

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV INTELIGENTNÍCH SYSTÉMŮ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY  
DEPARTMENT OF INTELLIGENT SYSTEMS

## LOKALIZACE POČÍTAČOVÝCH ZAŘÍZENÍ VE WIFI SÍTÍCH

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. PETER SZABÓ

BRNO 2015



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**  
**ÚSTAV INTELIGENTNÍCH SYSTÉMŮ**

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY  
DEPARTMENT OF INTELLIGENT SYSTEMS

# **LOKALIZACE POČÍTAČOVÝCH ZAŘÍZENÍ VE WIFI SÍTÍCH**

DEVICE LOCATION IN WIRELESS NETWORK

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. PETER SZABÓ**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. MATEJ KAČIC**

BRNO 2015

## **Abstrakt**

Tato práce se zabývá problematikou lokalizace počítačových zařízení v bezdrátových sítích. Čerpá z existujících řešení, které dále rozšiřuje, předkládá návrh a popisuje následnou implementaci prototypu lokalizačního systému sloužícího k lokalizaci zařízení ve WiFi sítích. V závěrečné části práce popisuje testování naimplementovaného systému, analyzuje zjištěné výsledky a porovnává je s výsledky testů jiných lokalizačních systémů založených na podobných technologiích.

## **Abstract**

This thesis deals with the issue of locating devices in wireless networks. It takes existing solutions as example and extends them using additional approaches. This thesis designs and describes the implementation of a prototype of a new proprietary indoor localization system used for locating devices within a WiFi network. In the final part of the thesis the testing of this system is described and its results are analyzed and compared with another localization systems based on similar technologies.

## **Klíčová slova**

WiFi, lokalizace, bezdrátová síť, signál, kalibrace, RSS

## **Keywords**

WiFi, indoor location, wireless network, signal, fingerprinting, RSS

## **Citace**

Peter Szabó: Lokalizace počítačových zařízení ve WiFi sítích, diplomová práce, Brno, FIT VUT v Brně, 2015

# Lokalizace počítačových zařízení ve WiFi sítích

## Prehlásenie

Prehlasujem, že som túto diplomovú prácu vypracoval samostatne pod vedením pána Ing. Mateja Kačica

.....

Peter Szabó  
20. května 2015

## Pod'akovanie

Rád by som poďakoval môjmu školiteľovi Ing. Matejovi Kačicovi, za jeho cenné rady a odbornú pomoc pri vypracovaní tejto práce.

© Peter Szabó, 2015.

*Táto práca vznikla ako školské dielo na Vysokom učení technickom v Brne, Fakulte informačných technológií. Práca je chránená autorským zákonom a jej použitie bez udelenia oprávnenia autorom je nezákonné, s výnimkou zákonom definovaných prípadov.*

# Obsah

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Úvod</b>   | <b>3</b>  |
| <b>2</b> | <b>Metódy lokalizácie zariadení</b>                                       | <b>5</b>  |
| 2.1      | Lokalizácia pomocou satelitných navigačných systémov . . . . .            | 6         |
| 2.1.1    | Vesmírny segment . . . . .  | 6         |
| 2.1.2    | Riadiaci segment . . . . .  | 7         |
| 2.1.3    | Používateľský segment . . . . .   | 8         |
| 2.2      | Lokalizačné techniky v terestriálnych systémoch . . . . .                 | 8         |
| 2.2.1    | Techniky založené na sile prijatého signálu (RSS) . . . . .               | 8         |
| 2.2.2    | Techniky založené na čase prijatia signálu (TOA) . . . . .                | 10        |
| 2.2.3    | Techniky založené na rozdielne času prijatia signálu (TDOA) . . . . .     | 10        |
| 2.2.4    | Techniky založené na uhle prijatia signálu (AOA) . . . . .                | 10        |
| 2.2.5    | Metódy a algoritmy na určenie polohy v terestriálnych systémoch . . . . . | 11        |
| 2.3      | Praktické použitie lokalizácie v terestriálnych systémoch . . . . .       | 14        |
| 2.3.1    | Lokalizácia v bunkových sieťach . . . . .                                 | 14        |
| 2.3.2    | Lokalizácia vo WiFi sieťach . . . . .                                     | 14        |
| <b>3</b> | <b>Návrh systému na lokalizáciu zariadení v prostredí WiFi siete</b>      | <b>17</b> |
| 3.1      | Prehľad existujúcich interných lokalizačných riešení . . . . .            | 17        |
| 3.2      | Architektúra navrhovaného systému . . . . .                               | 18        |
| 3.2.1    | Hardvérové sondy . . . . .  | 19        |
| 3.2.2    | Server na spracovanie a filtrovanie zachytených dát – kontrolér . . . . . | 20        |
| 3.2.3    | Databázový server . . . . .   | 21        |
| 3.2.4    | Webová aplikácia . . . . .  | 21        |
| 3.3      | Použitú lokalizačné algoritmy . . . . .                                   | 21        |
| 3.3.1    | Detailný popis algoritmu . . . . .  | 22        |
| 3.3.2    | Zvýšenie presnosti lokalizačného algoritmu . . . . .                      | 24        |
| 3.4      | Kalibrácia systému . . . . .  | 26        |
| 3.4.1    | Rozmiestnenie kalibračných bodov . . . . .                                | 26        |
| <b>4</b> | <b>Implementácia prototypu lokalizačného systému</b>                      | <b>29</b> |
| 4.1      | Sondy na zachytávanie signálu . . . . .                                   | 29        |
| 4.1.1    | Aplikačná časť sondy . . . . .  | 30        |
| 4.2      | Server na spracovanie a filtrovanie zachytených dát . . . . .             | 30        |
| 4.2.1    | Hlavička PPI . . . . .  | 31        |
| 4.2.2    | Súbor typu PCAP . . . . .   | 31        |
| 4.2.3    | Aplikácia PPI Parser . . . . .  | 31        |
| 4.3      | Databázový server . . . . .   | 32        |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 4.3.1    | Architektúra databázy . . . . .  | 32        |
| 4.3.2    | Implementácia lokalizačného algoritmu . . . . .                                | 33        |
| 4.4      | Klientská webová aplikácia . . . . .   | 34        |
| 4.4.1    | Technický popis aplikácie . . . . .  | 35        |
| 4.4.2    | Používateľské rozhranie a funkcie aplikácie . . . . .                          | 35        |
| 4.5      | Problémy riešené počas implementácie systému . . . . .                         | 36        |
| 4.5.1    | Množstvo zachytených dát . . . . .   | 37        |
| 4.5.2    | Presnosť lokalizácie . . . . .   | 37        |
| <b>5</b> | <b>Testovanie a dosiahnuté výsledky</b>  | <b>38</b> |
| 5.1      | Metodika testovania . . . . .  | 38        |
| 5.1.1    | Testovacie lokality . . . . .  | 39        |
| 5.1.2    | Testovacie zariadenia . . . . .  | 40        |
| 5.2      | Analýza dosiahnutých výsledkov . . . . .                                       | 40        |
| 5.2.1    | Výsledky testov lokalizácie presnej polohy . . . . .                           | 41        |
| 5.2.2    | Výsledky testov lokalizácie miestnosti . . . . .                               | 43        |
| 5.2.3    | Zhrnutie zistených výsledkov . . . . .   | 44        |
| <b>6</b> | <b>Záver</b>   | <b>46</b> |
| <b>A</b> | <b>Lokalizačný algoritmus</b>  | <b>50</b> |
| A.1      | Filtrovanie a korekcia zachyteného signálu . . . . .                           | 50        |
| <b>B</b> | <b>Výsledky lokalizačných testov systému</b>                                   | <b>52</b> |
| B.1      | Lokalizácia presnej polohy . . . . .   | 53        |
| B.1.1    | Prvé kolo testov (pôvodný algoritmus) . . . . .                                | 53        |
| B.1.2    | Druhé kolo testov (vylepšený algoritmus s korekciou chýbajúcich dát) . . . . . | 59        |
| B.2      | Lokalizácia miestnosti . . . . .   | 67        |
| B.2.1    | Prvé kolo testov (pôvodný algoritmus) . . . . .                                | 67        |
| B.2.2    | Druhé kolo testov (vylepšený algoritmus s korekciou chýbajúcich dát) . . . . . | 69        |
| B.2.3    | Grafy rozložení veľkosti lokalizačnej chyby vykonaných testov . . . . .        | 77        |
| B.3      | Lokalizácia miestnosti . . . . .   | 81        |
| B.3.1    | Prvé kolo testov (pôvodný algoritmus) . . . . .                                | 81        |
| B.3.2    | Druhé kolo testov (vylepšený algoritmus) . . . . .                             | 81        |
| <b>C</b> | <b>Zdrojové kódy</b>   | <b>82</b> |
| <b>D</b> | <b>Obrázky</b>   | <b>85</b> |
| D.1      | Databázový server . . . . .  | 85        |
| D.2      | Snímky obrazovky monitorovacej aplikácie . . . . .                             | 86        |

# Kapitola 1

## Úvod

Problém detekcie pozície rôznych pohybujúcich sa objektov vo vnútri budov je už dlhší čas predmetom rôznych výskumov. Masívne rozšírené satelitné navigačné systémy ako sú napríklad americké GPS, jeho ruský ekvivalent GLONASS či novovznikajúci európsky projekt Galileo, sú výborne využiteľné v otvorenom vonkajšom prostredí, no vo vnútri budov zlyhávajú a ich schopnosť objekty presne lokalizovať je značne limitovaná.

Vďaka intenzívne sa rozširujúcemu nasadzovaniu bezdrôtových sietí a predovšetkým veľkému nárastu ich používania sa nám otvárajú nové možnosti lokalizácie objektov. Práve WiFi siete sú tie, ktoré sa v poslednom čase masívne nasadzujú vo vnútri objektov takmer každého druhu. Je preto žiadané využiť ich možnosti na vyplnenie pomyselných medzery, ktorá vo funkcionalite satelitných navigačných systémov chýba – presnej lokalizácie objektov aj vo vnútri budov.

Lokalizácia vo vnútri budov môže mať veľmi široké využitie. Pri masovom nasadení môže byť využiteľná pre bežných ľudí v orientácii v cudzom prostredí letísk, železničných či autobusových staníc, alebo aj nákupných centier. Môže taktiež slúžiť rôznym záchranným zložkám na urýchlenie prístupu na potrebné miesto.

V prípade lokálneho nasadenia takéhoto systému si tento nájde uplatnenie napríklad v robotike, kde je potrebné lokalizovať roboty v prostredí, či už s cieľom zabezpečenia centrálného dohľadu nad ich polohou, alebo aby samotné roboty mali k dispozícii informáciu o svojej presnej polohe. Podobným príkladom s reálnym využitím môže byť automatizované parkovanie v parkovacích domoch.

Ďalším príkladom lokálneho nasadenia môžu byť rôzne marketingové nástroje ťažiacie z informácie o polohe používateľov. Napríklad v už spomínaných nákupných centrách či väčších obchodoch.

Táto práca sa venuje návrhu, implementácii a testovaniu presnosti a spoľahlivosti prototypu lokalizačného systému umožňujúceho lokalizáciu akýchkoľvek mobilných zariadení komunikujúcich prostredníctvom WiFi (predovšetkým notebooky a smartfóny). V tejto práci popisujeme proces vytvorenia systému slúžiaceho predovšetkým na monitorovanie polohy zariadení v bezdrôtovej počítačovej sieti. Ide o univerzálne jadro lokalizačného systému, ktoré je možné rozšíriť o ľubovoľnú nadstavbu slúžiacu na využitie v niektorých z vyššie spomínaných prípadoch.

Práca začína teoretickou časťou, kde v kapitole 2 popisujeme aktuálne používané lokalizačné a navigačné riešenia. Tie sú založené buď na satelitných alebo terestriálnych technológiách, pričom zvláštny dôraz kladieme na terestriálne lokalizačné systémy, z ktorých sme pri návrhu nášho systému vychádzali. V ďalšej časti kapitoly skúmame lokalizačné algoritmy, ktoré sa v týchto systémoch využívajú, s cieľom zvoliť vhodný lokalizačný algo-

ritmus pre náš systém.

V kapitole 3 sa už venujeme nášmu vlastnému lokalizačnému systému. Podrobne tu popisujeme jeho návrh, architektúru a zvolené algoritmy. Detailne sa venujeme jednotlivým hardvérovým aj softvérovým súčastiam nášho lokalizačného systému a aj pomocou porovnávania nášho systému s inými podobnými systémami sa snažíme nájsť riešenie pre vytvorenie nového lokalizačného systému s čo najvyššou presnosťou a spoľahlivosťou lokalizácie.

Ďalšou v poradí je kapitola 4 popisujúca samotnú implementáciu nášho lokalizačného systému. Implementácia sa riadi návrhom systému prezentovanom v kapitole 3 a operatívne rieši problémy objavujúce sa počas implementácie a pilotného testovania nového systému. V tejto kapitole taktiež podrobne popisujeme technológie, ktoré sme k implementácii systému využili, a na ktorých je samotný systém v mnohých prípadoch založený.

Poslednou kapitolou je kap. 5 popisujúca jednak metodiku, no predovšetkým výsledky testovania, ktoré sme na našom systéme uskutočnili. V tejto kapitole taktiež rozoberáme dosiahnuté výsledky a porovnávame výsledky nášho systému s inými lokalizačnými systémami podobného charakteru.

Práca obsahuje obširnu prílohu s kompletnými výsledkami všetkých uskutočnených testov, s ukázkami zdrojového kódu systému a snímok obrazoviek z klientskej aplikácie slúžiacej na zobrazovanie polohy lokalizovaných objektov a na ovládanie lokalizačného systému. Ďalšou súčasťou prílohy je CD nosič s kompletnými zdrojovými kódmi a konfiguračnými súbormi nášho lokalizačného systému.



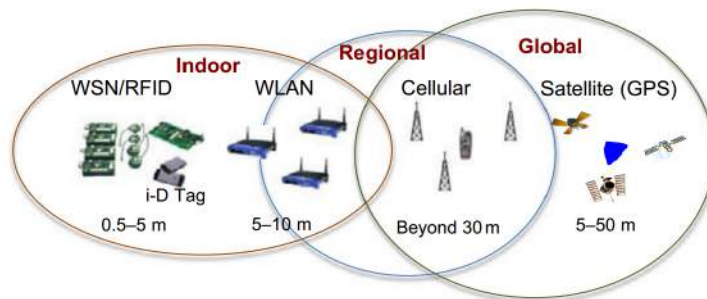
## Kapitola 2

# Metódy lokalizácie zariadení

Systémy na určenie polohy určitého objektu v priestore patria v dnešnej dobe jednoznačne k nevyhnutným a široko využívaným technickým vymoženostiam, a to či už ide o systémy na určenie vlastnej polohy kdekoľvek na svete alebo systémy na lokalizáciu cudzích zariadení.

Využitie týchto lokalizačných systémov je rôzne, od bežných ľudí používajúcich lokalizáciu (navigáciu) pri turistike či šoférovaní, až po armádu využívajúcu presnejšie, pre verejnosť neprístupné, časti lokalizačných systémov, či iné štátne zložky využívajúce napríklad lokalizáciu mobilných telefónov v bunkovej sieti (GSM, UMTS, LTE, ...).

Vo vyššie spomínaných lokalizačných systémoch sa využívajú dva základné spôsoby lokalizácie – *vzdialená lokalizácia* a *samolokalizácia*. V prvom prípade sa poloha objektu určuje centrálné (napr. lokalizácia mobilných telefónov v bunkovej sieti). V druhom prípade si samotný lokalizovaný objekt určuje svoju polohu sám (napr. systém GPS). [25]



Obrázok 2.1: Prehľad hlavných lokalizačných metód, ich pokrytia a presnosti prevzatý z [8]

Samolokalizácia je jednoznačne najvyužívanejší typ lokalizácie v dnešnej dobe. Na princípe samolokalizácie totiž funguje najrozšírenejší lokalizačný systém na svete – GPS. Podobne aj jemu ekvivalentné systémy (GLONASS, Galileo, COMPASS) využívajú rovnaké princípy lokalizácie. [21]

Pri samolokalizácii prebieha výpočet polohy priamo v zariadení, ktoré sa lokalizuje. Zariadenie prijíma signál z niekoľkých vysielačov, ktorých poloha je známa a na základe prijatého signálu využitím niektorého z dostupných algoritmov (viď kapitola 2.2) vypočíta svoju polohu. [25]

Tento princíp je známy predovšetkým u už vyššie spomínaných satelitných navigácií, no sú na ňom založené aj iné, v dnešnej dobe už málo využívané, pozemné lokalizačné systémy (napr. systém LORAN, ktorého zmodernizovaná verzia eLORAN je stále funkčná a využívaná [33]).

Princíp vzdialenej lokalizácie je v dnešnej dobe využívaný predovšetkým v bunkových mobilných sieťach. Týmto spôsobom je v nich možné lokalizovať jednotlivé mobilné stanice. Princíp lokalizácie je taký, že sa centrálné zhromažďujú informácie o tom, ktoré vysielateľ zachytávajú signál lokalizovaného zariadenia a pomocou niektorých z dostupných algoritmov (u GSM typicky TOA resp. TDOA – vid' kap. 2.2.2 a 2.2.3) sa určí poloha hľadaného zariadenia. [25, 8]

V nasledujúcich podkapitolách si rozoberieme princípy fungovania, využitie, výhody a nevýhody, ako aj rôzne algoritmy používané pri satelitnej a terestriálnej lokalizácii. V tejto kapitole sme z väčšej miery čerpali z publikácie [8], ktorá ponúka komplexný a v mnohých častiach detailný prehľad naprieč rôznymi lokalizačnými systémami. Prevzaté informácie sme v mnohých prípadoch doplnili o aktuálnejšie, resp. detailnejšie, informácie z ďalších relevantných zdrojov. Podrobne sa zameriame predovšetkým na vzdialenú terestriálnu lokalizáciu zariadení, na ktorú sa aj praktická časť tejto práce, popísaná v kapitole 4, sústreďuje.

## 2.1 Lokalizácia pomocou satelitných navigačných systémov

Aktuálne existuje niekoľko plne alebo zatiaľ iba čiastočne funkčných satelitných navigačných systémov. Niektoré sú k dispozícii globálne (GPS, GLONASS, Galileo), ďalšie iba regionálne (Compass – Čína a okolité regióny, IRNSS – India, QZSS – Japonsko). [8]

Každý satelitný navigačný systém sa skladá z troch segmentov: *vesmírny segment* tvorený konšteláciou vesmírnych satelitov, *riadiaci/monitorovací segment* tvorený sieťou pozemných monitorovacích staníc a *používateľský segment* pozostávajúci z koncových zariadení používateľov slúžiacich na výpočet a zobrazovanie ich polohy. [8]

### 2.1.1 Vesmírny segment

Vesmírny segment navigačných systémov tvoria satelity umiestnené na obežných dráhach okolo Zeme. Satelity navigačných systémov obiehajú Zem na MEO (Medium Earth Orbit), z čoho vyplýva aj minimálny počet potrebných satelitov (24 na šiestich obežných dráhach) na zabezpečenie dostatočne presnej lokalizácie na celej ploche planéty. Jednotlivé globálne systémy fungujú s rôznymi počtami satelitov, pričom okrem minimálnej konfigurácie majú k dispozícii aj jeden či viac záložných satelitov. [8]

### Navigačný systém GPS

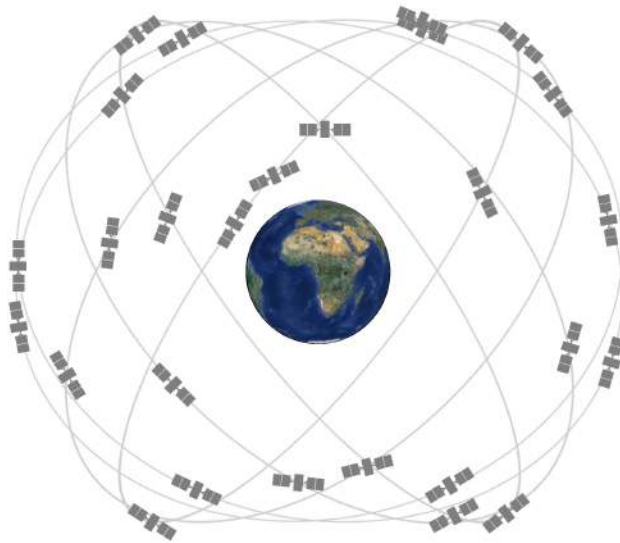
Systém GPS momentálne (február 2015) používa zostavu 31 satelitov – 27 v prevádzke (vid' obr. 2.2), 3 záložné a 1 mimo prevádzky [27, 19]. Záložné satelity sú tiež v plnej prevádzke a slúžia na zvyšovanie presnosti (spoľahlivosti) lokalizácie [8].

Satelity systému GPS vysielajú dva druhy signálov súvisiace s dvomi poskytovanými službami: *štandardný lokalizačný systém* určený pre civilných používateľov a *presný lokalizačný systém* určený na účely americkej armády a ďalších štátnych zložiek USA. [8]

Signál GPS je šírený dvomi, resp. tromi kanálmi (L1, L2 v aktuálnej verzii a L5 rezervovaný pre budúce použitie). Všetky satelity vysielajú na rovnakých frekvenciách a používajú kódový multiplex (CDMA) na rozlíšenie signálu z jednotlivých satelitov. Digitálny signál obsahujúci navigačné dáta je modulovaný pomocou BPSK. [8]

Každý satelit má pridelené svoje unikátne pseudonáhodné čísla, ktorými kóduje svoj navigačný signál. Signál vysielaný satelitmi obsahuje 3 navigačné kódy: [8]

- *C/A kód* so štandardnou presnosťou pre civilné použitie,



**Obrázok 2.2:** Konštelácia 27 satelitov na 6 obežných dráhach systému GPS prevzaná z [27]

- *P kód* rozširujúci C/A kód s cieľom zvýšenia jeho presnosti pre potreby armády a
- *Y kód* slúžiaci ako náhrada za P kód v prípade narušenia jeho integrity – taktiež pre potreby armády.

### Navigačný systém GLONASS

Systém GLONASS momentálne (február 2015) používa zostavu 28 satelitov – 24 v prevádzke, 1 záložný, 1 mimo prevádzky a 2 v testovacej fáze [18].

Na rozdiel od ostatných satelitných navigačných systémov, tento používa na rozlíšenie signálov jednotlivých satelitov frekvenčnú moduláciu (FDMA). Každý satelit teda vysiela na inej frekvencii v rámci spektier L1 a L2. [8]

Podobne ako u GPS sú k dispozícii dva navigačné kódy – verejný (C/A kód) s menšou presnosťou a presnejší (P kód) pre armádne využitie. [8]

### Navigačný systém Galileo

Systém Galileo je zatiaľ (máj 2015) v prevádzke len čiastočne. Na obežných dráhach je 8 satelitov, pričom iba 7 z nich je momentálne v prevádzke [11, 12]. Vypustenie ďalších štyroch satelitov je naplánované do konca roka 2015 [12]. Plne funkčný systém Galileo bude pozostávať z 30 satelitov (27 v plnej prevádzke a 3 záložných, no taktiež v prevádzke slúžiacich na spresňovanie lokalizácie) [8].

Satelity systému Galileo vysielať na troch nezávislých kanáloch E5, E6 a E1. Podobne ako aj u GPS, aj tu sa používa kódový multiplex (CDMA) na rozlíšenie signálu jednotlivých satelitov. Kým kanál E6 je vyhradený predovšetkým na šírenie komerčného lokalizačného kódu, kanály E5 a E6 obsahujú tak verejný, ako aj komerčný kód. [8]

#### 2.1.2 Riadiaci segment

Riadiaci segment je založený na množstve pozemných staníc rozložených po celom svete. Tieto stanice slúžia na ovládanie satelitov a na monitorovanie ich signálov a presnosti

lokalizácie. Jedine systém GLONASS má z politických dôvodov svoje monitorovacie stanice rozložené výhradne na území bývalého Sovietskeho zväzu, čo je považované za jeden zo slabých článkov tohoto systému. [8]

### 2.1.3 Používateľský segment

Ide o ďalšiu zo zásadných častí satelitných navigačných systémov. Používateľský segment tvorí množstvo rôznych zariadení od rôznych výrobcov. Ako už bolo spomenuté na začiatku tejto kapitoly, v prípade satelitných systémov ide o tzv. samolokalizáciu, čiže zariadenie v používateľskom segmente je samo zodpovedné za výpočet svojej polohy aplikáciou správneho algoritmu na signály prijaté z jednotlivých satelitov. [25, 8]

Výpočet polohy zariadenia pri satelitných navigačných systémoch sa deje pomocou algoritmu TDOA (viď kap. 2.2.3), kde sa využíva fakt, že signál z rôzne vzdialených družíc dorazí do daného zariadenia za rôzne dlhú dobu. [8]

Každý satelit vysiela signál s rovnakou preddefinovanou štruktúrou správy. Táto správa okrem iného obsahuje tzv. *almanach*, t. j. informácie o polohe všetkých satelitov. Základom pre úspešnú lokalizáciu je, aby malo zariadenie v používateľskom segmente tento almanach k dispozícii. Môže ho získať buď zachytením celého cyklu signálu z niektorého satelitu, alebo z externého zdroja (systém A-GPS). [8]

Hodiny na satelitoch sú dokonale synchronizované a každý satelit odosiela rovnakú časť správy v tom istom časovom okamihu. Lokalizačné zariadenie meria čas, ktorý uplynie od okamihu kedy bola zachytená určitá časť tejto správy z jedného satelitu až do okamihu, keď dôjde k zachyteniu rovnakej časti správy z ostatných dostupných satelitov. Z takto získaných dát sa určí rozdiel vzdialeností od jednotlivých satelitov. Keďže z almanachu je známa ich poloha, je možné dopočítať aj polohu samotného lokalizačného zariadenia. [8]

## 2.2 Lokalizačné techniky v terestriálnych systémoch

Lokalizačné techniky v bezdrôtových terestriálnych sieťach využívajú k lokalizácii rôzne parametre získané z vlastností týchto sietí. Vo väčšine sietí ide o rovnaké, resp. veľmi podobné, parametre. Väčšina systémov využíva parametre ako *sila prijatého signálu* (*RSS* – *received signal strength*), *čas prijatia signálu* (*TOA* – *time of arrival*), *rozdiel časov prijatia signálu* (*TDOA* – *time difference of arrival*) alebo *uhol prijatia signálu* (*AOA* – *angle of arrival*) [8]. Použitím týchto parametrov je možné vypočítať (v niektorých prípadoch viac, v iných menej presne) reálnu vzdialenosť medzi dvomi bezdrôtovo komunikujúcimi zariadeniami.

Vzdialenosti dvoch zariadení vypočítané z parametrov bezdrôtových sietí sa následne využívajú v lokalizačných algoritmoch ako sú *trilaterácia*, *triangulácia* či metódy založené na *kalibrácii* systému. Opäť platí, že jednotlivé lokalizačné systémy využívajú podobné algoritmy naprieč rôznymi terestriálnymi sieťami. [8]

### 2.2.1 Techniky založené na sile prijatého signálu (RSS)

Lokalizácia na základe sily prijatého signálu (RSS) je už niekoľko desiatok rokov známym a využívaným princípom. Jeho výhoda spočíva predovšetkým vo fakte, že ani jedno zo zariadení (prijímajúce/odosielajúce signál) nemusí riešiť vzájomnú synchronizáciu času. Nemenej dôležitou výhodou je aj skutočnosť, že princíp lokalizácie pomocou RSS je možné aplikovať vo väčšine bezdrôtových terestriálnych komunikačných sietí. Ide o najrozšírenejšiu

lokalizačnú technológiu predovšetkým vďaka nenáročnej implementácii a možnosti použitia aj na lacnejších zariadeniach. [8]

### Výpočet vzdialenosti dvoch zariadení na základe sily signálu medzi nimi

Keďže sila signálu medzi vysielačím a prijímačím zariadením sa zaznamenáva v logaritmických jednotkách (dBm), pre výpočet reálnej vzdialenosti medzi nimi (napr. v metroch) je potrebné ju najprv prekonvertovať. To je možné dosiahnuť vyjadrením vzdialenosti  $d$  z nasledovnej rovnice prevzatej z [26]:

$$P_{received}(d) = P_{received}(d_0) - 10 \cdot \alpha \cdot \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (2.1)$$

kde majú jednotlivé konštanty nasledovný význam:

- $P_{received}(d)$  je sila signálu voči vysielačiemu zariadeniu nameraná na prijímačom zariadení.
- $P_{received}(d_0)$  je sila referenčného signálu získaného buď jednorázovou kalibráciou, alebo priebežne vyhodnocovaného z prijímaných signálov. Môže ísť o periodický signál odosielaný z referenčného zariadenia so známou nemiennou sa polohou. Z polôh oboch zariadení sa následne určí reálna vzdialenosť ( $d_0$ ) medzi referenčným zariadením vysielačím a zariadením prijímačím referenčný signál.
- $\alpha$  je konštanta vyjadrujúca vlastnosti prostredia, v ktorom sa meranie uskutočňuje. Pre vonkajšie prostredie sa používa hodnota  $\alpha = 2$ , pre vnútorné prostredia sa táto hodnota blíži k číslu 3. [32]
- $d$  je vzdialenosť medzi vysielačím a prijímačím zariadením, ktorú chceme vypočítať.

