uk/coherent/publications/ACDbluetoothstpetersberg5-2002.pdf>.
- [29] JIANYONG, Z., LUO, H., ZILI, C. et al. RSSI based Bluetooth low energy indoor positioning. In [online]. 2014 [cit. 2019-02-23]. S. 526–533. Dostupné na: <https://www.researchgate.net/publication/286299324>.
- [30] FERRO, E. a POTORTI, F. Bluetooth and Wi-Fi wireless protocols: a survey and a comparison. *IEEE Wireless Communications* [online]. 2005 [cit. 2019-02-23]. S. 12–26. Dostupné na: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/1011709.pdf>.
- [31] YANG, J., WANG, Z. a ZHANG, X. An ibeacon-based indoor positioning systems for hospitals. *International Journal of Smart Home* [online]. 2015 [cit. 2019-02-23]. S. 161–168. Dostupné na: <https://pdfs.semanticscholar.org/8383>.

- [32] CHALLOO, R., OLADEINDE, A., YILMAZER, N. et al. An overview and assessment of wireless technologies and co-existence of ZigBee, Bluetooth and Wi-Fi devices. *Procedia Computer Science* [online]. 2012 [cit. 2019-02-23]. S. 386–391. Dostupné na: <https://core.ac.uk/download/pdf/82049199.pdf>.
- [33] HERNANDEZ, O., JAIN, V., CHAKRAVARTY, S. et al. Position location monitoring using iieee® 802.15. 4/zigbee® technology. *Beyond Bits, issue IV* [online]. 2009 [cit. 2019-02-23]. S. 67–69. Dostupné na: <http://cache.freescale.com/files/PositionLocationMonitoring.pdf>.
- [34] CHIU, C.-C. Indoor Positioning System with BLE and Wi-Fi technology-Data Analysis and Accuracy Improvement. *České vysoké učení technické v Praze. Vypočetní a informační centrum.* [online]. 2017 [cit. 2019-02-23]. Dostupné na: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/70519>.
- [35] BRENA, R. F., GARCÍA VÁZQUEZ, J. P., GALVÁN TEJADA, C. E. et al. Evolution of indoor positioning technologies: A survey. *Journal of Sensors* [online]. 2017 [cit. 2019-02-23]. Dostupné na: <https://www.hindawi.com/journals/js/2017/2630413/>.
- [36] WEINSTEIN, R. RFID: a technical overview and its application to the enterprise. *IT professional* [online]. 2005 [cit. 2019-02-23]. S. 27–33. Dostupné na: <https://www.researchgate.net/publication/3426734>.
- [37] DEFRAÏE, J. Determining the position of sporters using ultra-wideband indoor localization. [online]. 2017 [cit. 2019-02-23]. Dostupné na: <https://lib.ugent.be/fulltxt/RUG01/002/367/068/RUG01.pdf>.
- [38] MANDAL, A., LOPES, C. V., GIVARGIS, T. et al. Beep: 3D indoor positioning using audible sound. In *Consumer communications and networking conference, 2005. CCNC. 2005 Second IEEE* [online]. 2005 [cit. 2019-02-23]. S. 348–353. Dostupné na: <https://www.ics.uci.edu/~givargis/pubs/C25.pdf>.
- [39] MAGNUSSON, E. a NILSSON, R. *Development and implementation of an indoor positioning system with applications to smart lighting* [online]. 2012 [cit. 2019-02-23]. Dostupné na: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:561906/FULLTEXT01.pdf>.
- [40] SAKPERE, W., ADEYEYE OSHIN, M. a MLITWA, N. B. A state-of-the-art survey of indoor positioning and navigation systems and technologies. *SACJ* [online]. 2017 [cit. 2019-02-23]. Dostupné na: <http://sacj.cs.uct.ac.za/index.php/sacj/article/view/452/249>.
- [41] WANG, Q., LUO, H., MEN, A. et al. Light positioning: A high-accuracy visible light indoor positioning system based on attitude identification and propagation model. *International Journal of Distributed Sensor Networks* [online]. 2018 [cit. 2019-02-23]. Dostupné na: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/1550147718758263>.

