VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2021 Bc. Marek Šimka

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY
DEPARTMENT OF RADIOENGINEERING

LOKALIZACE UVNITŘ BUDOV POMOCÍ TECHNOLOGIE LORA
LORA-BASED INDOOR LOCALIZATION

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE — **Bc. Marek Šimka**
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — **doc. Ing. Ladislav Polák, Ph.D.**
SUPERVISOR

BRNO 2021

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Elektronika a komunikační technologie**

Ústav radioelektroniky

Student: Bc. Marek Šimka ***ID:*** 195444
Ročník: 2 ***Akademický rok:*** 2020/21

NÁZEV TÉMATU:

Lokalizace uvnitř budov pomocí technologie LoRa

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

V teoretické části práce se seznamte s technologií LoRa a možnostmi jeho využití pro lokalizace uvnitř budov. Seznamte se s vývojovým kitem SK-iM282A a navrhnete jednoduchý měřící setup pro tzv. RSSI-based lokalizaci uvnitř budov. Správnost měřícího konceptu ověřte jednoduchým měřením a navrhnete postup pro vyhodnocení výsledků.

V experimentální části práce proveďte rozsáhlé měření pro vyhodnocení využitelnosti technologii LoRa pro lokalizace uvnitř budov. V rámci měření uvažujte různé systémové parametry LoRa. Pro zpracování a analýzu výsledků zvolte vhodný programový nástroj.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] ISLAM, Bashima, Md Tamzeed ISLAM a Shahriar NIRJON. Feasibility of LoRa for Indoor Localization. [online]. 2017, s. 1-11 [cit. 2020-04-22]. Dostupné z: https://pdfs.semanticscholar.org/ab00/c1eacbdd76732b7438ec8e5653f7c875def4.pdf

[2] SADOWSKI, Sebastian a Petros SPACHOS. RSSI-Based Indoor Localization with the Internet of Things. IEEE Access [online]. 2018, 6, 30149-30161 [cit. 2020-04-22]. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2843325. ISSN 2169-3536. Dostupné z: https://ieeexplore.ieee.org/document/8371230/

[3] SK-iM282A - Starter Kit for iM282A [Online]. Dostupný z WWW: https://wireless-solutions.de/products/starterkits/sk-im282a.html

Termín zadání: 8.2.2021 ***Termín odevzdání:*** 20.5.2021

Vedoucí práce: doc. Ing. Ladislav Polák, Ph.D.

prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.
předseda rady studijního programu

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

ABSTRAKT

Diplomová práce je zaměřena na možné využití technologie LoRa® (Long Range) za účelem lokalizace uvnitř budov. Tato práce využívá vývojový kit SK-iM282A k vytvoření bezdrátové sítě LoRa v ISM pásmu 2,4 GHz. Hlavní pozornost je věnována experimentální lokalizaci pomocí metody RSSI v různých místnostech (různé přenosové podmínky), včetně popisu principu lokalizace, postupu zpracování naměřených dat a následného vyhodnocení lokalizovaných poloh. Správnost navrženého konceptu a metodiky je ověřena za pomoci rozsáhlých měření v různých typech přenosových prostředí a porovnána s článkem zabývající se stejnou problematikou.

KLÍČOVÁ SLOVA

LoRa®, lokalizace uvnitř budov, měření RSSI, ISM pásmo 2,4 GHz

ABSTRACT

This diploma thesis focuses on possible utilization of LoRa® (Long Range) technology for indoor localization purposes. In this thesis, the starter kit SK-iM282A is used to create a LoRa-based wireless link in the 2.4 GHz ISM band. Main attention is focused on the experimental localization using the RSSI method in the various transmission environments, including a description of the localization principle, the procedure of processing the measured data and the evaluation of localized coordinates. The rightness of the proposed measurement setup and methodology is verified by extensive measurements in various environments and compared with state-of-the-art article.

KEYWORDS

LoRa®, Indoor localization, measurement RSSI, ISM band 2,4 GHz

ŠIMKA, Marek. *Lokalizace uvnitř budov pomocí technologie LoRa*. Brno, 2021, 93 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky. Vedoucí práce: doc. Ing. Ladislav Polák, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Lokalizace uvnitř budov pomocí technologie LoRa“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno ....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Ladislavu Polákovi, Ph.D. za jeho vstřícnost, ochotu, odborné vedení a cenné připomínky.

Brno ....

podpis autora

Obsah

Úvod **12**

1 Low Power Wide Area Network **13**
1.1 Důležité vlastnosti sítí LPWAN 13

2 LoRa® **15**
2.1 Fyzická vrstva 15
2.1.1 CSS modulace 16
2.1.2 LoRa® modulace 17
2.1.3 LoRa® rámec 20
2.2 LoRaWAN 21

3 Metody vnitřní lokalizace **23**
3.1 Time of Arrival (ToA) 23
3.2 Time Difference of Arrival (TDoA) 24
3.3 Angle of Arrival (AoA) 25
3.4 Received Signal Strenght Indication (RSSI) 26

4 HW/SW vybavení **29**
4.1 SK-iM282A 29
4.2 WiMOD LR Studio 30

5 Koncept lokalizace **33**

6 Experimentální lokalizace **43**
6.1 Podmínky měření 43
6.2 Prostředí – Aula 44
6.3 Prostředí – Šatna 53
6.4 Prostředí – Chodba 67
6.5 Shrnutí 74
6.6 Machine Learning 76

Závěr **78**

Literatura **80**

Seznam zkratek **86**

A Přílohy **87**
A.1 Tabulky souřadnic lokalizovaných pozic – Aula 87
A.2 Tabulky souřadnic lokalizovaných pozic – Šatna 89
A.3 Tabulky souřadnic lokalizovaných pozic – Chodba 92

Seznam obrázků

1.1 Rozdělení bezdrátových sítí 14
2.1 Blokový diagram LoRa PHY 15
2.2 Časová závislost chirp signálu 16
2.3 Porovnání průběhů SF 7-12 18
2.4 Struktura rámce – uplink 20
2.5 Struktura rámce – downlink 20
2.6 Průběh LoRa® signálu v časové oblasti 21
3.1 Lokalizace ToA – trilaterace 24
3.2 Lokalizace TDoA – hyperbolická trilaterace 25
3.3 Lokalizace AoA – bilaterace 26
3.4 Lokalizace RSSI – trilaterace 28
4.1 Vývojový kit SK-iM282A 29
4.2 Ukázka WiMOD LR Studio 31
5.1 Půdorys místnosti zvolené pro měření 33
5.2 Závislost RSSI na vzdálenosti pro zvolenou místnost 36
5.3 Ukázka vysílače (A) připojeného k PC. 37
5.4 Princip lokalizace hledané polohy. 37
5.5 Polohy lokalizovaných pozic v daném prostředí – 1. varianta konfigurace LoRa® (BW = 800 kHz, SF = 12) 42
5.6 Polohy lokalizovaných pozic v daném prostředí – 2. varianta konfigurace LoRa® (BW = 1600 kHz, SF = 5) 42
6.1 Umístění vývojového kitu SK-iM282A na stativu. 43
6.2 Půdorys prostředí – Aula. 44
6.3 Ukázka části místnosti – Aula. 45
6.4 Závislost RSSI na vzdálenosti v prostředí – Aula. 46
6.5 Hustota pravděpodobnosti RSSI – Aula. 46
6.6 Polohy lokalizovaných pozic v prostředí Aula – 1. varianta 49
6.7 Polohy lokalizovaných pozic v prostředí Aula – 2. varianta 49
6.8 Polohy lokalizovaných pozic v prostředí Aula – 3. varianta 50
6.9 Polohy lokalizovaných pozic v prostředí Aula – 4. varianta 50
6.10 Polohy lokalizovaných pozic v prostředí Aula – 5. varianta 51
6.11 Polohy lokalizovaných pozic v prostředí Aula – 6. varianta 51
6.12 Odchylky lokalizace pro všechny varianty konfigurací – Aula. 52
6.13 Půdorys prostředí – Šatna. 53
6.14 Ukázka části místnosti – Šatna. 54
6.15 Hustota pravděpodobnosti RSSI – Šatna. 55
6.16 Závislost RSSI na vzdálenosti – Šatna. 56

6.17 Polohy lokalizovaných pozic v prostředí Šatna – 1. varianta 59
6.18 Polohy lokalizovaných pozic v prostředí Šatna – 2. varianta 59
6.19 Polohy lokalizovaných pozic v prostředí Šatna – 3. varianta 60
6.20 Polohy lokalizovaných pozic v prostředí Šatna – 4. varianta 60
6.21 Polohy lokalizovaných pozic v prostředí Šatna – 5. varianta 61
6.22 Polohy lokalizovaných pozic v prostředí Šatna – 6. varianta 61
6.23 Polohy lokalizovaných pozic v prostředí Šatna – 7. varianta 62
6.24 Polohy lokalizovaných pozic v prostředí Šatna – 8. varianta 62
6.25 Polohy lokalizovaných pozic v prostředí Šatna – 9. varianta 63
6.26 Polohy lokalizovaných pozic v prostředí Šatna – 10. varianta 63
6.27 Odchylky lokalizace pro všechny varianty konfigurací – Šatna. 64
6.28 Závislost průměrné odchylky lokalizace na hodnotě SF 66
6.29 Závislost průměrné odchylky lokalizace na vysílacím výkonu 66
6.30 Půdorys a ukázka přenosového prostředí – Chodba. 67
6.31 Závislost RSSI na vzdálenosti v prostředí – Chodba. 69
6.32 Hustota pravděpodobnosti RSSI – Chodba. 69
6.33 Polohy lokalizovaných pozic v prostředí Chodba – 1. varianta 71
6.34 Polohy lokalizovaných pozic v prostředí Chodba – 2. varianta 71
6.35 Polohy lokalizovaných pozic v prostředí Chodba – 3. varianta 72
6.36 Polohy lokalizovaných pozic v prostředí Chodba – 4. varianta 72
6.37 Polohy lokalizovaných pozic v prostředí Chodba – 5. varianta 73
6.38 Odchylky lokalizace pro všechny varianty konfigurací – Chodba. . . . 74
6.39 Polohy lokalizovaných pozic v prostředí Šatna pomocí ML – 4. varianta 77
6.40 Odchylky lokalizace v prostředí Šatna pro vybrané konfigurace 77

Seznam tabulek

2.1 Hodnoty činitele rozprostření (SF) 17
2.2 Schopnosti FEC technologie LoRa 19
2.3 Hlavní znaky tříd v LoRaWAN 22
4.1 Citlivost přijímače iM282A v závislosti na hodnotách BW a SF . . . 30
5.1 Parametry path loss modelu 35
5.2 Hodnoty souřadnic lokalizovaných pozic s odpovídajícími odchylkami – 1. varianta konfigurace LoRa® (BW = 800 kHz, SF = 12) 40
5.3 Hodnoty souřadnic lokalizovaných pozic s odpovídajícími odchylkami – 2. varianta konfigurace LoRa® (BW = 1600 kHz, SF = 5) 41
6.1 Parametry path loss modelu – Aula 46
6.2 Varianty konfigurací signálu v prostředí – Aula 47
6.3 Průměrné odchylky jednotlivých variant konfigurací – Aula 52
6.4 Parametry path loss modelu – Šatna 55
6.5 Varianty konfigurací signálu LoRa® v prostředí – Šatna 57
6.6 Průměrné odchylky jednotlivých variant konfigurací – Šatna 65
6.7 Parametry path loss modelu – Chodba 68
6.8 Varianty konfigurací signálu LoRa® v prostředí – Chodba 70
6.9 Průměrné odchylky jednotlivých variant konfigurací – Chodba 73
A.1 Souřadnice pozic s odchylkami v prostředí Aula – 1. varianta 87
A.2 Souřadnice pozic s odchylkami v prostředí Aula – 2. varianta 87
A.3 Souřadnice pozic s odchylkami v prostředí Aula – 3. varianta 87
A.4 Souřadnice pozic s odchylkami v prostředí Aula – 4. varianta 88
A.5 Souřadnice pozic s odchylkami v prostředí Aula – 5. varianta 88
A.6 Souřadnice pozic s odchylkami v prostředí Aula – 6. varianta 88
A.7 Souřadnice pozic s odchylkami v prostředí Šatna – 1. varianta 89
A.8 Souřadnice pozic s odchylkami v prostředí Šatna – 2. varianta 89
A.9 Souřadnice pozic s odchylkami v prostředí Šatna – 3. varianta 89
A.10 Souřadnice pozic s odchylkami v prostředí Šatna – 4. varianta 90
A.11 Souřadnice pozic s odchylkami v prostředí Šatna – 5. varianta 90
A.12 Souřadnice pozic s odchylkami v prostředí Šatna – 6. varianta 90
A.13 Souřadnice pozic s odchylkami v prostředí Šatna – 7. varianta 91
A.14 Souřadnice pozic s odchylkami v prostředí Šatna – 8. varianta 91
A.15 Souřadnice pozic s odchylkami v prostředí Šatna – 9. varianta 91
A.16 Souřadnice pozic s odchylkami v prostředí Šatna – 10. varianta 92
A.17 Souřadnice pozic s odchylkami v prostředí Chodba – 1. varianta . . . 92
A.18 Souřadnice pozic s odchylkami v prostředí Chodba – 2. varianta . . . 92
A.19 Souřadnice pozic s odchylkami v prostředí Chodba – 3. varianta . . . 93

A.20 Souřadnice pozic s odchylkami v prostředí Chodba – 4. varianta . . . 93
A.21 Souřadnice pozic s odchylkami v prostředí Chodba – 5. varianta . . . 93

Úvod

V současnosti se ve světě stále více prosazují moderní technologie, jenž pomáhají zefektivnit procesy v průmyslu, jako třeba automatizované výrobní linky. Usnadňují také lidem řízení domácnosti nebo jiných činností (autonomní řízení, robotické vysavače, chytré semafory a další). Pro takové situace se hojně využívají bezdrátové technologie z kategorie sítí LPWAN (Low Power Wide Area Network), které pracují se zařízeními s nízkou spotřebou energie, několikaletou výdrží na baterie a komunikací s dosahem až desítky kilometrů [1].

Významným zástupcem této kategorie je technologie LoRa® (Long Range) [2]. Jedná se o bezdrátovou technologii s možností realizovat spoj na dlouhé vzdálenosti, s nízkou rychlostí přenosu dat, při zachování nízkých vysílacích výkonů. Využívá modulace s technikou rozprostření spektra a pro Evropskou Unii je poskytována v ISM (Industrial, Scientific and Medical) pásmu frekvencí 863–870 MHz. Jejím původním účelem byl bezdrátový přenos naměřených dat z elektroměrů, plynoměrů apod. Díky zmíněným vlastnostem se naskytuje více způsobů aplikace této technologie a jednou z nich je lokalizace zařízení ve vnitřním prostředí nebo ve volném prostoru [3]. V případě vnitřní lokalizace se v praxi nabízí užitečné možnosti. Například nalezení polohy zboží či materiálu v rámci velkých skladových prostor, trasování polohy pacientů ve zdravotnických zařízeních nebo monitoring polohy členů hasičského záchranného sboru při požáru velkých budov [4], [5].

Cílem práce je prozkoumat a ověřit potenciál technologie LoRa® pro lokalizaci uvnitř budov. LoRa® je koncipována především pro pásma sub-GHz, avšak společnost Semtech v roce 2017 uvedla na trh také moduly umožňující spojení v ISM pásmu 2,4 GHz [6]. Diplomová práce využívá vývojového kitu, který zahrnuje vysílač/přijímač právě pro toto bezlicenční pásmo.

V první kapitole je stručně představen LPWAN. Druhá kapitola se dále široce věnuje rozboru LoRa® sítě a především její fyzické vrstvě. Ta je popsána včetně modulace, příslušných parametrů a formátu LoRa® rámce. Ve třetí kapitole jsou popsané nejpoužívanější metody vnitřní lokalizace bezdrátových zařízení. Čtvrtá kapitola popisuje hardware a software vybavení použitého pro měření parametrů LoRa® signálu. Pátá kapitola se věnuje rozboru navrženého konceptu lokalizace, ověřený experimentálním měřením, jenž bylo realizováno v domácích podmínkách. Konkrétně je zde specifikováno přenosové prostředí, parametry rádiové komunikace a také popis principu použitého k lokalizaci, včetně potřebného path loss modelu. Nejpodstatnější částí práce se zabývá poslední kapitola, která se věnuje rozsáhlým měřením uskutečněných ve třech různých přenosových prostředích. S využitím těchto měření jsou diskutovány dosažené výsledky práce.

1 Low Power Wide Area Network

O bezdrátové technologie je v této době enormní zájem po celém světě. Kromě rozmachu chytrých telefonů došlo ve společnosti také k rozšíření tzv. Internetu věcí, neboli IoT (Internet of Things) [7]. IoT označuje všechna zařízení a příslušenství jakéhokoliv typu, které je možné libovolným způsobem připojit k Internetu. V praxi to znamená komunikační propojení, například domácích spotřebičů, snímačů a dalších zařízení v chytré domácnosti, zemědělství nebo průmyslu. Zařízení IoT mají specifické požadavky, jako jsou nízký datový tok, dlouhý dosah spojení, nízká spotřeba energie a dostupná pořizovací cena. Ve společnosti hojně používané technologie jako Bluetooth, Wi-Fi jsou koncipovány pro komunikaci s krátkým dosahem [8]. Mobilní sítě nabízí naopak plošně velké pokrytí, avšak z hlediska spotřeby energie jsou také nevyhovující [9]. Toto vedlo ke vzniku nových technologií typu LPWAN, které odpovídají všem požadavkům zároveň [10].

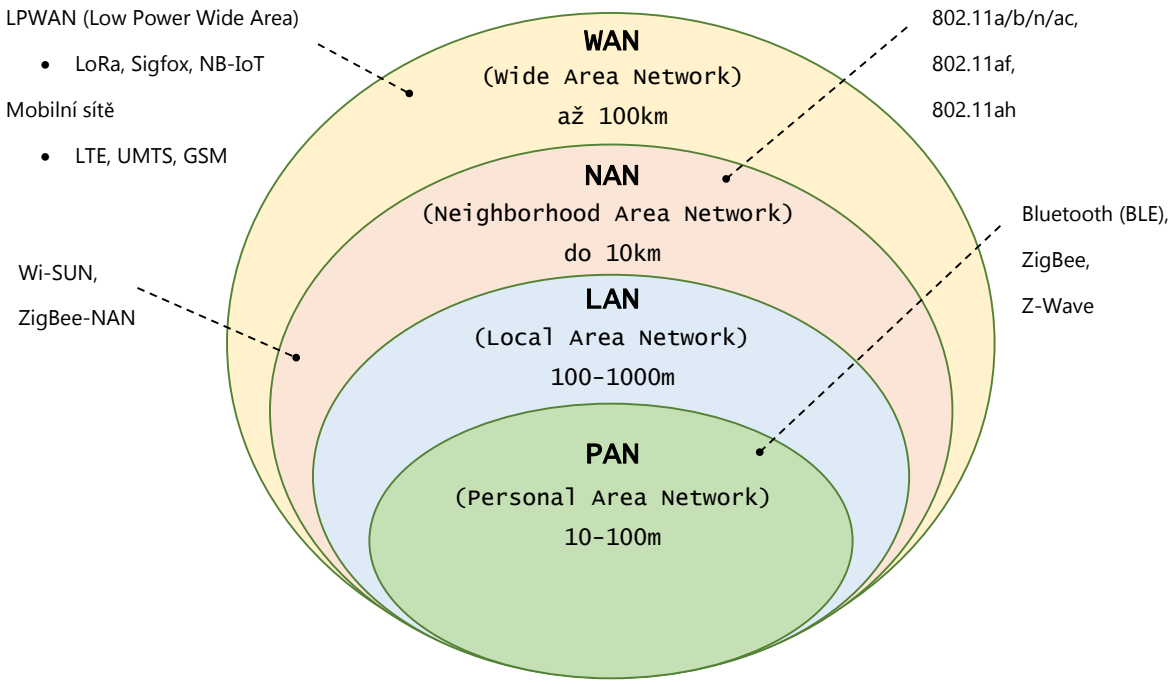
Označení LPWAN představuje rozsáhlou síť s nízkou spotřebou elektrické energie. Jedná se také o typ sítě, která je navržena pro nenákladnou komunikaci z hlediska pořizovací ceny jednotlivých zařízení a zároveň i provozních nákladů. Zároveň pracuje s nízkými datovými rychlostmi, jelikož vysoká datová rychlost není stěžejním parametrem vzhledem k typům aplikací. Technologie tohoto druhu se momentálně těší velké oblibě. Odhaduje se až 75 bilionů celosvětově aplikovaných zařízení do roku 2025 [11], [12]. Porovnání LPWAN s ostatními bezdrátovými sítěmi dle dosažitelné komunikační vzdálenosti nabízí Obrázek 1.1.

1.1 Důležité vlastnosti sítí LPWAN

Sítě z kategorie LPWAN nabízí různé oblasti aplikací, nicméně všechny mají společné klíčové vlastnosti. Popis těchto důležitých vlastností shrnuje následující podkapitola dle článků [13], [14].

Nízké pořizovací náklady

Technologie využívají koncentrátory/brány, které zprostředkovávají důležité spojení mezi síťovým serverem a koncovými zařízeními. Díky tomu mohou koncová zařízení komunikovat pouze na úrovni fyzické vrstvy, což zjednodušuje jejich hardware. Náklady lze snížit také nevyužíváním drahých součástek, jako například SAW (Surface Acoustic Wave) filtry nebo přesné krystaly. Jednoduchost provedení koncových zařízení a automatizovaná velkovýroba umožňuje dosáhnout cen pod hranici 2 € za integrovaný obvod.



Obr. 1.1: Rozdělení bezdrátových sítí (na základě [15]).

Dlouhodobý provoz zařízení až několik let

Dlouhodobý provoz úzce souvisí s nízkou spotřebou elektrické energie, proto je vhodné se vyhnout vysílacím výkonům, při kterých se proudové špičky pohybují v hodnotách 30 až 50 mA. Životnost baterie lze prodloužit také způsobem komunikace, respektive omezením četnosti odesílaných zpráv a zároveň navazováním spojení pouze v určitých časových intervalech. Koncová zařízení jsou v častých případech aplikována jako součást snímačů a spotřebičů, proto není žádoucí častá výměna baterií. Standardně dosahují zařízení výdrže až deseti let při napájení baterií (s kapacitou 2500 mAh).

Komunikace na dlouhé vzdálenosti

Komunikační dosah se liší podle konkrétně použité technologie. Vliv mají také podmínky prostředí pro přenos (zástavba, kopcovitost oblasti) a překážky v přenosové cestě. Dosah spojení ovlivňuje také vhodná volba komunikačních parametrů, jako jsou šířka pásma nebo například typ modulace a její konfigurace. Při vhodných podmínkách dokáží technologie komunikovat na vzdálenosti několik desítek kilometrů, ale obecně by měly být zařízení LPWAN schopna spojení na vzdálenost kolem 10 km.