Vzhľadom na jednoduchosť tohoto modelu nie sú jeho výsledky veľmi presné. Je to spôsobené predovšetkým príliš veľkou abstrakciou prostredia a vyjadrením všetkých jeho variabilných vlastností jedinou konštantou  $\alpha$ . [13]

V prípade použitia tohoto modelu na výpočet vzdialenosti v internom prostredí budovy, je možné ho ďalej rozšíriť a zvýšiť jeho presnosť pridaním konštánt charakterizujúcich vlastnosti stien nachádzajúcich sa medzi vysielačím a prijímačím zariadením, resp. referenčným zariadením. Dostávame teda nasledovnú modifikáciu predošlej rovnice prevzatú z [5, 13]:

$$P_{received}(d) = P_{received}(d_0) - 10 \cdot \alpha \cdot \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + \sum_{i=0}^{N_w} n_i \cdot \omega_i \quad (2.2)$$

kde majú dodatočné konštanty nasledovný význam:

- $(N_w - 1)$  udáva počet stien medzi dvoma zariadeniami s navzájom rôznymi vlastnosťami (materiál, hrúbka), a teda spôsobujúce rôzne veľký útlm signálu.
- $n_i$  udáva počet stien s daným (rovnakým) útlmom  $\omega_i$  dB.

Napriek vyššie zavedeným vylepšeniam daného modelu stále nie je jeho presnosť dostatočná kvôli príliš veľkým chybám spôsobenými príliš veľkou jednoduchosťou, a tým pádom aj veľkou nepresnosťou, konštanty  $\alpha$ . Tú je totiž vo vnútornom prostredí zariadenej budovy kvôli špecifickému spôsobu šírenia bezdrôtového signálu prakticky nemožné určiť dostatočne presne. [13]

### 2.2.2 Techniky založené na čase prijatia signálu (TOA)

Vzhľadom na to, že elektromagnetický signál sa šíri vákuom a približne všetkými druhmi materiálov, konštantnou rýchlosťou svetla ( $c \approx 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$ ), možno po zmeraní dĺžky trvania prenosu signálu (TOF – time of flight) medzi vysielajúcim a prijímajúcim zariadením jednoduchým vzťahom vypočítať ich vzájomnú vzdialenosť: [8]

$$d = \tau_f \cdot c \quad (2.3)$$

kde  $\tau_f$  označuje dĺžku trvania prenosu signálu,  $c$  je konštantná rýchlosť svetla a  $d$  je vypočítaná vzdialenosť medzi dvomi zariadeniami.

Najjednoduchší spôsob aplikácie tejto metódy je, že vysielajúce zariadenie vyšle signál obsahujúci čas jeho odoslania. Prijímajúce zariadenie si z času prijatia a času odoslania (obsiahnutom v samotnom signále) vypočíta dobu trvania prenosu signálu a z nej následne vzdialenosť medzi dvomi zariadeniami. Takýto prístup si ale vyžaduje veľmi presnú synchronizáciu času medzi zariadeniami, keďže každá, čo i len drobná nepresnosť, môže spôsobiť veľkú chybovosť vo výpočte vzájomnej vzdialenosti týchto zariadení. [8]

Jedným zo spôsobov, ako problému s presnou synchronizáciou hodín predísť, je použitie dvojcestnej modifikácie metódy TOA. V tomto prípade zariadenie, ktoré zisťuje svoju vzdialenosť od druhého, odošle signál, na ktorý druhé zariadenie po jeho prijatí odpovie. Pred odoslaním odpovede zariadenie zvyčajne konštantnú dobu čaká. Odosielajúce zariadenie má následne informáciu o dobe, ktorá uplynula od odoslania signálu až po prijatie odpovede (tzv.  $RTT$  – round-trip time). Vzťah na výpočet vzdialenosti v prípade tejto metódy je potom nasledovný: [8]

$$d = \frac{RTT - \tau_d}{2} \cdot c \quad (2.4)$$

kde  $RTT$  označuje čas medzi odoslaním signálu a prijatím odpovede,  $\tau_d$  je konštantná doba, počas ktorej druhé zariadenie čaká pred odoslaním odpovede,  $c$  je konštantná rýchlosť svetla a  $d$  je vypočítaná vzdialenosť medzi dvomi zariadeniami.

V tomto prípade sa síce eliminujú problémy spôsobené prípadnou nepresnou synchronizáciou hodín na jednotlivých zariadeniach, no presnosť výpočtu vzdialenosti stále ovplyvňuje prípadná relatívna nepresnosť hodín na zariadení, ktoré signál prijíma a odosiela odpoveď. Ak totiž hodiny na tomto zariadení bežia rýchlejšie alebo pomalšie ako na druhom, vnesie sa tým do merania nepresnosť. Tá sa prejaví na rôzne dlhých dobách  $\tau_d$  na jednotlivých zariadeniach kvôli rôzne rýchlym hodinám. [8]

### 2.2.3 Techniky založené na rozdiel čase prijatia signálu (TDOA)

Aby sa predišlo problémom, ktoré vznikajú v prípade metódy TOA (synchronizáciou hodín medzi zariadeniami, nepresnosť hodín na zariadeniach), používa sa práve metóda TDOA. Tá na rozdiel od predošlej metódy používajúcej absolútny čas prijatia signálu, porovnáva relatívny rozdiel v časoch prijatia signálu na dvoch rôznych prijímačoch s rôznymi polohami. Koreláciou prijatých signálov sa určí časový rozdiel a z neho vzdialenosť vysielajúceho zariadenia od jednotlivých prijímačov. [8]

### 2.2.4 Techniky založené na uhle prijatia signálu (AOA)

Na určenie uhla prijatia signálu je potrebné, aby prijímacie zariadenie disponovalo skupinou smerových antén. Uhol prijatia signálu sa vypočíta buď z rozdielu fáz prijatého signálu



na jednotlivých anténach alebo už spomínanou metódou TDOA z rozdielov časov prijatia daného signálu na jednotlivých anténach. [8]

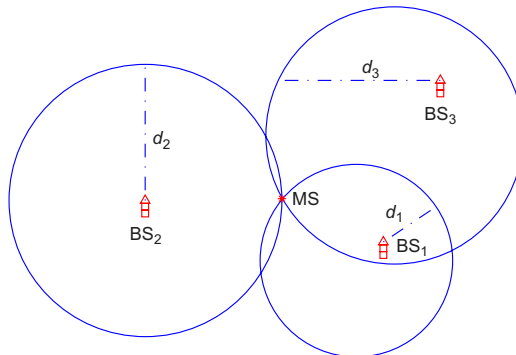
V tomto prípade nie je potrebné zisťovať vzdialenosť objektu, ale po zachytení rovnakého signálu na dvoch rôznych prijímačoch je možné po vypočítaní uhla prijatia signálu určiť priamo polohu vysielajúceho zariadenia (napr. *trianguláciou*).

## 2.2.5 Metódy a algoritmy na určenie polohy v terestriálnych systémoch

Lokalizácia v terestriálnych systémoch funguje vo väčšine prípadov v dvoch krokoch. V prvom kroku sa spracujú potrebné parametre terestriálnej siete (RSS, TOA, atď. popísané vyššie). V ďalšom kroku sa použitím týchto parametrov v kombinácii s vhodným lokalizačným algoritmom (geometrickým alebo mapovacím) lokalizuje dané zariadenie [8]. Na lokalizáciu je znova možné použiť niekoľko rôznych metód.

### Lokalizácia pomocou laterácie a angulácie

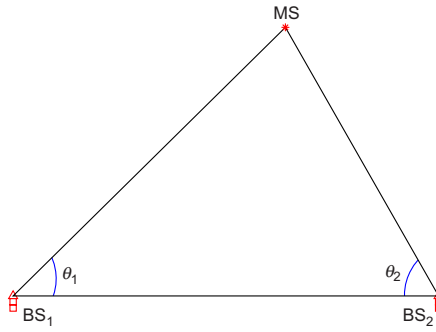
*Lateráciu* možno použiť v kombinácii s metódami RSS, TOA a TDOA [8]. Ide o geometrickú metódu [8], ktorá pomocou troch kružníc, kde každá má stred v referenčnom bode (poloha prijímača) a má polomer rovný vzdialenosti prijímača od vysielača, určí polohu vysielajúceho zariadenia na mieste, kde sa dané kružnice pretnú. V prípade, že sú vypočítané vzdialenosti presné, všetky kružnice sa pretnú v jednom bode (vid' obr. 2.3).



**Obrázok 2.3:** Určenie polohy zariadenia pomocou trilaterácie prevzaté z [8] (MS – lokalizované zariadenie, BS – prijímač signálu)

K jednoznačnému určeniu polohy vysielajúceho zariadenia je potrebné, aby jeho signál zachytili aspoň tri rôzne prijímajúce zariadenia. Ak sú vypočítané vzdialenosti nepresné, kružnice sa pretnú na viacerých miestach. Tieto priesečníky nám následne vymedzujú priestor, v ktorom sa hľadané zariadenie nachádza.

Lokalizácia pomocou *angulácie* (taktiež geometrická metóda) sa použije v kombinácii s metódou AOA. K použitiu tejto metódy je potrebné, aby signál vysielajúceho zariadenia zachytili dva prijímače, ktoré detegujú uhol prijatia signálu. Poloha vysielača sa následne určí ako priesečník priamok vedených z polohy prijímačov v smere prijatého signálu (vid' obr. 2.4) [8]



**Obrázok 2.4:** Určenie polohy zariadenia pomocou angulácie prevzaté z [8] (MS – lokalizované zariadenie, BS – prijímač signálu)

### Hybridné lokalizačné metódy

Pre dosiahnutie lepších výsledkov sa často používajú aj hybridné lokalizačné metódy. Možno tak použiť napr. metódy TOA, TDOA resp. RSS v kombinácii s metódou AOA. V tomto prípade postačuje, ak signál vysielajúceho zariadenia zachytí iba jeden prijímač. Ten pomocou metódy AOA určí smer, z ktorého bol signál prijatý, a pomocou jednej z ďalších metód vypočíta vzdialenosť vysielajúceho zariadenia. [8]

### Lokalizácia metódou kalibrácie (fingerprinting)

Ide o mapovaciu metódu, v ktorej sa v prvej fáze podrobne zmapuje intenzita signálu v celom monitorovanom priestore a vytvorí sa databáza nameraných hodnôt s údajmi o polohe, kde bola daná hodnota zaznamenaná a sile nameraného signálu. Poloha lokalizovaného zariadenia sa potom v druhej fáze určí z databázy výberom hodnôt, ktoré sú k aktuálne nameraným najbližšie. Použiť možno napríklad algoritmus *k-nearest neighbors* alebo výpočet pomocou neurónových sietí. [13, 8]

Algoritmus *k-nearest neighbors* postupne porovnáva *euklidovskú vzdialenosť* dvoch vektorov: [13]

- vektor aktuálne nameraných signálov medzi vysielačom a jednotlivých prijímačoch a
- vektor referenčných (nakalibrovaných) signálov získaných z databázy

podľa nasledovného vzťahu: [13]

$$d(Z, Z_i) = \frac{1}{M} \cdot \sqrt{\sum_{j=1}^M (RSS_j(x, y) - RSS_j(x_i, y_i))^2} \quad (2.5)$$

Jednotlivé konštanty v ňom majú nasledovný význam:

- $d(Z, Z_i)$  je vypočítaná euklidovská vzdialenosť medzi aktuálne nameranou hodnotou signálu  $Z$  a nakalibrovanou hodnotou  $Z_i$  na pozícii  $(x_i, y_i)$ ,
- $M$  je počet prijímačov, ktoré zachytávajú vysielačný signál,
- $RSS_j(x, y)$  je hodnota aktuálne nameraného signálu na prijímači „ $j$ “ voči vysielajúcejmu zariadeniu a



- $RSS_j(x_i, y_i)$  je hodnota nakalibrovaného signálu voči prijímaču „j“ na pozícii  $(x_i, y_i)$  získaného z databázy.

Po otestovaní všetkých referenčných záznamov sa z databázy vyberie ten záznam, ktorý má najmenšiu euklidovskú vzdialenosť, teda najmenšiu chybu voči aktuálne nameraným hodnotám signálu. Vysielajúce zariadenie sa napokon lokalizuje na polohu získanú z tohoto záznamu. [8]

V prípade lokalizácie použitím neurónovej siete má algoritmus opäť dve fázy. V prvej fáze prebieha tréning neurónovej siete. Tá dostáva na vstup jednotlivé kalibračné body so známymi polohami. V tejto fáze si neurónová sieť upravuje svoje parametre a postupne minimalizuje lokalizačnú chybu. [8]

V druhej fáze algoritmu už neurónová sieť priamo lokalizuje zariadenia vysielajúce signál na základe vstupných a naučených dát. Výhodou neurónových sietí oproti databázovému prístupu je okamžitá reakcia na vstupné dáta a menšie výpočtové nároky na zariadenie vykonávajúce lokalizačné výpočty. [8]

Metódu kalibrácie možno použiť v kombinácii s metódami RSS, TOA aj TDOA s tým, že ako kalibračné hodnoty sa použijú buď priamo originálne parametre (sila signálu, čas prijatia signálu, atď.) alebo prepočítané vzdialenosti získané z týchto parametrov.

### Spresenie kalibračnej metódy

Presnosť tejto metódy je silne závislá od hustoty kalibrácie, a to predovšetkým na plochách s množstvom prekážok brániacim šíreniu signálu (napr. vnútro budovy). Zabezpečiť dostatočnú hustotu kalibrácie ale môže byť pri aplikácii tohoto riešenia na plochu s väčšou rozlohou časovo náročné. Je preto žiadúce vylepšiť túto metódu a miesto výberu jednej (najbližšej) nakalibrovanej hodnoty ich vybrať viac (napríklad tri) a presnú polohu zariadenia dopočítať na základe rozdielov medzi hodnotami signálu aktuálne získanými z prijímačov a tými z databázy.

K tomu môžeme použiť už spomínanú metódu laterácie. V tomto prípade ju namiesto lokalizácie v rámci celej lokalizačnej plochy použijeme iba na upresnenie lokalizácie v rámci niekoľkých málo metrov (podľa hustoty kalibračných bodov). Vzdialenosť medzi týmito referenčnými bodmi zistíme z databázy a aj v prípade, že medzi nimi nebude homogénne prostredie a metóda dodatočného výpočtu bude nepresná, dosiahneme zrejme nie menšiu presnosť lokalizácie, než použitím priamo údajov získaných z databázy referenčných hodnôt.

Ďalšia možnosť ako zvýšiť presnosť tejto metódy je použitie výpočtu ťažiska z množiny vektorov najbližších nakalibrovaných polôh voči lokalizovanému zariadeniu. Majme teda množinu  $N$  týchto polôh získaných z databázy. Polohu lokalizovaného zariadenia môžeme určiť pomocou nasledovnej rovnice: [13]

$$X = \frac{\sum_{j=1}^k \left( \frac{1}{d(Z, Z_i)} \right) \cdot X_j}{\sum_{j=1}^k \left( \frac{1}{d(Z, Z_i)} \right)} \quad (2.6)$$

kde sú jednotlivé konštanty definované nasledovne:

- $X$  je výsledná poloha vysielajúceho zariadenia,
- $k$  je počet vybraných referenčných hodnôt z databázy a
- $X_j$  je daný vektor z množiny  $N$  vybraných hodnôt z databázy

## Ďalšie metódy lokalizácie zariadení

Okrem vyššie popisovaných metód detekcie zariadení vo WiFi sieti existujú aj ďalšie, ktoré ale presahujú rozsah tejto práce.

Ide napríklad o metódu detekcie polohy rôznymi pravdepodobnostnými algoritmi (napr. Markovov algoritmus) popísanú v [16], alebo o zvyšovanie presnosti detekcie analýzou grafických mapových podkladov, na ktorých sa dané zariadenie lokalizuje (tzv. *particle filter*). Na mape sa detekujú miestnosti, a tým sa dosahuje príslušná korekcia lokalizačného algoritmu [13, 30].

## 2.3 Praktické použitie lokalizácie v terestriálnych systémoch

Väčšina terestriálnych lokalizačných systémov na rozdiel od tých satelitných pôvodne slúžila ako komunikačná sieť. Až neskôr došlo k vývoju lokalizačných a navigačných systémov, ktoré začali využívať možnosti týchto sietí na určovanie polohy. [8]

Implementácia lokalizačných systémov nad existujúcimi komunikačnými sieťami sa týka predovšetkým *bunkových sietí*, *WiFi sietí (WLAN)*, *senzorových sietí (WSN)* a v poslednom čase aj v *ultra-širokopásmových sietí (UWB)*. [8]

### 2.3.1 Lokalizácia v bunkových sieťach

Pod pojmom bunkové siete rozumieme predovšetkým siete využívané pre komunikáciu prostredníctvom mobilných telefónov (GSM, UMTS, LTE, ...). Tie boli zo začiatku stavané na prenos hlasu, resp. dát a vôbec sa nepredpokladalo ich využitie aj za účelom lokalizácie mobilných zariadení. [8]

Najjednoduchší lokalizačný princíp aplikovateľný u bunkových sietí je detekcia vysielача (BTS), s ktorým lokalizované mobilné zariadenie komunikuje. Presnosť takejto lokalizácie ale závisí od veľkosti buniek a často je nevyhovujúca aj v prípade hustejších bunkových sietí. [8]

Alternatívnym riešením je použitie metód popísaných v kap. 2.2 ako sú TOA resp. TDOA. Tie ale vyžadujú, aby bol signál vysielaný lokalizovaným mobilným zariadením zachytený viacerými BTS, čo je v prípade rozľahlých mobilných sietí v mnohých prípadoch nemožné. To môžeme čiastočne riešiť hybridnými metódami, keď sa použije napríklad kombinácia TDOA/AOA popísaná napr. v [7], ktorá dokáže s vysokou presnosťou lokalizovať zariadenia aj v prípade, že sú detekované iba jedným BTS. [8]

### 2.3.2 Lokalizácia vo WiFi sieťach

Vzhľadom na veľké rozšírenie WiFi sietí, ktoré v dnešnej dobe nájdeme už vo väčšine budov, stále čoraz častejšie sa objavujú aj lokalizačné riešenia založené na technológii WiFi.

Tie vo väčšine prípadov využívajú na lokalizáciu informáciu o sile prijatého signálu (RSS). Intenzita WiFi signálu ale so zväčšujúcou sa vzdialenosťou klesá nelineárne, čo výrazne komplikuje jeho priamu konverziu na vzdialenosť. Preto sa v prípade WiFi sietí využíva hlavne mapovací algoritmus *kalibrácie* (viď kap. 2.2.5) v kombinácii s RSS. [8]

U WiFi sietí je teoreticky možné použiť aj metódu TOA resp. TDOA, keďže doba prenosu signálu sa mení lineárne v závislosti od vzdialenosti, no hardvér, na ktorých sú bežné prístupové body vo WiFi sieťach postavené, nemá dostatočne presné hodiny na to, aby mohol zariadenia metódou TOA dostatočne presne lokalizovať. [8]

Hodiny v bežnom prístupovom bode pracujú typicky s presnosťou  $1 \mu\text{s}$ , čo pri rýchlosti šírenia elektromagnetického signálu  $c \approx 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  vnáša do merania vzdialenosti chybu cca 300 m. Pre zníženie chyby na 1 m by boli potrebné hodiny s presnosťou až 3,33 ns. [8]

Existujú publikácie, ktoré sa s nepresnými hodinami na prístupových bodoch snažia vysporiadať a implementovať na nich metódy TOA (vid' napr. [20]). Ďalšie publikácie sa zase snažia implementovať metódu TDOA. V [23] napr. autori popisujú riešenie, ktoré umožňuje lokalizovať zariadenie vo WiFi sieti použitím TDOA bez potreby synchronizovať čas medzi jednotlivými prístupovými bodmi. Toto riešenie si ale na druhej strane vyžaduje, aby boli jednotlivé prístupové body vybavené hodinami s vysokou presnosťou.

## Štandard 802.11 a jeho protokoly

Štandard 802.11 špecifikuje všetky nevyhnutné detaily týkajúce sa bezdrôtovej komunikácie v počítačových sieťach v pásmach 2.4 GHz a 5 GHz. Tento štandard je známy predovšetkým pod názvom WiFi [3]. Pôvodný štandard 802.11 vznikol v roku 1999 a podporoval iba jeden protokol s nízkymi prenosovými rýchlosťami (1 a 2 Mb/s). Neskôr bola vytvorená jeho prvá modifikácia pridaním protokolu 802.11b, ktorý prenosovú rýchlosť výrazne zvýšil (až na 11 Mb/s) [10]. Využívanie WiFi sa postupne stalo veľmi populárnym a v poslednej dobe sa výrazne rozšíril počet zariadení, ktoré WiFi používajú. Do štandardu 802.11 tak postupne pribúdali nové protokoly význačné predovšetkým neustále sa zvyšujúcou prenosovou rýchlosťou oproti ich predchodcom (vid' nižšie v tejto kapitole).

Množina protokolov tohoto štandardu ale ešte zďaleka nie je konečná. Nové protokoly stále vznikajú a podporujú čoraz vyššie rýchlosti bezdrôtového prenosu (vid' protokoly 802.11ac a 802.11ad popísané ďalej).

### Protokol 802.11b

Tento protokol vznikol ako prvé rozšírenie pôvodného protokolu 802.11, no názvom 802.11b sa súhrnne označujú oba protokoly. Protokol podporuje štyri prenosové rýchlosti – 1 Mb/s a 2 Mb/s prevzaté z 802.11 a rýchlosti 5,5 Mb/s a 11 Mb/s pridané v 802.11b [10]. Reálne rýchlosti sa ale pohybujú maximálne okolo 5 Mb/s a k ich dosiahnutiu je potrebné, aby boli komunikujúce zariadenia od seba vzdialené na menej ako 100 metrov [9].

Protokol pracuje v pásme 2,4 GHz a používa kanály šírky 22 MHz. Tento protokol je už v dnešnej dobe považovaný za historický a bol postupne nahradený protokolom 802.11g. [9]

### Protokoly 802.11a a 802.11g

Protokoly 802.11a a 802.11g majú niekoľko spoločných vlastností, no na druhej strane sa v niektorých vlastnostiach výrazne líšia. Oba boli uvedené až po protokole 802.11b, no kým 802.11g sa snaží svojho predchodcu vylepšiť, teda ponúka vyššiu prenosovú rýchlosť (až 54 Mb/s) a zachováva spätnú kompatibilitu, 802.11a funguje na úplne inom princípe. Návrh protokolu 802.11a dokonca začal ešte skôr než návrh 802.11b. S protokolom 802.11g majú spoločnú iba maximálnu prenosovú rýchlosť. [9]

Protokol 802.11g zachováva spätnú kompatibilitu aj tým, že rovnako ako 802.11b využíva pásmo 2,4 GHz, no používa iné spôsoby modulácie signálu. 802.11a funguje na pásme 5 GHz, čo má niekoľko výhod no aj množstvo obmedzení. Pásmo 5 GHz je totiž menej zarušené, či už od iných zariadení, ktoré s WiFi kompatibilné nie sú, no spôsobujú rušenie (napr. mikrovlnné rúry, bezdrôtové telefóny a pod.), ale aj od veľkého množstva zariadení komunikujúcich cez WiFi. Signály s vyššou frekvenciou majú ale menší dosah, čo spôsobuje, že

dosah zariadení v pásme 5 GHz je približne 20 metrov, pričom maximálna reálna prenosová rýchlosť sa pohybuje okolo 11 – 20 Mb/s. U 802.11g je dosah rovnako ako u 802.11b približne 100 metrov a reálne prenosové rýchlosti dosahujú 20 – 25 Mb/s. [9]

### Protokol 802.11n

Ide o najnovší z aktuálne komerčne používaných protokolov WiFi podporujúci najvyššie prenosové rýchlosti. Teoretická maximálna rýchlosť prenosu je až 600 Mb/s. Protokol 802.11n bol zavedený v roku 2009 a je spätne kompatibilný so všetkými ostatnými popisovanými protokolmi, teda 802.11a, b aj g. Umožňuje preto komunikáciu v oboch využívaných pásmach 2,4 GHz aj 5 GHz. [9]

Významné zvýšenie prenosovej rýchlosti sa dosahuje niekoľkými technikami a optimalizáciami, pričom nie všetky sú prítomné v každej implementácii štandardu. Reálne prenosové rýchlosti sa preto môžu pohybovať od 65 Mb/s až do teoretických 600 Mb/s v závislosti od počtu a druhu použitých techník [9, 10]. Ide o nasledovné techniky:

- *MIMO (multiple input-multiple output)* používa niekoľko antén (maximálne štyri) na komunikáciu s jedným alebo viacerými zariadeniami. Pre zrýchlenie prenosovej rýchlosti je potrebné, aby obe zariadenia mali potrebný počet antén. [9, 10]
- *Kanály so šírkou 40 MHz* sa získajú spojením dvoch kanálov do jedného širšieho. Tým sa docieli vyše dvojnásobné zrýchlenie, keďže medzi jednotlivými kanálmi existuje ochranný interval, ktorý ale v tomto prípade nie je potrebný a môže byť tiež použitý na prenos dát. [9]
- *Agregácia rámcov* umožňuje spojiť niekoľko rôznych rámcov do jedného so spoločnou hlavičkou. Protokol ďalej umožňuje príjemcovi upozorniť odosielateľa v prípade, že sa niektoré časti veľkého rámca po ceste poškodili. Odosielateľ potom znova posiela iba tie rámce, ktoré neboli korektne prijaté a nie celý agregovaný rámec. [10]

### Blízka budúcnosť štandardu 802.11 – protokoly 802.11ac a 802.11ad

Protokoly 802.11ac a 802.11ad sú prvé WiFi protokoly dosahujúce gigabitových prenosových rýchlostí. Najvýznamnejším rozdielom medzi týmito dvoma protokolmi je pásmo v ktorom pracujú. Protokol 802.11ac využíva štandardné 5 GHz-ové pásmo, kým protokol 802.11ad pracuje v pásme 60 GHz. To, samozrejme, spôsobuje výrazné zníženie dosahu a napríklad problémy s priepustnosťou signálu cez steny. Rozdiel je taktiež v používanej modulácii signálu. Kým 802.11ac používa až 256-QAM, 802.11ad si vystačí so 16-QAM. [14, 28]

Výrazné zrýchlenie prenosu oproti 802.11n sa dosahuje znova niekoľkými rôznymi technikami. Protokol 802.11ac zväčšuje šírku využívaných kanálov na 80, prípadne až 160 MHz, čím sa podobne ako u 802.11n dosahuje zvýšenie prenosovej rýchlosti. V prípade, že nie je k dispozícii kontinuálny 160 MHz-ový kanál, protokol umožňuje použiť dva kanály šírky 80 MHz súčasne. Ďalšia modifikácia v 802.11ac je rozšírenie počtu antén zo štyroch na osem, čo sa v praxi využije predovšetkým na komunikáciu s rôznymi klientmi súčasne, no aj na výrazné zvýšenie maximálnej teoretickej prenosovej rýchlosti. [14]

Kapitoly 3 a 4 tejto práce nie sú zverejnené.

## Kapitola 5

# Testovanie a dosiahnuté výsledky

Pre účely otestovania a vyhodnotenia funkčnosti nášho lokalizačného systému sme si zvolili dve rozdielne lokality, v ktorých sme vykonávali naše testy. Cieľom bolo overiť a zdokumentovať presnosť a chybovosť nami implementovaného systému a jeho porovnanie s ďalšími systémami podobného charakteru (viď [25]).

Testovali sme dve varianty lokalizačného algoritmu (viď kap. 3.3.1) v dvoch režimoch lokalizácie (viď kap. 3.4.1) s dvomi testovacími zariadeniami, čo nám spolu dáva sadu ôsmich rôznych testov. Po aplikácii prvej sady testov a čiastočnom vyhodnotení výsledkov, sme sa za účelom zvýšenia presnosti a spoľahlivosti systému rozhodli mierne zmodifikovať lokalizačný algoritmus a pridali sme korekciu chýbajúcich dát popísanú v kap. 3.3.2. Celú sadu testov sme následne v oboch testovacích lokalitách zopakovali.

### 5.1 Metodika testovania

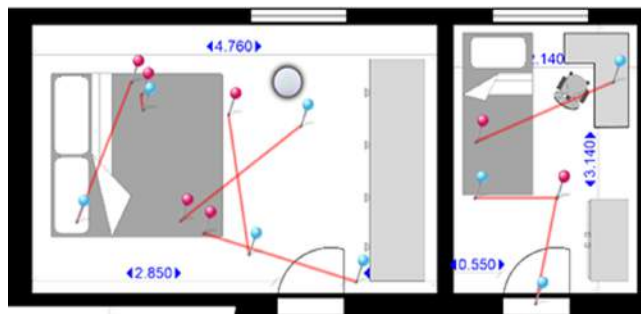
Testovanie prebiehalo formou porovnávania reálnej polohy testovacieho zariadenia (*testovacie bod*) s polohou určenou lokalizačným systémom. Používateľ postupne prechádzal po oblasti, v ktorej bol lokalizačný systém nasadený a v každej miestnosti si zvolil niekoľko testovacích bodov, na ktorých zadal do lokalizačného systému svoju aktuálnu polohu. Jeden test pozostával zo sady nazbieraných testovacích bodov po celej lokalizovanej oblasti. Takýchto testov sme vykonali niekoľko, s rôznymi kombináciami testovacích zariadení, lokalizačných algoritmov a režimov lokalizácie.