- [42] LI, B., GALLAGHER, T., DEMPSTER, A. G. et al. How feasible is the use of magnetic field alone for indoor positioning? In IEEE. *Indoor positioning and indoor navigation (ipin), 2012 international conference on* [online]. 2012 [cit. 2019-02-23]. S. 1–9. Dostupné na: <https://www.researchgate.net/publication/261310654>.
- [43] LI, B., GALLAGHER, T., RIZOS, C. et al. Using Geomagnetic Field for Indoor Positioning. *Journal of Applied Geodesy* [online]. 2013 [cit. 2019-02-23]. Dostupné na: <https://pdfs.semanticscholar.org/2fbd/8a47cd.pdf>.
- [44] WERNER, M., KESSEL, M. a MAROUANE, C. Indoor positioning using smartphone camera. In IEEE. *Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 2011 International Conference on* [online]. 2011 [cit. 2019-02-23]. S. 1–6. Dostupné na: <https://www.researchgate.net/publication/239863134>.

# Seznam obrázků

2.1	Měření rozdílu času pomocí doby letu signálu [9]. . . . .	4
2.2	Měření rozdílu času na dvou přijímačích [9]. . . . .	5
2.3	Rozdíl fáze dvou sinusoid. . . . .	6
2.4	Hledání objektu podle průsečíků tří kružnic [17]. . . . .	9
4.1	Hodnoty RSS ve vzdálenosti 5 metrů . . . . .	23
4.2	Hodnoty RSS ve vzdálenosti 15 metrů . . . . .	23
4.3	Klesající síla signálu s narůstající vzdáleností . . . . .	24
4.4	Naměřené hodnoty intenzity magnetického pole v budově C . . . .	27
4.5	Naměřená intenzita magnetického pole na čtyřech zařízeních ze stejné pozice . . . . .	28
4.6	Naměřená intenzita magnetického pole po otočení zařízení. . . . .	28
4.7	Rozdíl v intenzitě magnetického pole na dvou zařízeních během měnící se pozice. . . . .	29
4.8	Hodnoty naměřené kompasem v různých místech budovy C. . . . .	31
5.1	Architektura lokalizační části systému. . . . .	34
6.1	Otisky vytvořené v prvním podlaží budovy C a ve třetím podlaží budovy AV. . . . .	36
6.2	Průměrná chyba podle počtu použitých přístupových bodů. . . . .	38
6.3	Pohybující se zařízení rychlostí přibližně 3,6 km/h. . . . .	41
6.4	Pohybující se zařízení rychlostí přibližně 3,6km/h. . . . .	41
6.5	Průměrné polohy naměřené na různých zařízeních v budově AV. . .	42
6.6	Průměrné polohy naměřené na různých zařízeních v budově C. . .	42

# Seznam tabulek

2.1	Porovnání principů měření [2] . . . . .	7
3.1	Porovnání technologií podle využitelnosti v areálu JU. . . . .	20
4.1	Mobilní telefony a jejich základní parametry. Tato zařízení jsou použita pro měření rozdílů síly signálu. . . . .	22
4.2	Tabulka znázorňující vypočítané hodnoty mediánů u jednotlivých zařízení v určité vzdálenosti a stejném časovém intervalu. . . . .	22
4.3	Tabulka zobrazující rozdíly mezi hodnotami síly signálu během dne. Tyto hodnoty jsou měřeny jedním zařízením vždy ze stejné pozice. . . . .	25
4.4	Tabulka zobrazující data získaná z magnetometru. . . . .	26
4.5	Tabulka představující přesnost detekce kroků a vzdálenosti při jednoznačné délce kroku. . . . .	30
4.6	Tabulka představující přesnost detekce kroků a vzdálenosti při jednoznačné délce kroku. . . . .	31
6.1	Tabulka zobrazující průměrnou hodnotu nalezených přístupových bodů a rozdíl v naměřené hodnotě síly signálu na jednotlivých zařízeních. . . . .	35
6.2	Průměrné chyby (m) na různých pozicích v budově C podle použité metody a počtu přístupových bodů. . . . .	37
6.3	Průměrné chyby (m) na různých pozicích v budově AV podle použité metody a počtu přístupových bodů. . . . .	38
6.4	Průměrné chyby (m) na různých pozicích v budově C podle použité metody a počtu K. . . . .	39
6.5	Průměrné chyby (m) na různých pozicích v budově AV podle použité metody a počtu K. . . . .	39
6.6	Průměrné chyby (m) na dvou pozicích v budově C podle použitého scénáře. . . . .	40
6.7	Průměrné chyby (m) na dvou pozicích v budově AV podle použitého scénáře. . . . .	40
6.8	Průměrné chyby ve dvou budovách na různých typech zařízení . . . . .	42



# Přílohy

## A. Přiložené CD

Přiložené CD obsahuje zdrojový kód vytvořeného systému, elektronickou verzi práce ve formátu PDF a data z testů v tabulkovém formátu.