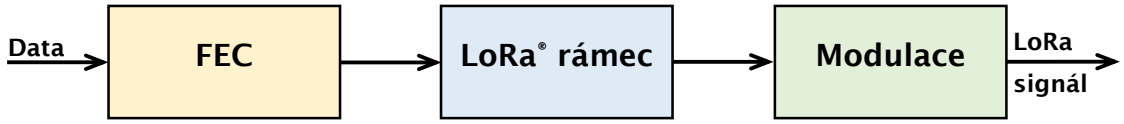
2 LoRa®

LoRa® je bezdrátová technologie určena pro realizaci spojení na dlouhé vzdálenosti (až 30 km) s nízkou rychlostí přenosu dat (0,595 kb/s až 253,9 kb/s pro modul SX1280 [16]). Koncipována je pro komunikaci v ISM frekvenčních pásmech sub-GHz. Technologie původně vznikla ve francouzské společnosti Cycleo, která pro energeticky nenáročnou síť využívá techniky modulace s rozprostřeným spektrem. V současnosti ji vyvíjí sdružení LoRa Alliance, jehož zakládajícím členem je společnost Semtech [13], [17].

Obecně samotnou technologii lze rozdělit na dvě části: LoRaWAN protokol a také LoRa® PHY[1] vrstvu. LoRaWAN představuje komunikační protokol sítě a definuje síťovou architekturu. LoRa® PHY označuje fyzickou vrstvu, která zajišťuje komunikační spojení prostřednictvím stejnojmenné modulace [11]. Podrobněji se těmto částem věnují následující subkapitoly.

2.1 Fyzická vrstva

Fyzická vrstva definuje rádiové spojení, které tvoří především modulační technika, jejíž předností je dosah na dlouhou vzdálenost. Data jsou zpracována nejprve v bloku FEC (Forward Error Correction). Následně dochází k vytvoření LoRa® rámce a poté je signál namodulován a připraven k přenosu. Obrázek 2.1 ilustruje nejpodstatnější části zmiňované vrstvy, které budou následně blíže popsány.



Obr. 2.1: Blokový diagram LoRa PHY.

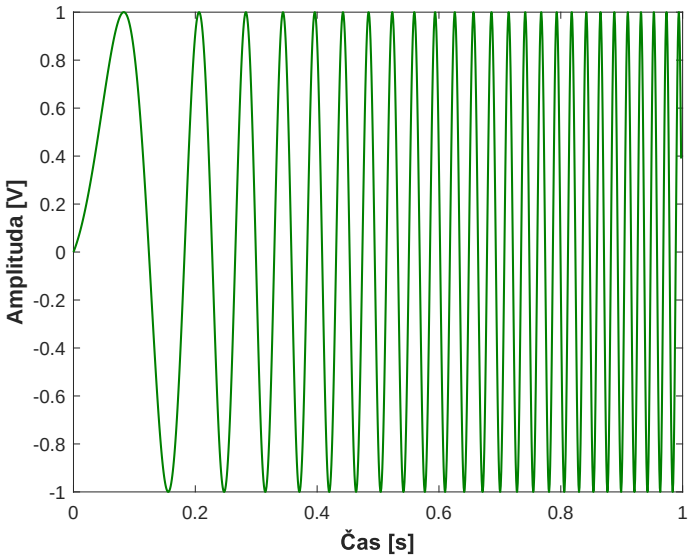
Pro oblast Evropské Unie je LoRa® poskytována nejčastěji v pásmu 863–870 MHz, což patří mezi bezlicenční frekvenční pásma, jenž podléhají omezení vysílacího času. To je dáno tzv. klíčovacím poměrem (duty cycle), jehož hodnotu určuje norma Českého telekomunikačního úřadu [18]. Pro zmiňované pásmo je klíčovací poměr 1 %, neboli zařízení vysílá 1 % času a následně 99 % času vysílat nesmí. V praxi to znamená, že zařízení vysílá například 1 sekundu a další vysílání může provést až po uplynutí 99 sekund.

[1] Physical Layer

LoRa® modulace je založena na principu modulace s rozprostřeným spektrem CSS (Chirp Spread Spectrum). Ta je odolná vůči rádiovému šumu, vícecestnému šíření a také vůči rušení způsobené Dopplerovým jevem. Rozprostření spektra způsobí zvětšení šířky pásma výsledného modulovaného signálu oproti šířce pásma signálu původního [13], [19].

2.1.1 CSS modulace

Modulace CSS byla dosud široce využívána pro sonary v námořnictví, radary v letectví nebo k vesmírné komunikaci. Rozložení spektra je založeno na krátkém pulzu sinusového průběhu označovaném jako chirp[2]. Signál mění svojí frekvenci lineárně s časem, při zachování konstantní amplitudy, viz Obrázek 2.2. Chirp signál lze dále rozlišovat na tzv. up-chirp a down-chirp. Up-chirp se nazývá signál s měnící se frekvencí od nejnižší hodnoty k nejvyšší (zmíněný Obrázek 2.2 ukazuje právě signál up-chirp) a naopak down-chirp má-li signál charakter klesající hodnoty frekvence [20], [21].



Obr. 2.2: Časová závislost chirp signálu.

Další modulace s rozprostřeným spektrem DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) nebo FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum) využívají pro rozprostření spektra pseudonáhodné kódy, což vyžaduje složité provedení demodulátoru a přesné hodiny v přijímačích. CSS je jednodušší a levnější variantou, neboť na rozdíl od předchozích dosahuje rozprostření spektra pomocí chirp pulzů. Frekvenční posuny mezi vysílačem a přijímačem jsou ekvivalentní k časovým posunům a to snižuje složitost provedení přijímače. Využitím celé šířky kanálu je vysílaný signál odolnější vůči

[2]Compressed High Intensity Radar Pulse

kanálovému úniku. LoRa® je první nízkonákladová aplikace pro komerční použití Chirp Spread Spectrum modulace [22].

2.1.2 LoRa® modulace

Úvod kapitoly 2.1 již napověděl, že LoRa® modulace je odvozená z principu CSS modulace. Velké množství jiných bezdrátových technologií používá pro fyzickou vrstvu modulaci FSK (Frequency Shift Keying), která zvládá spolehlivý přenos i při nízkém vysílacím výkonu. LoRa® dosahuje také efektivní komunikace při zachování energeticky úsporného vysílání, ale zároveň je navíc schopna výrazně většího komunikačního dosahu.

Posun frekvence mezi vysílačem a přijímačem je úměrný k časovým posunům, podobně jako u CSS. Frekvenční posun může dosáhnout až 20% šířky pásma [20], aniž by došlo k úplnému narušení synchronizace komunikačního přenosu. Frekvenční posun úzce souvisí s Dopplerovým jevem, tudíž je modulace imunní i vzhledem k tomuto nežádoucímu jevu. LoRa® také vyniká vysokou odolností proti vícecestnému šíření, únikům a vůči rušení v pásmu.

Modulace LoRa® kóduje bity užitečných dat do dlouhé sekvence bitů tzv. chipů. Reprezentací jednotlivých bitů sekvencemi chipů dojde k rozprostření spektra přenášeného signálu, což umožňuje přijímači rozeznat signál s vyšší mírou šumu tzn. s nižším poměrem signálu k šumu (SNR – Signal-to-Noise Ratio). Kromě samotné LoRa® modulace lze v LoRa® modulech využít i FLRC (Fast Long Range Communication) nebo již zmíněnou modulaci FSK, respektive její zvláštní variantu GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying) [20], [23].

Činitel rozprostření (Spreading Factor)

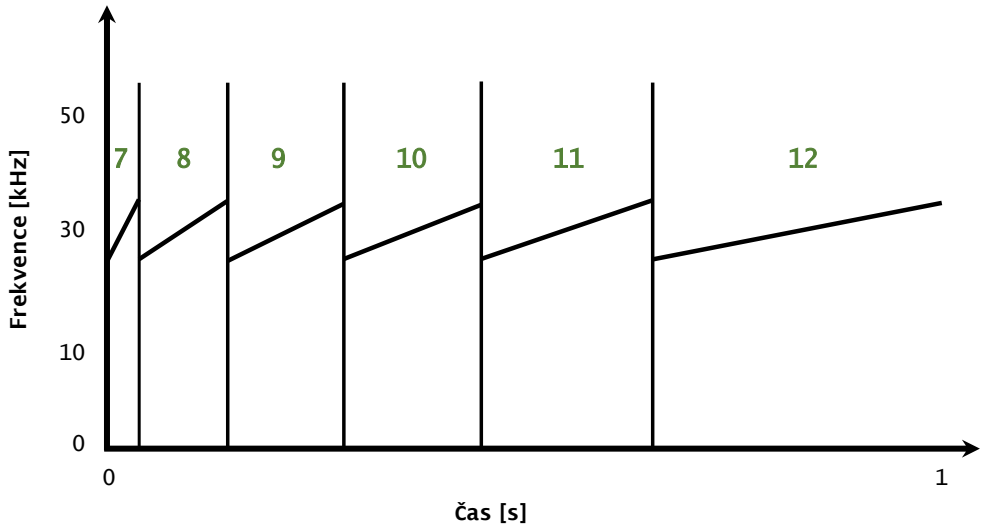
Počet chipů odpovídající jednomu bitu informace vyjadřuje parametr SF (Spreading Factor), neboli činitel rozprostření. Délka rozprostírací sekvence chipů, jejíž hodnoty jsou uvedeny v Tabulce 2.1, je definována jako 2^{SF}. SF udává vztah mezi symbolovou rychlostí (R_{S}) a chipovou rychlostí (R_{C}):

$$R_{\mathrm{C}} = 2^{\mathrm{SF}} \cdot R_{\mathrm{S}} \quad [cps] \tag{2.1}$$

Tab. 2.1: Hodnoty činitele rozprostření (SF)

Činitel rozprostření (SF)	7	8	9	10	11	12
Počet chipů	128	256	512	1024	2048	4096

Hodnota činitele rozprostření je volitelná většinou v rozsahu 7 až 12 dle odpovídajících požadavků. Pro bližší představu nabízí Obrázek 2.3 srovnání průběhů SF pro různé hodnoty. Pokud se třeba koncové zařízení nachází daleko (jednotky km) od dalšího přijímače, tak je zapotřebí vyššího SF, což poskytuje větší citlivost přijímače a odolnost vůči rušení, ale za cenu nižší datové rychlosti. V případě koncového zařízení v blízkosti přijímače platí opačné podmínky, takže postačuje nízký činitel rozprostření. Hodnotu SF nevolíme pouze dle dosahu komunikace, nýbrž také podle potřebných přenosových podmínek (datová rychlost, odolnost signálu a jiné). LoRa® tedy nabízí kompromis mezi citlivostí přijímače a datovou rychlostí. Z důvodu vlastnosti ortogonality musí být hodnota SF nastavena na obou stranách spojení stejná pro navázání komunikace [22], [16].



Obr. 2.3: Porovnání průběhů SF 7-12 (dle [21]).

Šířka pásma (Bandwidth)

Dalším volitelným parametrem je šířka pásma – BW. Pro nejvíce používané pásmo sub-GHz (typicky kmitočet 868 MHz pro oblast EU) je možné zvolit nejčastěji hodnotu 125, 250 nebo 500 kHz. Této práce se však týká modul (SX1280) pracující na frekvenci 2,4 GHz, jenž nabízí širší škálu hodnot 200 kHz, 400 kHz, 800 kHz, 1600 kHz. Šířka pásma je ekvivalentem chipové rychlosti R_{C}, takže například hodnota BW = 250 kHz odpovídá hodnotě 250 000 cps (chipů za sekundu). Šířka pásma souvisí také s datovou rychlostí, která s vyšší hodnotou šířky pásma přímo úměrně roste [16], [24]. Z již zmíněných parametrů činitele rozprostření a šířky pásma lze definovat symbolovou periodu (T_{S}):

$$T_{\mathrm{S}}\ [s] = \frac{2^{\mathrm{SF}}}{BW} \tag{2.2}$$

Podle základních dat definujeme datový tok (R_{braw}):

$$R_{\text{braw}}\ [b/s] = \frac{SF}{T_{\text{S}}} \tag{2.3}$$

Kódový poměr (Coding Rates)

Zabezpečení proti chybám při přenosu se obecně označuje pojmem FEC, neboli česky dopředná chybová korekce. LoRa® pro kontrolu a případně opravu vzniklých chyb přenášeného signálu využívá Hammingovo kódování. Parametr v souvislosti s tímto kódováním je tzv. kódový poměr – CR. Zpráva nesoucí informaci má vždy délku 4 bitů a délka kódové zprávy je nastavitelná v rozmezí 5 až 8 bitů. a právě kódový poměr nám udává zvolenou kombinaci délky datové zprávy ku kódové, což znamená, že dostupné hodnoty CR jsou 4/5, 4/6, 4/7 a 4/8.

Tab. 2.2: Schopnosti FEC technologie LoRa® [21]

Kódový poměr (CR)	**Detekované bity**	**Opravené bity**
4/5	0	0
4/6	1	0
4/7	2	1
4/8	3	1

V závislosti na zvoleném poměru se mění schopnosti zabezpečení, což je korekce a detekce chyb. Tabulka 2.2 naznačuje, že detekovat minimálně jednu chybu dokáží kódové poměry 4/6, 4/7 a 4/8. Opravit jeden chybný bit jsou schopné poměry 4/7 a 4/8. Hodnotu CR je vhodné volit dle žádaných vlastností komunikace, jelikož například při nastavení 4/7 dochází k navýšení velikosti datové části (payload) o 75 % oproti signálu bez aplikovaného kódování. Kódový poměr lze na rozdíl od SF a BW nastavit na každém přijímači či vysílači vzájemně nezávisle [21], [16]. Celkový datový tok (R_{b}) s ohledem na použitý parametr CR je možné vypočítat následovně:

$$R_{\text{b}}\ [b/s] = SF \cdot \frac{BW}{2^{\text{SF}}} \cdot \frac{4}{(4+CR)} \tag{2.4}$$

$$R_{\text{b}}\ [b/s] = R_{\text{braw}} \cdot \frac{4}{(4+CR)} \tag{2.5}$$

2.1.3 LoRa® rámec

Rámec LoRa® fyzické vrstvy má pevně definovanou strukturu. Je tvořen v explicitním módu, což je formát s proměnnou délkou rámce. Ve fyzické vrstvě existují dva typy zpráv – pro downlink a uplink. Uplink zprávy jsou zasílány od různých koncových zařízení přes jednu nebo vícero bran ve směru k síťovému serveru. Zprávy downlink se vysílají v opačném směru, tedy ze síťového serveru ke konkrétnímu koncovému zařízení, za pomoci jedné brány. Šířka pásma a činitel rozprostření jsou během přenosu jednoho rámce neměnné. Na Obrázcích 2.4 a 2.5 lze vidět strukturu obou variant.

Obr. 2.4: Struktura rámce – uplink (převzato a upraveno dle [25]).

Formát uplink a downlink rámce se liší pouze polem *CRC*[3], respektive uplink pro zvýšení ochrany dat obsahuje cyklický redundantní součet (CRC) navíc oproti downlinku. CRC představuje kontrolní součet, jehož hodnota je vysílána společně s daty a na konci spojení přepočtena. Pokud se výsledek přepočtu neshoduje s přenesenou hodnotou, tak došlo k chybě a tento rámec je zahozen bez využití. V případě rovnosti součtu je ověřeno, že přenos proběhl bez chyb.

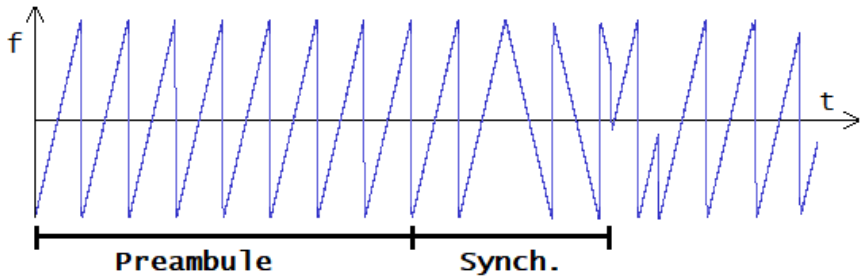
Obr. 2.5: Struktura rámce – downlink (převzato a upraveno dle [25]).

Rámec začíná polem *Preambule* sloužící pro synchronizaci přijímače s příchozím signálem. Tvoří ji konstantní posloupnost upchirp pulzů, z nichž poslední dva nesou synchronizační slovo o velikosti 1 B, které odlišuje danou síť od jiné LoRa® sítě komunikující ve stejném frekvenčním pásmu. Následuje 2,25 downchirpů pro frekvenční synchronizaci. Dohromady tedy synchronizační část tvoří 4,25 pulzů, jenž jsou součástí preambule. Popisované složení preambule nabízí Obrázek 2.6 s názornou ukázkou průběhu signálu včetně synchronizační části. Délku preambule lze konfigurovat od 12,25 až k 65539,25 symbolům.

Po preambuli následuje hlavička - *PHDR* (Physical Header), která je kódována nejvyšší variantou kódového poměru 4/8. Hlavička přenáší informaci o velikosti datového obsahu v Bytech (blok *PHY Payload*), dále o použitém kodovém poměru a zda rámec obsahuje nebo neobsahuje blok CRC o velikosti 16 bitů. Pro ochranu

[3]Cyclic Redundancy Check

přenosu hlavičky se používá samostatný CRC (pole *PHDR_CRC*). Hlavička není povinná, takže není nutné ji zasílat například v případech, kdy už předem známe informaci o velikosti dat, CR a CRC. Datový obsah - *PHY Payload* může nabývat maximálně hodnoty 255 bytů [20], [16].



Obr. 2.6: Průběh LoRa® signálu v časové oblasti (převzato a upraveno dle [26]).

2.2 LoRaWAN

LoRaWAN představuje vyšší vrstvu technologie definující systémovou architekturu a komunikační protokol, který je narozdíl od proprietární LoRa® modulace otevřeným standardem. Na úrovni linkové vrstvy sítě poskytuje řízení přístupu ke sdílenému médiu – MAC (Medium Access Control).

Na koncová zařízení jsou kladeny různé nároky podle konkrétní požadované aplikace, proto LoRaWAN rozlišuje koncová zařízení do tří kategorií. Dělí je na obousměrná zařízení tzv. třídy A, B, C. Hlavní znaky jednotlivých tříd shrnuje Tab. 2.3.

Zařízení třídy A
Zařízení umožnující přenos dat obousměrně dle vlastních potřeb. Proběhne-li přenos uplink zprávy, tak následují dvě krátká okna pro případný příjem downlink zprávy. Po uplynutí intervalu těchto dvou oken se zařízení přepne do úsporného režimu a přestává být v pohotovosti. V jinou dobu tedy není možné uskutečnit přenos dat ze síťového serveru (downlink), dokud nedojde samotným zařízením k odeslání další uplink zprávy. Vzhledem k omezeným příležitostem downlink komunikace, pracují koncová zařízení třídy a s nejnižší spotřebou.

Zařízení třídy B
Také nabízí náhodný přenos downlink zpráv jako předchozí třída, ale kromě toho lze tyto zprávy přijímat navíc i v pevně vyhrazenou dobu. Downlink okno je plánovaně otevřeno v určitý čas na základě synchronizačního rámce (beacon), který odesílá brána koncovému zařízení. Díky tomu se server přesně informuje o intervalu,

kdy je zařízení aktivní pro příjem dat. Zařízení se probouzí do aktivního stavu podle vlastních potřeb nebo v případě požadavku.

Zařízení třídy C

Koncová zařízení umožňují téměř neustálý příjem zpráv ze síťového serveru (mimo probíhajícího uplinku). Pracují víceméně nepřetržitě v aktivním režimu, tudíž mají nejvyšší spotřebu energie [19], [25].

Tab. 2.3: Hlavní znaky tříd v LoRaWAN [19]

Třída A	**Třída B**	**Třída C**
Bateriově poháněná z.	Bateriově poháněná z.	Poháněná z. ze sítě
Energeticky nejúspornější	Energeticky úsporné	Nejvyšší spotřeba energie
Downlink pouze po uplinku	Downlink dle beacon	Neustále aktivní zařízení
Podporováno všemi z.	Řízená latence downlinku	Bez latence pro downlink

3 Metody vnitřní lokalizace

Lokalizace pomocí bezdrátových sítí nachází v praxi velké množství přínosného využití, jako třeba lokalizování materiálu uvnitř velkých skladů nebo trasování jednotlivých dílů v rámci výrobních linek průmyslových společností apod. Nalezení neznámé polohy lokalizovaného zařízení lze dosáhnout pomocí různých metod. Metody rozlišujeme podle toho, jaký měřený parametr pro odhad polohy konkrétní technika využívá. V případě využití časových údajů (čas vyslání, přijetí zprávy nebo tzv. čas oběhu) rozeznáváme techniky ToA (Time of Arrival), TDoA (Time Difference of Arrival) nebo RTT (Round trip time). Dalším parametrem pro stanovení polohy může být úhel přijatého signálu, na kterém je založena technika AoA (Angle of Arrival). V neposlední řadě je také možné za účelem lokalizace využít metodu RSS, jenž hledanou polohu určuje na základě měření síly přijímaného signálu [27]. Následující kapitola nabízí rozbor nejčastěji aplikovaných metod lokalizace.

3.1 Time of Arrival (ToA)

Metoda ToA využívá k lokalizaci přesné měření času, který uplyne od vyslání až k přijetí signálu. Jinými slovy, vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem dokáže určit na základě přesné hodnoty doby šíření signálu. Signál se v přenosovém prostředí (éteru) šíří přibližně rychlostí světla. Pokud známe přesný čas zaznamenaný při přijetí signálu, pak můžeme vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem vypočítat následovně:

$$D = c \cdot t, \tag{3.1}$$

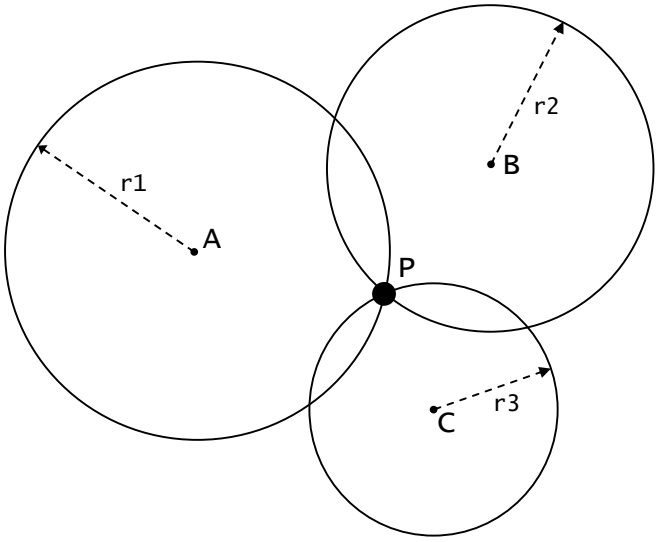
kde D je vzdálenost v metrech, c je rychlost šíření odpovídající hodnotě $3 \cdot 10^8\,\mathrm{m/s}$ a t [μs] je doba šíření signálu.

Lokalizační technika vyžaduje na obou stranách spojení velmi přesnou synchronizaci času, které lze dosáhnout aplikací přesných a cenově nákladných hodin. Případná chyba způsobená nepřesností časového údaje má velmi výrazný vliv na výslednou hodnotu vzdálenosti. Za předpokladu, že maximální přijatelná odchylka vzdálenosti je 1 metr, by nepřesnost stanovené doby šíření neměla přesáhnout jednotky nanosekund.

Vypočtenou vzdálenost si lze představit jako poloměr kruhu, který značí oblast, v níž se pravděpodobně nachází hledaná pozice. Viz Obrázek 3.1, jenž graficky znázorňuje princip metody, kde P značí právě lokalizovanou pozici.