Do lokalizačného systému sme naimplementovali špeciálnu funkcionalitu, ktorá nám slúžila pre efektívny zber testovacích dát. Systém si ukladal reálnu a vypočítanú polohu testovacieho zariadenia na danom testovacom bode do databázy a následne tieto dáta vykresloval do mapy lokalizovanej oblasti.

Výstupy testovania sú teda jednak grafické (mapa so zakreslenými testovacími bodmi a k nim prislúchajúcimi vypočítanými polohami – viď obr. 5.1), no aj textové (tabuľky so zoznamom testovacích bodov a výsledkami daného testu). Pri jednotlivých testoch nás zaujímali nasledovné výsledky:

- *lokalizačná chyba*, t. j. vzdialenosť reálnej polohy od vypočítanej polohy, pričom sme porovnávali **priemer** a **medián** lokalizačnej chyby a graficky znázornili rozloženie mediánu lokalizačnej chyby a jeho distribučnú funkciu (viď príloha B.2.3) – lokalizačnú chybu sme určovali iba v prípade testovania lokalizácie presnej polohy, keďže pri lokalizácii miestnosti je jej hodnota irelevantná,

- *úspešnosť lokalizácie miestnosti*, t. j. percento testovacích bodov lokalizovaných do správnej miestnosti – v tomto prípade sme zistili, že prítomnosť sondy v miestnosti úspešnosť značne zvyšuje, preto sme okrem celkovej hodnoty aj zvlášť vyhodnocovali a navzájom porovnávali úspešnosť v prípade miestností, v ktorých sa sonda nachádzala s úspešnosťou u miestností, ktoré boli bez sondy.



**Obrázok 5.1:** Ukážka grafického výstupu testovania (modrá značka – reálna poloha, červená značka – vypočítaná poloha testovacieho bodu)

### 5.1.1 Testovacie lokality

Testovanie prebiehalo v dvoch lokalitách. V oboch prípadoch šlo o obytné priestory s približne podobnou rozlohou, pričom ako lokalizačná oblasť sa v oboch prípadoch využila celá plocha objektu. Lokalizačná oblasť sa rozprestierala vždy iba na jednom poschodí. V každej z miestností lokalizačnej oblasti sa umiestnilo niekoľko testovacích bodov (spravidla 3 – 5 podľa rozlohy miestnosti). Aby boli testovacie podmienky čo najmenej odlišné, dvere jednotlivých miestností boli počas testovania zavreté.

Testovanie jedného algoritmu pomocou rôznych testovacích zariadení bolo vykonané vždy nad totožnými kalibračnými dátami. Rekalibrácia systému sa uskutočnila iba po úprave lokalizačného algoritmu (po nasadení korekcie chýbajúcich dát) a medzi testovaním lokalizácie presnej polohy a lokalizácie miestnosti, keďže jednotlivé metódy si vyžadujú odlišný prístup pri kalibrácii.

Lokalizačné oblasti, v ktorých sa vykonávali testy mali nasledovné parametre:

#### Lokalita A – murovaný dom s rôzne hrubými stenami

- **Hrúbka stien:** 10 – 35 cm
- **Rozloha lokalizačnej oblasti:** 75 m<sup>2</sup>
- **Počet miestností:** 8
- **Počet sond:** 3
- **Vzdialenosti medzi sondami:** 8,2 m; 8,4 m a 8,7 m

#### Lokalita B – byt v zdieľanom panelovom dome s rovnako hrubými stenami

- **Hrúbka stien:** 10 cm
- **Rozloha lokalizačnej oblasti:** 80 m<sup>2</sup>
- **Počet miestností:** 7
- **Počet sond:** 3
- **Vzdialenosti medzi sondami:** 8,5 m; 12 m a 13,4 m



### 5.1.2 Testovacie zariadenia

Na testovanie sme použili dve zariadenia – prenosný počítač (notebook) a mobilný telefón (smartfón). V prípade počítača išlo o rovnaké zariadenie, pomocou ktorého sa vykonávala aj kalibrácia, čo by mohlo výsledky testovania mierne skresliť. Aby sme takémuto skresleniu predišli, ako druhé zariadenie sme použili práve smartfón. Cieľom bolo dosiahnuť, aby boli parametre testovacích zariadení čo najviac v kontraste.

Ako sme totiž predpokladali, a následne sa to pri testovaní aj potvrdilo, WiFi modul v počítači vysiela signál s väčším výkonom než ten vo smartfóne, preto ho sondy zachytia silnejší a systém dokáže zariadenie lokalizovať presnejšie. Pri smartfóne sa taktiež ukázalo, že sondy mali často problém zachytiť jeho signál v okrajových častiach lokalizovanej oblasti, v ktorých s lokalizáciou počítača ešte problémy neboli.

Z tohoto dôvodu výsledky testov uskutočnených s jedným aj druhým zariadením považujeme za okrajové hodnoty, kde sa výsledky testov uskutočnených na počítači blížia k tým najlepším možným výsledkom, aké je systém schopný v ideálnych podmienkach dosiahnuť a výsledky testov uskutočnených na smartfóne sa zase naopak blížia k tým najhorším možným výsledkom, ktoré systém dosiahne v prípade pokusu lokalizovať zariadenie s nízkym vysielacím výkonom.

Práve rozdiel medzi týmito hodnotami nám tak dáva reálnu predstavu o spoľahlivosti nášho systému. Čím je totiž tento rozdiel menší, tým viac je možné nameranú presnosť systému (resp. jej medián) považovať za spoľahlivý údaj.

## 5.2 Analýza dosiahnutých výsledkov

Na základe tabuľky uverejnenej v [25] porovnávajúcej rôzne vnútorné lokalizačné systémy sme si zvolili niekoľko systémov pracujúcich na podobnom princípe ako pracuje aj ten náš (lokalizácia v prostredí WiFi siete na základe sily prijatého signálu). Jedným z cieľov bolo náš systém vhodne zaradiť medzi porovnávané systémy na základe výsledkov na ňom uskutočnených testov a reálne zhodnotiť jeho konkurencieschopnosť v porovnaní s týmito systémami. Ide konkrétne o systémy RADAR [2], Horus [35], DIT [34], MultiLoc [29] a TIX [15].

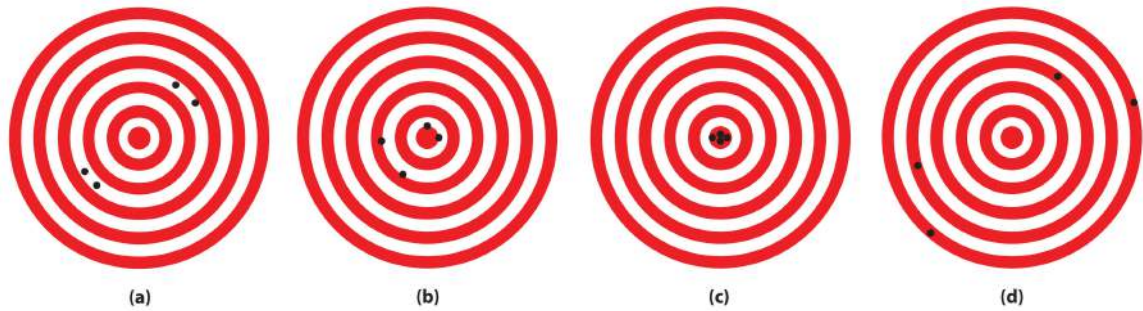
Autori v [25] tieto systémy porovnávajú predovšetkým na základe týchto dvoch zásadných metrík (taktiež vid' obr. 5.2):

- *presnosť lokalizácie (accuracy)* – t. j. priemerná hodnota resp. medián lokalizačnej chyby systému (vzdialenosť medzi reálnou a systémom vypočítanou polohou lokalizovaného objektu) a
- *zhodnosť lokalizácie (precision)* – najvyššia hodnota lokalizačnej chyby vyhodnotená zvlášť pre 50%, resp. 90% najpresnejších testovacích meraní určená z distribučnej funkcie vykonaných meraní.

Aj v našom prípade sme sa preto zamerali na testovanie *presnosti lokalizácie*, pričom zo získaných výsledkov sme pomocou distribučnej funkcie určili *zhodnosť lokalizácie* pre jednotlivé testy. Tú sme určili pre všetky vykonané testy lokalizácie presnej polohy.

Výsledky jednotlivých testov sme spracovali do tabuliek a graficky znázornili. Detailné výsledky všetkých testov sú k dispozícii k nahliadnutiu v prílohe B.





**Obrázok 5.2:** Grafické znázornenie rozdielu medzi presnosťou a zhodnosťou prevzaté z [22] (*a* – zhodné nepresné, *b* – nezhodné presné, *c* – zhodné presné a *d* – nezhodné nepresné)

### 5.2.1 Výsledky testov lokalizácie presnej polohy

Lokalizáciu presnej polohy sme na našom systéme testovali v dvoch lokalitách s dvomi rôznymi testovacími zariadeniami. Napriek podobnej rozlohe oboch lokalít, výsledky testov sa mierne líšia. Je to spôsobené predovšetkým rôznym počtom stien v jednotlivých lokalitách a ich rôznymi vlastnosťami. Kým v lokalite **A** sú steny väčšinou hrubé a z rôznych materiálov, v lokalite **B** ide o výrazne tenšie panelové steny. Na druhej strane ale jednotlivé sondy v lokalite **B** oddeľuje viac stien. Z toho preto vyplývajú aj mierne lepšie výsledky testov v lokalite **A**, t. j. väčšia presnosť lokalizácie (viď tab. 5.1).

Z výsledkov testovania uvedených v súhrnnej tabuľke 5.1 môžeme vyvodiť nasledovné závery (ako referenčné hodnoty používame hodnoty mediánu; hodnoty priemeru v tabuľke uvádzame len informatívne pre porovnanie):

- Presnosť lokalizácie je pri použití metódy **a** lokalizačného algoritmu vo všetkých prípadoch vyššia alebo výnimočne rovnaká ako pri použití metódy **b**, pričom oba algoritmy boli vždy aplikované súčasne na totožnú sadu testovacích dát.
- Po nasadení korekcie chýbajúcich dát sa presnosť systému pri metóde **a** lokalizačného algoritmu ďalej viditeľne zvýšila (v niektorých prípadoch až o cca 60%), pri metóde **b** došlo k zvýšeniu presnosti iba minimálne.
- Po nasadení korekcie chýbajúcich dát, sa vo väčšine prípadov zvýšila aj zhodnosť lokalizácie (v jednom prípade zostala rovnaká – test č. 9.a).
- Po nasadení korekcie chýbajúcich dát sa výrazne zvýšila aj úspešnosť lokalizácie miestnosti (t. j. systém správne určil miestnosť v ktorej sa testovacie zariadenie nachádza). Toto ale platilo iba pri použití metódy **a** lokalizačného algoritmu. Pri použití metódy **b** si lokalizačný systém naopak pohoršil.
- Úspešnosť lokalizácie miestnosti je niekoľkonásobne vyššia v prípade, že sa v nej nachádza sonda. V prípade nasadenia korekcie chýbajúcich dát sa ale tento rozdiel výrazne znižuje.

Na základe výsledkov testovania lokalizácie presnej polohy sme teda dospeli k záveru, že verzia **b** lokalizačného algoritmu **nie je v našom prípade vhodná** a jej nasadenie do produkčného systému by nemalo žiadny pozitívny úžitok. V žiadnom z prevedených testov totiž nedopadla lepšie ako verzia **a**.

|                              | Číslo testu | Lokalita | Verzia algoritmu | Testovacie zariadenie | Priemerná presnosť | Medián presnosti | Zhodnosť |        | Úspešnosť lokalizácie miestnosti celkovo |           |
|------------------------------|-------------|----------|------------------|-----------------------|--------------------|------------------|----------|--------|--|-----------|
|                              |             |          |                  |                       |                    |                  | 50%      | 90%    | So sondou                                | Bez sondy |
| Bez korekcie chýbajúcich dát | 1.a         | A        | a                | Počítač               | 2,03 m             | 1,81 m           | 1,7 m    | 2,8 m  | 70,0%                                    |           |
|                              |             |          |                  |                       |                    |                  |          |        | 92,3%                                    | 28,6%     |
|                              | 2.a         | A        | a                | Smartfón              | 2,61 m             | 2,80 m           | 2,7 m    | 4,0 m  | 57,1%                                    |           |
|                              |             |          |                  |                       |                    |                  |          |        | 78,6%                                    | 14,3%     |
|                              | 1.b         | A        | b                | Počítač               | 3,06 m             | 2,86 m           | 2,8 m    | 6,3 m  | 50,0%                                    |           |
|                              |             |          |                  |                       |                    |                  |          |        | 69,2%                                    | 14,3%     |
|                              | 2.b         | A        | b                | Smartfón              | 3,23 m             | 2,80 m           | 2,8 m    | 5,6 m  | 57,1%                                    |           |
|                              |             |          |                  |                       |                    |                  |          | 85,7%  | 0,0%                                     |           |
|                              | 4.a         | B        | a                | Počítač               | 1,96 m             | 1,67 m           | 1,7 m    | 3,5 m  | 63,2%                                    |           |
|                              |             |          |                  |                       |                    |                  |          | 72,7%  | 50,0%                                    |           |
|                              | 4.b         | B        | b                | Počítač               | 3,10 m             | 2,82 m           | 2,8 m    | 4,4 m  | 78,9%                                    |           |
|                              |             |          |                  |                       |                    |                  |          | 100,0% | 50,0%                                    |           |
| S korekciou chýbajúcich dát  | 7.a         | A        | a                | Počítač               | 1,21 m             | 1,22 m           | 1,2 m    | 1,9 m  | 96,2%                                    |           |
|                              |             |          |                  |                       |                    |                  |          |        | 100,0%                                   | 90,0%     |
|                              | 8.a         | A        | a                | Smartfón              | 1,56 m             | 1,62 m           | 1,5 m    | 2,7 m  | 80,0%                                    |           |
|                              |             |          |                  |                       |                    |                  |          |        | 93,8%                                    | 55,6%     |
|                              | 7.b         | A        | b                | Počítač               | 3,21 m             | 2,47 m           | 2,3 m    | 6,4 m  | 46,2%                                    |           |
|                              |             |          |                  |                       |                    |                  |          |        | 62,5%                                    | 20,0%     |
|                              | 8.b         | A        | b                | Smartfón              | 3,57 m             | 2,90 m           | 2,7 m    | 5,4 m  | 32,0%                                    |           |
|                              |             |          |                  |                       |                    |                  |          |        | 43,8%                                    | 11,1%     |
|                              | 9.a         | B        | a                | Počítač               | 1,81 m             | 1,82 m           | 1,7 m    | 3,0 m  | 88,9%                                    |           |
|                              |             |          |                  |                       |                    |                  |          |        | 92,9%                                    | 84,6%     |
|                              | 10.a        | B        | a                | Smartfón              | 1,97 m             | 1,80 m           | 1,8 m    | 3,6 m  | 79,2%                                    |           |
|                              |             |          |                  |                       |                    |                  |          | 92,3%  | 63,6%                                    |           |
|                              | 9.b         | B        | b                | Počítač               | 2,86 m             | 2,58 m           | 2,5 m    | 4,3 m  | 51,9%                                    |           |
|                              |             |          |                  |                       |                    |                  |          | 64,3%  | 38,5%                                    |           |
|                              | 10.b        | B        | b                | Smartfón              | 3,96 m             | 3,59 m           | 3,3 m    | 5,4 m  | 29,2%                                    |           |
|                              |             |          |                  |                       |                    |                  |          | 15,4%  | 45,5%                                    |           |

**Tabuľka 5.1:** Výsledky testovania presnosti a zhodnosti implementovaného lokalizačného systému (zelené riadky – algoritmus **a**, červené riadky – algoritmus **b** podľa kap. 3.3.1; bledé riadky – lokalita **A**, tmavé riadky – lokalita **B**)

Implementácia s korekciou chýbajúcich dát mala totiž v najhoršom prípade (test č. 10.a s použitím smartfónu) medián presnosti lokalizácie 1,80 m. Na základe týchto údajov teda môžeme náš systém (*InLocator*) zaradiť medzi najpresnejšie interné lokalizačné systémy spomedzi nami analyzovaných systémov (vid' tab. 5.2).

Pri porovnávaní zhodnosti lokalizácie na jednotlivých systémoch vidíme, že náš systém si vedie najlepšie v prípade zhodnosti u 50% najpresnejších testov. Pri zhodnosti u 90% najpresnejších testov je už zhodnosť nižšia, no stále je na tom náš systém lepšie ako väčšina analyzovaných systémov (vid' tab. 5.2).

| Názov systému | Presnosť | Zhodnosť  |
|---------------|----------|---|
| InLocator     | 1,8 m    | 50% v rámci 1,8 m<br>90% v rámci 3,6 m                                    |
| Horus         | 2 m      | 90% v rámci 2,1 m   |
| MultiLoc      | 2,7 m    | 50% v rámci 2,7 m   |
| DIT           | 3 m      | 90% v rámci 5,12 m*<br>90% v rámci 5,4 m*<br>* v závislosti od použ. alg. |
| RADAR         | 3~5 m    | 50% v rámci 2,5 m<br>90% v rámci 5,9 m                                    |
| TIX           | 5,4 m    | 50% v rámci 5,4 m   |

**Tabuľka 5.2:** Zoznam analyzovaných systémov prevzatý z [25] doplnený o náš systém *InLocator* zoradený podľa presnosti lokalizácie

## 5.2.2 Výsledky testov lokalizácie miestnosti

Podobne ako aj pri testovaní *lokalizácie presnej polohy*, aj v tomto prípade sme systém otestovali v oboch testovacích lokalitách s oboma testovacími zariadeniami. Žiaľ, všetky iné lokalizačné riešenia, ktoré sme v rámci návrhu nášho systému analyzovali sa sústredili výhradne na lokalizáciu presnej polohy, takže v tomto prípade nemôžeme výsledky testov nášho systému porovnať s výsledkami testov iných systémov podobného charakteru.

Pre implementáciu a následné testovanie *lokalizácie miestnosti* sme sa rozhodli na základe predpokladu, že v bežnej kancelárskej budove s množstvom menších miestností je často v prípade lokalizácie zariadení kritické predovšetkým správne lokalizovať miestnosť, v ktorej sa zariadenie nachádza. Presná poloha daného zariadenia je už druhoradá a väčšinou je možné ju určiť osobným kontaktom (napr. vyhľadávanie osôb v budove).

Z výsledkov jednotlivých testov zhrnutých v tab. 5.3 vidíme, že testy algoritmu **b** aj v tomto prípade dopadli výrazne horšie. Jednoznačne sa tým preto potvrdzuje, že nasadenie tohoto algoritmu do produkčného systému by nemalo žiadny úžitok.

Podobne ako aj v predošlom prípade, aj tu testy vykonané počítačom dopadli mierne lepšie ako tie vykonané smartfónom. Vysvetľujeme si to silnejším vysielačím výkonom WiFi modulu v počítači.

Najdôležitejším záverom týchto testov je ale fakt, že v porovnaní s testami *lokalizácie presnej polohy* v tab. 5.1 je úspešnosť lokalizácie miestnosti v prípade tejto metódy vo všeobecnosti vyššia. Po porovnaní výsledkov testov uskutočnených s použitím rovnakého zariadenia na rovnakej testovacej lokalite zistíme, že úspešnosť detekcie správnej miestnosti

|                              | Číslo testu | Lokalita | Verzia algoritmu | Testovacie zariadenie | Úspešnosť lokalizácie miestnosti celkovo |           |
|------------------------------|-------------|----------|------------------|-----------------------|--|-----------|
|                              |             |          |                  |                       | So sondou                                | Bez sondy |
| Bez korekcie chýbajúcich dát | 3.a         | A        | a                | Počítač               | 85,0%                                    |           |
|                              |             |          |                  |                       | 91,7%                                    | 75,0%     |
|                              | 3.b         | A        | b                | Počítač               | 40,0%                                    |           |
|                              |             |          |                  |                       | 50,0%                                    | 25,0%     |
| S korekciou chýbajúcich dát  | 6.a         | A        | a                | Počítač               | 95,7%                                    |           |
|                              |             |          |                  |                       | 100,0%                                   | 90,9%     |
|                              | 5.a         | A        | a                | Smartfón              | 86,4%                                    |           |
|                              |             |          |                  |                       | 83,3%                                    | 90,0%     |
|                              | 6.b         | A        | b                | Počítač               | 39,1%                                    |           |
|                              |             |          |                  |                       | 75,0%                                    | 0,0%      |
|                              | 5.b         | A        | b                | Smartfón              | 36,4%                                    |           |
|                              |             |          |                  |                       | 50,0%                                    | 20,0%     |
|                              | 11.a        | B        | a                | Počítač               | 85,0%                                    |           |
|                              |             |          |                  |                       | 100,0%                                   | 62,5%     |
|                              | 12.a        | B        | a                | Smartfón              | 84,2%                                    |           |
|                              |             |          |                  |                       | 100,0%                                   | 57,1%     |
| 11.b                         | B           | b        | Počítač          | 60,0%                 |  |           |
|                              |             |          |                  | 83,3%                 | 25,0%                                    |           |
| 12.b                         | B           | b        | Smartfón         | 52,6%                 |  |           |
|                              |             |          |                  | 58,3%                 | 42,9%                                    |           |

**Tabuľka 5.3:** Výsledky testovania úspešnosti lokalizácie miestnosti implementovaného lokalizačného systému (zelené riadky – algoritmus **a**, červené riadky – algoritmus **b** podľa kap. 3.3.1; bledé riadky – lokalita **A**, tmavé riadky – lokalita **B**)

je pri testoch metódy *lokalizácie miestnosti* vo väčšine prípadov vyššia, v najhoršom prípade však veľmi podobná, než výsledky metódy *lokalizácie presnej polohy*.

Ako už ale bolo spomenuté v kapitole 3.4, metóda *lokalizácie miestnosti* si vyžaduje výrazne menej času a energie potrebnej na kalibráciu lokalizovanej oblasti, preto v prípade, ak je potrebné lokalizovať iba miestnosť a presná poloha lokalizovaného objektu nie je relevantná, je jednoznačne namieste nasadiť práve túto metódu.

Ako posledný fakt sa znova (po zistení z testov *lokalizácie presnej polohy*) potvrdil aj ten, že v prípade prítomnosti sondy v miestnosti, je pravdepodobnosť správnej lokalizácie tejto miestnosti vo väčšine prípadov vyššia, než keď sa sonda v miestnosti nenachádza. Najväčší rozdiel badáme predovšetkým u algoritmu **b**, no rozdiel je jasne viditeľný aj v prípade algoritmu **a** (viď tab. 5.3).

### 5.2.3 Zhrnutie zistených výsledkov

Z výsledkov testovania, či už jedného alebo druhého spôsobu nasadenia systému, vidíme, že náš systém v porovnaní s inými systémami podobného charakteru obstál veľmi dobre. Systém je schopný určiť polohu lokalizovaného zariadenia s relatívne vysokou presnosťou, predovšetkým kvôli použitiu kalibrovaného lokalizačného algoritmu a explicitnému filtrova-

niu a korekcii zachyteného signálu.

Systém sme ale testovali v lokalitách s relatívne malými miestnosťami. Veľký počet stien v lokalizovanej oblasti totiž spôsoboval dobrú rozlíšiteľnosť intenzity signálu v jednotlivých miestnostiach, vďaka čomu vedel systém s vysokou úspešnosťou detegovať správnu miestnosť, v ktorej sa lokalizovaný objekt nachádzal.

K vysokej presnosti systému prispelo aj veľké množstvo kalibračných bodov, ktorých vytvorenie u rozľahlejšej lokalizačnej oblasti by mohlo byť časovo príliš náročné. V prípade využitia racionálneho množstva zdrojov by preto mohlo byť problematické dosiahnuť tak veľkú presnosť, ako sa to podarilo v našom prípade.

Aby sme teda mohli náš systém definitívne považovať za „dostatočne presný“, bude potrebné ho v budúcnosti otestovať aj v lokalite s veľkými otvorenými priestormi s menším počtom, resp. žiadnymi stenami. Pri testovaní sme taktiež zanedbali rôzne ďalšie rušivé elementy, ktorých prítomnosť môže mať negatívny vplyv na presnosť lokalizačného systému. Ide napríklad o veci ako zmena polohy nábytku v miestnostiach, počet ľudí v lokalizovanom objekte, ich poloha, rýchlosť ich pohybu a pod.

Ďalším zaujímavým faktorom hodným otestovania je aj zmena presnosti systému vplyvom času počas obdobia niekoľkých mesiacov. Kalibračné dáta môžu totiž časom prestávať byť relevantné predovšetkým kvôli rôznym drobným zmenám v lokalizačnej oblasti. Aj keď ide o faktory, ktoré priamo nekorelujú s uplynutým časom, výsledky takýchto testov by nám dali aspoň približnú údaj o priemernej trvanlivosti dát získanými kalibráciou.

Iba takto kompletne výsledky zahŕňajúce širokú škálu testov z rôznych prostredí za rôznych podmienok nám až môžu definitívne potvrdiť naše doterajšie zistenia ohľadom presnosti lokalizácie a upresniť zaradenie nášho systému do rebríčka podobných lokalizačných systémov zoradeného podľa ich presnosti.

# Kapitola 6

## Záver

Cieľom tejto práce bolo navrhnuť, naimplementovať a otestovať lokalizačný systém využívajúci WiFi siete na určenie polôh v nich komunikujúcich zariadení. V práci sme analyzovali existujúce riešenia a rôzne lokalizačné metódy a algoritmy, na ktorých sú tie založené.

Hlavnou súčasťou práce bol návrh a implementácia lokalizačného systému umožňujúceho lokalizovať zariadenia komunikujúce prostredníctvom WiFi siete vo vnútri budov. Navrhli sme si vlastné sondy na zachytávanie dát vo WiFi sieti, ktoré sme vytvorili použitím bežných prístupových bodov modifikáciou ich firmvéru a ich doplnením o dodatočný softvér.

Ďalej sme si našťudovali lokalizačné systémy podobného charakteru a vychádzajúc z týchto poznatkov sme si navrhli vlastný lokalizačný algoritmus, ktorý sme v priebehu implementácie systému ešte ďalej zdokonalovali.

Výstupom práce je funkčný prototyp tohoto systému, ktorý sme nasadili a odskúšali v dvoch rôznych lokalitách. Implementovaný systém umožňuje lokalizovať presnú polohu zariadení v reálnom čase alebo identifikovať miestnosť, v ktorej sa zariadenia nachádzajú. Systém taktiež umožňuje spätne zobrazovať polohu a pohyb zariadení v používateľom zvolenom časovom intervale.

Súčasťou práce bolo aj obširne testovanie implementovaného lokalizačného systému, ktoré sme uskutočňovali v oboch lokalitách, v ktorých bol systém nasadený. Z výsledkov týchto testov vyplynulo, že náš systém sa vyrovnáva, dokonca v mnohých prípadoch aj prekonáva, iné interné lokalizačné systémy fungujúce na podobných princípoch. Podrobné výsledky testovania sme zverejnili v prílohe a závery testovania diskutovali v tejto práci.

Do budúcnosti by bolo vhodné systém rozšíriť o nadstavbu s viac prepracovaným používateľským rozhraním určeným na konkrétne praktické (resp. komerčné) nasadenie, či už by šlo napríklad o nástroj na samolokalizáciu pre bežných používateľov, alebo o aplikáciu využívajúcu polohu používateľa na cielený marketing.

Samotné jadro lokalizačného systému by mohlo byť v budúcnosti tiež vylepšené. Potrebne by bolo predovšetkým preskúmať možnosti dostupných databázových systémov a vybrať ten najvhodnejší. Taktiež by bolo vhodné preskúmať alternatívne možnosti uskladnenia a výpočtu polôh lokalizovaných zariadení a zhodnotiť ich výhody a nevýhody voči riešeniu s použitím databázy.

V neposlednom rade uskutočnenie dôkladnejších a predovšetkým dlhodobých trvajúcich testov by bolo pre produkčné nasadenie tohoto systému obzvlášť esenciálne. Ostáva totiž ešte množstvo testovacích podmienok (zhrnutých v kap. 5.2.3), ktoré sme v rámci tejto práce nemohli z časových ani kapacitných dôvodov dostatočne podrobne otestovať.