Metoda ToA pro lokalizaci využívá minimálně tři referenční vysílače. Tím vzniknou tři kruhy s poloměry, které odpovídají vzdálenostem daných vysílačů k přijímači. Geometrickou technikou zvanou trilaterace je nalezen průsečík těchto kruhů,

který odpovídá pravděpodobné poloze lokalizovaného zařízení. Tento způsob nemusí být vždy přesný, jelikož v praxi nastávají situace, kdy nedojde k přesnému protnutí kruhů. Pro zvýšení přesnosti lze využít většího počtu vysílačů (multilaterace), což zvyšuje pravděpodobnost přesného nalezení průsečíku [28].



Obr. 3.1: Lokalizace ToA – trilaterace (dle [28]).

3.2 Time Difference of Arrival (TDoA)

Metoda TDoA používá měření rozdílných časů přijetí signálu přijímačem. Vysílač na neznámé pozici vysílá signál, který dorazí ke každému přijímači v jinou dobu. Proto je zapotřebí přesná časová synchronizace na přijímačích, avšak v případě vysílače jakožto lokalizovaném zařízení není přesný zdroj času nutný. V tom spočívá rozdíl metod ToA a TDoA, neboť ToA vyžaduje přesné hodiny u přijímače i vysílače.

K výpočtu lokalizované polohy využívá matematické metody nazývané jako hyperbolická laterace. Metoda vyžaduje minimálně počet tří referenčních přijímačů. Obrázek 3.2 ilustruje způsob lokalizace, kde P je vysílač na hledané pozici a A, B, C značí přijímače. Přijímač a přijme zprávu od vysílače v čase T_{A} a přijímač B v čase T_{B}. Potom můžeme rozdíl času vyjádřit jako kladnou konstantu k:

$$TDoA_{\mathrm{B-A}} = |T_{\mathrm{B}} - T_{\mathrm{A}}| = k_1 \tag{3.2}$$

Hodnota $TDoA_{\mathrm{B-A}}$ představuje hyperbolu s ohnisky v místech přijímačů a a B. Tato hyperbola vyjadřuje množinu bodů, jejichž vzdálenosti v metrech od obou ohnisek jsou dány součinem $k_1 \cdot c$. Všechny možné polohy hledané pozice P lze matematicky vyjádřit takto:

$$|D_{\mathrm{PB}} - D_{\mathrm{PA}}| = k_1 \cdot c \tag{3.3}$$

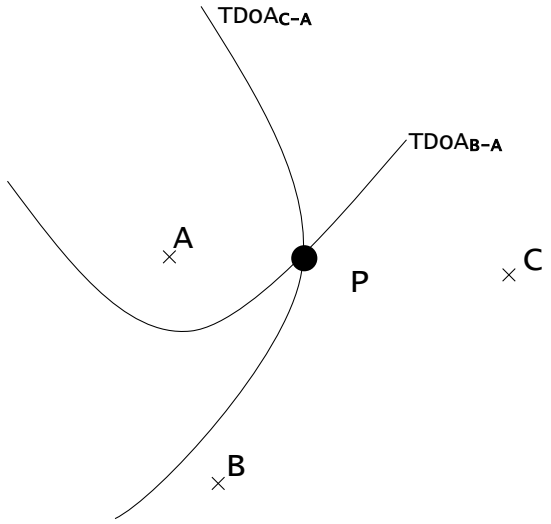
To znamená, že pravděpodobná poloha P se nachází v nějakém bodě hyperboly $TDoA_{\mathrm{B-A}}$. Pro zjištění přesné polohy je tedy zapotřebí výpočtu druhé hyperboly:

$$TDoA_{\mathrm{C-A}} = |T_{\mathrm{C}} - T_{\mathrm{A}}| = k_2 \tag{3.4}$$

Stejným způsobem jako v případě 3.3 lze popsat všechny možné polohy P dány druhou hyperbolou:

$$|D_{\mathrm{PC}} - D_{\mathrm{PA}}| = k_2 \cdot c \tag{3.5}$$

V dalším kroku je průsečíkem těchto dvou hyperbol nalezena lokalizovaná pozice P (viz Obr 3.2). Mohou však nastat případy, kdy výsledek hyperbolické trilaterace má více řešení. Potom tři přijímače nedostačují a je nutné navýšit počet přijímačů [28].



Obr. 3.2: Lokalizace TDoA – hyperbolická trilaterace (dle [28]).

3.3 Angle of Arrival (AoA)

Metoda stanovuje lokalizovanou pozici na základě úhlu, při kterém je signál přijat přijímačem. Proto je k aplikaci zapotřebí směrových antén. Základně k lokalizaci musíme použít alespoň dva přijímače. Potom princip spočívá v nalezení průsečíku dvou čar, které jsou spojnicí hledané pozice (vysílače) a příslušného přijímače. Vzhledem k radiální lince svírají tyto spojnice úhel θ_{n}, jak ukazuje Obrázek 3.3. Pro přesné určení hledané polohy se v praxi využívají tři přijímače. Metoda využívá geometrického principu nazývaném jako triangulace. Pro představu lze použitím dvou

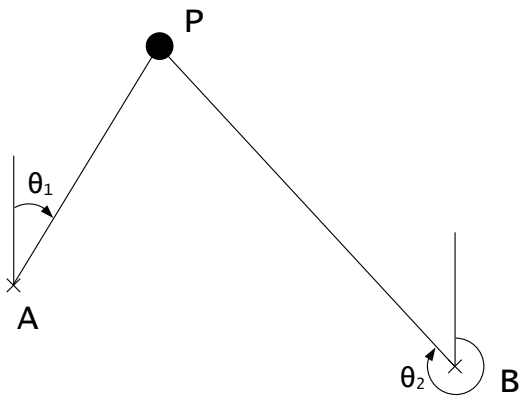
přijímačů popsat princip následující rovnicí:

$$l\ [m] = \frac{d}{\tan(\theta_1)} + \frac{d}{\tan(\theta_2)}, \tag{3.6}$$

l je vzdálenost mezi přijímačem a a B, $d\,[\mathrm{m}]$ je výška polohy, ve které se nachází lokalizované zařízení, θ_1 je úhel signálu přijatého přijímačem A, θ_2 je úhel signálu přijatého přijímačem B.

V dalším kroku lze vzdálenost r_n mezi vysílačem a příslušným přijímačem vypočítat aplikováním goniometrické funkce sinus:

$$r_\mathrm{n}\ [m] = \frac{d}{\sin(\theta_\mathrm{n})} \tag{3.7}$$



Obr. 3.3: Lokalizace AoA – bilaterace (dle [28]).

V praxi při vhodných podmínkách, kdy je umožněn přenos s přímou viditelností, lze směrové antény nastavit tak, aby byl směr vyzařování namířen do míst lokalizované pozice, a tím bylo při komunikaci dosaženo co největší síly signálu přijímaného přijímačem [28].

3.4 Received Signal Strenght Indication (RSSI)

Předchozí zmíněné metody mají své nevýhody. Důsledkem vícecestného šíření a především překážkami v prostoru, dochází k ovlivnění úhlu a času přijetí signálu. Další nevýhodou metod je potřeba přesných synchronizovaných hodin (ToA, TDoA) a směrové antény (AoA). Levnější alternativu nabízí metoda založená na závislosti síly signálu šířeného na vzdálenosti mezi vysílačem a přijímačem (lokalizovanou pozicí). V této metodě je tedy stěžejním parametrem síla přijatého signálu,

která je kvantizována a vyjádřená parametrem RSSI (Received Signal Strength Indication). Hodnota RSSI je vždy závislá na vlastnostech daného přijímače rádiového modulu. U vyslaného signálu během přenosu dochází k přirozenému útlumu vlivem šíření v daném prostředí a vlivem překážek nacházející se v přenosové cestě. Ve výsledku to znamená, že s rostoucí vzdáleností mezi vysílačem a přijímačem síla signálu klesá [9], [29].

Pro zjištění hledané vzdálenosti na základě hodnoty RSSI se využívají modely útlumu signálu, neboli path loss modely. Tyto modely mají velký vliv na přesnost zjištěné vzdálenosti. To znamená, že čím více se model blíží k reálné závislosti útlumu signálu v konkrétním prostředí, tím přesnější lokalizace můžeme dosáhnout. Jedním z často aplikovaných empirických modelů je definovaný následovně:

$$RSSI\ [dBm] = 10 \cdot n \cdot log_{10}(d) + A, \tag{3.8}$$

kde A [dBm] je naměřená hodnota RSSI při vzdálenosti 1 m mezi vysílačem a přijímačem, které mají mezi sebou přímou viditelnost (LOS - Line of Sight), n je koeficient ztrát a d [m] je vzdálenost pro počítanou hodnotu RSSI [30].

Podobný typ modelu, na rozdíl od předchozího, bere v potaz ztráty vlivem překážek, které mohou způsobit výraznou změnu síly signálu. Model platí pro vzdálenosti $\mathrm{d} > d_0$ a je dán rovnicí následovně:

$$RSSI\ [dBm] = RSSI(d_0) + 10 \cdot n \cdot log_{10}(\frac{d}{d_0}) + X_\sigma, \tag{3.9}$$

$RSSI(d_0)$ značí hodnotu RSSI v referenční vzdálenosti $d_0 = 0{,}8$ m (dle [30]), n je koeficient ztrát, $X\sigma$ [dB] je distribuční funkce Gaussova normálního rozdělení s nulovou střední hodnotou a směrodatnou odchylkou σ [dB]. Právě $X\sigma$ modeluje ztráty překážkami. Velikost tohoto parametru a koeficient n se volí (dle [31]) v závislosti na charakteru prostředí.

Další odlišný model uvádí Mezinárodní Telekomunikační Unie – ITU (International Telecommunication Union) v následujícím tvaru:

$$RSSI\ [dBm] = 20 \cdot log_{10}(f) - 28 + N \cdot log_{10}(\frac{d}{d_0}) + L_\mathrm{f}(n), \tag{3.10}$$

kde vztah $20 \cdot log_{10}(f) - 28$ vyjadřuje teoretickou hodnotu RSSI pro referenční vzdálenost $d_0 = 1$ m a pracovní frekvenci f [MHz]. N je koeficient výkonových ztrát, $L_\mathrm{f}(n)$ [dB] je ztrátový faktor podlaží, n vyjadřuje počet podlaží mezi vysílačem a přijímačem a nabývá hodnot $n \geq 0$. V případě komunikace v rámci jedné místnosti tj. $n = 0$ je také $L_\mathrm{f}(n)$ nulový. V jiných případech se N a $L_\mathrm{f}(n)$ volí z doporučených hodnot podle [32].

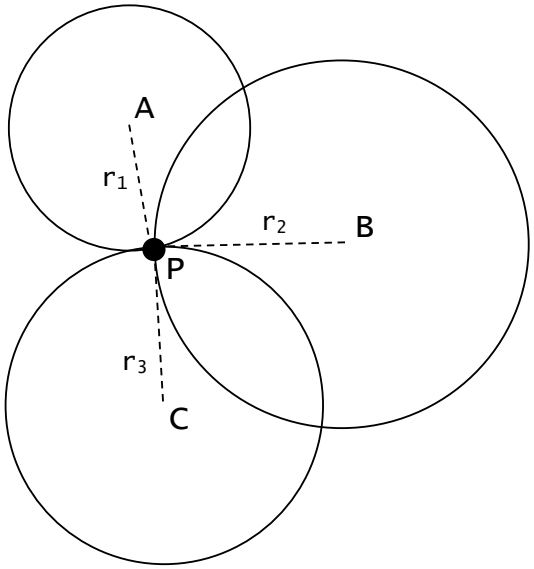
Na základě path loss modelu se vypočte vzdálenost mezi přijímačem a vysílačem, kterou si můžeme představit jako poloměr kruhu okolo vysílače. Ve většině případů

se pro lokalizaci ve 2D rovině využívají tři referenční vysílače. Hledanou polohu lze vypočítat pomocí trilaterace, což je technika založená na výpočtu průsečíku 3 kruhů (viz Obr 3.4), kde A, B, C jsou vysílače na známých souřadnicích X_n, Y_n a proměnné r_1, r_2, r_3 jejich vzdálenosti k hledané pozici P. Každou kružnici, respektive vysílač, lze popsat rovnicí. Potom pro případ tří vysílačů můžeme zapsat soustavu tří rovnic o dvou neznámých (X, Y) definující neznámou polohu P :

$$(X_\mathrm{A} - X)^2 + (Y_\mathrm{A} - Y)^2 = {r_1}^2 \tag{3.11}$$

$$(X_\mathrm{B} - X)^2 + (Y_\mathrm{B} - X)^2 = {r_2}^2 \tag{3.12}$$

$$(X_\mathrm{C} - X)^2 + (Y_\mathrm{C} - Y)^2 = {r_3}^2 \tag{3.13}$$



Obr. 3.4: Lokalizace RSSI – trilaterace (dle [27]).

Výsledkem řešení soustavy je nalezení souřadnic X a Y, na kterých se nachází lokalizovaná pozice. Nevýhodou této metody je, že závislost síly signálu na vzdálenosti ve členitém prostředí s velkým množstvím překážek, lze pomocí path loss modelu složitě popsat. Toto má za následek snížení přesnosti určené vzdálenosti mezi vysílačem a přijímačem [9].

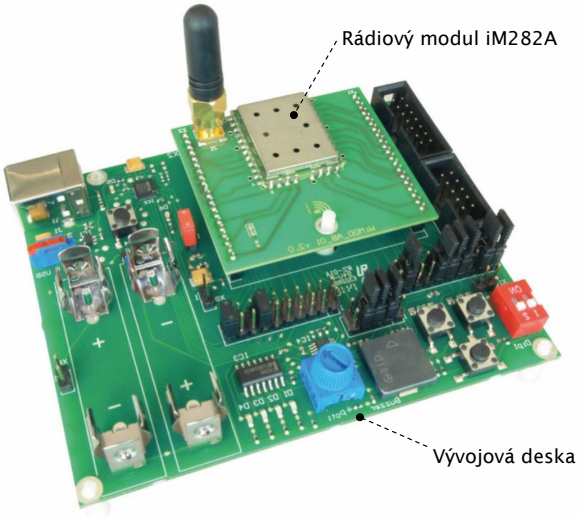
Volba lokalizační metody vždy závisí na charakteru a rozsahu přenosového prostředí, na účelu lokalizace nebo případně na požadované přesnosti, dále na typu aplikované sítě a v neposlední řadě také na hardware vybavení tzn. zda jsou dostupné směrové antény, přesný zdroj hodin nebo pouze rádiový modul, který měří sílu přijatého signálu, podobně jako v případě této diplomové práce.

4 HW/SW vybavení

Práce pro experimentální lokalizaci využívá vývojový kit SK-iM282A [34] pracující jako koncové zařízení a společně s ním také softwarové prostředí WiMOD LR Studio. V této kapitole jsou popsány parametry a vlastnosti SK-iM282A. Dále se zde nachází detailní rozbor aplikace WiMOD LR Studio včetně způsobu, jakým byl aplikován pro měření.

4.1 SK-iM282A

Vývojový kit SK-iM282A vyrábí společnost IMST GmbH, která je členem LoRa Aliance spravující síť LoRa®. Jedná se o víceúčelovou sadu dvou rádiových vysílačů, respektive přijímačů komunikujících v bezlicenčním pásmu 2,4 GHz. Jejich struktura je složena z vývojové desky (Demo Boardu) a desky s rádiovým modulem a anténou. Ukázka vysílače/přijímače SK-iM282A je na Obrázku 4.1. Důležitou část kitu tvoří právě čip iM282A, což je rádiový modul poskytující obousměrnou komunikaci s nízkým vysílacím výkonem (koncipován až do 12 dBm, avšak softwarově omezeno na 8 dBm) a velmi dlouhým dosahem (v článku [33] bylo ověřeno minimálně 12 km při přímé viditelnosti).



Obr. 4.1: Vývojový kit SK-iM282A.

Modul nabízí na výběr FSK, FLRC (Fast Long Range Communication) a především LoRa® modulaci. FSK a FLRC oproti LoRa® nabízí vyšší přenosové rychlosti na úkor úzké šířky pásma, takže jsou vhodné pro rychlé spojení na krátkých vzdálenostech. FSK umožňuje komunikaci s maximální přenosovou rychlostí 2 Mb/s

při šířce pásma 2,4 MHz, avšak za cenu nízké citlivosti přijímače (-83 dBm). V tomto případě se jedná o variantu (G)FSK, což znamená doplnění o Gaussův filtr snižující výkonově postranní pásma. Modul iM282A nabízí (G)FSK modulaci v provedení jako využívá fyzická vrstva BLE (Bluetooth Low Energy) [16]. FLRC pracuje na základě GMSK (Gauss Minimum Shift Keying) modulace v kombinaci s protichybovým opatřením, které tvoří FEC a technika prokládání. Nejvyšší hodnoty přenosové rychlosti v případě FLRC činí 1,3 Mb/s s BW 1,2 MHz. Kódový poměr zvláštního typu nabývá variant 1/2, 3/4 a 1.

Pro komunikaci typu LoRa® nabízí vývojový kit SK-iM282A mnoho variant nastavení komunikačních parametrů. Hodnotu činitele rozprostření - SF lze zvolit od 5 do 12. V případě šířky pásma - BW je na výběr 203, 406, 812 nebo 1625 kHz (systémově označované jako BW 200, 400, 800 a 1600). Úroveň vysílacího výkonu můžeme nastavit od -18 dBm do maximální hodnoty 8 dBm. Tabulka 4.1 obsahuje hodnoty citlivosti přijímače v závislosti na BW v kombinaci s krajními hodnotami SF. Je patrné, že nejnižší úroveň citlivosti, při které lze ještě úspěšně detekovat signál o nízké síle (-130 dBm), odpovídá kombinaci nastavení nejnižší hodnoty BW (203 kHz) a současně nejvyšší hodnoty SF (12) [34].

Tab. 4.1: Citlivost přijímače iM282A v závislosti na hodnotách BW a SF [35]

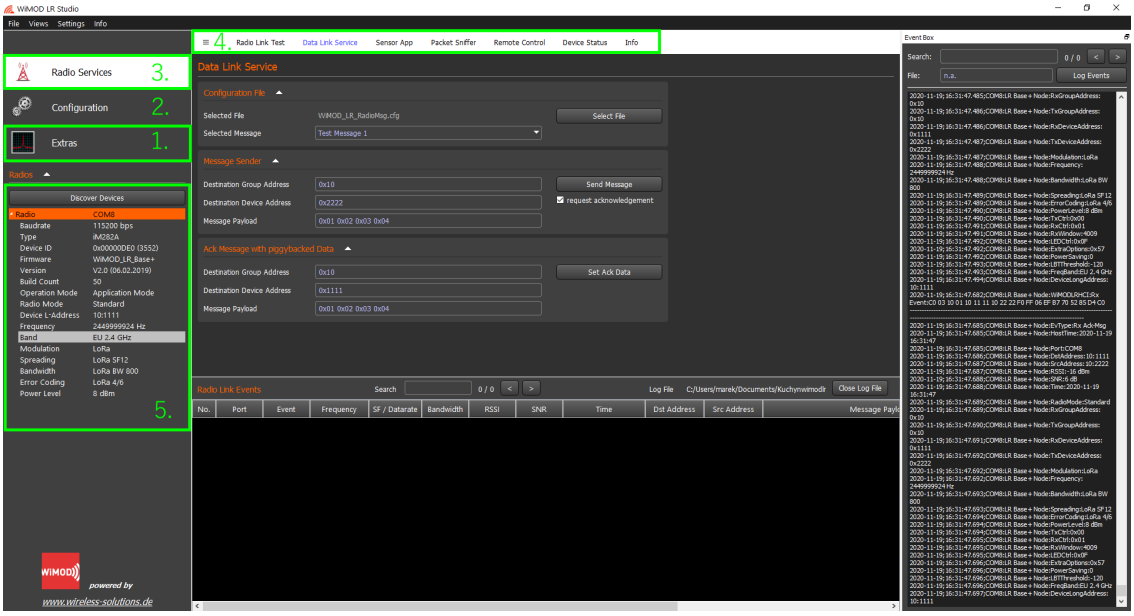
BW [kHz]	**SF**	**Úroveň citlivosti [dBm]**
203	5	-109
203	**12**	**-130**
406	5	-105
406	12	-127
812	5	-103
812	12	-126
1 625	**5**	**-99**
1 625	12	-120

4.2 WiMOD LR Studio

Výrobce kromě vývojového kitu poskytuje také volně přístupný software s označením WiMOD LR Studio. Aplikace pro řízení rádiové sítě poskytuje ovládání LoRa® komunikace v různých režimech. Podporuje také více typů modulů, takže umožňuje kontrolu sítě na frekvencích 868 MHz a 2,4 GHz.

K nastavení spojení a přístupu mezi modulem a softwarem využívá protokol HCI (Host Controller Interface). Přenos dat probíhá pomocí rozhraní UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter), které slouží pro paralelně sériový převod dat při přenosu mezi mikrokontrolérem kitu a portem počítače. Výchozí rychlost přenosu je 115,2 kb/s [36].

Programové prostředí je zpracováno formou GUI (Graphical User Interface), což uživatelsky zjednodušuje způsob jeho ovládání. Podoba této aplikace je zachycena na Obrázku 4.2, kde jsou pro bližší popis očíslovány (**1.** až **5.**) a zeleně označeny podstatné části programu.



Obr. 4.2: Ukázka WiMOD LR Studio: **1.** Sekce "Extras", **2.** Sekce "Configuration", **3.** Sekce "Radio Services", **4.** Záložky zvolené sekce, **5.** Informace o připojeném zařízení.

Okno programu v levé části obsahuje tři hlavní sekce `Extras`, `Configuration` a `Radio Services`. Ke konfiguraci portů, k logování a odesílání HCI zpráv slouží `Extras` (**1.**).

Panel `Configuration` (**2.**) obsahuje vícero záložek jako třeba `Security` k nastavení zabezpečení přenosu pomocí šifrovacího klíče, `Device Information` pro výpis adresy a stavu zařízení. Další záložka `Real Time Clock` je určena pro konfiguraci hodin (RTC). Záložka `Module HCI Settings` umožňuje nastavit režim a formát HCI komunikace daného modulu. Poslední a důležitou záložkou je `Radio Configuration`, která nabízí možnost zadávat a měnit parametry týkající se rádiového modulu. Například 16-bitové adresy vysílače (Tx) a přijímače (Rx), režim modulu (Standardní nebo Sniffer pro přeposílání rámců), úroveň vysílacího výkonu (v rozsahu -18 dBm až

8 dBm). Dále především parametry signálu jako frekvenční pásmo (v našem případě pouze 2,4 GHz), nosná frekvence (2,402 – 2,479 GHz). Modulace, šířka pásma, činitel rozprostření a kódový poměr jsou na výběr ve stejném rozsahu, jak bylo již popsáno v případě vývojového kitu SK-iM282A.

`Radio Services` (**3.**) obsahuje funkce pro různé způsoby řízení LoRa® komunikace. V záložkách (**4.**) nabízí například režim `Sensor App` pro periodický přenos dat z určitého snímače, `Remote Control` pro dálkové ovládání koncového zařízení v LoRa® síti nebo také `Radio Packet Sniffer`, jenž dokáže zprostředkovávat spojení více zařízení tím, že přijaté rámce od jednoho zařízení přeposílá k dalšímu. Kromě toho lze využít hlavní funkce `Radio Link Test`, což je režim analyzující rádiové spojení mezi Tx a Rx pomocí zaznamenávání komunikačních parametrů (hodnota RSSI, SNR, počet chybných paketů – PER), které jsou měřeny pro oba směry (uplink i downlink). Kvalitu spojení ověřuje na základě přenosu definovaného množství rámců (RF packet) (100 až 50 000) o jednotlivé velikosti (15 – 255 B). Poslední dostupný režim `Data Link Service` umožňuje vysílat konkrétní zprávy na adresou určené zařízení. Navíc lze využít možnosti požádat o odpověď v podobě ACK (Acknowledgement) zprávy. Tato odpověď, kromě příznaku vyjadřující potvrzení o správném doručení zprávy, nese informace o stávajících parametrech indikovaných ve vzdáleném zařízení.