# Literatura

- [1] Alippi, C.; Vanini, G.: A RSSI-based and calibrated centralized localization technique for wireless sensor networks. In *Pervasive Computing and Communications Workshops, 2006. PerCom Workshops 2006. Fourth Annual IEEE International Conference on*, March 2006, s. 5 pp.–305, doi:10.1109/PERCOMW.2006.13.
- [2] Bahl, P.; Padmanabhan, V. N.: RADAR: An in-building RF-based user location and tracking system. In *INFOCOM 2000. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE*, ročník 2, Ieee, 2000, s. 775–784.
- [3] Boyes, W.: *Instrumentation Reference Book (4th Edition)*. Elsevier, 2010, ISBN 978-0-7506-8308-1.
- [4] CACE Technologies: Per-Packet Information Header Specification Version 1.0.7. <http://www.cacotech.com/documents/PPI%20Header%20format%201.0.7.pdf>, 2008-11-09 [cit. 2013-12-20].
- [5] Chen, Y.; Kobayashi, H.: Signal strength based indoor geolocation. In *Communications, 2002. ICC 2002. IEEE International Conference on*, ročník 1, 2002, s. 436 – 439, doi:10.1109/ICC.2002.996891.
- [6] Chen, Y.-C.; Chiang, J.-R.; Chu, H.-h.; aj.: Sensor-assisted wi-fi indoor location system for adapting to environmental dynamics. In *Proceedings of the 8th ACM international symposium on Modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems*, ACM, 2005, s. 118–125.
- [7] Cong, L.; Zhuang, W.: Nonline-of-sight error mitigation in mobile location. *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, ročník 4, č. 2, 2005: s. 560–573.
- [8] Dardari, F. E. L. M., Davide: *Satellite and Terrestrial Radio Positioning Techniques - A Signal Processing Perspective*. Elsevier, 2012, ISBN 978-0-12-382084-6.
- [9] Dean, T.: *Network+ Guide to Networks*. Network Design Team Series, Cengage Learning, 2009, ISBN 978-1-423-90245-4.
- [10] Epstein, J.: *Scalable VoIP Mobility – Integration and Deployment*. Elsevier, 2009, ISBN 978-1-85617-508-1.
- [11] European Space Agency: Four Galileo satellites at ESA test centre [online]. [http://www.esa.int/Our\\_Activities/Navigation/Four\\_Galileo\\_satellites\\_at\\_ESA\\_test\\_centre](http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/Four_Galileo_satellites_at_ESA_test_centre), 2014-12-22 [cit. 2015-02-16].

- [12] European Space Agency: Two new satellites join the Galileo constellation [online]. [http://www.esa.int/Our\\_Activities/Navigation/The\\_future\\_-\\_Galileo/Launching\\_Galileo/Two\\_new\\_satellites\\_join\\_the\\_Galileo\\_constellation](http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/The_future_-_Galileo/Launching_Galileo/Two_new_satellites_join_the_Galileo_constellation) 2015-03-28 [cit. 2015-05-11].
- [13] Evennou, F.; Marx, F.: Advanced Integration of WIFI and Inertial Navigation Systems for Indoor Mobile Positioning. *EURASIP J. Appl. Signal Process.*, ročník 2006, Leden 2006: s. 164–164, ISSN 1110-8657, doi:10.1155/ASP/2006/86706.
- [14] Gast, M.: *802.11ac: A Survival Guide*. O'Reilly Media, 2013, ISBN 978-1-449-35773-3.
- [15] Gwon, Y.; Jain, R.: Error characteristics and calibration-free techniques for wireless LAN-based location estimation. In *Proceedings of the second international workshop on Mobility management & wireless access protocols*, ACM, 2004, s. 2–9.
- [16] Haeberlen, A.; Flannery, E.; Ladd, A. M.; aj.: Practical Robust Localization over Large-scale 802.11 Wireless Networks. In *Proceedings of the 10th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, MobiCom '04, New York, NY, USA: ACM, 2004, ISBN 1-58113-868-7, s. 70 – 84, doi:10.1145/1023720.1023728.
- [17] Harris, G.: Libpcap File Format. <https://wiki.wireshark.org/Development/LibpcapFileFormat>, 2013-07-29 [cit. 2015-05-01].
- [18] Information-analytical centre: GLONASS constellation status [online]. <http://www.glonass-center.ru/en/GLONASS/index.php>, 2015-02-16 [cit. 2015-02-16].
- [19] Information-analytical centre: GPS constellation status [online]. <http://www.glonass-center.ru/en/GPS/index.php>, 2015-02-16 [cit. 2015-02-16].
- [20] Izquierdo, F.; Ciurana, M.; Barceló, F.; aj.: Performance evaluation of a TOA-based trilateration method to locate terminals in WLAN. In *Wireless Pervasive Computing, 2006 1st International Symposium on*, IEEE, 2006, s. 1–6.
- [21] Kovár, P.; Kacmarik, P.; Vejrazka, F.: Interoperable GPS, GLONASS and Galileo software receiver. *Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE*, ročník 26, č. 4, April 2011: s. 24–30, ISSN 0885-8985, doi:10.1109/MAES.2011.5763340.
- [22] Larsen, D.: Uncertainty in Measurement [online]. [http://chemwiki.ucdavis.edu/?title=Textbook\\_Maps/General\\_Chemistry\\_Textbook\\_Maps/Map:\\_Brown,\\_LeMay,\\_%26\\_Bursten\\_%22Chemistry:\\_The\\_Central\\_Science%22/01.\\_Introduction:\\_Matter\\_and\\_Measurement/1.5:\\_Uncertainty\\_in\\_Measurement](http://chemwiki.ucdavis.edu/?title=Textbook_Maps/General_Chemistry_Textbook_Maps/Map:_Brown,_LeMay,_%26_Bursten_%22Chemistry:_The_Central_Science%22/01._Introduction:_Matter_and_Measurement/1.5:_Uncertainty_in_Measurement), 2015 [cit. 2015-04-20].
- [23] Li, X.; Pahlavan, K.; Latva-aho, M.; aj.: Comparison of indoor geolocation methods in DSSS and OFDM wireless LAN systems. In *Vehicular Technology Conference, 2000. IEEE-VTS Fall VTC 2000. 52nd*, ročník 6, IEEE, 2000, s. 3015–3020.
- [24] Lim, C.-B.; Kang, S.-H.; Cho, H.-H.; aj.: An Enhanced Indoor Localization algorithm Based on IEEE 802.11 WLAN using RSSI and multiple parameters. In *Systems and*



*Networks Communications (ICSNC), 2010 Fifth International Conference on*, IEEE, 2010, s. 238–242.

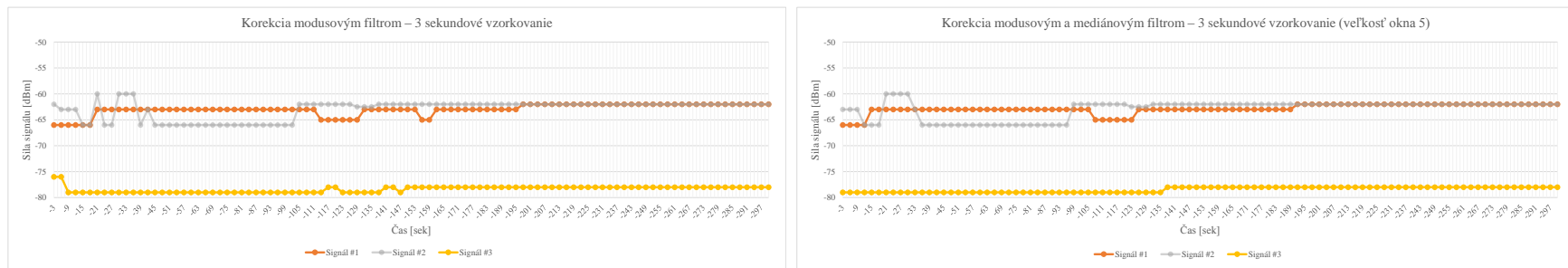
- [25] Liu, H.; Darabi, H.; Banerjee, P.; aj.: Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems. *Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, IEEE Transactions on*, ročník 37, č. 6, Nov 2007: s. 1067–1080, ISSN 1094-6977, doi:10.1109/TSMCC.2007.905750.
- [26] Motley, A.; Keenan, J.: Personal communication radio coverage in buildings at 900 MHz and 1700 MHz. *Electronics Letters*, ročník 24, č. 12, 1988: s. 763–764, ISSN 0013-5194.
- [27] National Coordination Office for Space-Based Positioning, Navigation, and Timing: The Global Positioning System – Space Segment [online]. <http://www.gps.gov/systems/gps/space/>, 2015-01-13 [cit. 2015-02-16].
- [28] Perahia, E.; Gong, M. X.: Gigabit wireless LANs: an overview of IEEE 802.11 ac and 802.11 ad. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, ročník 15, č. 3, 2011: s. 23–33.
- [29] Prasithsangaree, P.; Krishnamurthy, P.; Chrysanthis, P. K.: On indoor position location with wireless LANs. In *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2002. The 13th IEEE International Symposium on*, ročník 2, IEEE, 2002, s. 720–724.
- [30] Thrun, S.; Fox, D.; Burgard, W.; aj.: Robust Monte Carlo localization for mobile robots. *Artificial Intelligence*, ročník 128, č. 1-2, 2001: s. 99 – 141, ISSN 0004-3702, doi:10.1016/S0004-3702(01)00069-8.
- [31] Torteeka, P.; XIU, C.; YANG, D.: Hybrid Technique for Indoor Positioning System based on Wi-Fi Received Signal Strength Indication.
- [32] Vaughan, R.; Bach Andersen, J.: *Channels, propagation and antennas for mobile communications*. Iet, 2003, ISBN 978-0-85296-084-4.
- [33] Weintrit, A.: *Navigational Systems and Simulators: Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. A Balkema Book, CRC Press, 2011, ISBN 9780203157343.
- [34] Xiang, Z.; Song, S.; Chen, J.; aj.: A wireless LAN-based indoor positioning technology. *IBM Journal of research and development*, ročník 48, č. 5.6, 2004: s. 617–626.
- [35] Youssef, M. A.; Agrawala, A.; Udaya Shankar, A.: WLAN location determination via clustering and probability distributions. In *Pervasive Computing and Communications, 2003.(PerCom 2003). Proceedings of the First IEEE International Conference on*, IEEE, 2003, s. 143–150.

# Príloha A

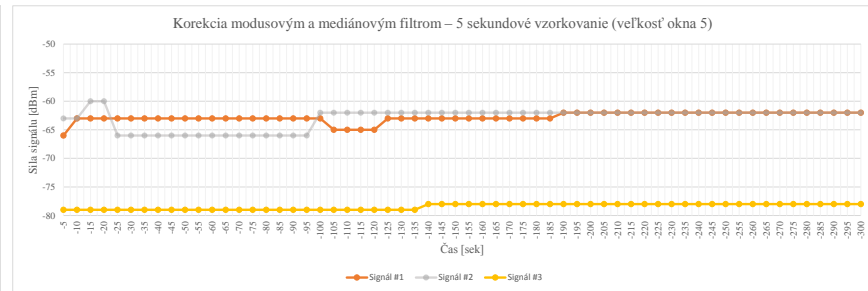
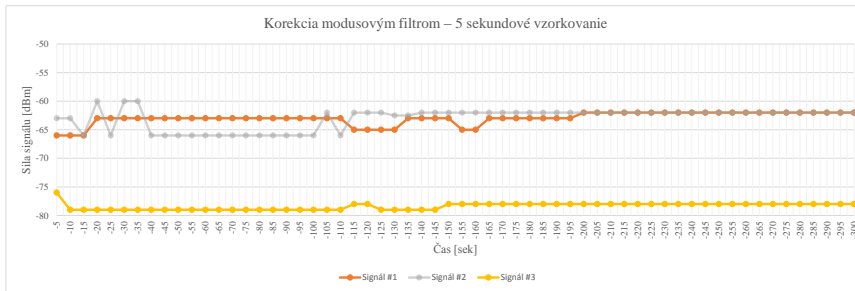
## Lokalizačný algoritmus

### A.1 Filtrovanie a korekcia zachyteného signálu

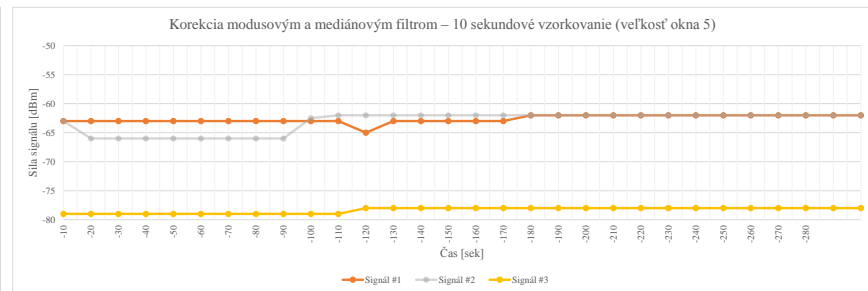
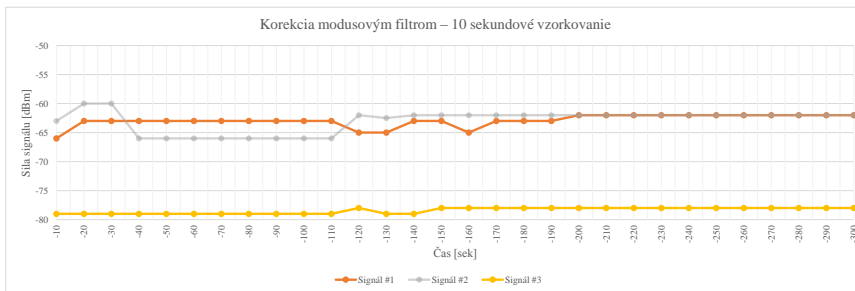
50



Obrázok A.1: Filtrovanie signálu modusovým (vľavo) a následne mediánovým (vpravo) filtrom s 3 sekundovým vzorkovaním



Obrázok A.2: Filtrovanie signálu modusovým (vľavo) a následne mediánovým (vpravo) filtrom s 5 sekundovým vzorkovaním



Obrázok A.3: Filtrovanie signálu modusovým (vľavo) a následne mediánovým (vpravo) filtrom s 10 sekundovým vzorkovaním

## Príloha B

# Výsledky lokalizačných testov systému

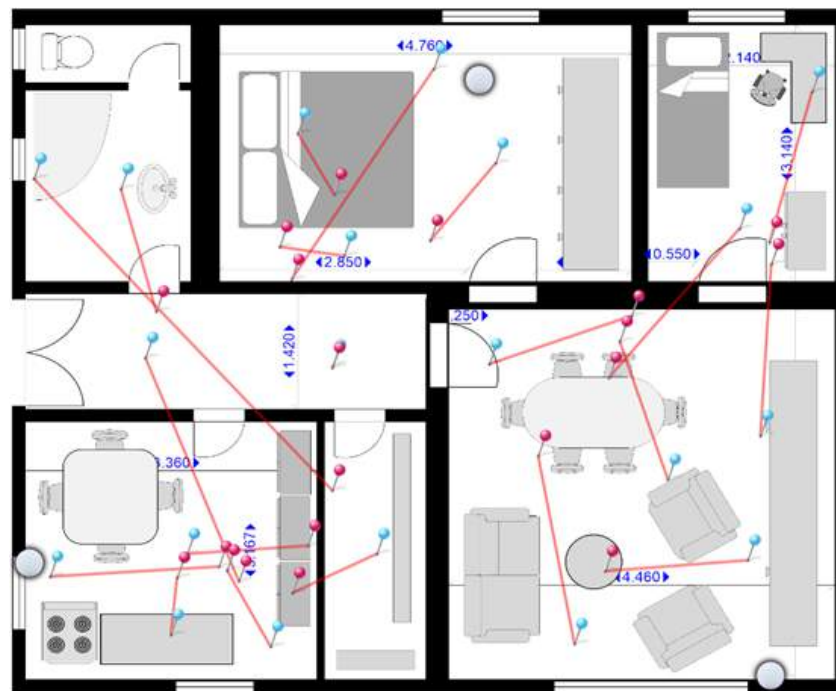
## B.1 Lokalizácia presnej polohy

### B.1.1 Prvé kolo testov (pôvodný algoritmus)

Test č. 1.a – lokalita A, testovacie zariadenie počítač, algoritmus a

| Číslo merania                                 | Súradnica X | Súradnica Y | Vzdial. [m] | Lokaliz. Miestnosti | Sonda v miestnosti |
|---|-------------|-------------|-------------|---------------------|--------------------|
| 1   | 51,491989   | -0,076592   | 1,70        | ✓                   | ✓                  |
| 2   | 51,475144   | -0,091984   | 2,11        | ✓                   | ✓                  |
| 3   | 51,496455   | -0,061349   | 1,85        | ✗                   | ✓                  |
| 4   | 51,517662   | -0,064786   | 2,76        | ✗                   | ✗                  |
| 5   | 51,483707   | -0,063441   | 2,46        | ✓                   | ✓                  |
| 6   | 51,503804   | -0,106032   | 2,50        | ✓                   | ✓                  |
| 7   | 51,524357   | -0,104985   | 1,39        | ✓                   | ✓                  |
| 8   | 51,534026   | -0,115147   | 3,33        | ✓                   | ✓                  |
| 9   | 51,527425   | -0,137563   | 0,91        | ✓                   | ✓                  |
| 10  | 51,514872   | -0,129942   | 1,11        | ✓                   | ✓                  |
| 11  | 51,503711   | -0,131735   | 0,03        | ✓                   | ✗                  |
| 12  | 51,504455   | -0,162669   | 2,89        | ✗                   | ✗                  |
| 13  | 51,476075   | -0,158485   | 0,62        | ✓                   | ✓                  |
| 14  | 51,484358   | -0,155795   | 2,08        | ✓                   | ✓                  |
| 15  | 51,474865   | -0,142047   | 1,11        | ✓                   | ✓                  |
| 16  | 51,482032   | -0,178360   | 2,91        | ✓                   | ✓                  |
| 17  | 51,521753   | -0,166704   | 1,45        | ✗                   | ✗                  |
| 18  | 51,522776   | -0,181050   | 6,13        | ✗                   | ✗                  |
| 19  | 51,484358   | -0,124562   | 1,52        | ✗                   | ✗                  |
| 20  | 51,531702   | -0,052831   | 1,77        | ✓                   | ✗                  |
| Priemerná lokalizačná chyba [m]:              |             |             |             | 2,03                |                    |
| Medián lokalizačnej chyby [m]:                |             |             |             | 1,81                |                    |
| Zhodnosť lokalizačnej chyby (50%/90%) [m]:    |             |             |             | 1,70                | 2,80               |
| Úspešnosť lokalizácie miestnosti celkom:      |             |             |             | 70,0%               |                    |
| Úspešnosť lokalizácie miestnosti s/bez sondy: |             |             |             | 92,3%               | 28,6%              |

Tabuľka B.1: Detailné výsledky testu č. 1.a

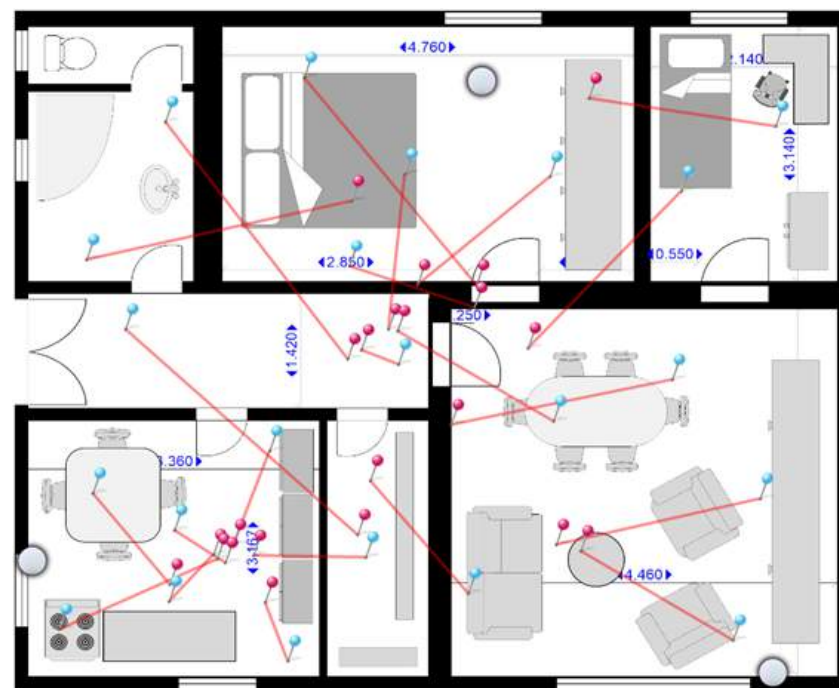


Obrázok B.1: Grafické znázornenie výsledkov testu č. 1.a

Test č. 2.a – lokalita A, testovacie zariadenie smartfón, algoritmus a

| Číslo merania                                 | Súradnica X | Súradnica Y | Vzdial. [m] | Lokaliz. Miestnosti | Sonda v miestnosti |
|---|-------------|-------------|-------------|---------------------|--------------------|
| 1   | 51,497850   | -0,095870   | 2,86        | ✓                   | ✓                  |
| 2   | 51,480077   | -0,109917   | 2,08        | ✗                   | ✓                  |
| 3   | 51,479240   | -0,159232   | 0,91        | ✓                   | ✓                  |
| 4   | 51,490407   | -0,171785   | 1,65        | ✓                   | ✓                  |
| 5   | 51,473097   | -0,139656   | 0,74        | ✓                   | ✓                  |
| 6   | 51,503711   | -0,121424   | 0,66        | ✓                   | ✗                  |
| 7   | 51,523055   | -0,096467   | 2,56        | ✓                   | ✓                  |
| 8   | 51,533282   | -0,136966   | 3,71        | ✓                   | ✓                  |
| 9   | 51,483800   | -0,126804   | 1,93        | ✗                   | ✗                  |
| 10  | 51,489849   | -0,061797   | 3,55        | ✓                   | ✓                  |
| 11  | 51,513849   | -0,129494   | 2,20        | ✓                   | ✓                  |
| 12  | 51,494780   | -0,142644   | 1,19        | ✓                   | ✓                  |
| 13  | 51,476354   | -0,177314   | 2,82        | ✓                   | ✓                  |
| 14  | 51,502129   | -0,076293   | 3,85        | ✓                   | ✓                  |
| 15  | 51,475238   | -0,066281   | 2,80        | ✓                   | ✓                  |
| 16  | 51,523334   | -0,120378   | 1,70        | ✗                   | ✓                  |
| 17  | 51,507339   | -0,166405   | 4,58        | ✗                   | ✗                  |
| 18  | 51,514500   | -0,172831   | 4,60        | ✗                   | ✗                  |
| 19  | 51,528727   | -0,159830   | 4,04        | ✗                   | ✗                  |
| 20  | 51,528262   | -0,059257   | 3,23        | ✗                   | ✗                  |
| 21  | 51,521567   | -0,074799   | 3,14        | ✓                   | ✗                  |
| Priemerná lokalizačná chyba [m]:              |             |             |             | 2,61                |                    |
| Medián lokalizačnej chyby [m]:                |             |             |             | 2,80                |                    |
| Zhodnosť lokalizačnej chyby (50%/90%) [m]:    |             |             |             | 2,65                | 4,00               |
| Úspešnosť lokalizácie miestnosti celkom:      |             |             |             | 57,1%               |                    |
| Úspešnosť lokalizácie miestnosti s/bez sondy: |             |             |             | 78,6%               | 14,3%              |

Tabuľka B.2: Detailné výsledky testu č. 2.a

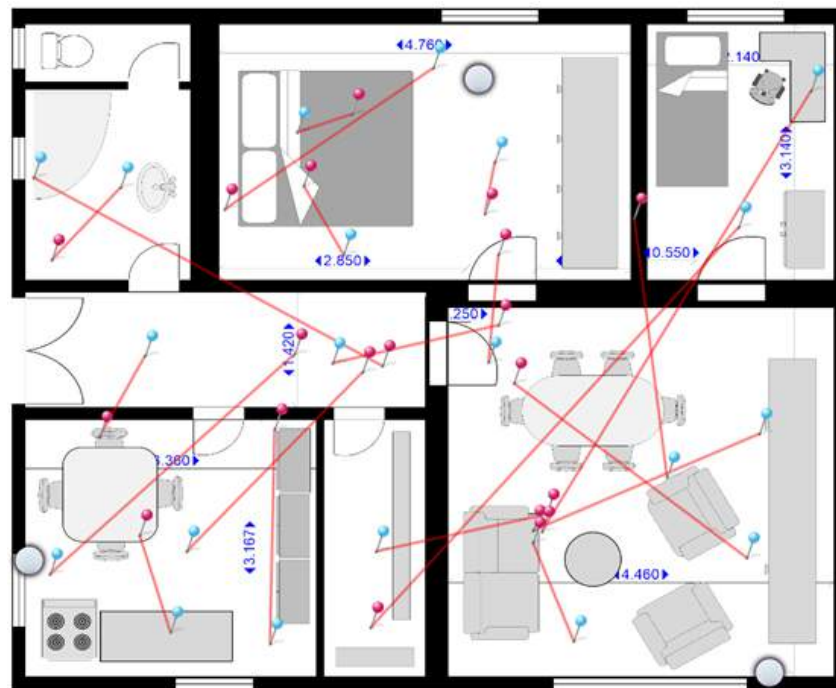


Obrázok B.2: Grafické znázornenie výsledkov testu č. 2.a

Test č. 1.b – lokalita A, testovacie zariadenie počítač, algoritmus b

| Číslo merania                                 | Súradnica X | Súradnica Y | Vzdial. [m] | Lokaliz. Miestnosti | Sonda v miestnosti |
|---|-------------|-------------|-------------|---------------------|--------------------|
| 1   | 51,491989   | -0,076592   | 2,84        | ✗                   | ✓                  |
| 2   | 51,475144   | -0,091984   | 1,27        | ✓                   | ✓                  |
| 3   | 51,496455   | -0,061349   | 4,05        | ✓                   | ✓                  |
| 4   | 51,517662   | -0,064786   | 7,66        | ✗                   | ✗                  |
| 5   | 51,483707   | -0,063441   | 4,43        | ✓                   | ✓                  |
| 6   | 51,503804   | -0,106032   | 1,17        | ✗                   | ✓                  |
| 7   | 51,524357   | -0,104985   | 0,58        | ✓                   | ✓                  |
| 8   | 51,534026   | -0,115147   | 3,90        | ✓                   | ✓                  |
| 9   | 51,527425   | -0,137563   | 0,96        | ✓                   | ✓                  |
| 10  | 51,514872   | -0,129942   | 1,01        | ✓                   | ✓                  |
| 11  | 51,503711   | -0,131735   | 2,88        | ✗                   | ✗                  |
| 12  | 51,504455   | -0,162669   | 1,17        | ✗                   | ✗                  |
| 13  | 51,476075   | -0,158485   | 1,17        | ✓                   | ✓                  |
| 14  | 51,484358   | -0,155795   | 3,60        | ✗                   | ✓                  |
| 15  | 51,474865   | -0,142047   | 2,30        | ✓                   | ✓                  |
| 16  | 51,482032   | -0,178360   | 4,83        | ✗                   | ✓                  |
| 17  | 51,521753   | -0,166704   | 1,42        | ✓                   | ✗                  |
| 18  | 51,522776   | -0,181050   | 6,34        | ✗                   | ✗                  |
| 19  | 51,484358   | -0,124562   | 2,97        | ✗                   | ✗                  |
| 20  | 51,531702   | -0,052831   | 6,64        | ✗                   | ✗                  |
| Priemerná lokalizačná chyba [m]:              |             |             |             | 3,06                |                    |
| Medián lokalizačnej chyby [m]:                |             |             |             | 2,86                |                    |
| Zhodnosť lokalizačnej chyby (50%/90%) [m]:    |             |             |             | 2,80                | 6,30               |
| Úspešnosť lokalizácie miestnosti celkom:      |             |             |             | 50,0%               |                    |
| Úspešnosť lokalizácie miestnosti s/bez sondy: |             |             |             | 69,2%               | 14,3%              |

Tabuľka B.3: Detailné výsledky testu č. 1.b

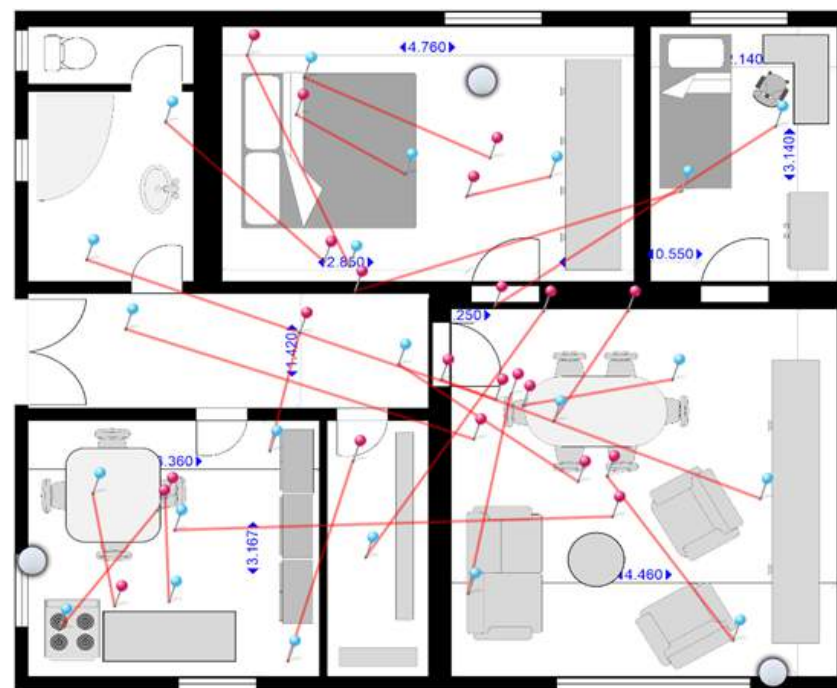


Obrázok B.3: Grafické znázornenie výsledkov testu č. 1.b

Test č. 2.b – lokalita A, testovacie zariadenie smartfón, algoritmus b

| Číslo merania                                 | Súradnica X | Súradnica Y | Vzdial. [m] | Lokaliz. Miestnosti | Sonda v miestnosti |
|---|-------------|-------------|-------------|---------------------|--------------------|
| 1   | 51,497850   | -0,095870   | 1,74        | ✓                   | ✓                  |
| 2   | 51,480077   | -0,109917   | 2,27        | ✓                   | ✓                  |
| 3   | 51,479240   | -0,159232   | 1,12        | ✓                   | ✓                  |
| 4   | 51,490407   | -0,171785   | 1,27        | ✓                   | ✓                  |
| 5   | 51,473097   | -0,139656   | 2,43        | ✗                   | ✓                  |
| 6   | 51,503711   | -0,121424   | 3,34        | ✗                   | ✗                  |
| 7   | 51,523055   | -0,096467   | 1,46        | ✓                   | ✓                  |
| 8   | 51,533282   | -0,136966   | 3,32        | ✓                   | ✓                  |
| 9   | 51,483800   | -0,126804   | 4,06        | ✗                   | ✗                  |
| 10  | 51,489849   | -0,061797   | 5,64        | ✓                   | ✓                  |
| 11  | 51,513849   | -0,129494   | 2,88        | ✓                   | ✓                  |
| 12  | 51,494780   | -0,142644   | 1,38        | ✗                   | ✓                  |
| 13  | 51,476354   | -0,177314   | 2,12        | ✓                   | ✓                  |
| 14  | 51,502129   | -0,076293   | 2,60        | ✓                   | ✓                  |
| 15  | 51,475238   | -0,066281   | 2,80        | ✓                   | ✓                  |
| 16  | 51,523334   | -0,120378   | 1,98        | ✓                   | ✓                  |
| 17  | 51,507339   | -0,166405   | 6,12        | ✗                   | ✗                  |
| 18  | 51,514500   | -0,172831   | 7,21        | ✗                   | ✗                  |
| 19  | 51,528727   | -0,159830   | 3,12        | ✗                   | ✗                  |
| 20  | 51,528262   | -0,059257   | 5,23        | ✗                   | ✗                  |
| 21  | 51,521567   | -0,074799   | 5,73        | ✗                   | ✗                  |
| Priemerná lokalizačná chyba [m]:              |             |             |             | 3,23                |                    |
| Medián lokalizačnej chyby [m]:                |             |             |             | 2,80                |                    |
| Zhodnosť lokalizačnej chyby (50%/90%) [m]:    |             |             |             | 2,80                | 5,60               |
| Úspešnosť lokalizácie miestnosti celkom:      |             |             |             | 57,1%               |                    |
| Úspešnosť lokalizácie miestnosti s/bez sondy: |             |             |             | 85,7%               | 0,0%               |

Tabuľka B.4: Detailné výsledky testu č. 2.b



Obrázok B.4: Grafické znázornenie výsledkov testu č. 2.b

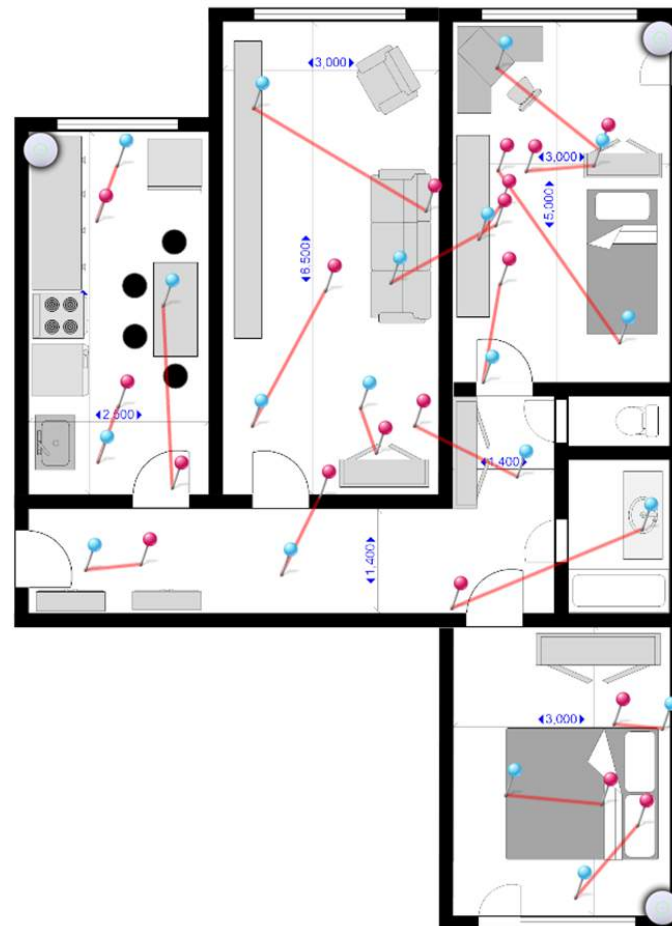


Test č. 4.a – lokalita B, testovacie zariadenie počítač, algoritmus a

57

| Číslo merania                                 | Súradnica X | Súradnica Y | Vzdial. [m] | Lokaliz. Miestnosti | Sonda v miestnosti |
|---|-------------|-------------|-------------|---------------------|--------------------|
| 1   | 51,538116   | -0,134425   | 2,49        | ✓                   | ✓                  |
| 2   | 51,530028   | -0,121573   | 1,47        | ✓                   | ✓                  |
| 3   | 51,515430   | -0,118136   | 3,54        | ✓                   | ✓                  |
| 4   | 51,523985   | -0,136816   | 0,65        | ✓                   | ✓                  |
| 5   | 51,512175   | -0,136218   | 1,37        | ✓                   | ✓                  |
| 6   | 51,504362   | -0,131735   | 2,32        | ✗                   | ✗                  |
| 7   | 51,499990   | -0,115147   | 4,27        | ✗                   | ✗                  |
| 8   | 51,478030   | -0,133230   | 2,08        | ✓                   | ✓                  |
| 9   | 51,469559   | -0,123964   | 1,67        | ✓                   | ✓                  |
| 10  | 51,483521   | -0,112457   | 1,05        | ✓                   | ✓                  |
| 11  | 51,496269   | -0,162968   | 1,35        | ✗                   | ✗                  |
| 12  | 51,496641   | -0,188971   | 1,21        | ✓                   | ✗                  |
| 13  | 51,505571   | -0,187327   | 0,86        | ✓                   | ✓                  |
| 14  | 51,530028   | -0,184786   | 0,86        | ✓                   | ✓                  |
| 15  | 51,518499   | -0,178659   | 2,48        | ✓                   | ✓                  |
| 16  | 51,508548   | -0,166854   | 2,44        | ✓                   | ✗                  |
| 17  | 51,520359   | -0,148472   | 2,41        | ✗                   | ✗                  |
| 18  | 51,534769   | -0,166704   | 3,99        | ✓                   | ✗                  |
| 19  | 51,510036   | -0,152507   | 0,71        | ✓                   | ✗                  |
| Priemerná lokalizačná chyba [m]:              |             |             |             | 1,96                |                    |
| Medián lokalizačnej chyby [m]:                |             |             |             | 1,67                |                    |
| Zhodnosť lokalizačnej chyby (50%/90%) [m]:    |             |             |             | 1,70                | 3,50               |
| Úspešnosť lokalizácie miestnosti celkom:      |             |             |             | 78,9%               |                    |
| Úspešnosť lokalizácie miestnosti s/bez sondy: |             |             |             | 100,0%              | 50,0%              |

Tabuľka B.5: Detailné výsledky testu č. 4.a



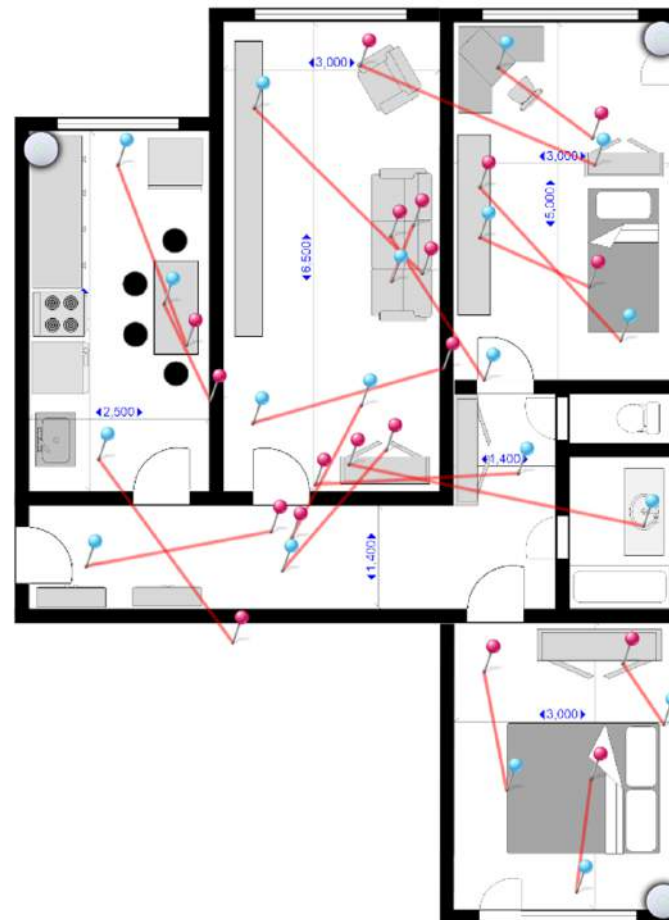
Obrázok B.5: Grafické znázornenie výsledkov testu č. 4.a

Test č. 4.b – lokalita B, testovacie zariadenie počítač, algoritmus b

88

| Číslo merania                                 | Súradnica X | Súradnica Y | Vzdial. [m] | Lokaliz. Miestnosti | Sonda v miestnosti |
|---|-------------|-------------|-------------|---------------------|--------------------|
| 1   | 51,538116   | -0,134425   | 2,28        | ✓                   | ✓                  |
| 2   | 51,530028   | -0,121573   | 5,28        | ✗                   | ✓                  |
| 3   | 51,515430   | -0,118136   | 3,71        | ✓                   | ✓                  |
| 4   | 51,523985   | -0,136816   | 2,46        | ✓                   | ✓                  |
| 5   | 51,512175   | -0,136218   | 2,82        | ✗                   | ✓                  |
| 6   | 51,504362   | -0,131735   | 4,41        | ✗                   | ✗                  |
| 7   | 51,499990   | -0,115147   | 6,45        | ✗                   | ✗                  |
| 8   | 51,478030   | -0,133230   | 1,69        | ✓                   | ✓                  |
| 9   | 51,469559   | -0,123964   | 1,57        | ✓                   | ✓                  |
| 10  | 51,483521   | -0,112457   | 1,21        | ✓                   | ✓                  |
| 11  | 51,496269   | -0,162968   | 2,80        | ✗                   | ✗                  |
| 12  | 51,496641   | -0,188971   | 4,04        | ✓                   | ✗                  |
| 13  | 51,505571   | -0,187327   | 3,84        | ✗                   | ✓                  |
| 14  | 51,530028   | -0,184786   | 2,86        | ✓                   | ✓                  |
| 15  | 51,518499   | -0,178659   | 1,67        | ✓                   | ✓                  |
| 16  | 51,508548   | -0,166854   | 4,20        | ✓                   | ✗                  |
| 17  | 51,520359   | -0,148472   | 0,90        | ✓                   | ✗                  |
| 18  | 51,534769   | -0,166704   | 4,29        | ✓                   | ✗                  |
| 19  | 51,510036   | -0,152507   | 2,36        | ✗                   | ✗                  |
| Priemerná lokalizačná chyba [m]:              |             |             |             | 3,10                |                    |
| Medián lokalizačnej chyby [m]:                |             |             |             | 2,82                |                    |
| Zhodnosť lokalizačnej chyby (50%/90%) [m]:    |             |             |             | 2,80                | 4,40               |
| Úspešnosť lokalizácie miestnosti celkom:      |             |             |             | 63,2%               |                    |
| Úspešnosť lokalizácie miestnosti s/bez sondy: |             |             |             | 72,7%               | 50,0%              |

Tabuľka B.6: Detailné výsledky testu č. 4.b



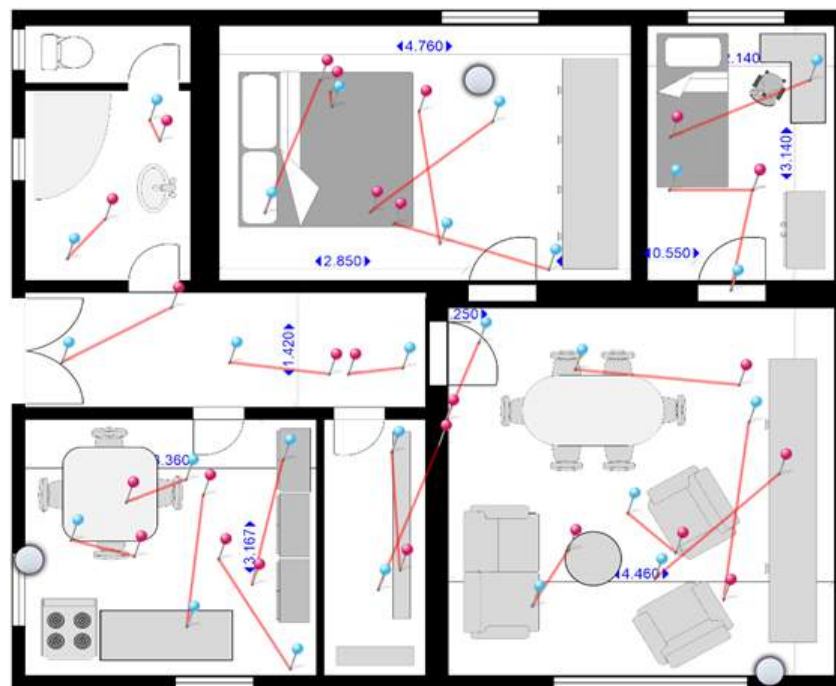
Obrázok B.6: Grafické znázornenie výsledkov testu č. 4.b

## B.1.2 Druhé kolo testov (vylepšený algoritmus s korekciou chýbajúcich dát)

Test č. 7.a – lokalita A, testovacie zariadenie počítač, algoritmus a

| Číslo merania                                 | Súradnica X | Súradnica Y | Vzdial. [m] | Lokaliz. Miestnosti | Sonda v miestnosti |
|---|-------------|-------------|-------------|---------------------|--------------------|
| 1   | 51,532910   | -0,053130   | 1,67        | ✓                   | ✗                  |
| 2   | 51,521567   | -0,076293   | 0,97        | ✓                   | ✗                  |
| 3   | 51,511245   | -0,066131   | 1,17        | ✓                   | ✗                  |
| 4   | 51,497664   | -0,063142   | 2,42        | ✓                   | ✓                  |
| 5   | 51,481473   | -0,078684   | 1,92        | ✓                   | ✓                  |
| 6   | 51,478681   | -0,098858   | 0,59        | ✓                   | ✓                  |
| 7   | 51,503060   | -0,091835   | 1,90        | ✓                   | ✓                  |
| 8   | 51,505850   | -0,107675   | 0,68        | ✓                   | ✓                  |
| 9   | 51,513384   | -0,096169   | 1,92        | ✓                   | ✓                  |
| 10  | 51,528634   | -0,105434   | 1,86        | ✓                   | ✓                  |
| 11  | 51,530214   | -0,131885   | 0,11        | ✓                   | ✓                  |
| 12  | 51,519243   | -0,142943   | 2,12        | ✓                   | ✓                  |
| 13  | 51,516081   | -0,114101   | 0,99        | ✓                   | ✓                  |
| 14  | 51,488267   | -0,083167   | 0,62        | ✓                   | ✓                  |
| 15  | 51,503246   | -0,120228   | 0,64        | ✓                   | ✗                  |
| 16  | 51,503804   | -0,148771   | 1,36        | ✓                   | ✗                  |
| 17  | 51,503804   | -0,176418   | 1,33        | ✓                   | ✗                  |
| 18  | 51,528820   | -0,161922   | 0,19        | ✓                   | ✗                  |
| 19  | 51,514500   | -0,175521   | 0,63        | ✓                   | ✗                  |
| 20  | 51,493757   | -0,139954   | 1,37        | ✓                   | ✓                  |
| 21  | 51,472166   | -0,138759   | 1,15        | ✓                   | ✓                  |
| 22  | 51,485475   | -0,174923   | 0,74        | ✓                   | ✓                  |
| 23  | 51,476541   | -0,155795   | 1,27        | ✓                   | ✓                  |
| 24  | 51,491710   | -0,155944   | 0,71        | ✓                   | ✓                  |
| 25  | 51,480357   | -0,124263   | 1,86        | ✗                   | ✗                  |
| 26  | 51,494594   | -0,122022   | 1,26        | ✓                   | ✗                  |
| Priemerná lokalizačná chyba [m]:              |             |             |             | 1,21                |                    |
| Medián lokalizačnej chyby [m]:                |             |             |             | 1,22                |                    |
| Zhodnosť lokalizačnej chyby (50%/90%) [m]:    |             |             |             | 1,20                | 1,90               |
| Úspešnosť lokalizácie miestnosti celkom:      |             |             |             | 96,2%               |                    |
| Úspešnosť lokalizácie miestnosti s/bez sondy: |             |             |             | 100,0%              | 90,0%              |

Tabuľka B.7: Detailné výsledky testu č. 7.a

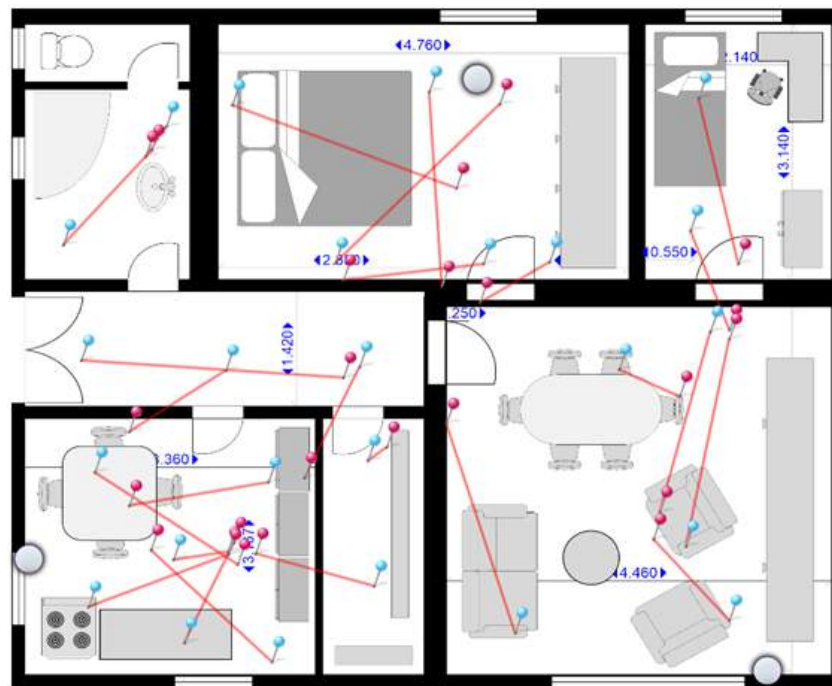


Obrázok B.7: Grafické znázornenie výsledkov testu č. 7.a

Test č. 8.a – lokalita A, testovacie zariadenie smartfón, algoritmus a

| Číslo merania                                 | Súradnica X | Súradnica Y | Vzdial. [m] | Lokaliz. Miestnosti | Sonda v miestnosti |
|---|-------------|-------------|-------------|---------------------|--------------------|
| 1   | 51,475796   | -0,101399   | 1,97        | ✓                   | ✓                  |
| 2   | 51,477099   | -0,065982   | 1,19        | ✓                   | ✓                  |
| 3   | 51,484731   | -0,073155   | 1,99        | ✓                   | ✓                  |
| 4   | 51,506873   | -0,069120   | 2,13        | ✓                   | ✓                  |
| 5   | 51,517290   | -0,072408   | 1,05        | ✗                   | ✗                  |
| 6   | 51,530958   | -0,071063   | 1,89        | ✓                   | ✗                  |
| 7   | 51,514035   | -0,095720   | 1,06        | ✗                   | ✓                  |
| 8   | 51,531609   | -0,115596   | 1,42        | ✓                   | ✓                  |
| 9   | 51,530214   | -0,148174   | 3,07        | ✓                   | ✓                  |
| 10  | 51,513942   | -0,131137   | 2,73        | ✓                   | ✓                  |
| 11  | 51,513849   | -0,106629   | 1,63        | ✓                   | ✓                  |
| 12  | 51,503246   | -0,127103   | 1,33        | ✗                   | ✓                  |
| 13  | 51,503897   | -0,173130   | 3,04        | ✓                   | ✗                  |
| 14  | 51,474772   | -0,156094   | 1,13        | ✓                   | ✓                  |
| 15  | 51,492361   | -0,170888   | 1,98        | ✓                   | ✓                  |
| 16  | 51,483335   | -0,157887   | 0,63        | ✓                   | ✓                  |
| 17  | 51,491337   | -0,142196   | 1,63        | ✓                   | ✓                  |
| 18  | 51,478495   | -0,171935   | 1,67        | ✓                   | ✓                  |
| 19  | 51,515802   | -0,176119   | 1,74        | ✓                   | ✗                  |
| 20  | 51,527983   | -0,159083   | 0,32        | ✓                   | ✗                  |
| 21  | 51,472817   | -0,141598   | 1,62        | ✓                   | ✓                  |
| 22  | 51,502874   | -0,149220   | 1,51        | ✗                   | ✗                  |
| 23  | 51,480636   | -0,124712   | 1,40        | ✗                   | ✗                  |
| 24  | 51,502967   | -0,084213   | 0,73        | ✓                   | ✓                  |
| 25  | 51,493570   | -0,125758   | 0,24        | ✓                   | ✗                  |
| Priemerná lokalizačná chyba [m]:              |             |             | 1,56        |                     |                    |
| Medián lokalizačnej chyby [m]:                |             |             | 1,62        |                     |                    |
| Zhodnosť lokalizačnej chyby (50%/90%) [m]:    |             |             | 1,50        | 2,70                |                    |
| Úspešnosť lokalizácie miestnosti celkom:      |             |             | 80,0%       |                     |                    |
| Úspešnosť lokalizácie miestnosti s/bez sondy: |             |             | 93,8%       | 55,6%               |                    |

Tabuľka B.8: Detailné výsledky testu č. 8.a

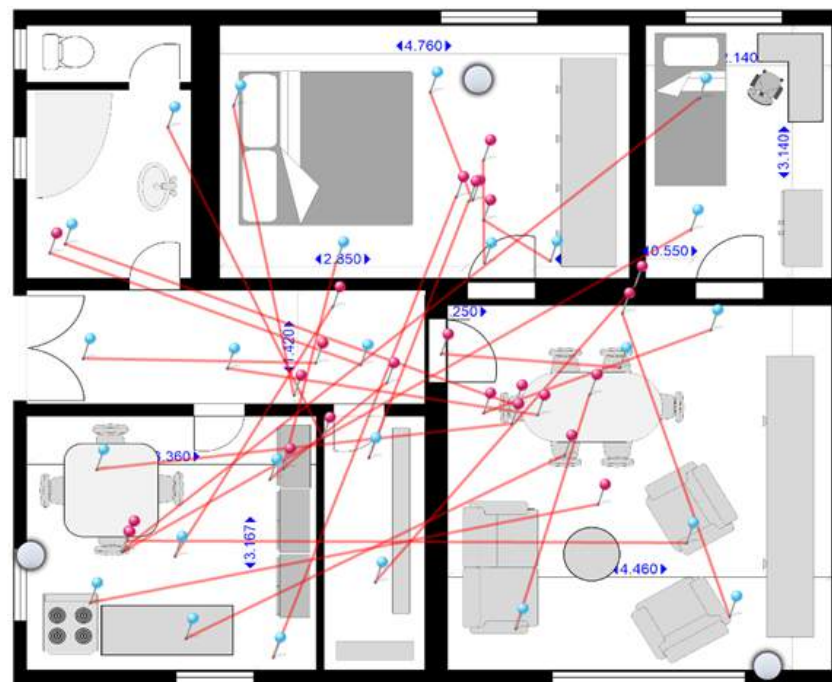


Obrázok B.8: Grafické znázornenie výsledkov testu č. 8.a

Test č. 7.b – lokalita A, testovacie zariadenie počítač, algoritmus b

| Číslo merania                                 | Súradnica X | Súradnica Y | Vzdial. [m] | Lokaliz. Miestnosti | Sonda v miestnosti |
|---|-------------|-------------|-------------|---------------------|--------------------|
| 1   | 51,532910   | -0,053130   | 8,09        | ✗                   | ✗                  |
| 2   | 51,521567   | -0,076293   | 6,44        | ✗                   | ✗                  |
| 3   | 51,511245   | -0,066131   | 6,76        | ✗                   | ✗                  |
| 4   | 51,497664   | -0,063142   | 7,36        | ✗                   | ✓                  |
| 5   | 51,481473   | -0,078684   | 4,82        | ✗                   | ✓                  |
| 6   | 51,478681   | -0,098858   | 3,47        | ✓                   | ✓                  |
| 7   | 51,503060   | -0,091835   | 1,21        | ✓                   | ✓                  |
| 8   | 51,505850   | -0,107675   | 2,59        | ✓                   | ✓                  |
| 9   | 51,513384   | -0,096169   | 0,96        | ✓                   | ✓                  |
| 10  | 51,528634   | -0,105434   | 0,92        | ✓                   | ✓                  |
| 11  | 51,530214   | -0,131885   | 1,32        | ✓                   | ✓                  |
| 12  | 51,519243   | -0,142943   | 1,41        | ✓                   | ✓                  |
| 13  | 51,516081   | -0,114101   | 1,92        | ✗                   | ✓                  |
| 14  | 51,488267   | -0,083167   | 8,42        | ✗                   | ✓                  |
| 15  | 51,503246   | -0,120228   | 0,90        | ✓                   | ✗                  |
| 16  | 51,503804   | -0,148771   | 1,42        | ✗                   | ✗                  |
| 17  | 51,503804   | -0,176418   | 2,27        | ✗                   | ✗                  |
| 18  | 51,528820   | -0,161922   | 4,23        | ✗                   | ✗                  |
| 19  | 51,514500   | -0,175521   | 1,15        | ✓                   | ✗                  |
| 20  | 51,493757   | -0,139954   | 0,60        | ✓                   | ✓                  |
| 21  | 51,472166   | -0,138759   | 2,69        | ✗                   | ✓                  |
| 22  | 51,485475   | -0,174923   | 3,08        | ✗                   | ✓                  |
| 23  | 51,476541   | -0,155795   | 4,02        | ✓                   | ✓                  |
| 24  | 51,491710   | -0,155944   | 2,35        | ✓                   | ✓                  |
| 25  | 51,480357   | -0,124263   | 3,58        | ✗                   | ✗                  |
| 26  | 51,494594   | -0,122022   | 1,43        | ✗                   | ✗                  |
| Priemerná lokalizačná chyba [m]:              |             |             |             | 3,21                |                    |
| Medián lokalizačnej chyby [m]:                |             |             |             | 2,47                |                    |
| Zhodnosť lokalizačnej chyby (50%/90%) [m]:    |             |             |             | 2,30                | 6,40               |
| Úspešnosť lokalizácie miestnosti celkom:      |             |             |             | 46,2%               |                    |
| Úspešnosť lokalizácie miestnosti s/bez sondy: |             |             |             | 62,5%               | 20,0%              |