Na Obrázku 4.2 lze také vlevo dole vidět panel (**5.**), kde se zobrazují fyzicky připojené zařízení dle příslušného portu. Zde se ukazuje přehled vlastností rádiového modulu (typ čipu, adresa zařízení, nastavený režim atd.) a komunikačních parametrů.

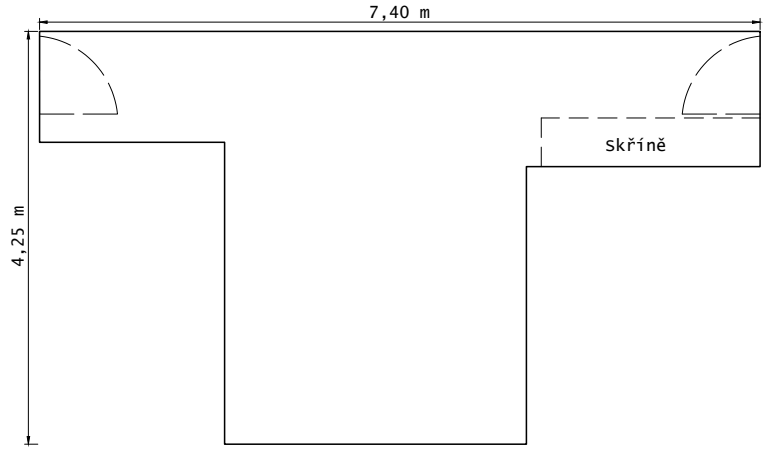
Tato práce využívá jeden modul ve funkci vysílače (adresa 0x1111), který byl kabelem připojen pomocí USB konektoru k počítači. Druhý modul plnil funkci přijímače (adresa 0x2222) jako vzdálené zařízení napájené bateriemi. Bylo zapotřebí pomocí rádiového spojení získat přenosové parametry naměřené přijímačem. Z toho důvodu bylo využito režimu `Data Link Service`, za jehož pomoci bylo možné vyslat LoRa® signál a přijímač po jeho přijetí nazpátek zaslal zprávu s naměřenými údaji (RSSI, SNR). Tento režim umožňuje uložit kompletní záznam komunikace do souboru pouze textového formátu `.log`, což bylo využito pro následné zpracování měřených dat.

5 Koncept lokalizace

Tato kapitola popisuje na praktické situaci princip a postup lokalizace, včetně způsobu měření, zpracování a vyhodnocení dat. Koncept byl aplikován v reálném prostředí, přesněji řečeno v domácích podmínkách.

Přenosové prostředí a parametry komunikace

Pro experimentální ověření lokalizace pomocí LoRa® technologie a navrženého konceptu bylo vybráno nejprve prostředí nacházející se v rodinném bytě. Členitost a půdorys místnosti s rozměry 7,4 × 4,25 m ukazuje Obr. 5.1. V okolí místnosti se nachází 11 Wi-Fi sítí pracujících také v pásmu 2,4 GHz. Wi-Fi v koexistenci s LoRa® sítí může způsobovat rušení, respektive útlum LoRa® signálu (více v práci [37]). Tato skutečnost by mohla mít za následek ovlivnění nepřesnosti lokalizované polohy v případě blízkých hodnot pracovních kmitočtů ($\Delta f \leq 6\,\mathrm{MHz}$) sítí Wi-Fi a LoRa®. Analyzováním okolních Wi-Fi sítí bylo zjištěno, že žádná z nich nepracuje na frekvenci bližší než $\Delta f = 24\,\mathrm{MHz}$, takže v rámci měření by k výraznému ovlivnění LoRa® signálu nemělo dojít. Přenosové prostředí umožňovalo komunikaci s přímou viditelností (LOS), jelikož se v ose přenosové cesty nenacházely žádné překážky.



Obr. 5.1: Půdorys místnosti zvolené pro měření.

Vysílač i přijímač byly umístěny na volné desce psacího stolu (více v podkapitole 5), což přibližně odpovídá výšce pasu člověka a tím emuluje reálnou situaci, kdy se koncové zařízení nachází v kapse lokalizované osoby. Nežádoucí vlivy snižující přesnost měření lze omezit konstantními přenosovými podmínkami během doby měření a také vhodným nastavením technologie LoRa®. Proto měření probíhalo bez přítomnosti a pohybu jiných osob v místnosti a zároveň v době, kdy se v okolí nacházelo minimální množství bezdrátových zařízení (notebook, chytrý telefon) a dalších zdrojů rádiových signálů.

Robustnost LoRa® signálu souvisí především s hodnotou činitele rozprostření a velikosti šířky pásma. Čím vyšší je nastavena hodnota SF, tím roste odolnost signálu. To také vyplývá z Tabulky 4.1 obsahující úrovně citlivosti přijímače v závislosti právě na SF a BW. Na základě této znalosti a zároveň s ohledem na okolní Wi-Fi sítě byla zvolena v 1. variantě robustnější konfigurace LoRa® signálu (kombinace BW = 800 kHz a SF 12). Kromě toho bylo provedeno další měření s odlišným nastavením LoRa® signálu, kde 2. varianta byla naopak zvolena v nejméně odolné konfiguraci (kombinace BW = 1600 kHz a SF 5). Pro experimentální měření jsou přenášená data nedůležitá, proto byl kódový poměr ponechán na hodnotě (4/6) dle původního nastavení softwaru.
Systémové parametry LoRa® během měření byly nastaveny následovně:

	1. varianta	**2. varianta**
Modulace:	`LoRa`	`LoRa`
Frekvence:	`2,449999924 GHz`	`2,449999924 GHz`
Šířka pásma:	`800 kHz`	`1600 kHz`
Činitel rozprostření:	`SF 12`	`SF 5`
Kódový poměr:	`4/6`	`4/6`
Vysílací výkon:	`8 dBm`	`8 dBm`

Path Loss Model

Samotné lokalizaci musí předcházet měření závislosti RSSI na vzdálenosti. Tím dojde k získání path loss modelu charakterizující útlum šířeného signálu v daném prostředí.

Přijímač a vysílač byly umístěny v jedné řadě v ose X. Postupným vzdalováním přijímače od vysílače po jednotlivých krocích docházelo k měření RSSI hodnot. V našem případě bylo měření provedeno pro vzdálenosti v rozsahu 0,1 až 7 m, což vyhovuje lokalizaci i na krajních místech v tomto prostoru vzhledem k rozměrům (7,4 × 4,25 m) a tvaru testované místnosti. Měření proběhlo v rozmezí 0,1 - 0,5 m s jemným krokem 0,1 m a v intervalu 0,5 m až 7 m s krokem 0,5 m. Závislost útlumu signálu v prostoru má logaritmický charakter (viz Obr. 5.2), takže při vzdálenosti do 0,5 m dochází k nejprudšímu poklesu RSSI, proto byl zvolen jemnější krok a tím dosaženo přesnějšího modelu. Pro každý bod vzdálenosti bylo naměřeno 10 hodnot a z nich následně vypočten medián, čímž se odstranil vliv skokově se měnících hodnot.

Pro potřeby lokalizace byl zvolen typ modelu dle [38], který vychází z měřené hodnoty RSSI při referenční vzdálenosti 1 m a nikoliv z teoretického vztahu $(20 \cdot log_{10}(f) - 28)$ na základě pracovní frekvence. Empirický model je definován následující rovnicí:

$$RSSI\ [dBm] = -10 \cdot n \cdot log_{10}(\frac{d}{d_0}) + A + X_\sigma, \tag{5.1}$$

d je vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem, n je koeficient ztrát šířením v daném prostředí, A značí hodnotu RSSI naměřenou při vzdálenosti $d_0 = 1\,\text{m}$, X_σ představuje Gaussovo normální rozdělení s nulovou střední hodnotou a k tomu příslušná směrodatná odchylka σ. V případě zvolení vzdálenosti d_0 na hodnotu 1 m můžeme tento parametr ve jmenovateli zlomku vynechat. Pro LOS komunikaci je směrodatná odchylka σ nulová, tím pádem X_σ nabývá nulové hodnoty a díky tomu se rovnice zjednoduší do následujícího tvaru:

$$RSSI\ [dBm] = -10 \cdot n \cdot log_{10}(d) + A \tag{5.2}$$

Následně bylo zapotřebí zjisit hodnoty parametrů n a A. Pro vzdálenost 1 m byly experimentálně naměřeny hodnoty RSSI, přičemž medián těchto hodnot odpovídal velikosti A. Měřením na různých vzdálenostech došlo k nalezení průměrné hodnoty n, jenž se pohybovala v rozmezí 1,345 až 1,573. Pro parametr n platí, že čím více se nachází v prostoru překážek, tím větší hodnoty nabývá (například $n = 1{,}2$ pro kancelář dle [39]).

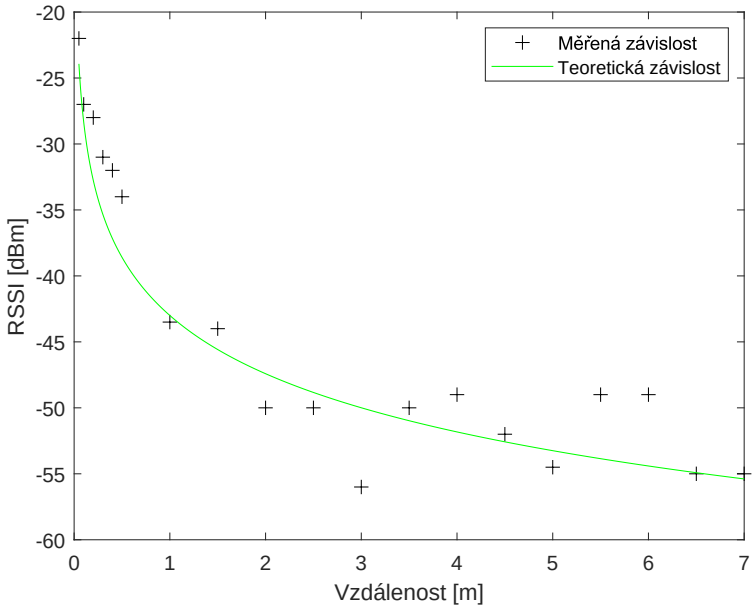
Graf 5.2 ukazuje měřený i teoretický průběh závislosti RSSI na vzdálenosti. Teoretická závislost pro vzdálenosti $d = 0 - 7\,\text{m}$ byla vypočtena dosazením nalezených hodnot A a n do rovnice 5.2. Následně přesnost teoretické závislosti ve srovnání se závislostí měřenou byla ověřena dosazením vypočteného modelu do funkce `fit` v MATLAB, která byla použita za účelem matematického vyhodnocení tohoto porovnání. Přesnost odhadu path loss modelu byl posuzován podle hodnoty koeficientu determinace (R-square), který nabývá hodnoty od 0 do 1, kde hodnota 1 znamená přesnou shodu teoretického modelu s reálným. V našem případě, při vyjádření v procentech, se vypočtený model shoduje s měřenou závislostí na 90 %. Tuto hodnotu a stanovené hodnoty parametrů path loss modelu n a A obsahuje Tabulka 5.1.

Tab. 5.1: Parametry path loss modelu

n	**A** [dBm]	**R-square**	
1,466	-43	0,906	90 %

Princip lokalizace

Z hlediska parametrů užitečných pro lokalizaci software WiMOD LR Studio v kombinaci s vývojovým kitem SK-iM282A umožňuje měřit parametr RSSI a čas vyslaných zpráv. Nabízí se tedy výběr využití lokalizačních technik ToA nebo RSSI. V režimu `Data Link Service` jsou sice zaznamenávány časy odeslání zprávy z vysílače a přijetí zpětné odpovědi od přijímače, avšak tyto časové údaje jsou vyjádřeny v jednotkách sekund, což pro výpočet doby šíření v rámci metody ToA představuje



Obr. 5.2: Závislost RSSI na vzdálenosti pro zvolenou místnost.

nedostatečné rozlišení hodnot. Také metoda TDOA vyžaduje přesnější časové údaje, takže ani ta není vhodná pro aplikaci. Z těchto důvodů lokalizace proběhla s využitím principu měření síly přijímaného signálu (RSS), v případě kitu SK-iM282A vyjádřenou pomocí RSSI hodnot. Aplikovaný postup lokalizace je inspirován dle [39].

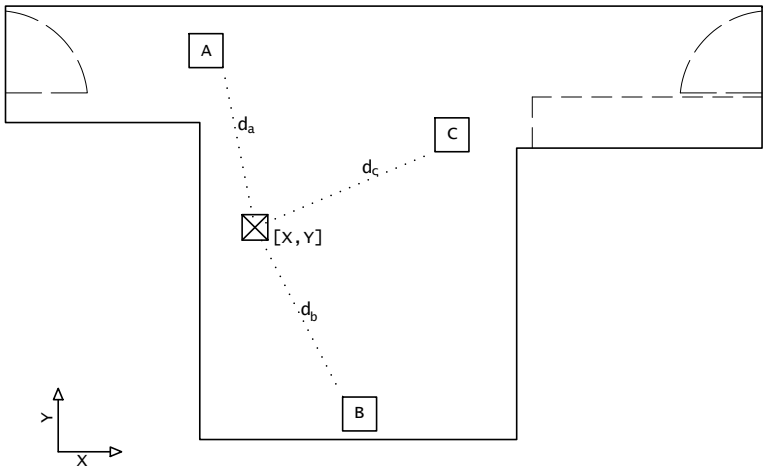
Pro měření byl zvolen počet tří vysílačů. V našem případě byl fyzicky k dispozici pouze jeden Tx, proto bylo nutné měření provádět postupně v krocích pro tři různá umístění vysílače do konkrétních pozic. Označíme-li pozice písmeny A, B, C, potom pro potřeby měření představuje jeden Tx na těchto pozicích tři vysílače: A, B a C (praktická ukázka vysílače na Obr 5.3). Ty byly s přihlédnutím k půdorysu místnosti rozmístěny do tvaru trojúhelníku pro dosažení rovnoměrného pokrytí signálem, jak je pro představu naznačeno v Obrázku 5.4. V něm lze také vidět příklad hledané pozice, kterou charakterizujeme souřadnicemi X a Y.

Rádiová komunikace

Z vysílače připojeného k USB portu počítače byly postupně vysílány zprávy `Tx C-Msg` adresované přijímači, který zprávu zpracoval a odpověděl zprávou `Rx Ack-Msg` nesoucí informace o parametrech přenosu. Příklad výpisu komunikace:

```
No.;Port;Event;Frequency;SF / Datarate;Bandwidth;RSSI;SNR;
-Time;Dst Address;Src Address;Message Payload
7;COM8;Tx C-Msg;2449999924 Hz;LoRa SF12;LoRa BW 800;;;
-2020-11-19 17:45:42.146;;;Status:OK  Packet:5  AirTime:214 ms
8;COM8;Rx Ack-Msg;2449999924 Hz;LoRa SF12;LoRa BW 800;-28 dBm;6 dB;
2020-11-19 17:45:41;10:1111;10:2222;
```

Obr. 5.3: Ukázka vysílače (A) připojeného k PC.



Obr. 5.4: Princip lokalizace hledané polohy.

Pomocí těchto zpráv došlo k získání RSSI hodnot naměřených v přijímači. Pro každou pozici bylo na jednotlivých vysílačích naměřeno 30 vzorků (celkem tedy 90 pro jednu pozici) a z nich byla vypočtena průměrná hodnota RSSI. Výstupem měření byly soubory `.log` obsahující surová data pro každou lokalizovanou pozici zvlášť.

Zpracování naměřených dat

Následně v prostředí MATLAB byly data ze souboru zpracovány až do fáze vypočtení souřadnic lokalizované polohy. Každý soubor obsahoval údaje naměřené pro všechny tři vysílače dohromady. Nejprve došlo k načtení textového souboru a získání samostatných RSSI hodnot, které byly poté zapsány do tabulky.

Příklad zpracování surových dat pro 1. pozici:

```
filename1 = '1wimodlr_radiolink_2020-11-16';
opts = detectImportOptions(filename1);
opts.SelectedVariableNames = {'RSSI'};
opts = setvartype(opts,{'RSSI'},'double');
getvaropts(opts,{'RSSI'})
opts = setvaropts(opts,'RSSI','Suffixes','dBm');
data1 = readtable('1wimodlr_radiolink_2020-11-16',opts);
```

V dalším kroku byla data z tabulky rozdělena a zapsána do polí pro každý vysílač zvlášť. Dále z nich byl vypočten průměr hodnot RSSI. Výsledkem zůstala konkrétní hodnota RSSI pro vysílač A, B a C. Následně s využitím předem získaného path loss modelu byla k dané velikosti RSSI nalezena odpovídající hodnota vzdálenosti. Ta představuje vzdálenost mezi přijímačem a daným vysílačem, v případě měření označována jako d_a, d_b, d_c (viz Obrázek 5.4). Kromě toho známe od začátku měření také přesné pozice vysílačů, jenž byly zaznamenány v soustavě souřadnic jako $[X_\mathrm{a}\,;Y_\mathrm{a}]$ pro vysílač A, $[X_\mathrm{b}\,;Y_\mathrm{b}]$ pro vysílač B a $[X_\mathrm{c}\,;Y_\mathrm{c}]$ odpovídal vysílači C.

V dalším kroku byl proveden samotný výpočet lokalizované pozice za pomoci matematického principu trilaterace, který byl představen v podkapitole 3.4. V obecném tvaru lze jeden vysílač popsat následující rovnicí [40]:

$$(X - X_\mathrm{i})^2 + (Y - Y_\mathrm{i})^2 = {d_\mathrm{i}}^2 \tag{5.3}$$

Obecný tvar lze převézt do vztahu ke konkrétním vysílačům jednotlivě, čímž dostaneme soustavu tří rovnic (5.4, 5.5, 5.6) o dvou neznámých.

$$(X - X_\mathrm{a})^2 + (Y - Y_\mathrm{a})^2 = {d_\mathrm{a}}^2 \tag{5.4}$$

$$(X - X_\mathrm{b})^2 + (Y - Y_\mathrm{b})^2 = {d_\mathrm{b}}^2 \tag{5.5}$$

$$(X - X_\mathrm{c})^2 + (Y - Y_\mathrm{c})^2 = {d_\mathrm{c}}^2 \tag{5.6}$$

Následně byla každá rovnice roznásobena a upravena:

$$X^2 + Y^2 + {X_\mathrm{a}}^2 + {Y_\mathrm{a}}^2 - 2X_\mathrm{a}X - 2Y_\mathrm{a}Y = {d_\mathrm{a}}^2 \tag{5.7}$$

$$X^2 + Y^2 + {X_\mathrm{b}}^2 + {Y_\mathrm{b}}^2 - 2X_\mathrm{b}X - 2Y_\mathrm{b}Y = {d_\mathrm{b}}^2 \tag{5.8}$$

$$X^2 + Y^2 + {X_\mathrm{c}}^2 + {Y_\mathrm{c}}^2 - 2X_\mathrm{c}X - 2Y_\mathrm{c}Y = {d_\mathrm{c}}^2 \tag{5.9}$$

Rovnice 5.7, 5.8, 5.9 lze upravit použitím sčítací metody pro řešení soustavy rovnic do následujícího tvaru.

$$X(-2X_{\mathrm{a}} + 2X_{\mathrm{b}}) + Y(-2Y_{\mathrm{a}} + 2Y_{\mathrm{b}}) = {d_{\mathrm{a}}}^2 - {d_{\mathrm{b}}}^2 - {X_{\mathrm{a}}}^2 + {X_{\mathrm{b}}}^2 - {Y_{\mathrm{a}}}^2 + {Y_{\mathrm{b}}}^2 \quad (5.10)$$

$$X(-2X_{\mathrm{b}} + 2X_{\mathrm{c}}) + Y(-2Y_{\mathrm{b}} + 2Y_{\mathrm{c}}) = {d_{\mathrm{b}}}^2 - {d_{\mathrm{c}}}^2 - {X_{\mathrm{b}}}^2 + {X_{\mathrm{c}}}^2 - {Y_{\mathrm{b}}}^2 + {Y_{\mathrm{c}}}^2 \quad (5.11)$$

Pro zjednodušení řešení soustavy rovnic lze použít substituci. U rovnice 5.10 byly dva mnohočleny na levé straně rovnice nahrazeny neznámou M, N a pravá strana byla nahrazena neznámou O. V případě rovnice 5.11 byly mnohočleny levé strany nahrazeny neznámou P, Q a pravá strana neznámou R.

$$X \cdot M + Y \cdot H = O \quad (5.12)$$

$$X \cdot P + Y \cdot Q = R \quad (5.13)$$

Vyjádřením neznámých X a Y dostáváme následující řešení:

$$X = \frac{O \cdot Q - N \cdot R}{M \cdot Q - N \cdot P} \quad (5.14)$$

$$Y = \frac{O \cdot P - M \cdot R}{N \cdot P - M \cdot Q} \quad (5.15)$$

Rovnice 5.14 a 5.15 byly aplikovány k výpočtům hledaných souřadnic $[X_{\mathrm{P}}\,;Y_{\mathrm{P}}]$ jednotlivých pozic.

Příklad výpočtu souřadnic pro pozici P2:

$$X_2 = \frac{(-12,5239 \cdot 4,3) - (-6,5 \cdot 21,1630)}{(2,2 \cdot 4,3) - (-6,5 \cdot 1,2)} = 4,8497\,m \quad (5.16)$$

$$Y_2 = \frac{(-12,5239 \cdot 1,2) - (2,2 \cdot 21,1630)}{(-6,5 \cdot 1,2) - (2,2 \cdot 4,3)} = 3,5682\,m \quad (5.17)$$

Vyhodnocení měření a výsledky

Měření proběhla pro dvě různé varianty konfigurace systémových parametrů LoRa®, přičemž pro tato měření platily stejné přenosové podmínky a princip lokalizace. Lišila se především konfigurací LoRa® signálu a také v hodnotě parametru A. S ohledem na vlastnosti signálu byla pro 1. variantu zvolena hodnota A = -43 dBm a pro 2. variantu A = -44 dBm.

Ve vybraném prostředí byla provedena měření celkem pro šest různých pozic s náhodně vybranými souřadnicemi a přitom se referenční vysílače A, B a C nacházely na místech **A** [2,20 ; 3,65], **B** [3,30 ; 0,40], **C** [3,90 ; 2,55]. Jak bylo zmíněno na začátku podkapitoly 5, tak jednotlivé Tx byly rozmístěny takovým způsobem,

aby místnost pokryly signálem rovnoměrně a zároveň se nacházely na odlišných pozicích ve směru obou souřadnicových os. Dříve popsaným principem byly vypočteny souřadnice X, Y jednotlivých pozic. Vyhodnotit přesnost lokalizace lze pomocí rovnice 5.18, která číselně vyjadřuje odchylku, respektive vzdálenost, vypočtené polohy od skutečné [39]:

$$Odchylka = \sqrt{(X_{\text{vypočtená}} - X_{\text{skutečná}})^2 + (Y_{\text{vypočtená}} - Y_{\text{skutečná}})^2} \qquad [m] \qquad (5.18)$$

V případě měření při 1. variantě konfigurace LoRa® (BW = 800 kHz, SF = 12) je souhrn vypočtených souřadnic a k nim odpovídající hodnoty odchylek pro lokalizované pozice (P1-P6) obsažen v Tab. 5.2. Je patrné, že k nejvyšší odchylce (3,12 m) došlo v situaci pozice P6. Naopak nejpřesněji lokalizovaná pozice byla P5 s odchylkou 0,193 m. Z pohledu celého měření činí hodnota průměrné odchylky 1,115 m.