Tabuľka B.9: Detailné výsledky testu č. 7.b

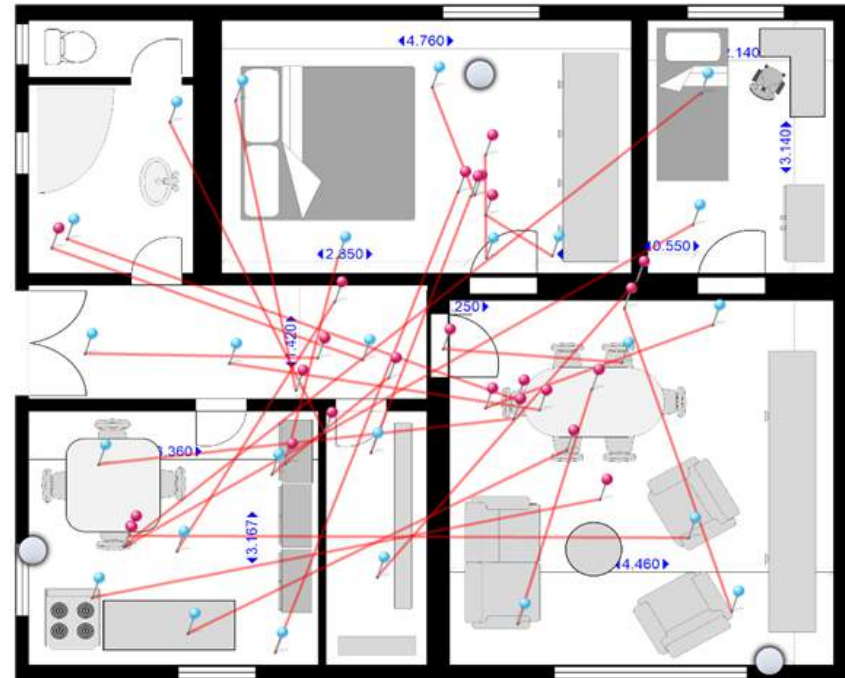


Obrázok B.9: Grafické znázornenie výsledkov testu č. 7.b

Test č. 8.b – lokalita A, testovacie zariadenie smartfón, algoritmus b

| Číslo merania                                 | Súradnica X | Súradnica Y | Vzdial. [m] | Lokaliz. Miestnosti | Sonda v miestnosti |
|---|-------------|-------------|-------------|---------------------|--------------------|
| 1   | 51,475796   | -0,101399   | 1,92        | ✓                   | ✓                  |
| 2   | 51,477099   | -0,065982   | 2,54        | ✓                   | ✓                  |
| 3   | 51,484731   | -0,073155   | 6,51        | ✗                   | ✓                  |
| 4   | 51,506873   | -0,069120   | 2,72        | ✓                   | ✓                  |
| 5   | 51,517290   | -0,072408   | 8,02        | ✗                   | ✗                  |
| 6   | 51,530958   | -0,071063   | 8,48        | ✗                   | ✗                  |
| 7   | 51,514035   | -0,095720   | 0,83        | ✓                   | ✓                  |
| 8   | 51,531609   | -0,115596   | 1,03        | ✓                   | ✓                  |
| 9   | 51,530214   | -0,148174   | 2,23        | ✗                   | ✓                  |
| 10  | 51,513942   | -0,131137   | 1,63        | ✗                   | ✓                  |
| 11  | 51,513849   | -0,106629   | 1,05        | ✓                   | ✓                  |
| 12  | 51,503246   | -0,127103   | 3,71        | ✗                   | ✗                  |
| 13  | 51,503897   | -0,173130   | 2,71        | ✓                   | ✗                  |
| 14  | 51,474772   | -0,156094   | 4,61        | ✗                   | ✓                  |
| 15  | 51,492361   | -0,170888   | 4,84        | ✗                   | ✓                  |
| 16  | 51,483335   | -0,157887   | 3,38        | ✗                   | ✓                  |
| 17  | 51,491337   | -0,142196   | 1,54        | ✗                   | ✓                  |
| 18  | 51,478495   | -0,171935   | 5,96        | ✗                   | ✓                  |
| 19  | 51,515802   | -0,176119   | 5,37        | ✗                   | ✗                  |
| 20  | 51,527983   | -0,159083   | 2,90        | ✗                   | ✗                  |
| 21  | 51,472817   | -0,141598   | 5,28        | ✗                   | ✓                  |
| 22  | 51,502874   | -0,149220   | 3,62        | ✗                   | ✗                  |
| 23  | 51,480636   | -0,124712   | 4,12        | ✗                   | ✗                  |
| 24  | 51,502967   | -0,084213   | 2,08        | ✓                   | ✓                  |
| 25  | 51,493570   | -0,125758   | 2,21        | ✗                   | ✗                  |
| Priemerná lokalizačná chyba [m]:              |             |             | 3,57        |                     |                    |
| Medián lokalizačnej chyby [m]:                |             |             | 2,90        |                     |                    |
| Zhodnosť lokalizačnej chyby (50%/90%) [m]:    |             |             | 2,70        | 5,40                |                    |
| Úspešnosť lokalizácie miestnosti celkom:      |             |             | 32,0%       |                     |                    |
| Úspešnosť lokalizácie miestnosti s/bez sondy: |             |             | 43,8%       | 11,1%               |                    |

Tabuľka B.10: Detailné výsledky testu č. 8.b



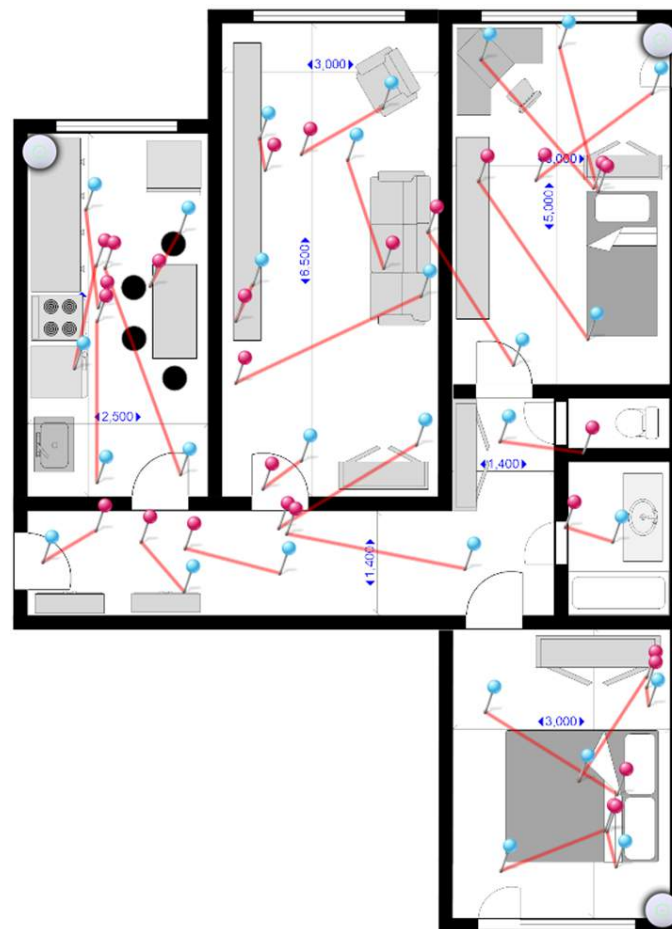
Obrázok B.10: Grafické znázornenie výsledkov testu č. 8.b



Test č. 9.a – lokalita B, testovacie zariadenie počítač, algoritmus a

| Číslo merania                                 | Súradnica X | Súradnica Y | Vzdial. [m] | Lokaliz. Miestnosti | Sonda v miestnosti |
|---|-------------|-------------|-------------|---------------------|--------------------|
| 1   | 51,495059   | -0,175820   | 1,15        | ✓                   | ✗                  |
| 2   | 51,497478   | -0,194500   | 1,22        | ✓                   | ✗                  |
| 3   | 51,504083   | -0,187327   | 2,47        | ✓                   | ✓                  |
| 4   | 51,524636   | -0,176418   | 0,95        | ✓                   | ✓                  |
| 5   | 51,526588   | -0,188821   | 1,36        | ✓                   | ✓                  |
| 6   | 51,513477   | -0,190316   | 1,57        | ✓                   | ✓                  |
| 7   | 51,504734   | -0,176268   | 3,24        | ✓                   | ✓                  |
| 8   | 51,496548   | -0,163118   | 1,60        | ✓                   | ✗                  |
| 9   | 51,530679   | -0,154151   | 1,66        | ✓                   | ✗                  |
| 10  | 51,519429   | -0,144438   | 2,98        | ✓                   | ✗                  |
| 11  | 51,520359   | -0,166704   | 0,61        | ✓                   | ✗                  |
| 12  | 51,534955   | -0,149519   | 1,87        | ✓                   | ✗                  |
| 13  | 51,505850   | -0,160278   | 0,91        | ✓                   | ✗                  |
| 14  | 51,507152   | -0,145035   | 2,60        | ✗                   | ✗                  |
| 15  | 51,532445   | -0,165808   | 0,44        | ✓                   | ✗                  |
| 16  | 51,496920   | -0,138609   | 2,90        | ✓                   | ✗                  |
| 17  | 51,507432   | -0,133977   | 1,82        | ✗                   | ✗                  |
| 18  | 51,472352   | -0,118584   | 0,50        | ✓                   | ✓                  |
| 19  | 51,515895   | -0,122320   | 3,20        | ✓                   | ✓                  |
| 20  | 51,539975   | -0,126056   | 2,13        | ✓                   | ✓                  |
| 21  | 51,538952   | -0,136517   | 2,99        | ✓                   | ✓                  |
| 22  | 51,536164   | -0,113802   | 2,78        | ✓                   | ✓                  |
| 23  | 51,513756   | -0,132184   | 2,58        | ✗                   | ✓                  |
| 24  | 51,499153   | -0,119033   | 1,05        | ✓                   | ✗                  |
| 25  | 51,485103   | -0,135920   | 2,07        | ✓                   | ✓                  |
| 26  | 51,485661   | -0,114251   | 0,24        | ✓                   | ✓                  |
| 27  | 51,479426   | -0,123516   | 1,84        | ✓                   | ✓                  |
| Priemerná lokalizačná chyba [m]:              |             |             |             | 1,81                |                    |
| Medián lokalizačnej chyby [m]:                |             |             |             | 1,82                |                    |
| Zhodnosť lokalizačnej chyby (50%/90%) [m]:    |             |             |             | 1,70                | 3,00               |
| Úspešnosť lokalizácie miestnosti celkom:      |             |             |             | 88,9%               |                    |
| Úspešnosť lokalizácie miestnosti s/bez sondy: |             |             |             | 92,9%               | 84,6%              |

Tabuľka B.11: Detailné výsledky testu č. 9.a

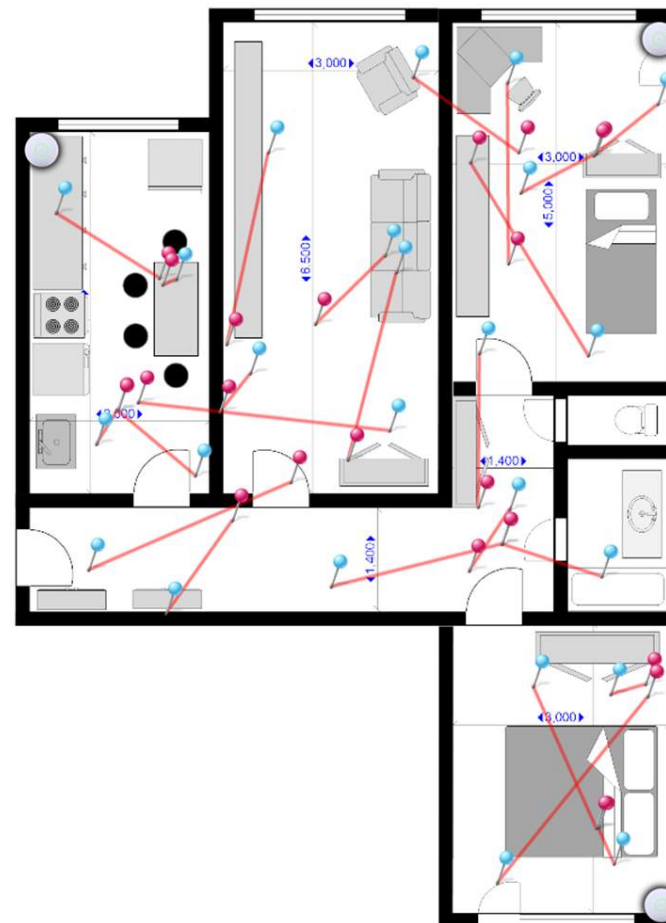


Obrázok B.11: Grafické znázornenie výsledkov testu č. 9.a

Test č. 10.a – lokalita B, testovacie zariadenie počítač, algoritmus a

| Číslo merania                                 | Súradnica X | Súradnica Y | Vzdial. [m] | Lokaliz. Miestnosti | Sonda v miestnosti |
|---|-------------|-------------|-------------|---------------------|--------------------|
| 1   | 51,536907   | -0,132931   | 2,45        | ✓                   | ✓                  |
| 2   | 51,535141   | -0,112906   | 1,56        | ✓                   | ✓                  |
| 3   | 51,527797   | -0,131137   | 1,49        | ✓                   | ✓                  |
| 4   | 51,514314   | -0,122171   | 3,58        | ✓                   | ✓                  |
| 5   | 51,514500   | -0,136667   | 2,09        | ✗                   | ✓                  |
| 6   | 51,501571   | -0,132632   | 1,23        | ✓                   | ✗                  |
| 7   | 51,495152   | -0,156393   | 2,78        | ✓                   | ✗                  |
| 8   | 51,508083   | -0,148622   | 3,90        | ✗                   | ✗                  |
| 9   | 51,521195   | -0,147725   | 2,76        | ✓                   | ✗                  |
| 10  | 51,512826   | -0,167152   | 0,84        | ✓                   | ✗                  |
| 11  | 51,492919   | -0,178360   | 1,92        | ✓                   | ✗                  |
| 12  | 51,496548   | -0,188672   | 3,08        | ✗                   | ✗                  |
| 13  | 51,520637   | -0,177016   | 0,30        | ✓                   | ✓                  |
| 14  | 51,526123   | -0,193006   | 1,73        | ✓                   | ✓                  |
| 15  | 51,506966   | -0,187626   | 0,66        | ✓                   | ✓                  |
| 16  | 51,504362   | -0,174475   | 1,41        | ✓                   | ✓                  |
| 17  | 51,522590   | -0,149220   | 1,79        | ✓                   | ✗                  |
| 18  | 51,531144   | -0,164761   | 2,77        | ✓                   | ✗                  |
| 19  | 51,537372   | -0,145484   | 1,81        | ✗                   | ✗                  |
| 20  | 51,470583   | -0,134276   | 3,84        | ✓                   | ✓                  |
| 21  | 51,472166   | -0,118734   | 0,60        | ✓                   | ✓                  |
| 22  | 51,486871   | -0,129494   | 2,36        | ✓                   | ✓                  |
| 23  | 51,486220   | -0,119182   | 0,58        | ✓                   | ✓                  |
| 24  | 51,495989   | -0,120378   | 1,73        | ✗                   | ✗                  |
| Priemerná lokalizačná chyba [m]:              |             |             |             | 1,97                |                    |
| Medián lokalizačnej chyby [m]:                |             |             |             | 1,80                |                    |
| Zhodnosť lokalizačnej chyby (50%/90%) [m]:    |             |             |             | 1,80   3,60         |                    |
| Úspešnosť lokalizácie miestnosti celkom:      |             |             |             | 79,2%               |                    |
| Úspešnosť lokalizácie miestnosti s/bez sondy: |             |             |             | 92,3%   63,6%       |                    |

Tabuľka B.12: Detailné výsledky testu č. 10.a



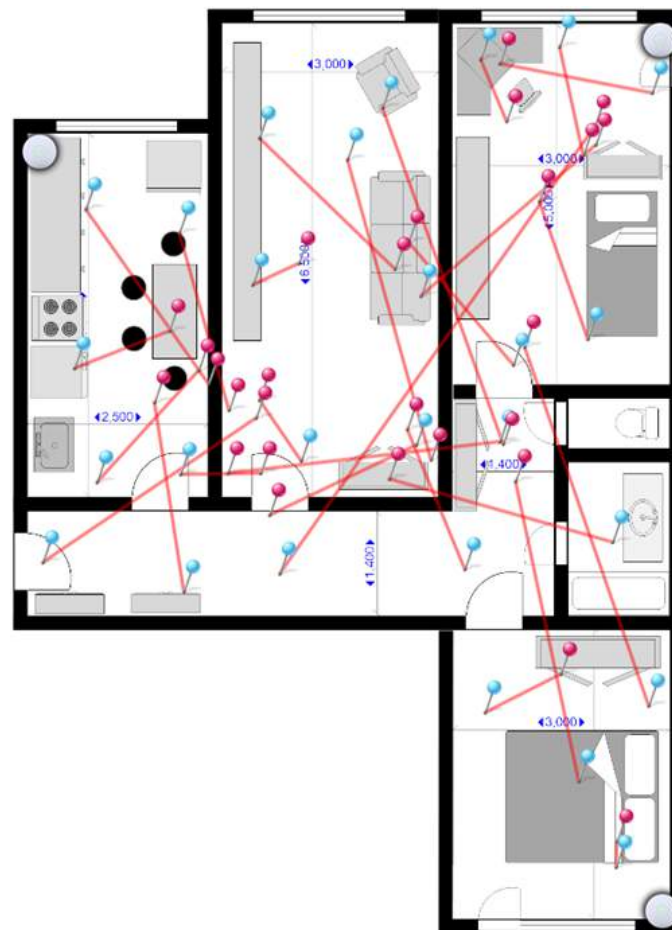
Obrázok B.12: Grafické znázornenie výsledkov testu č. 10.a



Test č. 9.b – lokalita B, testovacie zariadenie počítač, algoritmus b

| Číslo merania                                 | Súradnica X | Súradnica Y | Vzdial. [m] | Lokaliz. Miestnosti | Sonda v miestnosti |
|---|-------------|-------------|-------------|---------------------|--------------------|
| 1   | 51,495059   | -0,175820   | 2,63        | ✗                   | ✗                  |
| 2   | 51,497478   | -0,194500   | 3,03        | ✗                   | ✗                  |
| 3   | 51,504083   | -0,187327   | 2,58        | ✓                   | ✓                  |
| 4   | 51,524636   | -0,176418   | 2,63        | ✗                   | ✓                  |
| 5   | 51,526588   | -0,188821   | 3,46        | ✓                   | ✓                  |
| 6   | 51,513477   | -0,190316   | 1,22        | ✓                   | ✓                  |
| 7   | 51,504734   | -0,176268   | 0,95        | ✗                   | ✓                  |
| 8   | 51,496548   | -0,163118   | 9,13        | ✗                   | ✗                  |
| 9   | 51,530679   | -0,154151   | 4,45        | ✓                   | ✗                  |
| 10  | 51,519429   | -0,144438   | 3,71        | ✗                   | ✗                  |
| 11  | 51,520359   | -0,166704   | 1,04        | ✓                   | ✗                  |
| 12  | 51,534955   | -0,149519   | 5,24        | ✗                   | ✗                  |
| 13  | 51,505850   | -0,160278   | 1,22        | ✓                   | ✗                  |
| 14  | 51,507152   | -0,145035   | 2,52        | ✓                   | ✗                  |
| 15  | 51,532445   | -0,165808   | 3,04        | ✓                   | ✗                  |
| 16  | 51,496920   | -0,138609   | 2,27        | ✗                   | ✗                  |
| 17  | 51,507432   | -0,133977   | 3,62        | ✗                   | ✗                  |
| 18  | 51,472352   | -0,118584   | 0,35        | ✓                   | ✓                  |
| 19  | 51,515895   | -0,122320   | 2,13        | ✓                   | ✓                  |
| 20  | 51,539975   | -0,126056   | 1,56        | ✓                   | ✓                  |
| 21  | 51,538952   | -0,136517   | 1,02        | ✓                   | ✓                  |
| 22  | 51,536164   | -0,113802   | 2,33        | ✓                   | ✓                  |
| 23  | 51,513756   | -0,132184   | 2,42        | ✗                   | ✓                  |
| 24  | 51,499153   | -0,119033   | 3,01        | ✗                   | ✗                  |
| 25  | 51,485103   | -0,135920   | 1,72        | ✓                   | ✓                  |
| 26  | 51,485661   | -0,114251   | 5,55        | ✗                   | ✓                  |
| 27  | 51,479426   | -0,123516   | 4,28        | ✗                   | ✓                  |
| Priemerná lokalizačná chyba [m]:              |             |             |             | 2,86                |                    |
| Medián lokalizačnej chyby [m]:                |             |             |             | 2,58                |                    |
| Zhodnosť lokalizačnej chyby (50%/90%) [m]:    |             |             |             | 2,50                | 4,30               |
| Úspešnosť lokalizácie miestnosti celkom:      |             |             |             | 51,9%               |                    |
| Úspešnosť lokalizácie miestnosti s/bez sondy: |             |             |             | 64,3%               | 38,5%              |

Tabuľka B.13: Detailné výsledky testu č. 9.b

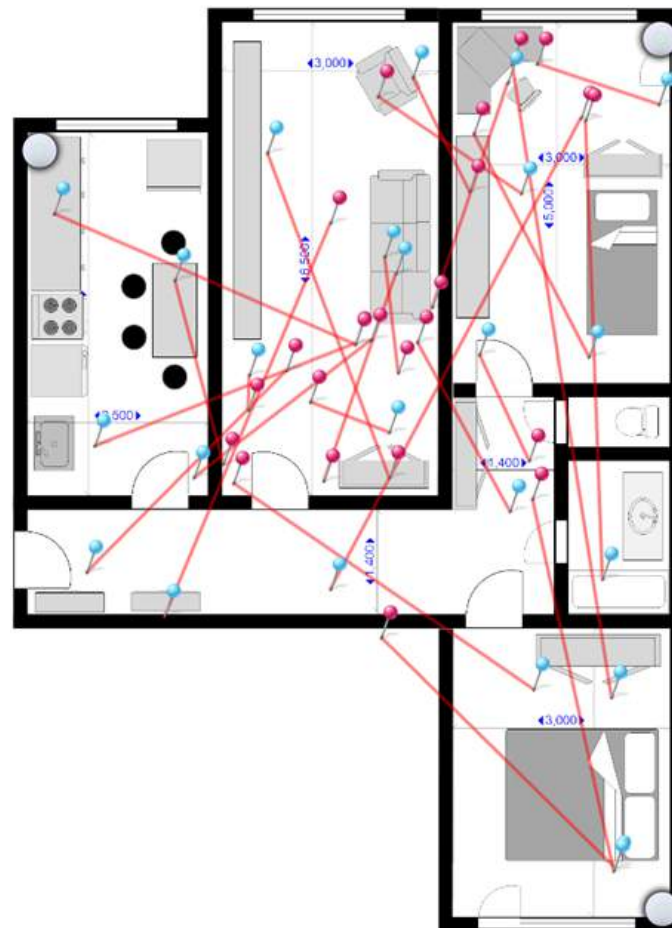


Obrázok B.13: Grafické znázornenie výsledkov testu č. 9.b

Test č. 10.b – lokalita B, testovacie zariadenie počítač, algoritmus b

| Číslo merania                                 | Súradnica X | Súradnica Y | Vzdial. [m] | Lokaliz. Miestnosti | Sonda v miestnosti |
|---|-------------|-------------|-------------|---------------------|--------------------|
| 1   | 51,536907   | -0,132931   | 3,45        | ✗                   | ✓                  |
| 2   | 51,535141   | -0,112906   | 1,70        | ✓                   | ✓                  |
| 3   | 51,527797   | -0,131137   | 2,37        | ✗                   | ✓                  |
| 4   | 51,514314   | -0,122171   | 3,73        | ✓                   | ✓                  |
| 5   | 51,514500   | -0,136667   | 1,79        | ✗                   | ✓                  |
| 6   | 51,501571   | -0,132632   | 3,04        | ✗                   | ✗                  |
| 7   | 51,495152   | -0,156393   | 8,38        | ✗                   | ✗                  |
| 8   | 51,508083   | -0,148622   | 1,37        | ✓                   | ✗                  |
| 9   | 51,521195   | -0,147725   | 3,20        | ✓                   | ✗                  |
| 10  | 51,512826   | -0,167152   | 0,48        | ✓                   | ✗                  |
| 11  | 51,492919   | -0,178360   | 6,42        | ✗                   | ✗                  |
| 12  | 51,496548   | -0,188672   | 5,13        | ✗                   | ✗                  |
| 13  | 51,520637   | -0,177016   | 2,69        | ✗                   | ✓                  |
| 14  | 51,526123   | -0,193006   | 5,27        | ✗                   | ✓                  |
| 15  | 51,506966   | -0,187626   | 4,83        | ✗                   | ✓                  |
| 16  | 51,504362   | -0,174475   | 3,28        | ✗                   | ✓                  |
| 17  | 51,522590   | -0,149220   | 1,60        | ✓                   | ✗                  |
| 18  | 51,531144   | -0,164761   | 5,14        | ✓                   | ✗                  |
| 19  | 51,537372   | -0,145484   | 1,98        | ✗                   | ✗                  |
| 20  | 51,471887   | -0,118883   | 4,04        | ✗                   | ✓                  |
| 21  | 51,472166   | -0,118734   | 4,94        | ✗                   | ✓                  |
| 22  | 51,486871   | -0,129494   | 5,08        | ✗                   | ✓                  |
| 23  | 51,486220   | -0,119182   | 8,84        | ✗                   | ✓                  |
| 24  | 51,495989   | -0,120378   | 6,21        | ✗                   | ✗                  |
| Priemerná lokalizačná chyba [m]:              |             |             |             | 3,96                |                    |
| Medián lokalizačnej chyby [m]:                |             |             |             | 3,59                |                    |
| Zhodnosť lokalizačnej chyby (50%/90%) [m]:    |             |             |             | 3,30                | 5,40               |
| Úspešnosť lokalizácie miestnosti celkom:      |             |             |             | 29,2%               |                    |
| Úspešnosť lokalizácie miestnosti s/bez sondy: |             |             |             | 15,4%               | 45,5%              |

Tabuľka B.14: Detailné výsledky testu č. 10.b



Obrázok B.14: Grafické znázornenie výsledkov testu č. 10.b

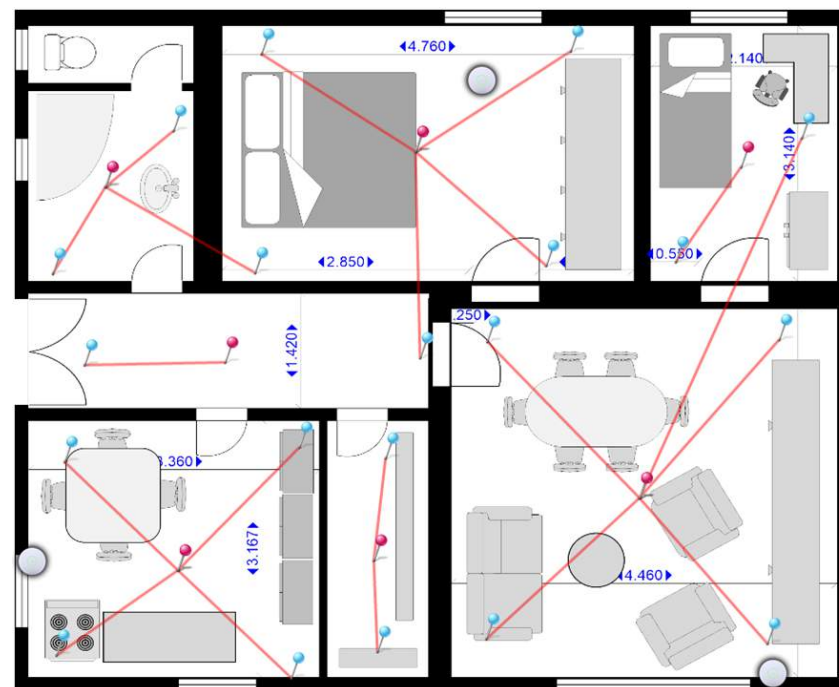
## B.2 Lokalizácia miestnosti

### B.2.1 Prvé kolo testov (pôvodný algoritmus)

Test č. 3.a – lokalita A, testovacie zariadenie počítač, algoritmus a

| Číslo merania                                 | Súradnica X | Súradnica Y | Vzdial. [m] | Lokaliz. Miestnosti | Sonda v miestnosti |
|---|-------------|-------------|-------------|---------------------|--------------------|
| 1   | 51,475424   | -0,106928   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 2   | 51,474958   | -0,060602   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 3   | 51,506222   | -0,058659   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 4   | 51,506036   | -0,106779   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 5   | 51,513849   | -0,097065   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 6   | 51,535885   | -0,093030   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 7   | 51,535606   | -0,143989   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 8   | 51,513105   | -0,145035   | —           | ✗                   | ✓                  |
| 9   | 51,526960   | -0,054923   | —           | ✗                   | ✗                  |
| 10  | 51,514221   | -0,075695   | —           | ✓                   | ✗                  |
| 11  | 51,471421   | -0,139058   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 12  | 51,473748   | -0,177763   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 13  | 51,495152   | -0,137713   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 14  | 51,493663   | -0,176418   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 15  | 51,503618   | -0,173130   | —           | ✓                   | ✗                  |
| 16  | 51,504362   | -0,117837   | —           | ✗                   | ✗                  |
| 17  | 51,527704   | -0,158485   | —           | ✓                   | ✗                  |
| 18  | 51,513012   | -0,178360   | —           | ✓                   | ✗                  |
| 19  | 51,494036   | -0,123516   | —           | ✓                   | ✗                  |
| 20  | 51,474121   | -0,124861   | —           | ✓                   | ✗                  |
| Úspešnosť lokalizácie miestnosti celkom:      |             |             |             | 85,0%               |                    |
| Úspešnosť lokalizácie miestnosti s/bez sondy: |             |             |             | 91,7%               | 75,0%              |

Tabuľka B.15: Detailné výsledky testu č. 3.a

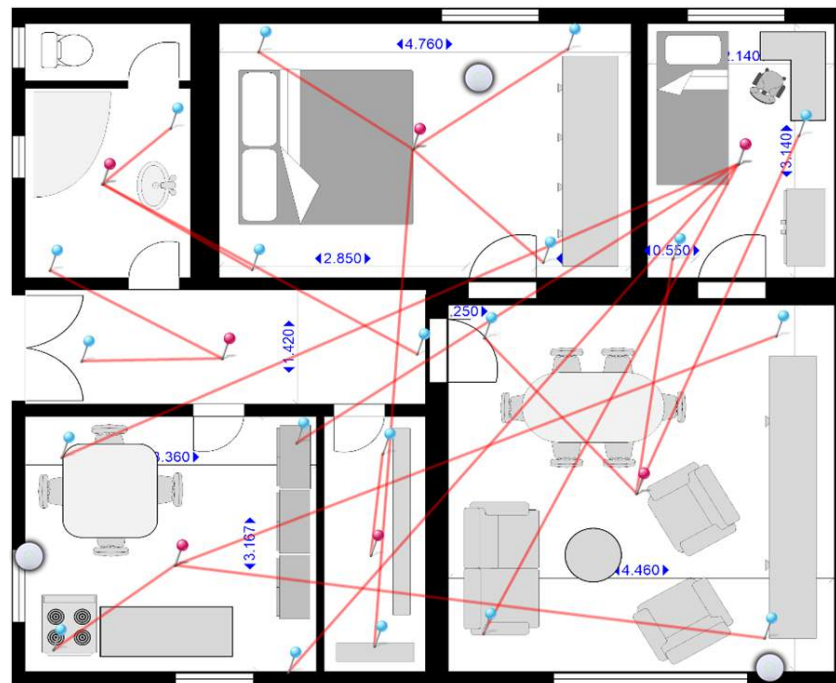


Obrázok B.15: Grafické znázornenie výsledkov testu č. 3.a

Test č. 3.b – lokalita A, testovacie zariadenie počítač, algoritmus b

| Číslo merania                                   | Súradnica X | Súradnica Y | Vzdial. [m] | Lokaliz. Miestnosti | Sonda v miestnosti |
|---|-------------|-------------|-------------|---------------------|--------------------|
| 1   | 51,475424   | -0,106928   | —           | ✗                   | ✓                  |
| 2   | 51,474958   | -0,060602   | —           | ✗                   | ✓                  |
| 3   | 51,506222   | -0,058659   | —           | ✗                   | ✓                  |
| 4   | 51,506036   | -0,106779   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 5   | 51,513849   | -0,097065   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 6   | 51,535885   | -0,093030   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 7   | 51,535606   | -0,143989   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 8   | 51,513105   | -0,145035   | —           | ✗                   | ✓                  |
| 9   | 51,526960   | -0,054923   | —           | ✗                   | ✗                  |
| 10  | 51,514221   | -0,075695   | —           | ✗                   | ✗                  |
| 11  | 51,471421   | -0,139058   | —           | ✗                   | ✓                  |
| 12  | 51,473748   | -0,177763   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 13  | 51,495152   | -0,137713   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 14  | 51,493663   | -0,176418   | —           | ✗                   | ✓                  |
| 15  | 51,503618   | -0,173130   | —           | ✗                   | ✗                  |
| 16  | 51,504362   | -0,117837   | —           | ✗                   | ✗                  |
| 17  | 51,527704   | -0,158485   | —           | ✓                   | ✗                  |
| 18  | 51,513012   | -0,178360   | —           | ✗                   | ✗                  |
| 19  | 51,494036   | -0,123516   | —           | ✓                   | ✗                  |
| 20  | 51,474121   | -0,124861   | —           | ✗                   | ✗                  |
| <b>Úspešnosť lokalizácie miestnosti celkom:</b> |             |             |             | 40,0%               |                    |
| Úspešnosť lokalizácie miestnosti s/bez sondy:   |             |             |             | 50,0%               | 25,0%              |

Tabuľka B.16: Detailné výsledky testu č. 3.b



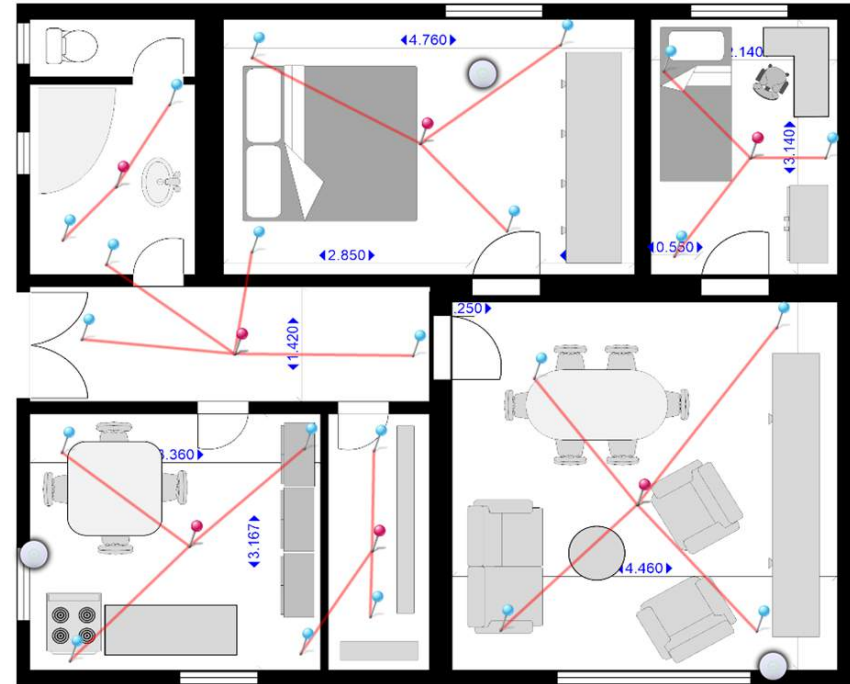
Obrázok B.16: Grafické znázornenie výsledkov testu č. 3.b

## B.2.2 Druhé kolo testov (vylepšený algoritmus s korekciou chýbajúcich dát)

Test č. 5.a – lokalita A, testovacie zariadenie smartfón, algoritmus a

| Číslo merania  | Súradnica X | Súradnica Y | Vzdial. [m] | Lokaliz. Miestnosti | Sonda v miestnosti |
|--|-------------|-------------|-------------|---------------------|--------------------|
| 1  | 51,475610   | -0,104687   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 2  | 51,475517   | -0,062395   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 3  | 51,506780   | -0,059107   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 4  | 51,514128   | -0,075994   | —           | ✓                   | ✗                  |
| 5  | 51,514593   | -0,145783   | —           | ✗                   | ✗                  |
| 6  | 51,534583   | -0,145783   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 7  | 51,535885   | -0,094824   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 8  | 51,516732   | -0,103641   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 9  | 51,501571   | -0,099157   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 10   | 51,503897   | -0,119182   | —           | ✓                   | ✗                  |
| 11   | 51,505571   | -0,173877   | —           | ✓                   | ✗                  |
| 12   | 51,513291   | -0,169842   | —           | ✗                   | ✗                  |
| 13   | 51,515802   | -0,177016   | —           | ✓                   | ✗                  |
| 14   | 51,529749   | -0,159382   | —           | ✓                   | ✗                  |
| 15   | 51,472445   | -0,175820   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 16   | 51,473190   | -0,137713   | —           | ✗                   | ✓                  |
| 17   | 51,494315   | -0,137115   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 18   | 51,493943   | -0,177165   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 19   | 51,494129   | -0,125608   | —           | ✓                   | ✗                  |
| 20   | 51,477006   | -0,126206   | —           | ✓                   | ✗                  |
| 21   | 51,533189   | -0,077787   | —           | ✓                   | ✗                  |
| 22   | 51,524264   | -0,051038   | —           | ✓                   | ✗                  |
| <b>Úspešnosť lokalizácie miestnosti celkom:</b>      |             |             |             | 86,4%               |                    |
| <b>Úspešnosť lokalizácie miestnosti s/bez sondy:</b> |             |             |             | 83,3%               | 90,0%              |

Tabuľka B.17: Detailné výsledky testu č. 5.a

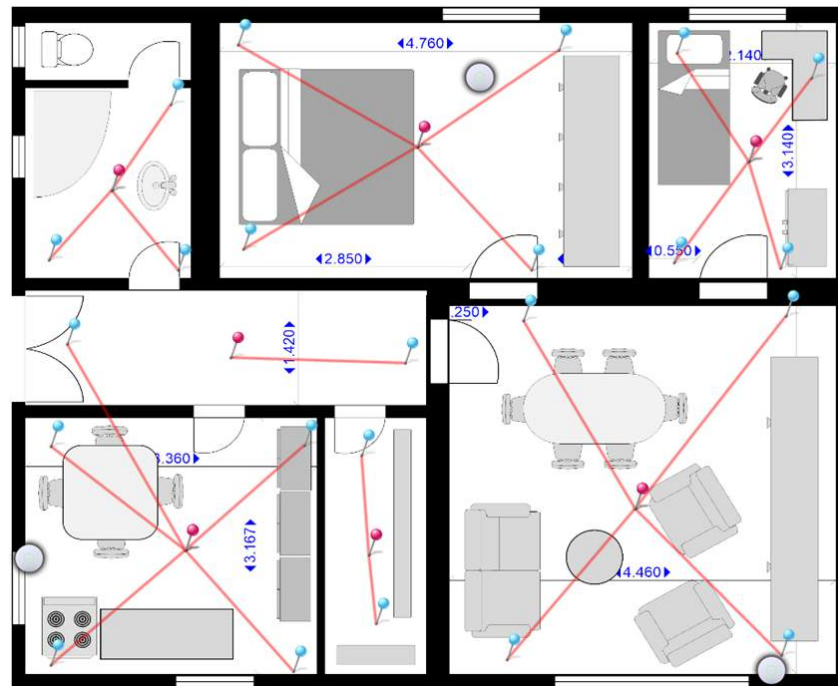


Obrázok B.17: Grafické znázornenie výsledkov testu č. 5.a

Test č. 6.a – lokalita A, testovacie zariadenie počítač, algoritmus a

| Číslo merania                                   | Súradnica X | Súradnica Y | Vzdial. [m] | Lokaliz. Miestnosti | Sonda v miestnosti |
|---|-------------|-------------|-------------|---------------------|--------------------|
| 1   | 51,532817   | -0,053130   | —           | ✓                   | ✗                  |
| 2   | 51,508362   | -0,057314   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 3   | 51,473469   | -0,058061   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 4   | 51,473004   | -0,103192   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 5   | 51,513849   | -0,075695   | —           | ✓                   | ✗                  |
| 6   | 51,535699   | -0,094674   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 7   | 51,536257   | -0,147426   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 8   | 51,515244   | -0,146530   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 9   | 51,513105   | -0,099157   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 10  | 51,503525   | -0,119929   | —           | ✓                   | ✗                  |
| 11  | 51,505478   | -0,175521   | —           | ✗                   | ✗                  |
| 12  | 51,472445   | -0,178211   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 13  | 51,471793   | -0,138311   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 14  | 51,495059   | -0,136517   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 15  | 51,494966   | -0,178211   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 16  | 51,535420   | -0,075247   | —           | ✓                   | ✗                  |
| 17  | 51,513291   | -0,058211   | —           | ✓                   | ✗                  |
| 18  | 51,507897   | -0,100502   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 19  | 51,530121   | -0,158485   | —           | ✓                   | ✗                  |
| 20  | 51,513105   | -0,157289   | —           | ✓                   | ✗                  |
| 21  | 51,514128   | -0,178510   | —           | ✓                   | ✗                  |
| 22  | 51,476727   | -0,124712   | —           | ✓                   | ✗                  |
| 23  | 51,494036   | -0,127103   | —           | ✓                   | ✗                  |
| <b>Úspešnosť lokalizácie miestnosti celkom:</b> |             |             |             | 95,7%               |                    |
| Úspešnosť lokalizácie miestnosti s/bez sondy:   |             |             |             | 100,0%              | 90,9%              |

Tabuľka B.18: Detailné výsledky testu č. 6.a



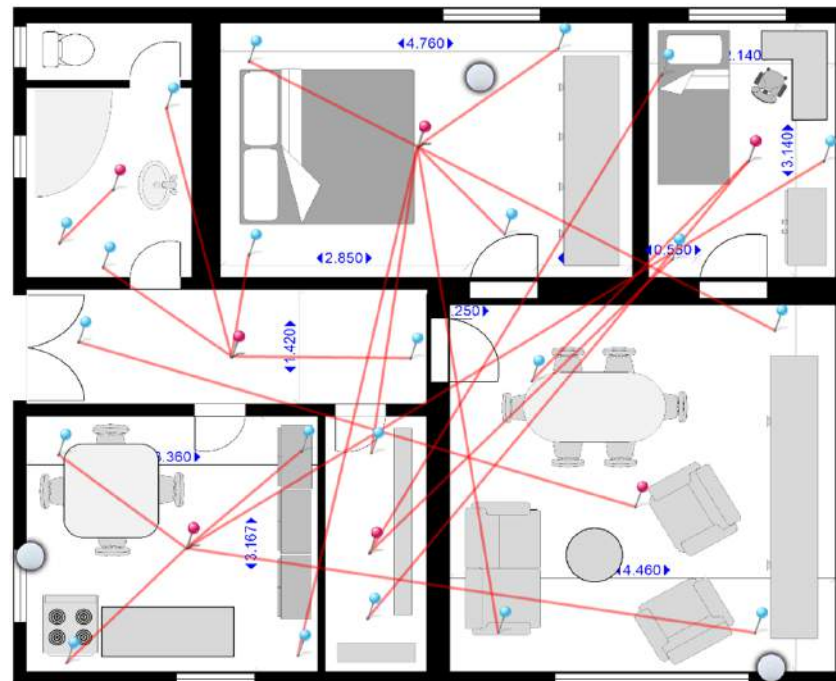
Obrázok B.18: Grafické znázornenie výsledkov testu č. 6.a



Test č. 5.b – lokalita A, testovacie zariadenie smartfón, algoritmus b

| Číslo merania                                 | Súradnica X | Súradnica Y | Vzdial. [m] | Lokaliz. Miestnosti | Sonda v miestnosti |
|---|-------------|-------------|-------------|---------------------|--------------------|
| 1   | 51,475610   | -0,104687   | —           | ✗                   | ✓                  |
| 2   | 51,475517   | -0,062395   | —           | ✗                   | ✓                  |
| 3   | 51,506780   | -0,059107   | —           | ✗                   | ✓                  |
| 4   | 51,514128   | -0,075994   | —           | ✗                   | ✗                  |
| 5   | 51,514593   | -0,145783   | —           | ✗                   | ✓                  |
| 6   | 51,534583   | -0,145783   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 7   | 51,535885   | -0,094824   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 8   | 51,516732   | -0,103641   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 9   | 51,501571   | -0,099157   | —           | ✗                   | ✓                  |
| 10  | 51,503897   | -0,119182   | —           | ✓                   | ✗                  |
| 11  | 51,505571   | -0,173877   | —           | ✗                   | ✗                  |
| 12  | 51,513291   | -0,169842   | —           | ✗                   | ✗                  |
| 13  | 51,515802   | -0,177016   | —           | ✓                   | ✗                  |
| 14  | 51,529749   | -0,159382   | —           | ✗                   | ✗                  |
| 15  | 51,472445   | -0,175820   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 16  | 51,473190   | -0,137713   | —           | ✗                   | ✓                  |
| 17  | 51,494315   | -0,137115   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 18  | 51,493943   | -0,177165   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 19  | 51,494129   | -0,125608   | —           | ✗                   | ✗                  |
| 20  | 51,477006   | -0,126206   | —           | ✗                   | ✗                  |
| 21  | 51,533189   | -0,077787   | —           | ✗                   | ✗                  |
| 22  | 51,524264   | -0,051038   | —           | ✗                   | ✗                  |
| Úspešnosť lokalizácie miestnosti celkom:      |             |             |             | 36,4%               |                    |
| Úspešnosť lokalizácie miestnosti s/bez sondy: |             |             |             | 50,0%               | 20,0%              |

71



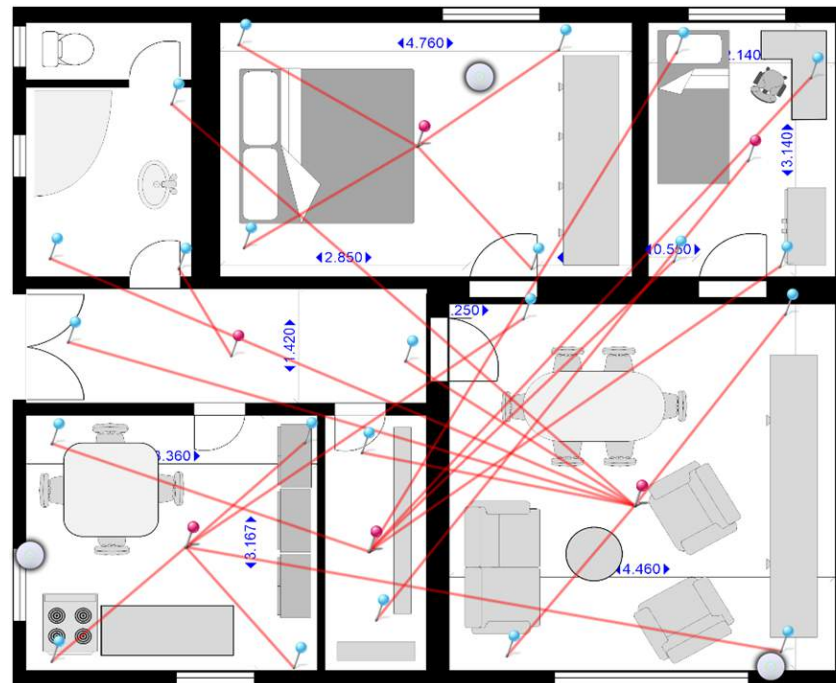
Tabuľka B.19: Detailné výsledky testu č. 5.b

Obrázok B.19: Grafické znázornenie výsledkov testu č. 5.b

Test č. 6.b – lokalita A, testovacie zariadenie počítač, algoritmus b

| Číslo merania                                   | Súradnica X | Súradnica Y | Vzdial. [m] | Lokaliz. Miestnosti | Sonda v miestnosti |
|---|-------------|-------------|-------------|---------------------|--------------------|
| 1   | 51,532817   | -0,053130   | —           | ✗                   | ✗                  |
| 2   | 51,508362   | -0,057314   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 3   | 51,473469   | -0,058061   | —           | ✗                   | ✓                  |
| 4   | 51,473004   | -0,103192   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 5   | 51,513849   | -0,075695   | —           | ✗                   | ✗                  |
| 6   | 51,535699   | -0,094674   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 7   | 51,536257   | -0,147426   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 8   | 51,515244   | -0,146530   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 9   | 51,513105   | -0,099157   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 10  | 51,503525   | -0,119929   | —           | ✗                   | ✗                  |
| 11  | 51,505478   | -0,175521   | —           | ✗                   | ✗                  |
| 12  | 51,472445   | -0,178211   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 13  | 51,471793   | -0,138311   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 14  | 51,495059   | -0,136517   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 15  | 51,494966   | -0,178211   | —           | ✗                   | ✓                  |
| 16  | 51,535420   | -0,075247   | —           | ✗                   | ✗                  |
| 17  | 51,513291   | -0,058211   | —           | ✗                   | ✗                  |
| 18  | 51,507897   | -0,100502   | —           | ✗                   | ✓                  |
| 19  | 51,530121   | -0,158485   | —           | ✗                   | ✗                  |
| 20  | 51,513105   | -0,157289   | —           | ✗                   | ✗                  |
| 21  | 51,514128   | -0,178510   | —           | ✗                   | ✗                  |
| 22  | 51,476727   | -0,124712   | —           | ✗                   | ✗                  |
| 23  | 51,494036   | -0,127103   | —           | ✗                   | ✗                  |
| <b>Úspešnosť lokalizácie miestnosti celkom:</b> |             |             |             | 39,1%               |                    |
| Úspešnosť lokalizácie miestnosti s/bez sondy:   |             |             |             | 75,0%               | 0,0%               |

Tabuľka B.20: Detailné výsledky testu č. 6.b



Obrázok B.20: Grafické znázornenie výsledkov testu č. 6.b

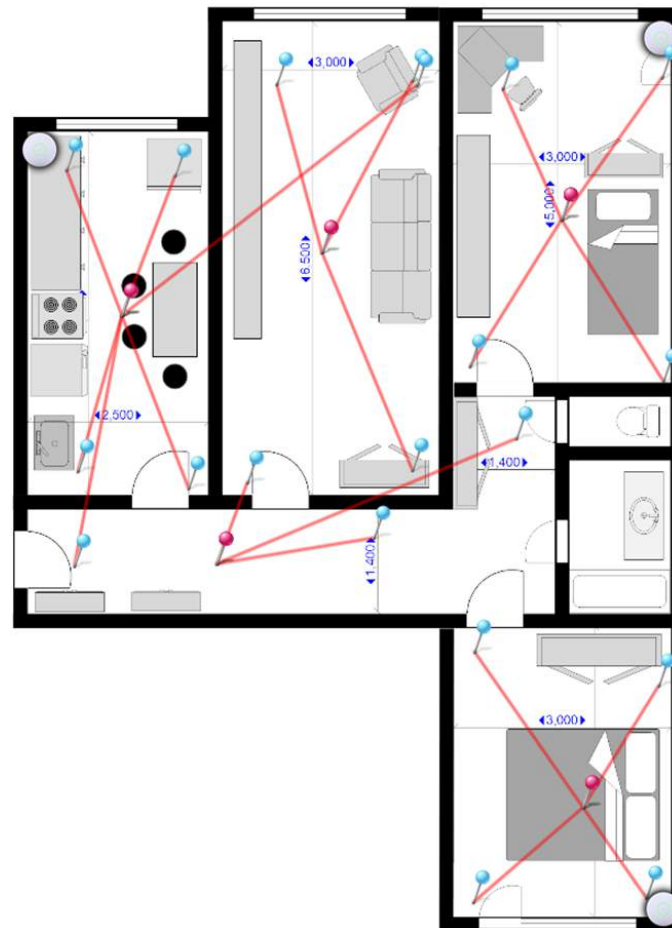


Test č. 11.a – lokalita B, testovacie zariadenie počítač, algoritmus a

73

| Číslo merania                                   | Súradnica X | Súradnica Y | Vzdial. [m] | Lokaliz. Miestnosti | Sonda v miestnosti |
|---|-------------|-------------|-------------|---------------------|--------------------|
| 1   | 51,536349   | -0,133678   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 2   | 51,489942   | -0,137414   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 3   | 51,469280   | -0,137563   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 4   | 51,469652   | -0,114699   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 5   | 51,487150   | -0,113055   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 6   | 51,512268   | -0,112457   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 7   | 51,537279   | -0,112607   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 8   | 51,513477   | -0,138012   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 9   | 51,507525   | -0,131885   | —           | ✓                   | ✗                  |
| 10  | 51,499339   | -0,150714   | —           | ✓                   | ✗                  |
| 11  | 51,497013   | -0,190316   | —           | ✗                   | ✗                  |
| 12  | 51,504827   | -0,189867   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 13  | 51,529656   | -0,191362   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 14  | 51,529191   | -0,177016   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 15  | 51,503432   | -0,175222   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 16  | 51,536721   | -0,163566   | —           | ✓                   | ✗                  |
| 17  | 51,536628   | -0,145035   | —           | ✗                   | ✗                  |
| 18  | 51,537000   | -0,145633   | —           | ✓                   | ✗                  |
| 19  | 51,504920   | -0,145633   | —           | ✓                   | ✗                  |
| 20  | 51,503897   | -0,167451   | —           | ✗                   | ✗                  |
| <b>Úspešnosť lokalizácie miestnosti celkom:</b> |             |             |             | 85,0%               |                    |
| Úspešnosť lokalizácie miestnosti s/bez sondy:   |             |             |             | 100,0%              | 62,5%              |

Tabuľka B.21: Detailné výsledky testu č. 11.a



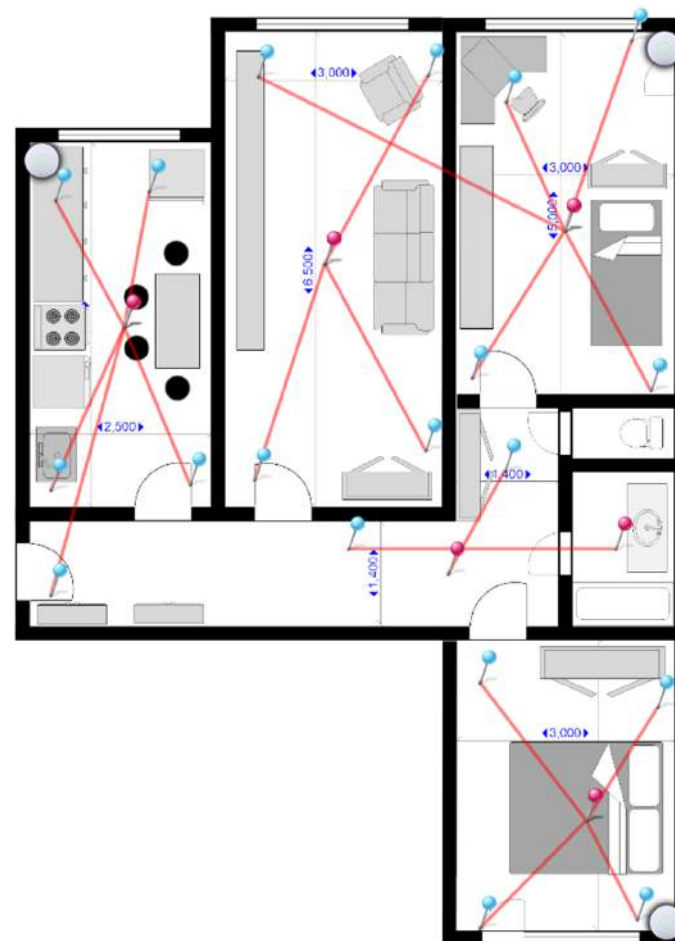
Obrázok B.21: Grafické znázornenie výsledkov testu č. 11.a

Test č. 12.a – lokalita B, testovacie zariadenie počítač, algoritmus a

74

| Číslo merania  | Súradnica X | Súradnica Y | Vzdial. [m] | Lokaliz. Miestnosti | Sonda v miestnosti |
|--|-------------|-------------|-------------|---------------------|--------------------|
| 1  | 51,536164   | -0,133678   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 2  | 51,507525   | -0,144288   | —           | ✓                   | ✗                  |
| 3  | 51,538301   | -0,143989   | —           | ✓                   | ✗                  |
| 4  | 51,538209   | -0,166405   | —           | ✗                   | ✗                  |
| 5  | 51,505106   | -0,166854   | —           | ✓                   | ✗                  |
| 6  | 51,488453   | -0,137115   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 7  | 51,468256   | -0,137115   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 8  | 51,469001   | -0,116343   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 9  | 51,486406   | -0,113653   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 10   | 51,541183   | -0,117090   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 11   | 51,512454   | -0,114550   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 12   | 51,513477   | -0,138161   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 13   | 51,504734   | -0,175372   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 14   | 51,504269   | -0,193753   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 15   | 51,528820   | -0,180751   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 16   | 51,528076   | -0,193155   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 17   | 51,495617   | -0,193753   | —           | ✗                   | ✗                  |
| 18   | 51,505850   | -0,133827   | —           | ✓                   | ✗                  |
| 19   | 51,499432   | -0,154450   | —           | ✗                   | ✗                  |
| <b>Úspešnosť lokalizácie miestnosti celkom:</b>      |             |             |             | 84,2%               |                    |
| <b>Úspešnosť lokalizácie miestnosti s/bez sondy:</b> |             |             |             | 100,0%              | 57,1%              |