Tab. 5.2: Hodnoty souřadnic lokalizovaných pozic s odpovídajícími odchylkami – 1. varianta konfigurace LoRa® (BW = 800 kHz, SF = 12)

Pozice	**Skutečné souřadnice**		**Vypočtené souřadnice**		**Odchylka**
	X [m]	Y [m]	X [m]	Y [m]	[m]
P1	2,20	2,00	2,65	2,29	0,539
P2	4,20	2,85	4,85	3,57	0,968
P3	3,30	3,65	3,28	2,86	0,786
P4	2,50	1,00	3,53	1,30	1,080
P5	4,60	1,50	4,44	1,60	0,193
P6	5,50	4,05	7,25	6,63	3,120

Souřadnice vysílačů: A [2,20 ; 3,65], B [3,30 ; 0,40], C [3,90 ; 2,55]

Tabulka 5.3 nabízí výsledky lokalizace s příslušnými odchylkami pro 2. variantu konfigurace systémových parametrů LoRa® (BW = 1600 kHz, SF = 5). V této variantě byl signál méně robustní než v 1. variantě, což se projevilo zvýšenými hodnotami výsledných odchylek, konkrétně byl rozsah odchylek 0,81 m až 4,95 m. Nejpřesněji byla lokalizována pozice `P5`, jenž byla zároveň jedinou pozicí s odchylkou nižší než 1 m. Průměrná odchylka v tomto případě činila 2,048 m.

Grafické znázornění veškerých výsledků lokalizace pro obě varianty měření nabízí Obrázky 5.5 a 5.6. Zde jsou v naznačeném půdorysu místnosti vykresleny jednak polohy vysílačů (ve čtvercích označené `A, B, C`), ale také vypočtené a skutečné polohy lokalizovaných pozic. Každá poloha je označená pomocí křížku s příslušným názvem pozice. Polohy skutečné jsou pro orientaci zvýrazněny zelenou barvou a vypočtené barvou červenou.

Lze si všimnout, že pozice `P6` lokalizována s nejvýraznější odchylkou, je jedinou pozicí, která byla umístěna v krajní části místnosti. Tento prostor je zaprvé

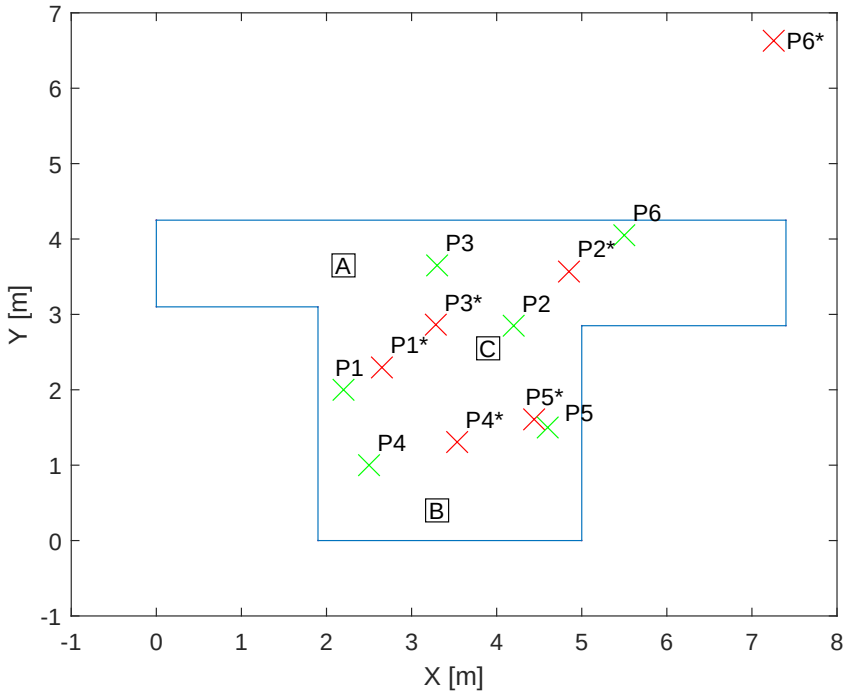
Tab. 5.3: Hodnoty souřadnic lokalizovaných pozic s odpovídajícími odchylkami – 2. varianta konfigurace LoRa® (BW = 1600 kHz, SF = 5)

Pozice	**Skutečné souřadnice**		**Vypočtené souřadnice**		**Odchylka**
	X [m]	Y [m]	X [m]	Y [m]	[m]
P1	2,20	2,00	1,84	0,76	1,287
P2	4,20	2,85	2,74	2,02	1,674
P3	3,30	3,65	5,22	2,99	2,029
P4	2,50	1,00	0,96	1,05	1,541
P5	4,60	1,50	5,38	1,70	0,810
P6	5,50	4,05	7,47	8,58	4,947

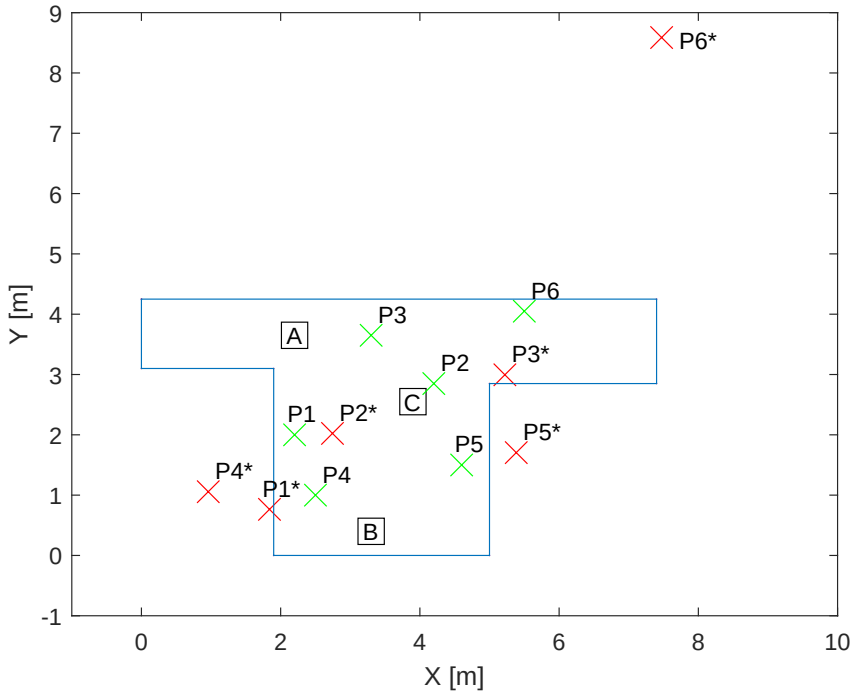
Souřadnice vysílačů: A [2,20 ; 3,65], B [3,30 ; 0,40], C [3,90 ; 2,55]

úzký a zadruhé se v blízkosti přijímače (0,7 m) nacházely skříně. s tím souvisí i nepřesnost měření, neboť charakter prostoru má vliv na vícecestné šíření signálu. Kromě toho spojení mezi pozicí `P6` a vysílačem `B` nebylo zcela na přímou viditelnost, jelikož do přenosové cesty zasahoval roh místnosti, který svým vlivem zvyšoval útlum signálu. Vliv zvýšeného útlumu signálu na přesnost měření dokazovaly stanovené hodnoty vzdálenosti d_{b}, jenž oproti skutečné vzdálenosti mezi pozicí P6 a vysílačem B dosahovaly velké nepřesnosti tj. 29,9 % při 1. variantě a 43,8 % při 2. variantě nastavení systémových parametrů. Zároveň je z těchto hodnot patrné, že v případě 2. varianty konfigurace, tedy využití méně robustního signálu, měla překážka v přenosové cestě a povaha prostředí výraznější vliv na měřené hodnoty. Je velmi pravděpodobné, že právě úzká část této místnosti měla vliv na odrazy šířícího se signálu, čímž došlo k naměření zkreslených hodnot RSSI. Další případný zdroj odchylky může spočívat v nedokonalosti principu metody využívající trilateraci, která hledanou polohu určuje na základě průsečíku tří kruhů odpovídající vzdálenostem mezi vysílači a přijímačem. V praxi se stává, že dojde například k nalezení průsečíku pouze dvou kruhů, což znamená, že třetí referenční vysílač se neuplatní a tím vzniká odchylka [30].

Přesnost měření lze porovnat například s článkem [39], kde provedli lokalizaci ve dvou odlišných prostředích na vzdálenostech do 5 m. V jejich případě činila průměrná odchylka měření 0,846 m pro 1. prostředí (kancelářská místnost) a 1,534 m pro 2. prostředí (školní učebna). V našem případě dosahovala průměrná odchylka hodnoty 1,115 m pro 1. konfiguraci LoRa®, respektive 2,048 m pro 2. konfiguraci. Z těchto údajů vyplývá, že přesnost lokalizace lze také ovlivnit vhodným nastavením systémových parametrů LoRa®.



Obr. 5.5: Polohy lokalizovaných pozic v daném prostředí – 1. varianta konfigurace LoRa® (BW = 800 kHz, SF = 12) (× – skutečná poloha, × – vypočtená poloha).



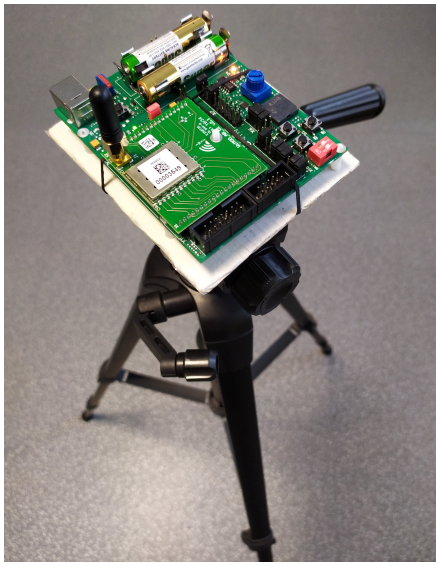
Obr. 5.6: Polohy lokalizovaných pozic v daném prostředí – 2. varianta konfigurace LoRa® (BW = 1600 kHz, SF = 5) (× – skutečná poloha, × – vypočtená poloha).

6 Experimentální lokalizace

Za účelem zjištění potenciálu technologie LoRa® pro lokalizaci uvnitř budov byla provedena rozsáhlá řada měření v dalších reálných prostředích. Konkrétně uvnitř tří různých místností, vyznačujících se odlišnými přenosovými podmínkami, v této práci označených jako "Aula", "Šatna", "Chodba". Tyto místnosti se nacházely v budově Gymnázia ve Žďáře nad Sázavou. Lokalizace v těchto případech byly realizovány s využitím konceptu, o němž pojednává předchozí 5. kapitola.

6.1 Podmínky měření

Měření hodnot RSSI proběhlo za podmínek, kdy vysílač i přijímač byly připevněny na fotografickém stativu. Vývojový kit byl umístěn na papírové desce ve výšce 1,1 m (viz Obr. 6.1), což napodobuje reálnou situaci, kdy lokalizovaná osoba drží koncové zařízení v ruce nebo se zařízení nachází v kapse osoby.



Obr. 6.1: Umístění vývojového kitu SK-iM282A na stativu.

V okolí místností se nacházelo celkem 9 Wi-Fi sítí pracujících také v pásmu 2,4 GHz. Wi-Fi signál může být rušivou složkou vůči signálu LoRa®, jak již bylo zmíněno a specifikováno v podklapitole 5. Analyzováním okolních sítí pomocí mobilní aplikace bylo zjištěno, že 3 Wi-Fi sítě pracovaly na blízkých frekvencích $\Delta f < 3\,\text{MHz}$. Ostatní sítě Wi-Fi využívaly jiné frekvence a byly frekvenčně vzdáleny alespoň o 6 MHz. Kromě jedné konfigurace signálu LoRa®, byly všechny ostatní ($f_c = 2\,450\,000\,122\,\text{Hz}$) realizovány v dosahu frekvencí tří zmíněných Wi-Fi sítí, neboť i v reálných případech je pro běžného uživatele obtížné zabránit koexistenci s jinými sítěmi.

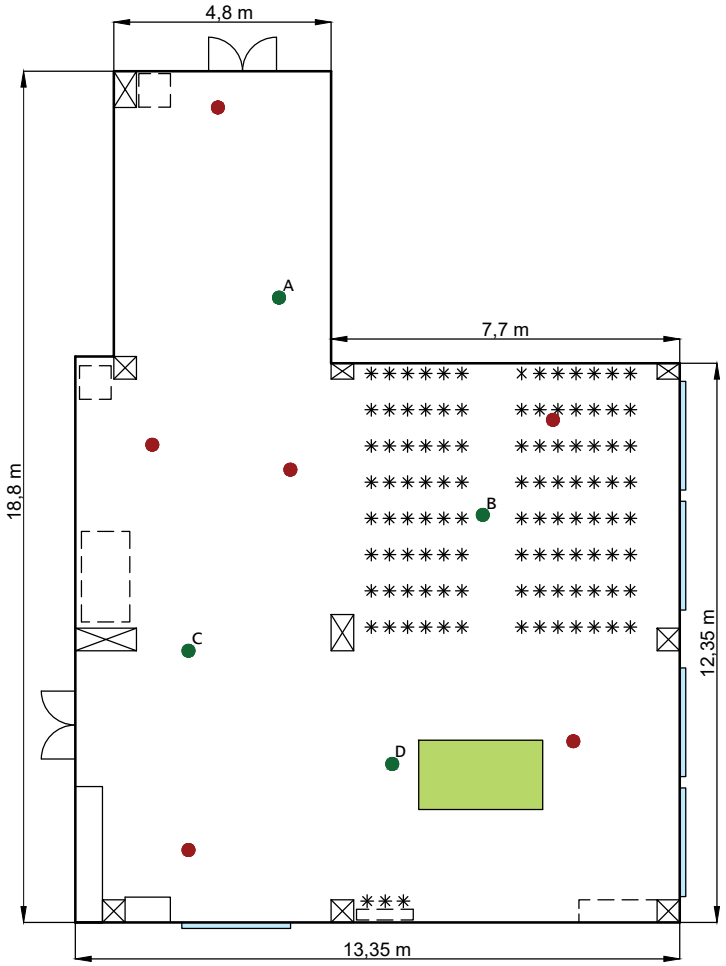
Dalším podstatným údajem je počet měřených vzorků RSSI hodnot za účelem lokalizace. Pro všechny konfigurace signálu LoRa® uvedených v této kapitole platí, že pro jednotlivé vysílače bylo naměřeno vždy 50 vzorků a z nich následně vypočtena průměrná hodnota RSSI. To znamená, že každá pozice byla lokalizována na základě tří vysílačů tj. 150 hodnot. Měření probíhala bez trvalé přítomnosti a pohybu jiných osob v přenosovém prostředí a zároveň v časech, kdy se v budově nacházelo minimální množství bezdrátových zařízení jako například chytrý telefon apod.

Podrobný popis každého prostředí a další informace o nastavených parametrech komunikace jsou obsaženy vždy v příslušné podkapitole daného prostředí.

6.2 Prostředí – Aula

První přenosové prostředí se nacházelo v prostorách školní auly s přibližnou rozlohou 200 m^2. Jednalo se o místnost, která svým charakterem ve většině případů umožňovala komunikaci s přímou viditelností (LOS). Půdorys místnosti ukazuje Obr. 6.2.

Při pohledu na půdorys si lze všimnout v levém spodním rohu dvou dřevěných skříní, které jsou 2,6 m vysoké a mají skleněné vitríny. Dalším nábytkem obsahující sklo je terárium ležící na stole v blízkosti vysílače `C`. V neposlední řadě lemují pravou stranu místnosti čtyři okna. Páté okno se nachází vedle vysokých skříní a napravo od něj klavír se židlemi. V levé horní části půdorysu se nacházejí dva objekty. Nejprve malá lednice stojící v zákrytu sloupu a dalším objektem je tiskárna u dveří. Dále je v pravém dolním rohu dřevěná skříňka s výbavou k dataprojektoru a dvěma reproduktorům umístěných u stropu místnosti. Zelený obdélník na půdorysu označuje skládací pingpongový stůl. Výrazným nábytkem jsou také dřevěné židle zabírající velkou část plochy ve 13 řadách. Ilustrační fotka místnosti je vidět na Obr. 6.3.



Obr. 6.2: Půdorys prostředí – Aula (● vysílače, ● lokalizované pozice, - vysoké skříně, - - objekty do výšky 1,2 m, ∗ židle, ■ pingpongový stůl, ■ okna).

Obr. 6.3: Ukázka části místnosti – Aula.

Path Loss Model

Měření za účelem získání path loss modelu proběhlo totožnou metodikou, která je popsána v podkapitole 5. Rozdíl nastal v počtu vzorků, jak bylo již v úvodu této kapitoly zmíněno. Každému bodu vzdálenosti odpovídala průměrná hodnota RSSI stanovená na základě 50 vzorků. Vzhledem k velikosti místnosti (18,8 x 13,35 m) bylo měření provedeno v rozsahu vzdálenosti 0,1 až 15 m.

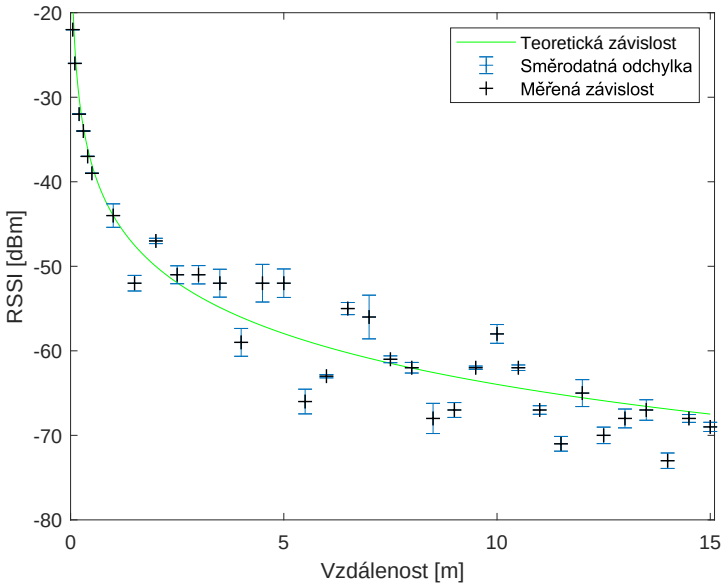
Výsledkem měření byly nejprve hodnoty parametrů n a A, které lze vidět v Tabulce 6.1. Zde najdeme i velikost tzv. koeficientu determinace (R-square), jehož hodnota odpovídá přesnosti výsledného modelu vůči měřené závislosti. V tomto případě se vypočtený model shodoval na 92%. Hodnota A byla experimentálně změřena zvlášť pro každou variantu konfigurace systémových parametrů, jelikož konfigurace přímo souvisí s vlastnostmi daného signálu. Z toho důvodu byla provedena lokalizace individuálně dle varianty konfigurace. Hodnota A činila -44 dBm pro prvních pět konfigurací signálu LoRa® a pro šestou variantu platilo $A = $ -43 dBm. Jedná se o medián naměřených hodnot, který při aplikaci vykazoval mírně vyšší přesnost výsledné lokalizace, než v případě použití průměrné hodnoty (-43,8 dBm). Rozdíl výsledných odchylek při využití průměru nebo mediánu činil průměrně pouze 0,1 m, tudíž by v tomto prostředí mohly být využity obě možnosti hodnot parametru A.

S využitím těchto parametrů a naměřených hodnot byl sestrojen Graf 6.4 ukazující měřený i teoretický průběh závislosti RSSI na vzdálenosti.

Na základě naměřených hodnot RSSI byla nalezena jim odpovídající hustota pravděpodobnosti RSSI (viz 6.5). Těmto hodnotám nejvíce odpovídalo normální

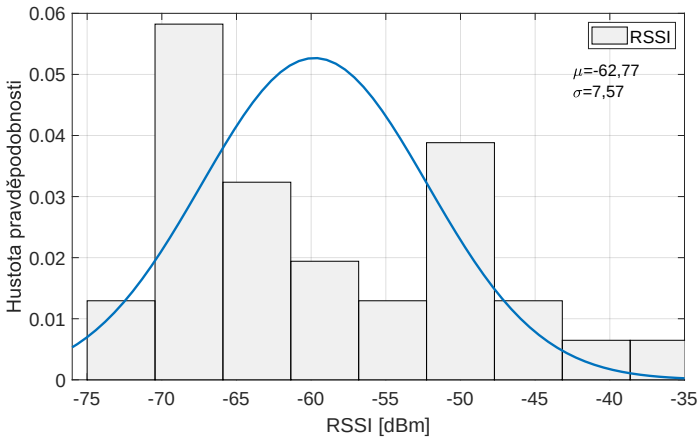
Tab. 6.1: Parametry path loss modelu – Aula

n	**A** [dBm]	**R-square**	
1.997	-44	0,928	92 %



Obr. 6.4: Závislost RSSI na vzdálenosti v prostředí – Aula.

(Gaussovo) rozdělení se střední hodnotou $\mu = -62{,}77$ a také směrodatnou odchylkou $\sigma = 7{,}57$. s tím souvisí také rozptyl hodnot, který činil 63,24. Rozdělení bylo aplikováno pro rozsah -75 až -40 dBm, což mírně převyšuje rozsah využívaný při lokalizaci. Můžeme tedy říci, že v prostředí Aula činila hodnota RSSI průměrně -62,77 dBm pro vzdálenosti do 15 m.



Obr. 6.5: Hustota pravděpodobnosti RSSI pro vzdálenosti 0,5-15 m – Aula.

Parametry komunikace

V tomto prostředí proběhly lokalizace s cílem porovnat technologii LoRa® s jinými modulacemi. Modul iM282A umožňuje navíc modulace FLRC a (G)FSK. Konfigurace signálu byly zvoleny s přihlédnutím na vlastnosti prostředí. v rámci měření došlo k využití LoRa® signálu ve dvou variantách. Konkrétně při nejrobustnější a nejméně odolné konfiguraci závislé na kombinaci BW a SF. Obdobně i modulace FLRC a (G)FSK byly aplikovány ve dvou krajních verzích. U nich byla dostupná kombinace BW a BR (Bit Rate), neboli datový tok. Konkrétní varianty konfigurací signálu LoRa® dle parametrů (kromě CR) ukazuje přehledně Tab. 6.2. Přenášená data nejsou pro účel lokalizace důležitá, proto byl kódový poměr nastaven na nejnižší hodnotu 4/5 v případě LoRa® technologie a $\mathrm{CR} = 1$ v případě modulace FLRC.