Tabuľka B.22: Detailné výsledky testu č. 12.a



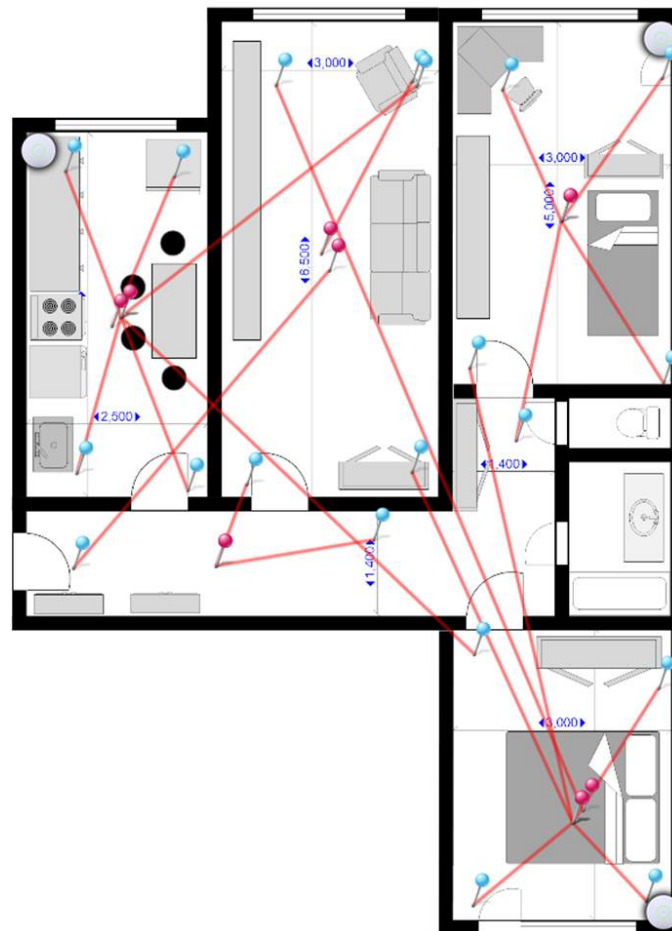
Obrázok B.22: Grafické znázornenie výsledkov testu č. 12.a

Test č. 11.b – lokalita B, testovacie zariadenie počítač, algoritmus b

75

| Číslo merania  | Súradnica X | Súradnica Y | Vzdial. [m] | Lokaliz. Miestnosti | Sonda v miestnosti |
|--|-------------|-------------|-------------|---------------------|--------------------|
| 1  | 51,536349   | -0,133678   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 2  | 51,489942   | -0,137414   | —           | ✗                   | ✓                  |
| 3  | 51,469280   | -0,137563   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 4  | 51,469652   | -0,114699   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 5  | 51,487150   | -0,113055   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 6  | 51,512268   | -0,112457   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 7  | 51,537279   | -0,112607   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 8  | 51,513477   | -0,138012   | —           | ✗                   | ✓                  |
| 9  | 51,507525   | -0,131885   | —           | ✗                   | ✗                  |
| 10   | 51,499339   | -0,150714   | —           | ✓                   | ✗                  |
| 11   | 51,497013   | -0,190316   | —           | ✗                   | ✗                  |
| 12   | 51,504827   | -0,189867   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 13   | 51,529656   | -0,191362   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 14   | 51,529191   | -0,177016   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 15   | 51,503432   | -0,175222   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 16   | 51,536721   | -0,163566   | —           | ✗                   | ✗                  |
| 17   | 51,536628   | -0,145035   | —           | ✗                   | ✗                  |
| 18   | 51,537000   | -0,145633   | —           | ✓                   | ✗                  |
| 19   | 51,504920   | -0,145633   | —           | ✗                   | ✗                  |
| 20   | 51,503897   | -0,167451   | —           | ✗                   | ✗                  |
| <b>Úspešnosť lokalizácie miestnosti celkom:</b>      |             |             |             | 60,0%               |                    |
| <b>Úspešnosť lokalizácie miestnosti s/bez sondy:</b> |             |             |             | 83,3%               | 25,0%              |

Tabuľka B.23: Detailné výsledky testu č. 11.b

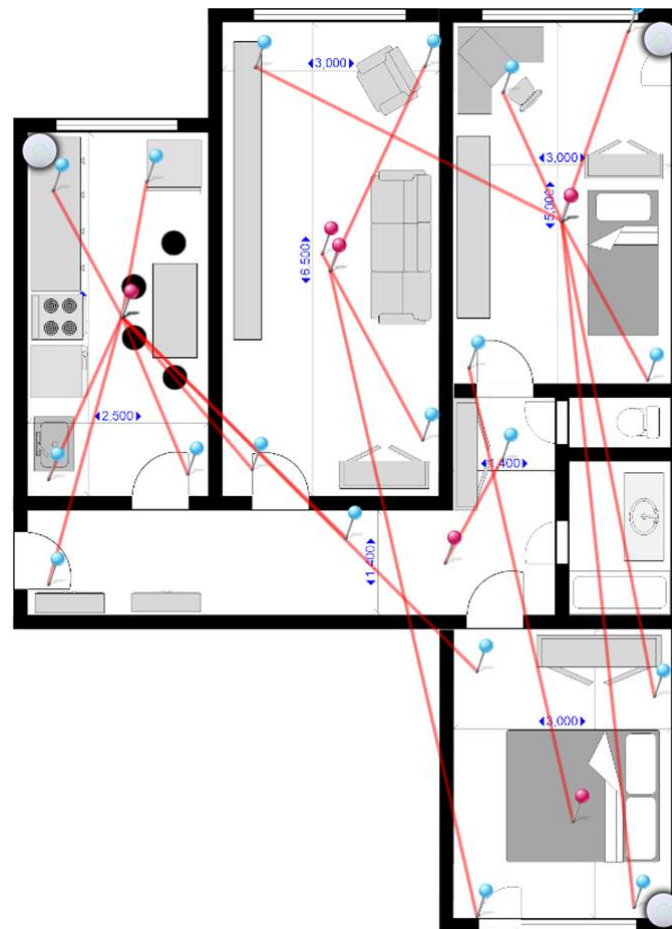


Obrázok B.23: Grafické znázornenie výsledkov testu č. 11.b

Test č. 12.b – lokalita B, testovacie zariadenie počítač, algoritmus b

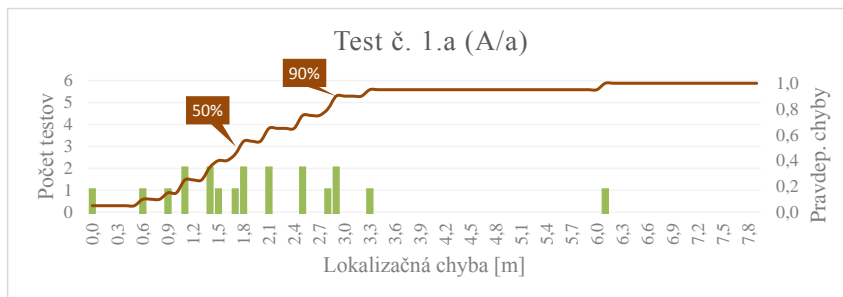
| Číslo merania  | Súradnica X | Súradnica Y | Vzdial. [m] | Lokaliz. Miestnosti | Sonda v miestnosti |
|--|-------------|-------------|-------------|---------------------|--------------------|
| 1  | 51,536164   | -0,133678   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 2  | 51,507525   | -0,144288   | —           | ✓                   | ✗                  |
| 3  | 51,538301   | -0,143989   | —           | ✓                   | ✗                  |
| 4  | 51,538209   | -0,166405   | —           | ✗                   | ✗                  |
| 5  | 51,505106   | -0,166854   | —           | ✗                   | ✗                  |
| 6  | 51,488453   | -0,137115   | —           | ✗                   | ✓                  |
| 7  | 51,468256   | -0,137115   | —           | ✗                   | ✓                  |
| 8  | 51,469001   | -0,116343   | —           | ✗                   | ✓                  |
| 9  | 51,486406   | -0,113653   | —           | ✗                   | ✓                  |
| 10   | 51,541183   | -0,117090   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 11   | 51,512454   | -0,114550   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 12   | 51,513477   | -0,138161   | —           | ✗                   | ✓                  |
| 13   | 51,504734   | -0,175372   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 14   | 51,504269   | -0,193753   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 15   | 51,528820   | -0,180751   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 16   | 51,528076   | -0,193155   | —           | ✓                   | ✓                  |
| 17   | 51,495617   | -0,193753   | —           | ✗                   | ✗                  |
| 18   | 51,505850   | -0,133827   | —           | ✓                   | ✗                  |
| 19   | 51,499432   | -0,154450   | —           | ✗                   | ✗                  |
| <b>Úspešnosť lokalizácie miestnosti celkom:</b>      |             |             |             | 52,6%               |                    |
| <b>Úspešnosť lokalizácie miestnosti s/bez sondy:</b> |             |             |             | 58,3%               | 42,9%              |

Tabuľka B.24: Detailné výsledky testu č. 12.b

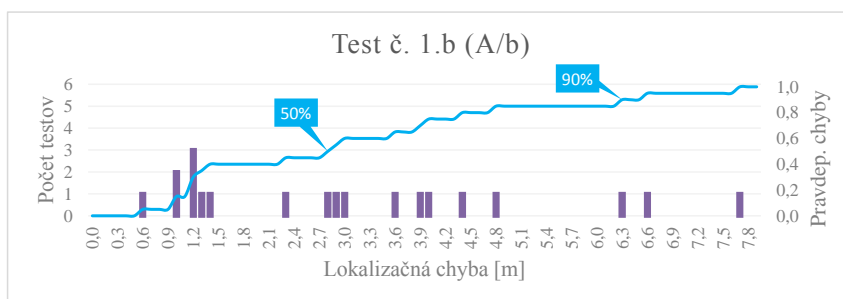


Obrázok B.24: Grafické znázornenie výsledkov testu č. 12.b

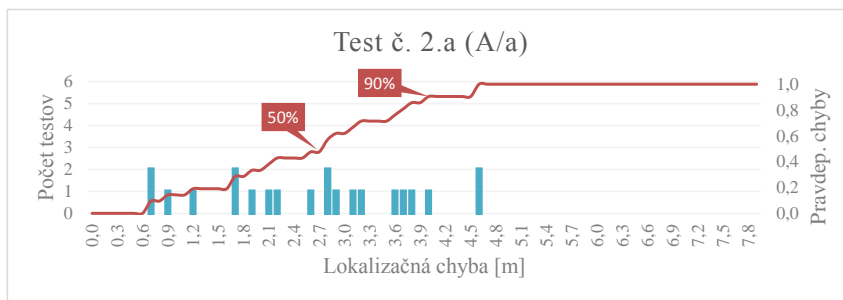
### B.2.3 Grafy rozložení veľkosti lokalizačnej chyby vykonaných testov



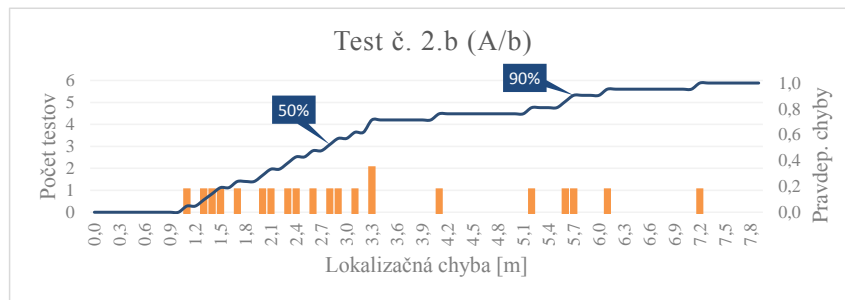
**Obrázok B.25:** Rozloženie veľkosti lokalizačnej chyby pre test č. 1 – lokalita A; algoritmus a; počítač; bez korekcie chýbajúcich dát



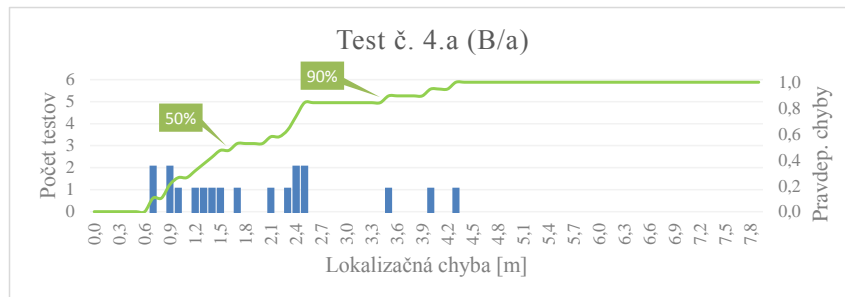
**Obrázok B.26:** Rozloženie veľkosti lokalizačnej chyby pre test č. 1 – lokalita A; algoritmus b; počítač; bez korekcie chýbajúcich dát



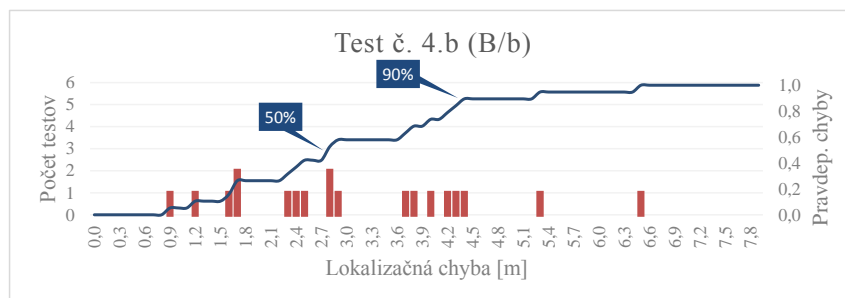
**Obrázok B.27:** Rozloženie veľkosti lokalizačnej chyby pre test č. 2 – lokalita A; algoritmus a; smartfón; bez korekcie chýbajúcich dát



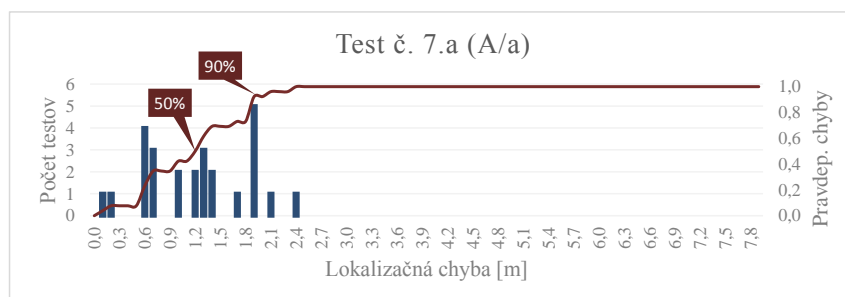
**Obrázok B.28:** Rozloženie veľkosti lokalizačnej chyby pre test č. 2 – lokalita A; algoritmus b; smartfón; bez korekcie chýbajúcich dát



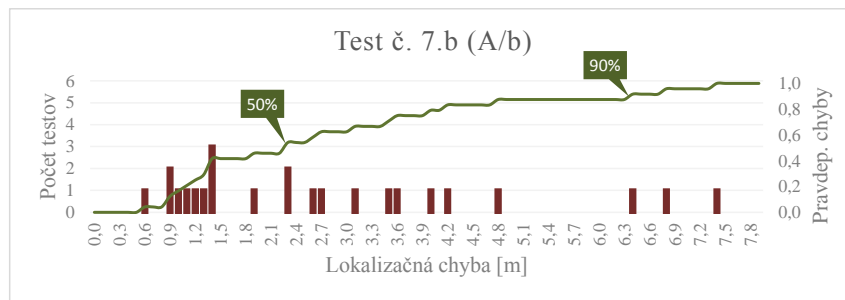
**Obrázok B.29:** Rozloženie veľkosti lokalizačnej chyby pre test č. 4 – lokalita B; algoritmus a; počítač; bez korekcie chýbajúcich dát



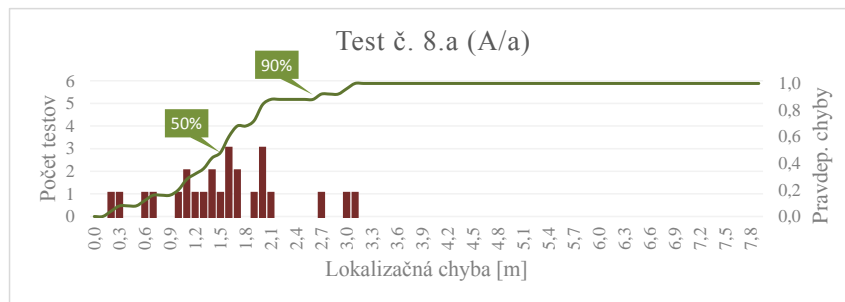
**Obrázok B.30:** Rozloženie veľkosti lokalizačnej chyby pre test č. 4 – lokalita B; algoritmus b; počítač; bez korekcie chýbajúcich dát



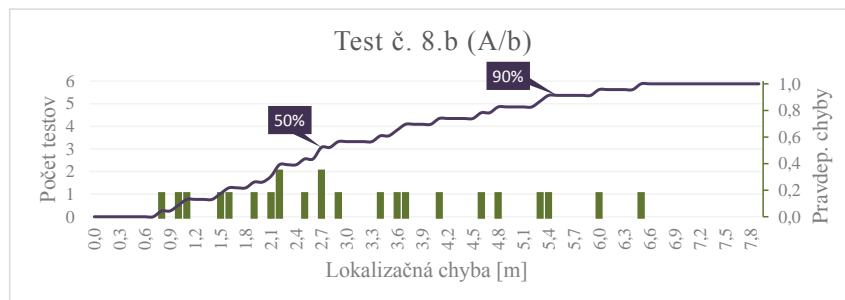
**Obrázok B.31:** Rozloženie veľkosti lokalizačnej chyby pre test č. 7 – lokalita A; algoritmus a; počítač; s korekciou chýbajúcich dát



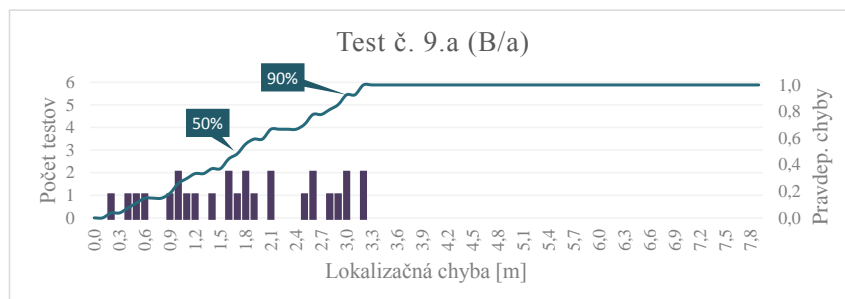
**Obrázok B.32:** Rozloženie veľkosti lokalizačnej chyby pre test č. 7 – lokalita A; algoritmus b; počítač; s korekciou chýbajúcich dát



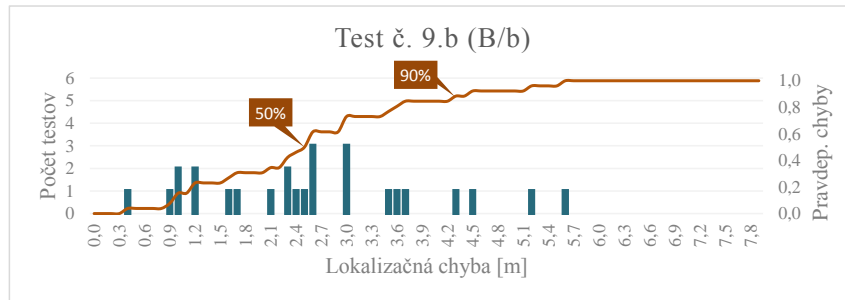
**Obrázok B.33:** Rozloženie veľkosti lokalizačnej chyby pre test č. 8 – lokalita A; algoritmus a; smartfón; s korekciou chýbajúcich dát



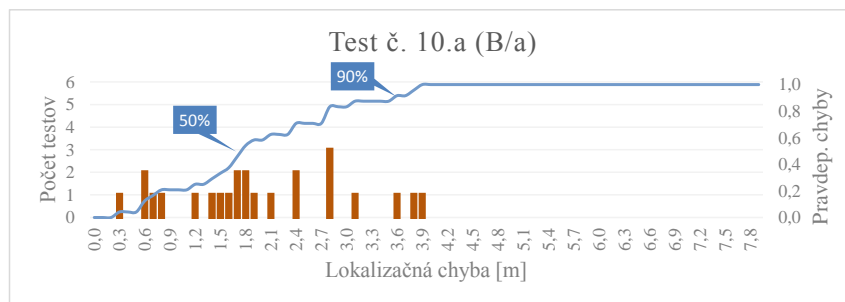
**Obrázok B.34:** Rozloženie veľkosti lokalizačnej chyby pre test č. 8 – lokalita A; algoritmus b; smartfón; s korekciou chýbajúcich dát



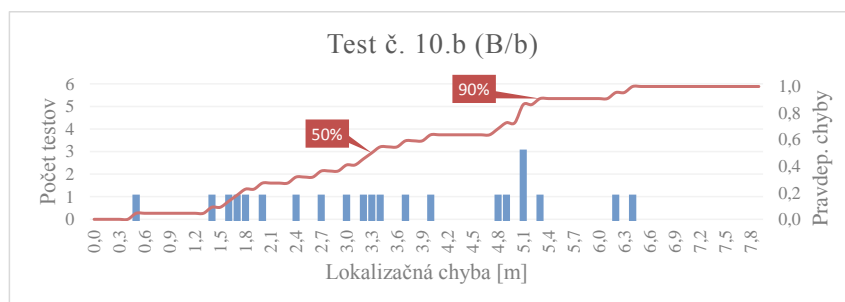
**Obrázok B.35:** Rozloženie veľkosti lokalizačnej chyby pre test č. 9 – lokalita B; algoritmus a; počítač; s korekciou chýbajúcich dát



**Obrázok B.36:** Rozloženie veľkosti lokalizačnej chyby pre test č. 9 – lokalita B; algoritmus b; počítač; s korekciou chýbajúcich dát



**Obrázok B.37:** Rozloženie veľkosti lokalizačnej chyby pre test č. 10 – lokalita B; algoritmus a; smartfón; s korekciou chýbajúcich dát



**Obrázok B.38:** Rozloženie veľkosti lokalizačnej chyby pre test č. 10 – lokalita B; algoritmus b; smartfón; s korekciou chýbajúcich dát



## **B.3 Lokalizácia miestnosti**

### **B.3.1 Prvé kolo testov (pôvodný algoritmus)**

todo

### **B.3.2 Druhé kolo testov (vylepšený algoritmus)**

todo

# Príloha C

## Zdrojové kódy

```
SELECT avg(t1.antenna_signal) as median_val FROM (
  SELECT @rownum:=@rownum+1 as row_number, d.antenna_signal
  FROM packet_data d, (
    SELECT @rownum:=0) r
  WHERE
    drone_id={ $d_id } AND client_mac={ $mac } AND received <= { $time_to }
    AND received >= { $time_from }
  ORDER BY d.antenna_signal
) as t1, (
  SELECT count(*) as total_rows
  FROM packet_data d
  WHERE
    drone_id={ $d_id } AND client_mac={ $mac } AND received <= { $time_to }
    AND received >= { $time_from }
) as t2
WHERE
  t1.row_number in ( floor((total_rows+1)/2), floor((total_rows+2)/2) )
```

Zdrojový kód C.1: Výpočet kalibračnej hodnoty sily signálu

```
SELECT
  drone_id,
  AVG(antenna_signal) AS 'signal'
FROM (
  SELECT
    client_mac, antenna_signal, drone_id, COUNT(antenna_signal) AS amount
  FROM
    packet_data
  JOIN
    drones on packet_data.drone_id=drones.custom_id
  WHERE
    packet_data.client_mac = { $mac } AND drones.map_id = { $m_id } AND
    packet_data.received >= { $time_from } AND packet_data.received <= {
    $time_to }
  GROUP BY
    packet_data.client_mac, packet_data.drone_id, packet_data.antenna_signal
) as1
WHERE
  amount = (
    SELECT
      MAX(as2.amount)
    FROM (
```

```

SELECT
    pd2.client_mac, pd2.antenna_signal, pd2.drone_id, COUNT(pd2.
        antenna_signal) AS amount
FROM
    packet_data pd2
JOIN
    drones d2 on pd2.drone_id=d2.custom_id
WHERE
    pd2.client_mac = {$mac} AND d2.map_id = {$m_id} AND pd2.received >=
        {$time_from} AND pd2.received <= {$time_to}
GROUP BY
    pd2.client_mac, pd2.drone_id, pd2.antenna_signal
) as2
WHERE
    as1.client_mac = as2.client_mac AND as1.drone_id = as2.drone_id
)
GROUP BY
    client_mac, drone_id

```

**Zdrojový kód C.2:** Výpočet sily signálu mezi zariadením a jednotlivými sondami

```

SELECT
    c0.'xpos', c0.'ypos',
    SQRT(POW(({$signal_a}) - c0.'signal', 2) + POW(({$signal_b}) - c1.'signal
        ', 2) + POW(({$signal_c}) - c2.'signal', 2))*(1/3) AS '
        euclidian_distance'
FROM
    'calibration' c0
JOIN
    'calibration' c1 ON c0.'xpos'=c1.'xpos' AND c0.'ypos'=c1.'ypos'
JOIN
    'calibration' c2 ON c0.'xpos'=c2.'xpos' AND c0.'ypos'=c2.'ypos'
WHERE
    c0.'drone_id'=1 AND c1.'drone_id'=2 AND c2.'drone_id'=3
ORDER BY
    'euclidian_distance' ASC
LIMIT 3

```

**Zdrojový kód C.3:** Výber troch kalibračných bodov s najmenšou euklidovskou vzdialenosťou voči lokalizovanému objektu v prípade detekcie objektu tromi sondami pri použití verzie **a** lokalizačného algoritmu. Parametre {\$signal\_a}, {\$signal\_b} a {\$signal\_c} obsahujú hodnotu veľkosti signálu nameranú voči lokalizovanému objektu na jednotlivých sondách a, b a c

```

SELECT
    c0.'xpos', c0.'ypos',
    SQRT(POW((5) - c0.'signal_difference', 2) + POW((14) - c1.'
        signal_difference', 2) + POW((19) - c2.'signal_difference', 2))*(1/3)
        AS 'euclidian_distance'
FROM
    'difference_calibration' c0
JOIN
    'difference_calibration' c1 ON c0.'xpos'=c1.'xpos' AND c0.'ypos'=c1.'ypos'
JOIN
    'difference_calibration' c2 ON c0.'xpos'=c2.'xpos' AND c0.'ypos'=c2.'ypos'
WHERE
    ((c0.'drone_a_id'=1 AND c0.'drone_b_id'=2) OR (c0.'drone_b_id'=1 AND c0.'
        drone_a_id'=2)) AND ((c1.'drone_a_id'=1 AND c1.'drone_b_id'=3) OR (c1

```

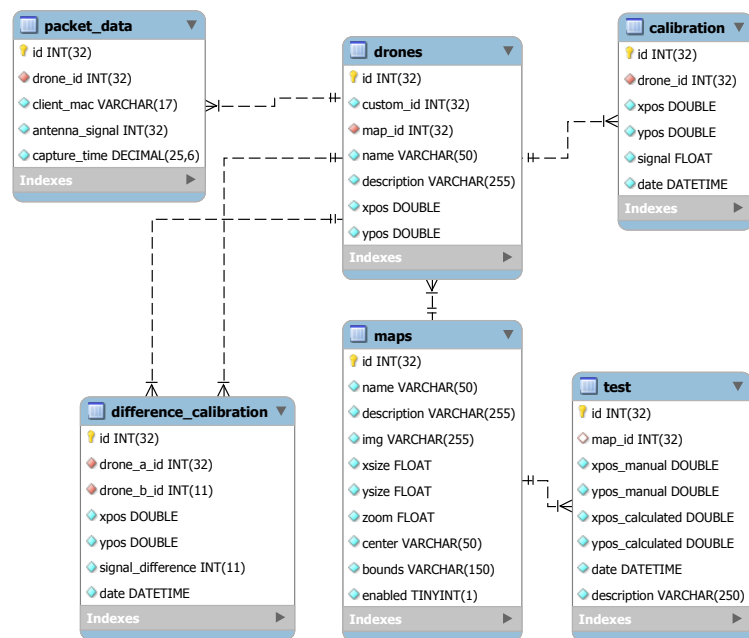
```
        . 'drone_b_id' = 1 AND c1. 'drone_a_id' = 3)) AND ((c2. 'drone_a_id' = 2 AND c2
        . 'drone_b_id' = 3) OR (c2. 'drone_b_id' = 2 AND c2. 'drone_a_id' = 3))
ORDER BY
    'euclidian_distance' ASC
LIMIT 3
```

**Zdrojový kód C.4:** Výber troch kalibračných bodov s najmenšou euklidovskou vzdialenosťou voči lokalizovanému objektu v prípade detekcie objektu tromi sondami pri použití verzie **b** lokalizačného algoritmu. Parametre `{signal_a}`, `{signal_b}` a `{signal_c}` obsahujú hodnotu veľkosti signálu nameranú voči lokalizovanému objektu na jednotlivých sondách **a**, **b** a **c**

# Príloha D

## Obrázky

### D.1 Databázový server



Obrázok D.1: EER diagram relačnej databázy

## D.2 Snímky obrazovky monitorovacej aplikácie



Obrázok D.2: Snímka základnej obrazovky zobrazujúcej mapu monitorovanej budovy a polohu lokalizovaných zariadení



Obrázok D.3: Snímka obrazovky zobrazujúcej jednotlivé kalibračné body, intenzitu nameraného signálu voči zvolenej sonde v kalibračnom móde a kontextové menu aplikácie