Tab. 6.2: Varianty konfigurací signálu v prostředí – Aula

Varianta	**1.**	**2.**	**3.**	**4.**	**5.**	**6.**
Modulace	LoRa®	LoRa®	FLRC	FLRC	(G)FSK	(G)FSK
Frekvence [GHz]	2,45 (1)	2,45 (1)	2,45 (1)	2,45 (1)	2,45 (1)	2,45 (1)
Šířka pásma [kHz]	1600	200	1200	300	2400	300
Činitel rozprostření	5	12	–	–	–	–
Datový tok [kb/s]	253,9	0,595	1300	260	2000	125
Vysílací výkon [dBm]	8	8	8	8	8	8

(1) $f_\mathrm{c} = 2\,450\,000\,122\,\mathrm{Hz}$

Vyhodnocení měření

Lokalizace proběhla pro šest náhodně vybraných pozic. K dosažení vyšší přesnosti lokalizace nebyly použity referenční vysílače tři, nýbrž čtyři – A, B, C, D. Nacházely se na souřadnicích $\mathbf{A}\,[4{,}5\,;13{,}8]$, $\mathbf{B}\,[9{,}0\,;9{,}0]$, $\mathbf{C}\,[2{,}5\,;6{,}0]$, $\mathbf{D}\,[7{,}0\,;3{,}5]$. Jejich umístění pro představu naznačuje i obrázek půdorysu (Obr. 6.2).

Navýšení počtu vysílačů bylo zvoleno z důvodu dosažení rovnoměrnějšího pokrytí signálem pro všechny pozice, neboť místnost byla členitá a měla velkou rozlohu. V případě aplikování trilaterace (viz podkapitola 5) je zapotřebí tří vysílačů, tudíž čtyři vysílače nabízí různé trojice, respektive kombinace vysílačů použitých pro výpočet polohy. To znamená, že tento způsob umožňuje získat pro jednu pozici čtyři různé výsledky lokalizace, z nichž je následně vybrán ten nejpřesnější. Například v případě 2. varianty konfigurace (LoRa® - $\mathrm{BW} = 200\,\mathrm{kHz}$, $\mathrm{SF} = 12$) rozdíl

mezi hodnotou odchylky nejpřesnější a nejméně přesné kombinace vysílačů dosahoval průměrně 5,6 m. V této místnosti nejčastěji dosahovala nejvyšší odchylky lokalizace kombinace složená z vysílačů A, B, D (viz Obr. 6.2). Z měření je patrné, že tímto způsobem lze efektivně zpřesnit lokalizaci. Zároveň to dokazuje skutečnost, že přesnost výsledné lokalizace závisí na vhodném rozmístění referenčních vysílačů.

Analýzy výsledků

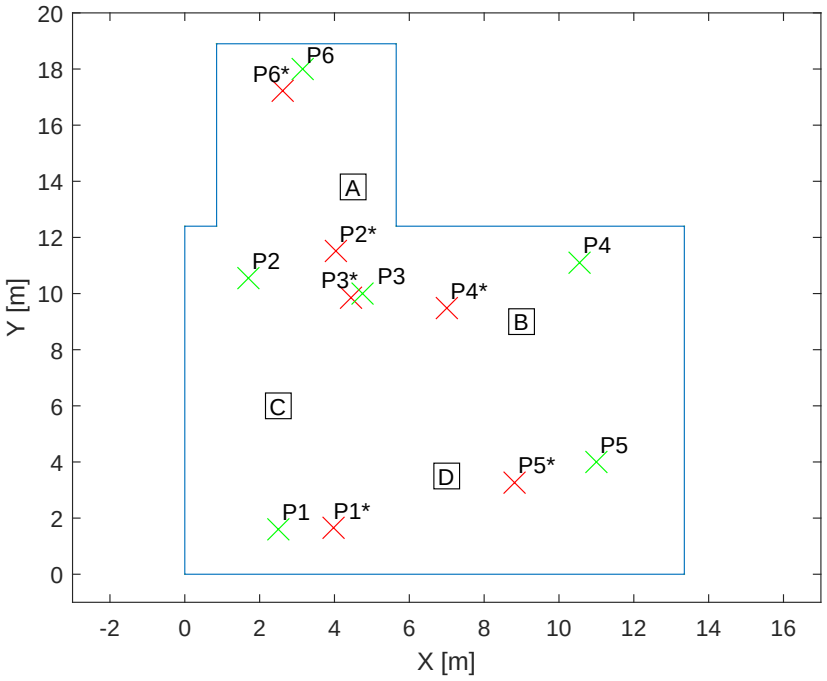
K bližší představě konkrétních pozic, respektive jejich vypočtených a skutečných poloh, slouží Obr. 6.6 až Obr. 6.11. Ty nabízí grafické znázornění výsledků jednotlivých konfigurací signálu LoRa®.

Na Obr. 6.6 a 6.7 lze vidět výsledky pro dvě krajní varianty konfigurace z hlediska robustnosti LoRa® signálu. Tyto varianty se v přesnosti výrazně neliší, avšak na pozicích `P4` a `P5` se většími odchylkami projevila nižší odolnost signálu 1. varianty konfigurace (BW = 1600 kHz, SF = 5). Tyto pozice se nacházely na straně u oken a také v blízkosti objektů (židle a pingpongový stůl), což mohlo mít vliv na větší četnost odrazů signálu na rozdíl od ostatních pozic.

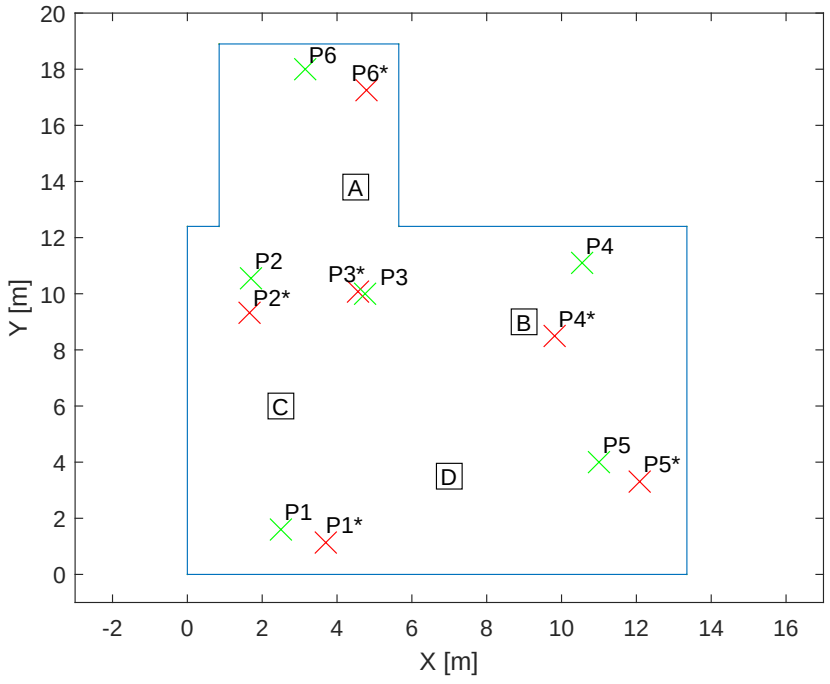
Ve výsledcích týkajících se modulace FLRC (Obr. 6.8, Obr. 6.9) nastávají podobné rozdíly mezi konfiguracemi jako u technologie LoRa®. Lze si všimnout, že 4. varianta konfigurace (BW = 300 kHz, BR = 260 kb/s) dokonce vykazuje nízkou odchylku i na pozicích `P4` a `P5`. Obr. 6.10 a 6.11 se týkají lokalizace pomocí modulace (G)FSK. Zde na rozdíl od předchozích variant proběhla přesněji lokalizace při využití větší šířky pásma tzn. 5. varianta konfigurace (BW = 2400 kHz, BR = 2000 kb/s). Tato technologie byla také výrazně nepřesná v případě pozice `P4`, ba dokonce dosahovala nejvyšších odchylek ze všech variant.

Přesnost lokalizace pro šest konfigurací signálu LoRa® lze posoudit dle vypočtených odchylek znázorňující rozdíl mezi vypočtenými a skutečnými polohami. Souhrn výsledných odchylek pro jednotlivé pozice nabízí Graf 6.12.

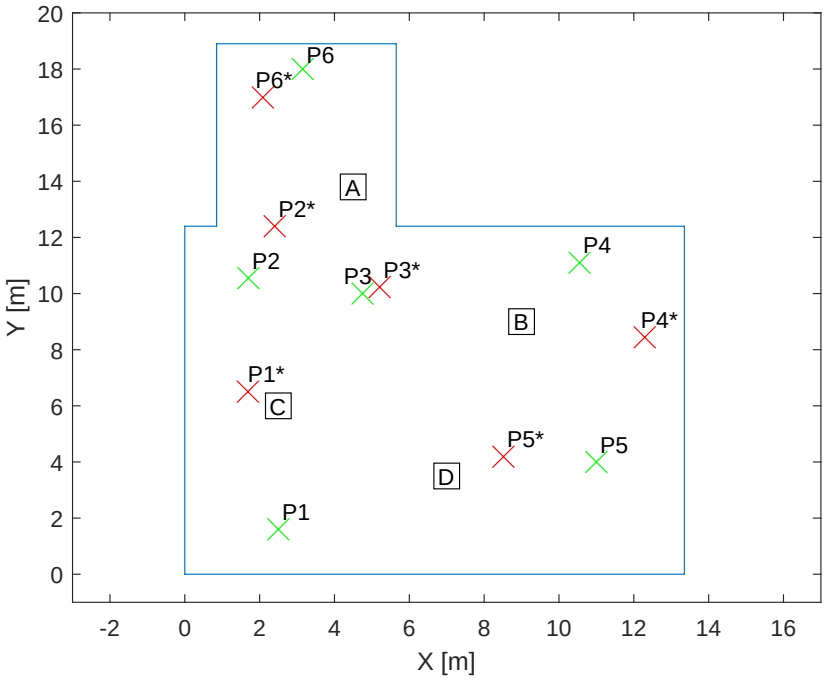
Detailní výsledky obsahují tabulky v příloze A.1, kde jsou přesné údaje o skutečných a vypočtených souřadnicích a k nim příslušných odchylkách.



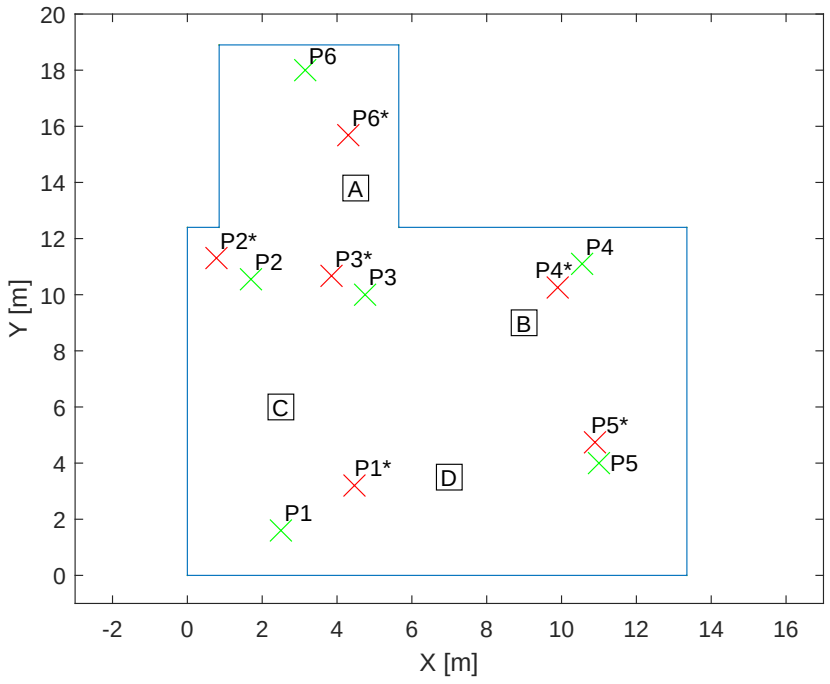
Obr. 6.6: Polohy lokalizovaných pozic v prostředí Aula – 1. varianta konfigurace (LoRa® - BW = 1600 kHz, SF = 5) (× – skutečná poloha, × – vypočtená poloha).



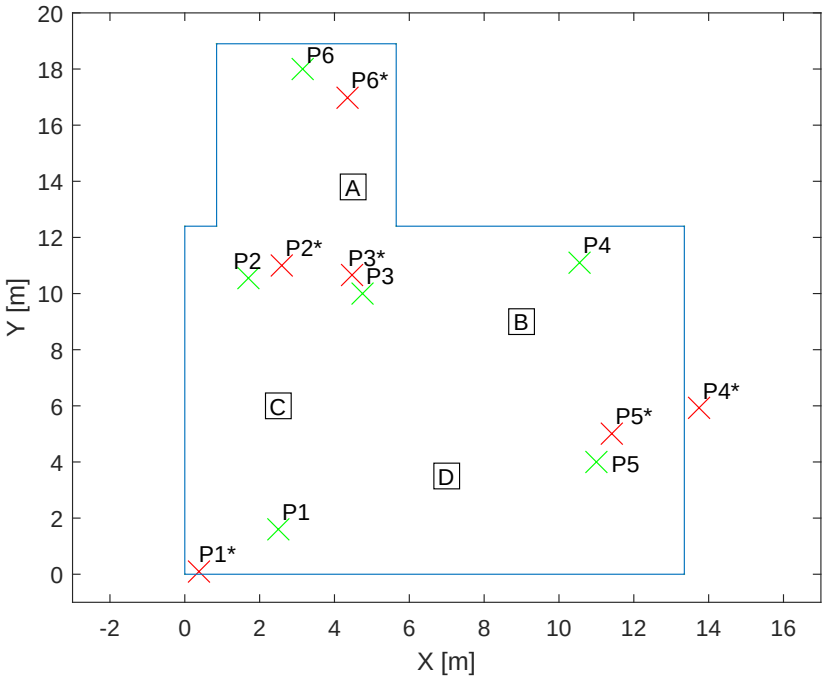
Obr. 6.7: Polohy lokalizovaných pozic v prostředí Aula – 2. varianta konfigurace (LoRa® - BW = 200 kHz, SF = 12) (× – skutečná poloha, × – vypočtená poloha).



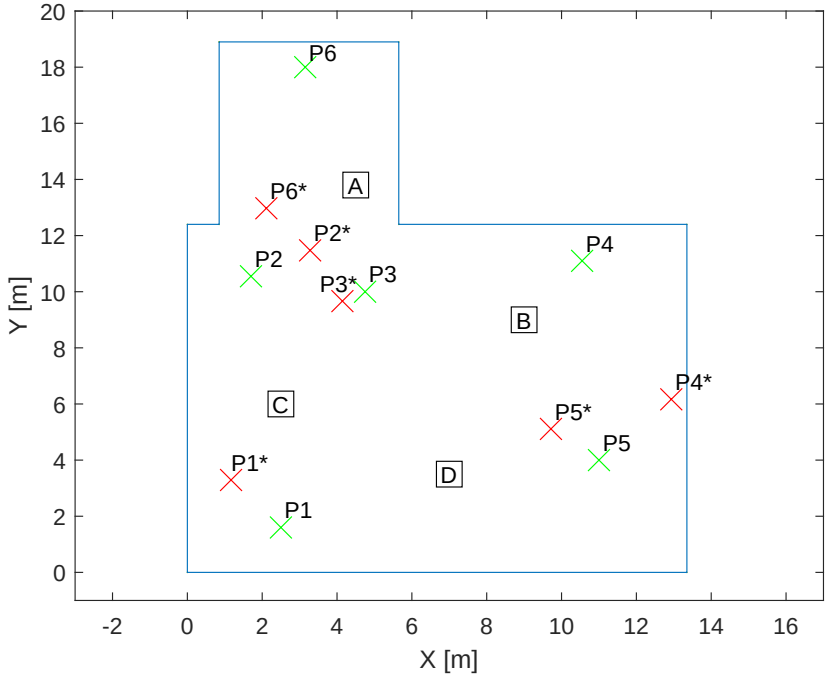
Obr. 6.8: Polohy lokalizovaných pozic v prostředí Aula – 3. varianta konfigurace (FLRC - BW = 1200 kHz, BR = 1300) (× – skutečná poloha, × – vypočtená poloha).



Obr. 6.9: Polohy lokalizovaných pozic v prostředí Aula – 4. varianta konfigurace (FLRC - BW = 300 kHz, BR = 260) (× – skutečná poloha, × – vypočtená poloha).

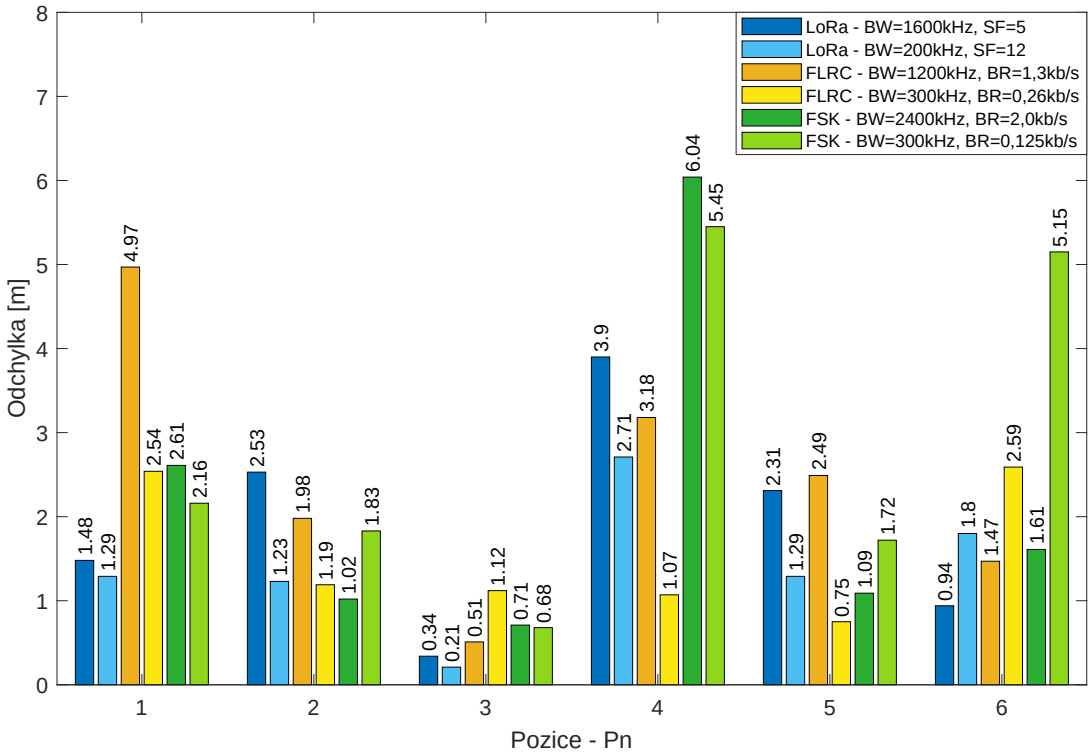


Obr. 6.10: Polohy lokalizovaných pozic v prostředí Aula – 5. varianta konfigurace ((G)FSK - BW = 2400 kHz, BR = 2000) (× – skutečná poloha, × – vypočtená poloha).



Obr. 6.11: Polohy lokalizovaných pozic v prostředí Aula – 6. varianta konfigurace ((G)FSK - BW = 300 kHz, BR = 125) (× – skutečná poloha, × – vypočtená poloha).

Na Obr. 6.12 můžeme vidět přímé porovnání veškerých variant konfigurace systémových parametrů.



Obr. 6.12: Odchylky lokalizace jednotlivých pozic pro všechny varianty konfigurací v přenosovém prostředí – Aula.

V Tab. 6.3 jsou hodnoty průměrných odchylek pro jednotlivé varianty. Údaje v této tabulce potvrzují, že technologie LoRa® a FLRC, respektive 2. a 4. varianta vykazovaly obdobnou přesnost lokalizace. Dále je patrné, že i nejméně robustní nastavení LoRa® (kombinace BW = 1600 kHz, SF = 5) umožnilo lokalizaci s odchylkami v průměru nižší než 2 m.

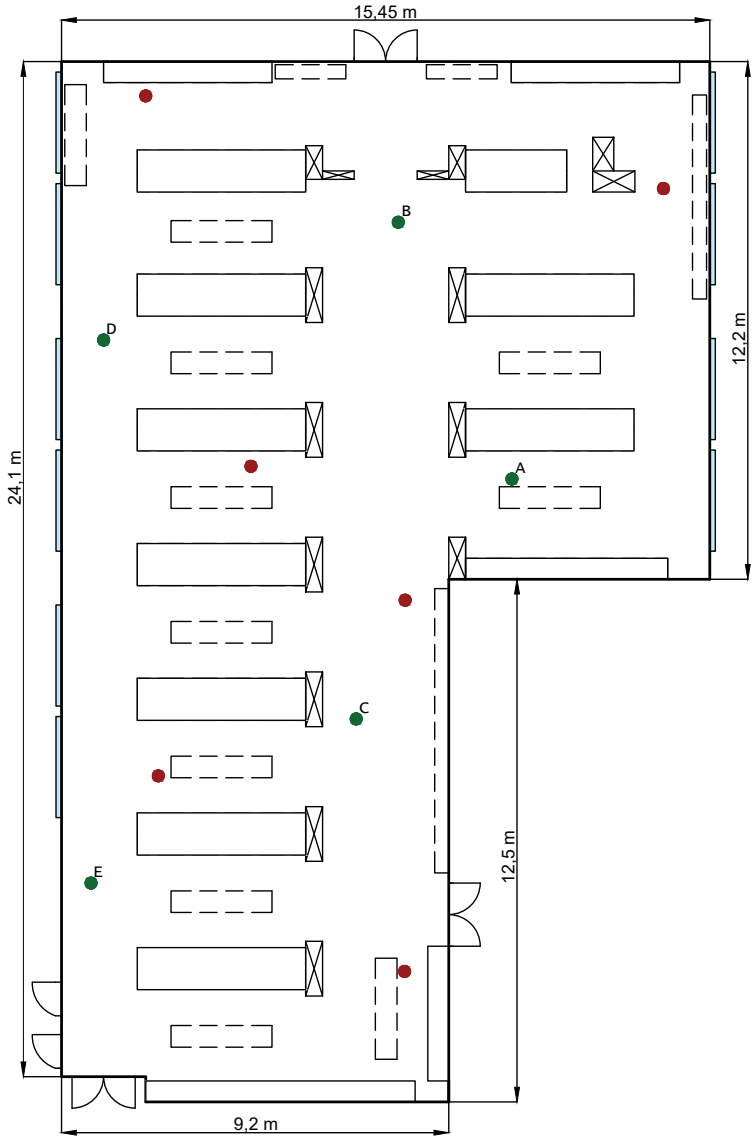
Tab. 6.3: Průměrné odchylky jednotlivých variant konfigurací signálu – Aula

Varianta konfigurace	**Průměrná odchylka [m]**
1. LoRa® - BW = 1600 kHz, SF = 5	1,916
2. LoRa® - BW = 200 kHz, SF = 12	1,419
3. FLRC - BW = 1200 kHz, BR = 1300 kb/s	2,434
4. FLRC - BW = 300 kHz, BR = 260 kb/s	1,542
5. (G)FSK - BW = 2400 kHz, BR = 2000 kb/s	2,180
6. (G)FSK - BW = 300 kHz, BR = 125 kb/s	2,832

6.3 Prostředí – Šatna

Další prostředí zvolené pro měření byla šatna školy. Místnost s rozlohou kolem 300 m^2 byla zároveň z hlediska plochy největším přenosovým prostředím, která byla testována v této práci. Komunikace během měření probíhala převážně bez přímé viditelnosti (NLOS), neboť se zde nacházelo velké množství překážek.

Na půdorysu (Obr. 6.13) si lze všimnout především šatních skříněk, jenž jsou situovány v řadě za sebou po celé délce místnosti. Jednalo se o celokovové skříňky s výškou 1,8 m. Dalšími objekty jsou nízké (výška 0,4 m) kovové lavičky, které se nacházejí nejen mezi skříňkami, ale také podél zdi u dveří vpravo dole, u dveří nahoře a dále pod okny napravo a nalevo v horní části půdorysu. Více na Obr. 6.14.



Obr. 6.13: Půdorys prostředí – Šatna (● vysílače, ● lokalizované pozice, - - lavičky, - šatní skříně, ■ okna).

Obr. 6.14: Ukázka části místnosti – Šatna.

Path Loss Model

Podobně jako u předchozího prostředí proběhlo měření za účelem získání path loss modelu metodikou, která je popsána v podkapitole 5. Každá RSSI hodnota je výsledkem mediánu 50 vzorků RSSI. Vzhledem k velikosti místnosti (24,1 x 15,45 m) bylo měření provedeno v rozsahu vzdálenosti 0,2 až 20 m.

V prostředí Šatna byl navíc aplikován path loss model s Gaussovým normálním rozdělením, jelikož charakter místnosti ve většině případů umožňoval pouze komunikaci bez přímé viditelnosti (NLOS). Rovnice 5.2 byla tedy rozšířena o funkci hustoty pravděpodobnosti vyjádřenou rovnicí 6.1 [41].

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}\frac{(x-\mu)^2}{\sigma^2}}, \tag{6.1}$$

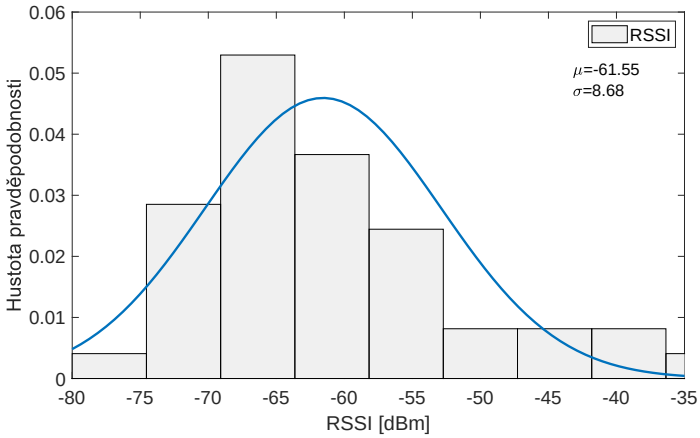
kde μ je dána rovnicí 6.2 a jedná se o střední hodnotu naměřených RSSI hodnot. Proměnná σ představuje směrodatnou odchylku (viz rovnice 6.3).

$$\mu = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} RSSI_{\mathrm{i}} \tag{6.2}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}(RSSI_{\mathrm{i}} - \mu)^2} \tag{6.3}$$

Hustotu pravděpodobnosti RSSI pro toto prostředí ukazuje obrázek 6.15. Histogramu hodnot RSSI v rozsahu -80 až -40 dBm nejvíce odpovídalo rozdělení se směrodatnou odchylkou $\sigma = 8{,}68$ a střední hodnotou $\mu = -61{,}55$. V neposlední řadě rozptyl

hodnot činil 75,34. Nicméně hodnoty RSSI pro path loss model byly měřeny v levé části místnosti tj. v prostoru mezi skříňkami a stěnou s okny. Skříňky tedy nestály přímo v přenosové cestě, proto je závislost RSSI na vzdálenosti méně zatížena útlumem překážek.



Obr. 6.15: Hustota pravděpodobnosti RSSI pro vzdálenosti 0,5-20 m – Šatna.

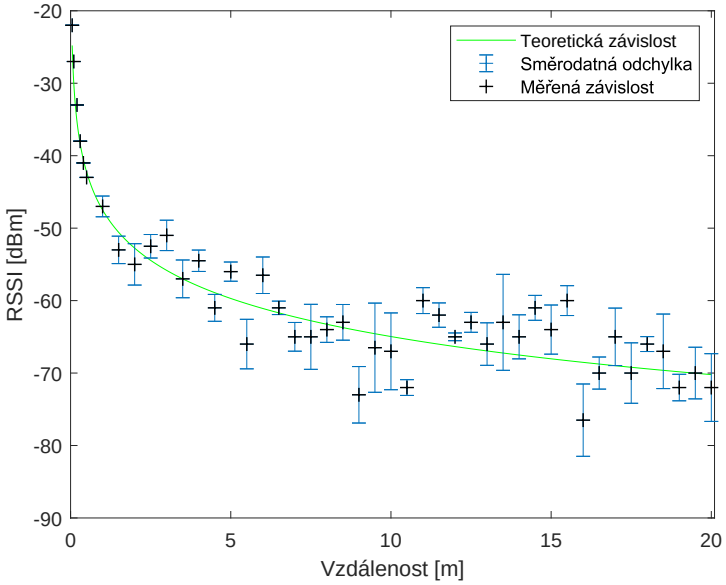
Experimentálním měřením byly zjištěny hodnoty parametrů n a A, které lze vidět v Tabulce 6.4. Zde najdeme i velikost tzv. koeficientu determinace (R-square). Vypočtený model se shodoval na 90% s měřenou závislostí.

Dle [41] má hustota pravděpodobnosti RSSI hodnot v path loss modelu menší vliv na přesnost lokalizace, než hodnota RSSI měřená ve vzdálenosti 1 m od vysílače tj. parametr A. Hodnota A odpovídala v tomto prostředí nikoliv mediánu (-47 dBm) hodnot RSSI, nýbrž průměru (-47,54 dBm). Výsledky lokalizace, při aplikování průměrné hodnoty, totiž dosahovaly nižších odchylek oproti lokalizaci, kdy byl využit medián. Například u 1. varianty konfigurace (BW = 200 kHz, SF = 12) činila průměrná odchylka 1,445 m při A = -47,54 m, zatímco při A = -47 m se odchylka zvýšila na 1,912 m. Velikost tohoto parametru byla změřena zvlášť pro každou variantu konfigurace systémových parametrů. Hodnota A činila shodně -47,54 dBm pro 1. až 7. variantu měření. Další varianty pracovaly s různými vysílacími výkony, proto se také průměrné hodnoty lišily. Konkrétně A = -56,40 dBm pro 8. variantu, A = -64,07 dBm pro 9. variantu a A = -43 dBm pro 10. variantu měření.

Tab. 6.4: Parametry path loss modelu – Šatna

n	**A** [dBm]	**R-square**	
1.746	-47.54	0,904	90 %

S využitím těchto parametrů a naměřených hodnot byl sestrojen Graf 6.16, jenž ukazuje teoretickou i měřenou závislost RSSI na vzdálenosti a společně s ní také směrodatné odchylky RSSI hodnot jednotlivých bodů vzdálenosti.



Obr. 6.16: Závislost RSSI na vzdálenosti – Šatna.

Parametry komunikace

Toto prostředí nabízelo možnost využít systém LoRa® k lokalizaci v místnosti obsahující velké množství překážek. Úplně první varianta konfigurace je jedinou konfigurací, která pracovala s frekvencí $f_c = 2\,479\,999\,939$ Hz. Jedná se o nejvyšší hodnotu kmitočtu, kterou modul iM282A umožňuje. Především se ale tento kmitočet nacházel lehce mimo dosah místních Wi-Fi sítí, přesněji řečeno na okraji jejich frekvenčních pásem. Konkrétně dvě Wi-Fi sítě pracovaly tak, že jejich horní hranice pásma byla vzdálená o 3 MHz od našeho LoRa® signálu, přičemž jejich síla signálu, naměřená v místnosti pomocí přijímače v mobilu, činila -85 a -87 dBm. Na základě zmíněných informací lze považovat tuto variantu konfigurace (BW = 200 kHz, SF = 12, $f_c = 2{,}479$ GHz) signálu LoRa® za nacházející se mimo dosah okolních Wi-Fi sítí.

Všechny ostatní varianty konfigurací využívali $f_c = 2\,450\,000\,122$ Hz. S cílem zjistit přibližnou závislost vlivu SF na hodnoty výsledných odchylek byly realizovány varianty 4., 5., 6. a 7. při konstantní BW = 1600 kHz a hodnotách SF = 5, 8, 10 a 12.

Další skupina variant byla zvolena za účelem lokalizace s různými vysílacími výkony. Při kombinaci BW = 1600 kHz, SF = 12 byl pro 8. variantu zvolen výkon 0 dBm, pro 9. variantu -8 dBm a -18 dBm pro poslední 10. variantu měření. Kombinace BW = 1600 kHz, SF = 12 byla zvolena z důvodu snížení doby měření, neboť větší

šířka pásma souvisí s vyšším datovým tokem a tím pádem i časově rychlejším přenosem zpráv. Tato kombinace sice není nejrobustnější konfigurací LoRa® signálu, ale na základě měření bylo zjištěno, že průměrná odchylka této konfigurace se výrazně neliší ($\Delta = 0{,}162\,\mathrm{m}$) od konfigurace $\mathrm{BW} = 200$, $\mathrm{SF} = 12$.

Přehled nastavení systémových parametrů (kromě CR), pro všechny konfigurace signálu LoRa®, obsahuje Tab. 6.5. Přenášená data nejsou pro účel lokalizace důležitá, proto byl kódový poměr nastaven na nejnižší hodnotu 4/5.

Tab. 6.5: Varianty konfigurací signálu LoRa® v prostředí – Šatna

Varianta	**Modulace**	**Frekvence** [GHz]	**Šířka pásma** [kHz]	**Činitel rozprostření**	$\mathbf{P}_{\mathrm{Tx}}$ [dBm]
1.	LoRa®	2,48 (1)	200	12	8
2.	LoRa®	2,45 (2)	200	12	8
3.	LoRa®	2,45 (2)	200	5	8
4.	LoRa®	2,45 (2)	1600	5	8
5.	LoRa®	2,45 (2)	1600	8	8
6.	LoRa®	2,45 (2)	1600	10	8
7.	LoRa®	2,45 (2)	1600	12	8
8.	LoRa®	2,45 (2)	1600	12	0
9.	LoRa®	2,45 (2)	1600	12	-8
10.	LoRa®	2,45 (2)	1600	12	-18

(1) $f_{\mathrm{c}} = 2\,479\,999\,939\,\mathrm{Hz}$, (2) $f_{\mathrm{c}} = 2\,450\,000\,122\,\mathrm{Hz}$

Vyhodnocení měření

Lokalizace proběhla opět pro šest náhodně vybraných pozic. Pro dosažení vyšší přesnosti lokalizace nebyly použity referenční vysílače tři, ale pět – A, B, C, D, E. Nacházely se na souřadnicích $\mathbf{A}\,[10{,}7\,;14{,}2\,]$, $\mathbf{B}\,[8{,}0\,;20{,}3\,]$, $\mathbf{C}\,[7{,}0\,;8{,}5\,]$, $\mathbf{D}\,[1{,}0\,;17{,}5\,]$, $\mathbf{E}\,[0{,}7\,;4{,}6\,]$. Jejich umístění pro představu naznačuje i obrázek půdorysu (Obr. 6.13).

Navýšení počtu vysílačů bylo již zdůvodněno u předchozího přenosového prostředí viz část kapitoly 6.2. Nicméně v tomto prostředí byl přidán ještě další vysílač, poněvadž se jedná o velmi členitý prostor a současně má místnost velkou rozlohu. Při pěti dostupných vysílačích vzniká celkem jedenáct možných výsledků trilaterace. Především to umožnilo zvolit vhodnou kombinaci vysílačů podle toho, v které části místnosti se lokalizovaná pozice nacházela.

Analýzy výsledků

K bližší představě výsledků slouží grafické znázornění na Obr. 6.17 až Obr. 6.26, které pro jednotlivé konfigurace signálu LoRa® ilustrují lokalizované a skutečné polohy.

První konfigurace signálu LoRa® (Obr. 6.17) představuje nejpřesnější případ lokalizace v prostředí Šatna. Společně s 2. variantou (Obr. 6.18) bylo cílem porovnat lokalizaci pomocí systému LoRa® mimo dosah WiFi sítí a naopak při koexistenci s Wi-Fi. Lze si všimnout, že mírně nižší odchylky nastaly u 1. varianty, která využívala pracovní frekvenci s odstupem od pásma Wi-Fi. Nicméně rozdíl mezi variantami není příliš velký, což mohlo být ovlivněno tím, že u 1. varianty byl frekvenční odstup Wi-Fi pouze o 3 MHz.

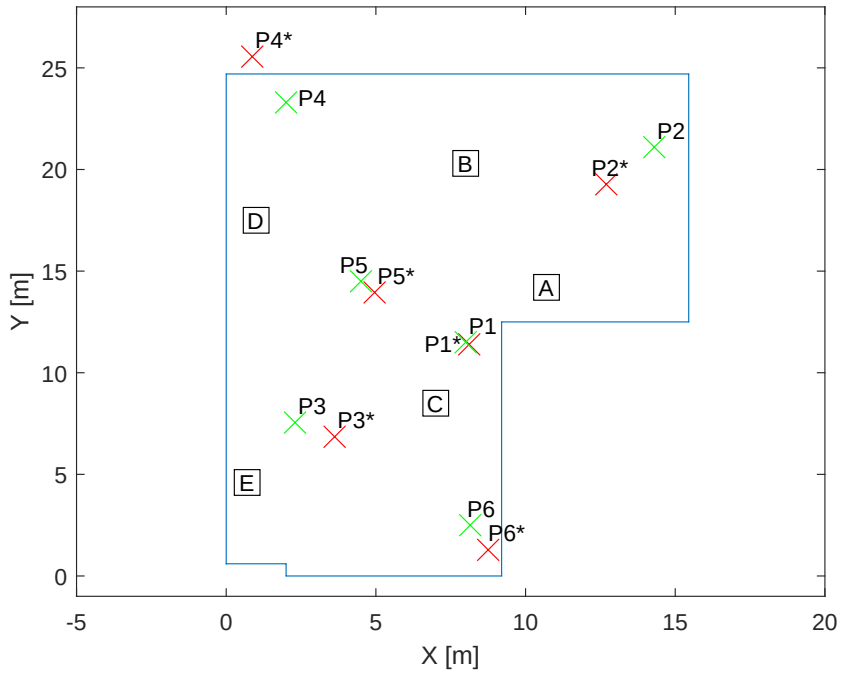
Z výsledků měření pro různé konfigurace signálu LoRa® je patrné, že k nejvyšším odchylkám docházelo u pozice `P2`. V přenosové cestě k přijímači se nejenže nacházelo mnoho překážek, ale také byla tato pozice umístěna v rohu místnosti mezi sloupem a stěnou s okny (viz půdorys na Obr 6.13). Zmíněné faktory měly pravděpodobně vliv na útlum a odrazy signálu. Výkyvy oproti jiným pozicím vykazovaly také výsledky v případě pozice `P6`. Pozice se nacházela v rohu místnosti, těsně vedle kovové lavičky a zároveň obklopena ze dvou stran celokovovými skříňkami. Dalším důvodem, který mohl mít za následek zvýšené odchylky lokalizace, byl charakter přenosové cesty mezi přijímačem a vysílači B, C. Tyto vysílače a pozice `P6` se nalézaly v hlavním koridoru místnosti bez překážek, proto hodnoty RSSI v těchto případech byly často nižší než by se na daných vzdálenostech dle path loss modelu očekávalo.

Na Obr. 6.20 až 6.23 lze vidět výsledky pro varianty s různými hodnotami SF. Rozdíly v odchylkách jednotlivých variant konfigurací jsou více patrné v číselně vyjádřených výsledcích. Závislost průměrné odchylky na konkrétní nastavené hodnotě SF ukazuje Graf 6.28.

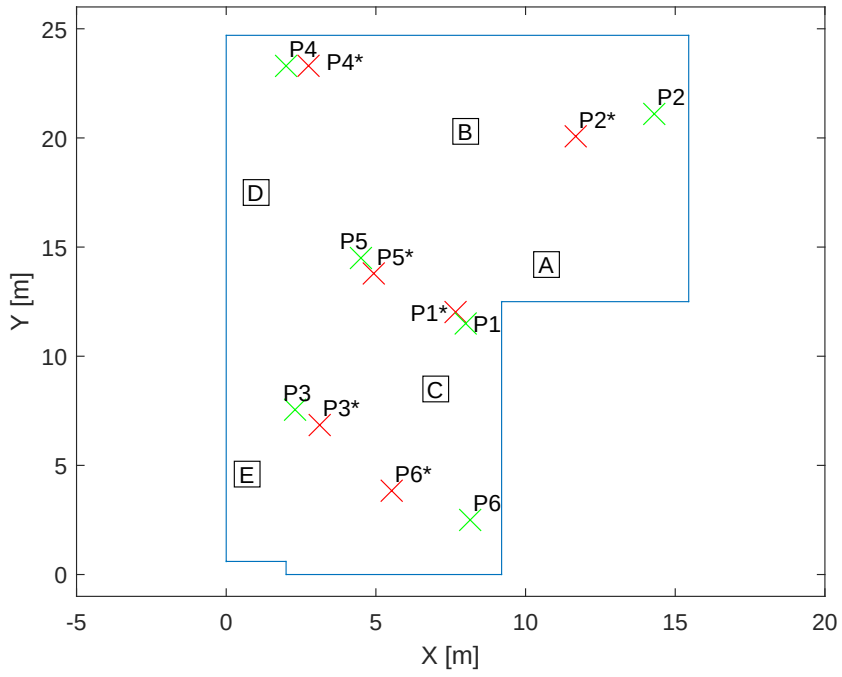
Výsledky konfigurací s různými vysílacími výkony jsou k vidění na Obr. 6.23 až Obr. 6.26. Z obrázků je jasně patrné, že s nižším vysílacím výkonem roste také odchylka mezi skutečnou a vypočtenou polohou. Více o této závislosti vyplývá z Grafu 6.29.

Rozdíly v odchylkách jednotlivých variant konfigurací můžeme porovnat číselně. Přehled odchylek nabízí Obr. 6.27, kde jsou výsledky lokalizace na jednotlivých pozicích pro všechny konfigurace signálu LoRa®.

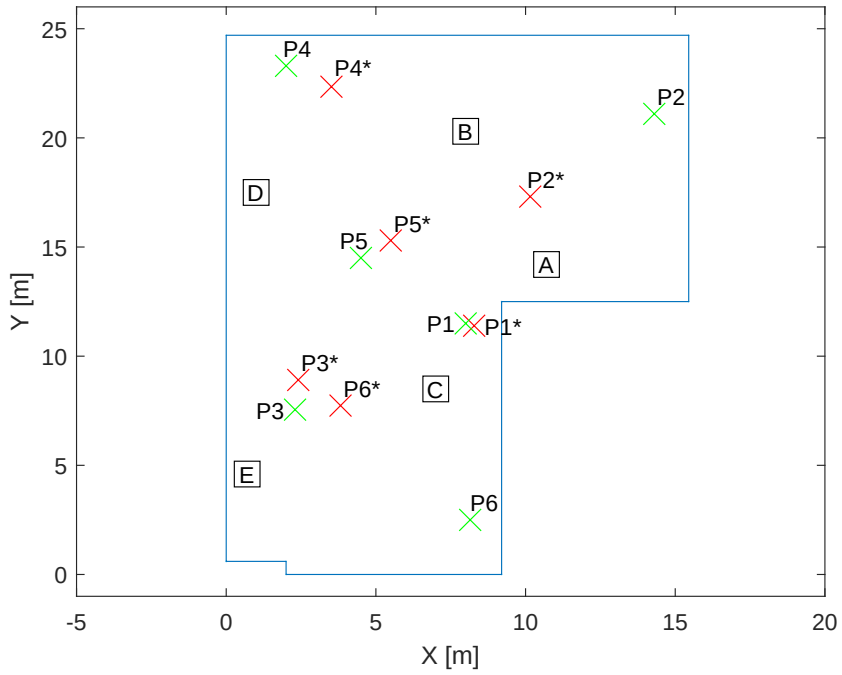
Detailní výsledky obsahují tabulky v příloze A.2, kde jsou přesné údaje o skutečných a vypočtených souřadnicích a k nim příslušných odchylkách.



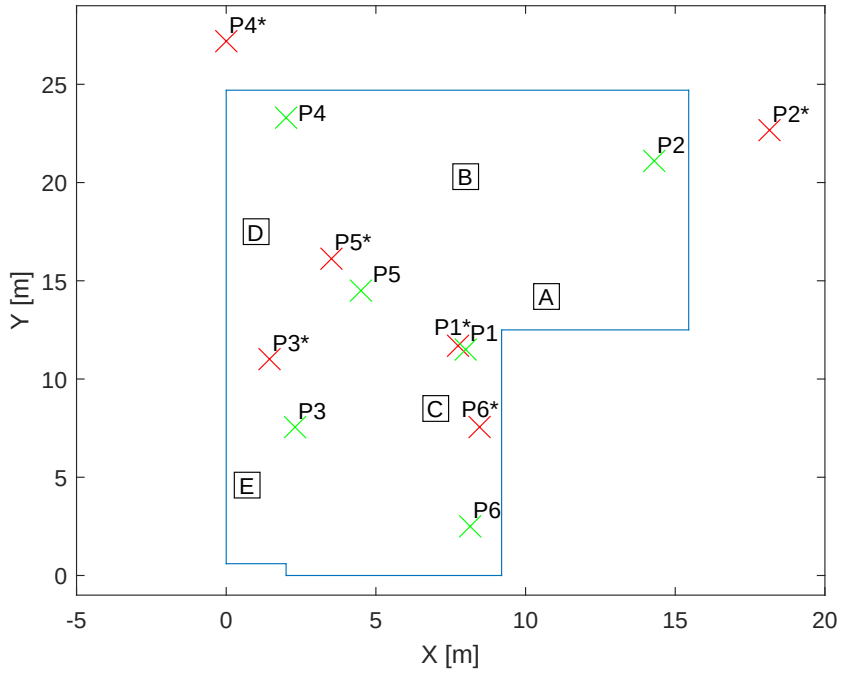
Obr. 6.17: Polohy lokalizovaných pozic v prostředí Šatna – 1. varianta konfigurace (LoRa® - BW = 200 kHz, SF = 12, f_c = 2,479 999 939 Hz) (× – skutečná poloha, × – vypočtená poloha).



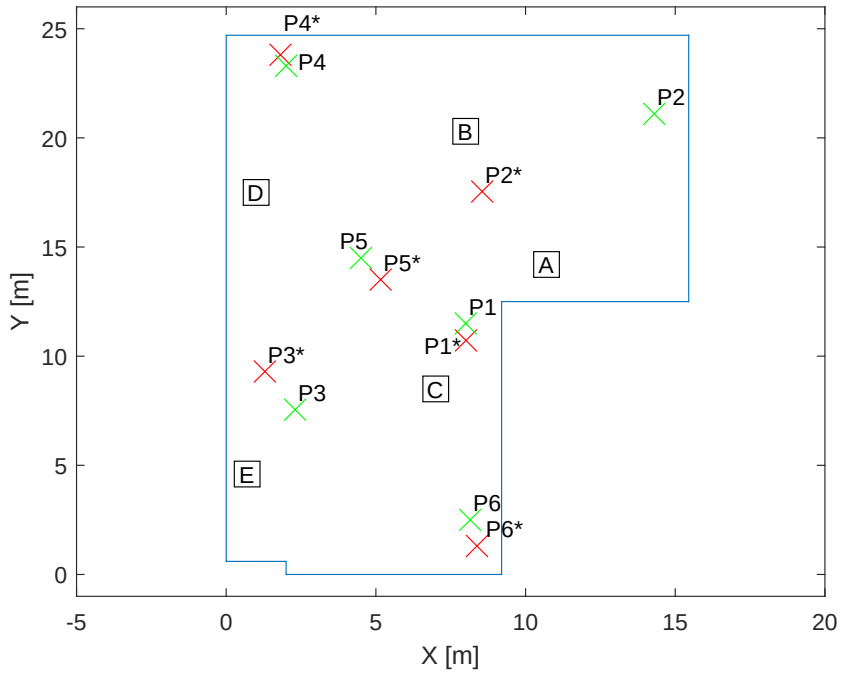
Obr. 6.18: Polohy lokalizovaných pozic v prostředí Šatna – 2. varianta konfigurace (LoRa® - BW = 200 kHz, SF = 12, f_c = 2 450 000 122 Hz) (× – skutečná poloha, × – vypočtená poloha).



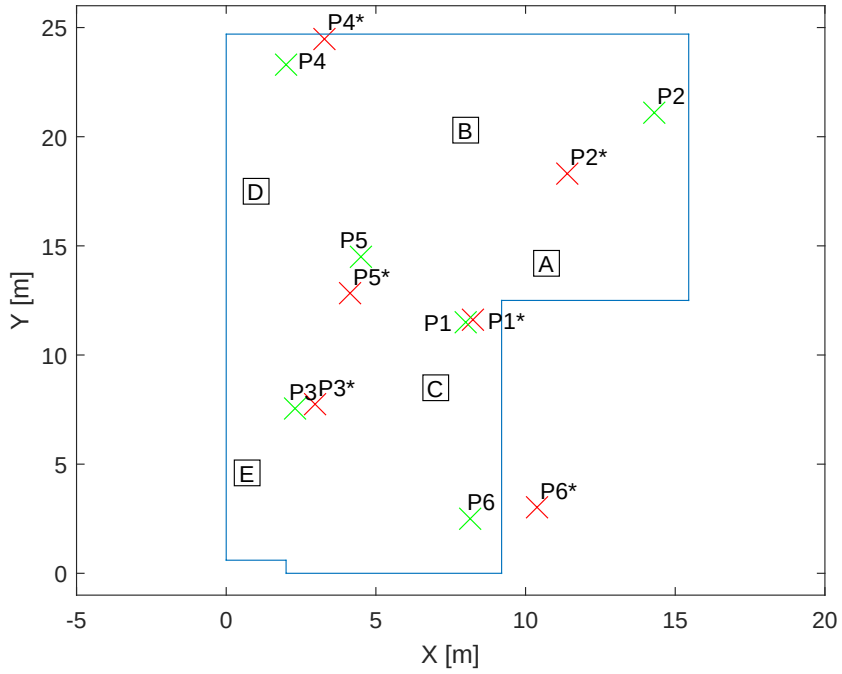
Obr. 6.19: Polohy lokalizovaných pozic v prostředí Šatna – 3. varianta konfigurace (LoRa® - BW = 200 kHz, SF = 5) (× – skutečná poloha, × – vypočtená poloha).



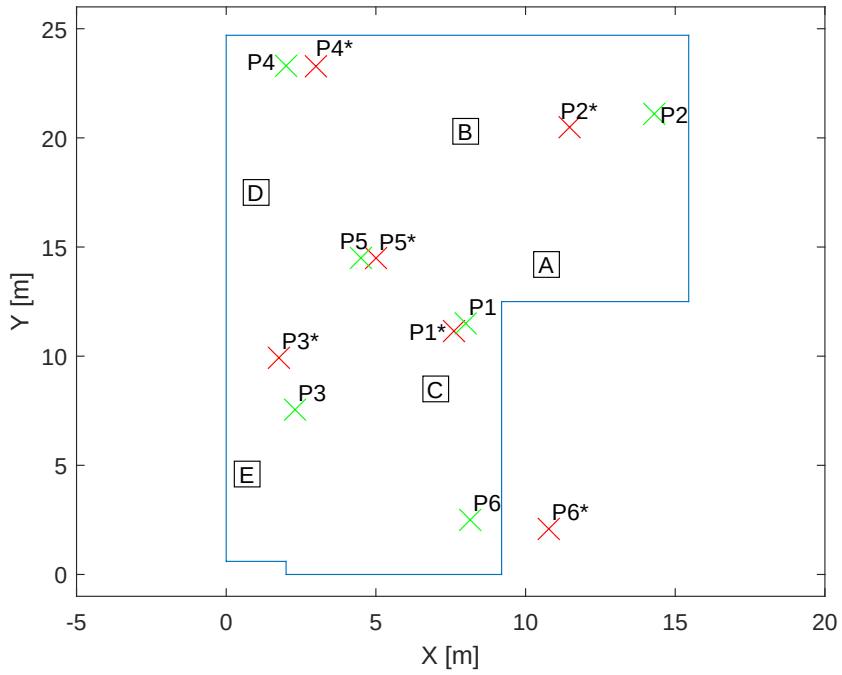
Obr. 6.20: Polohy lokalizovaných pozic v prostředí Šatna – 4. varianta konfigurace (LoRa® - BW = 1600 kHz, SF = 5) (× – skutečná poloha, × – vypočtená poloha).



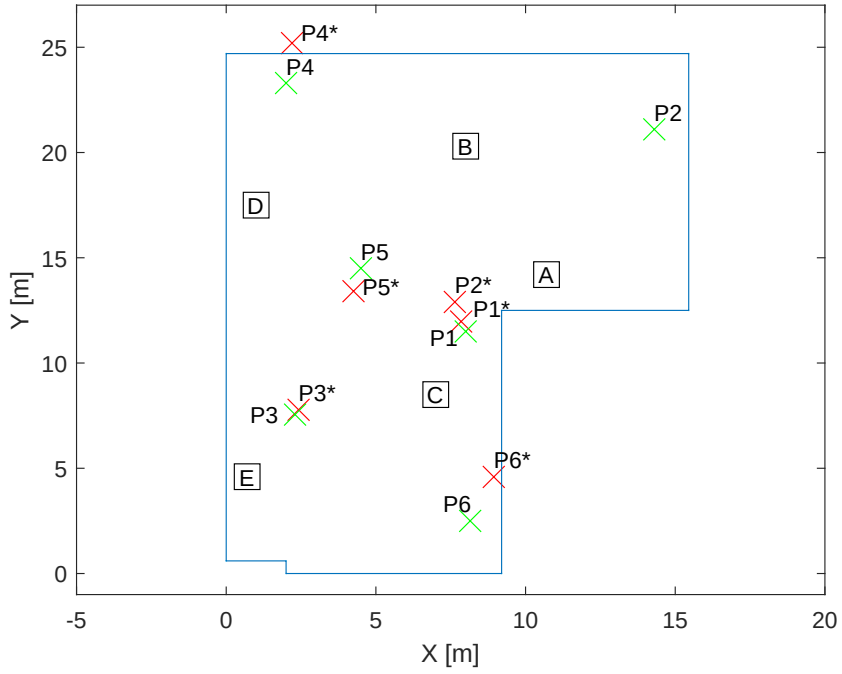
Obr. 6.21: Polohy lokalizovaných pozic v prostředí Šatna – 5. varianta konfigurace (LoRa® - BW = 1600 kHz, SF = 8) (× – skutečná poloha, × – vypočtená poloha).



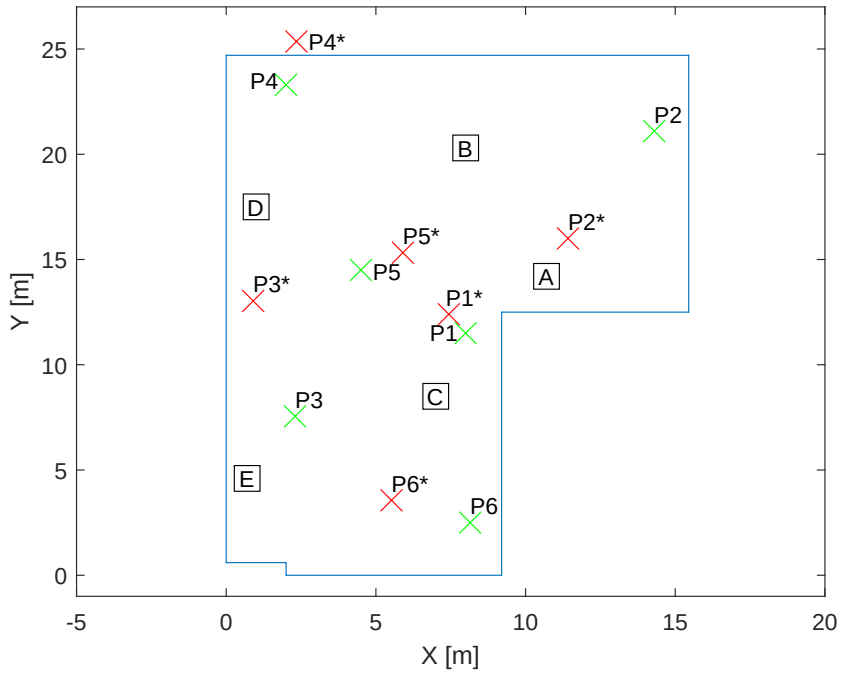
Obr. 6.22: Polohy lokalizovaných pozic v prostředí Šatna – 6. varianta konfigurace (LoRa® - BW = 1600 kHz, SF = 10) (× – skutečná poloha, × – vypočtená poloha).



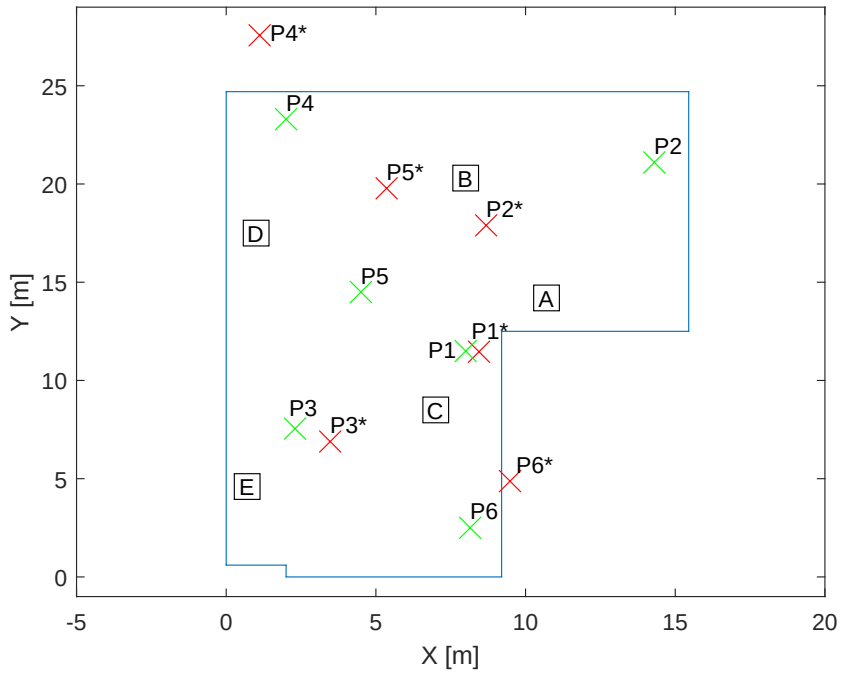
Obr. 6.23: Polohy lokalizovaných pozic v prostředí Šatna – 7. varianta konfigurace (LoRa® - BW = 1600 kHz, SF = 12, P_{Tx} = 8 dBm) (× – skutečná poloha, × – vypočtená poloha).



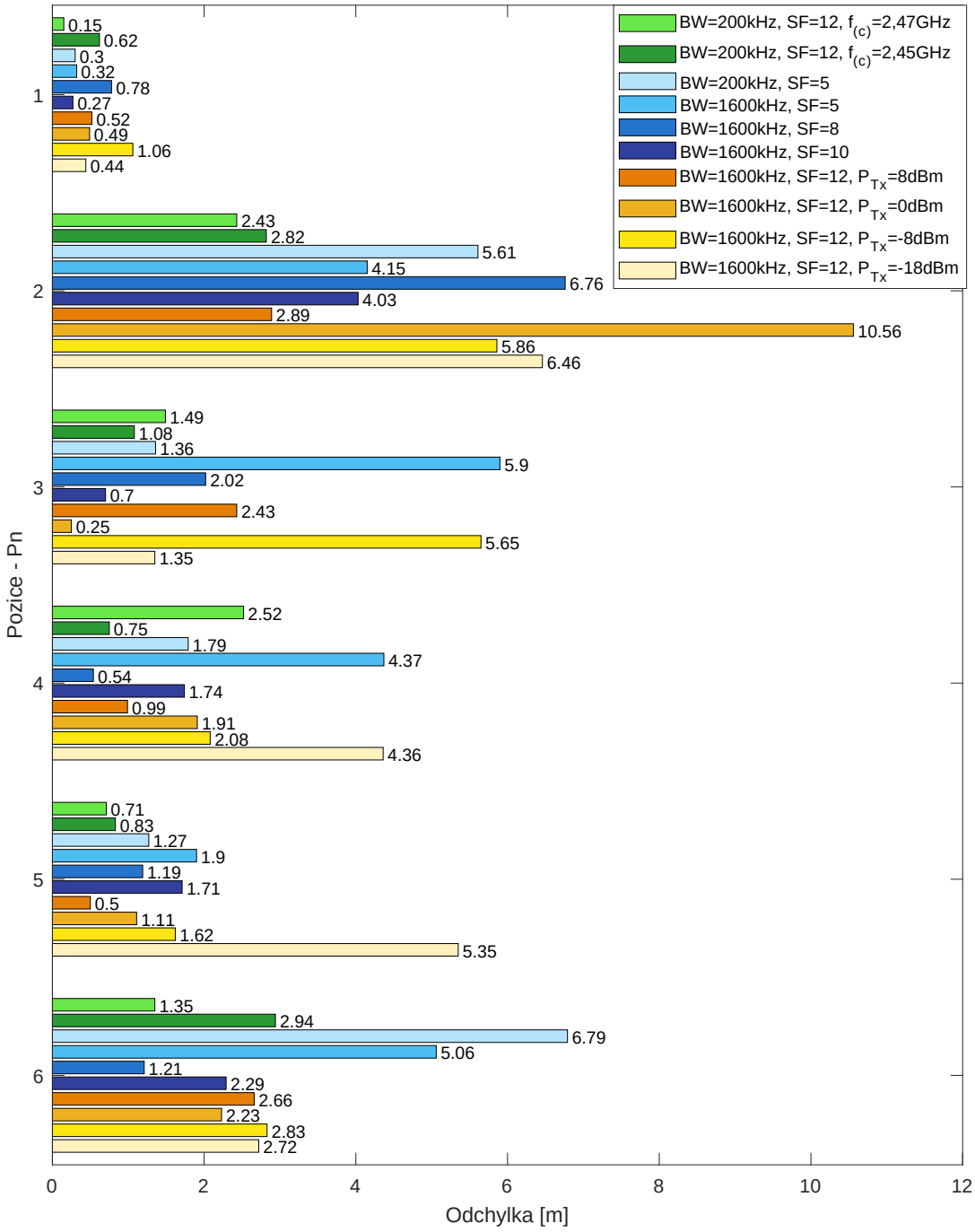
Obr. 6.24: Polohy lokalizovaných pozic v prostředí Šatna – 8. varianta konfigurace (LoRa® - BW = 1600 kHz, SF = 12, P_{Tx} = 0 dBm)) (× – skutečná poloha, × – vypočtená poloha).



Obr. 6.25: Polohy lokalizovaných pozic v prostředí Šatna – 9. varianta konfigurace (LoRa® - BW = 1600 kHz, SF = 12, P_{Tx} = -8 dBm) (× – skutečná poloha, × – vypočtená poloha).



Obr. 6.26: Polohy lokalizovaných pozic v prostředí Šatna – 10. varianta konfigurace (LoRa® - BW = 1600 kHz, SF = 12, P_{Tx} = -18 dBm)) (× – skutečná poloha, × – vypočtená poloha).



Obr. 6.27: Odchylky lokalizovaných pozic pro všechny varianty konfigurací – Šatna.

Číselně vyjádřené odchylky můžeme vidět na sloupcovém grafu výše. Lze si všimnout nízkých hodnot odchylek v případě pozice `P1`. Naopak v případě již zmiňované pozice `P2` dosahovaly odchylky vysokých hodnot. Jedná se například o jedinou pozici, kde ani jedna varianta nedokázala dosáhnout lokalizace s přesností pod 2 m.

Neobvykle vysoké odchylky dosahovala konfigurace ($BW = 1600\,kHz$, $SF = 12$, $P_{Tx} = 0\,dBm$) v případě pozice `P2`. Z toho důvodu byla provedena revize měřených

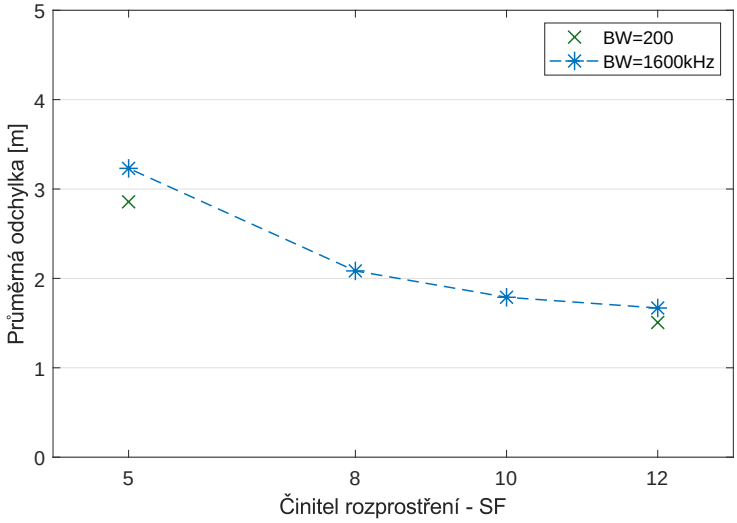
dat. V případě této konfigurace a pozice činila směrodatná odchylka RSSI hodnot, které byly měřeny pro referenční vysílače (A, B, C, D, E), průměrně 0,91. Pro srovnání při konfiguraci BW = 1600 kHz, SF = 12, P_{Tx} = 8 dBm průměrná směrodatná odchylka hodnot RSSI činila 0,86. Také vypočtené vzdálenosti d_a, d_b, d_d mezi touto pozicí a vysílači A, B, D (kombinace aplikovaná v případě pozice `P2`) nedosahovaly nijak neobvyklých hodnot. Konkrétně průměrná hodnota těchto vzdáleností se lišila o 2,62 m a 1,19 m oproti konfiguracím s P_{Tx} = 8 dBm a P_{Tx} = -8 dBm, takže chybu způsobenou vstupními daty můžeme také vyloučit. Odchylku tedy pravděpodobně způsobila chyba výpočtu polohy způsobena nedokonalostí metody. Dle [30] může při výpočtu lokalizované polohy dojít k situaci, kdy výsledné souřadnice jsou stanoveny na základě průsečíku pouze dvou vzdáleností a nikoliv tří, jak je z principu trilaterace (viz podkapitola 3.4) obvyklé.

Přímé porovnání jednotlivých variant, jak přesnou lokalizaci umožňovaly, vyplývá z hodnot průměrných odchylek v Tab 6.6. Dle předpokladů dosáhly nejnižších odchylek varianty 1. a 2., neboli varianty s nejrobustnější konfigurací (BW = 200 kHz, SF = 12). Nejvyšší průměrná odchylka nastala u 4. a 10. varianty tzn. v případě nejméně odolné konfigurace (BW = 1600 kHz, SF = 5) a při využití nejnižšího vysílacího výkonu -18 dBm.

Tab. 6.6: Průměrné odchylky jednotlivých variant konfigurací signálu – Šatna

Varianta konfigurace	**Průměrná odchylka [m]**
1. BW = 200 kHz, SF = 12, f_c = 2,479 GHz	1,445
2. BW = 200 kHz, SF = 12, f_c = 2,450 GHz	1,507
3. BW = 200 kHz, SF = 5	2,857
4. BW = 1600 kHz, SF = 5	3,231
5. BW = 1600 kHz, SF = 8	2,084
6. BW = 1600 kHz, SF = 10	1,789
7. BW = 1600 kHz, SF = 12, P_{Tx} = 8 dBm	1,669
8. BW = 1600 kHz, SF = 12, P_{Tx} = 0 dBm	2,762
9. BW = 1600 kHz, SF = 12, P_{Tx} = -8 dBm	3,186
10. BW = 1600 kHz, SF = 12, P_{Tx} = -18 dBm	3,448

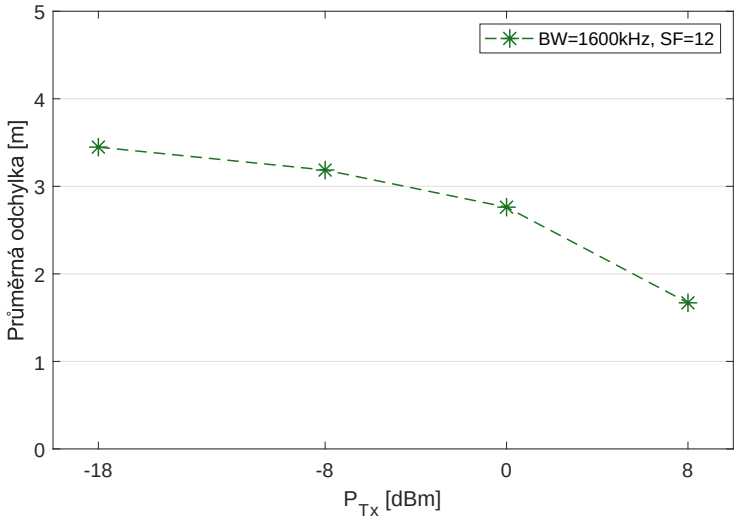
Graf 6.28 znázorňuje závislost odchylky na hodnotě SF. Hodnota průměrné odchylky klesá s rostoucími hodnotami SF, což je očekávaný průběh. Z grafu vyplývá, že závislost strmě klesá v úseku hodnot SF = 5 až 8 a při hodnotách SF = 12 a 10 je klesající už pouze mírně. Zmíněná charakteristika je výsledkem měření s využitím BW = 1600 kHz. Graf obsahuje pro orientační porovnání s jinou konfigurací také dva samostatné body, což jsou údaje naměřené při BW = 200 kHz pro krajní hodnoty SF



Obr. 6.28: Závislost průměrné odchylky lokalizace na hodnotě SF.

tj. 5 a 12. Konfigurace s touto hodnotou BW nebyly testovány za účelem získání závislosti odchylky na hodnotě SF. Proto není závislost v tomto případě proměřena v celém rozsahu hodnot SF a body nejsou proloženy.

Dalším výsledkem analýzy měřených dat je charakteristika na Obr. 6.29. Konkrétně se jedná o závislost průměrné odchylky lokalizace na hodnotě vysílacího výkonu. Závislost má klesající charakter, neboli hodnota odchylky klesá závisle na zvyšujícím se vysílacím výkonu. Při hodnotách P_{Tx} = -8 dBm a -18 dBm není pokles odchylky příliš výrazný, což pravděpodobně souvisí s povahou přenosového prostředí, která má vliv na chování LoRa® signálu.



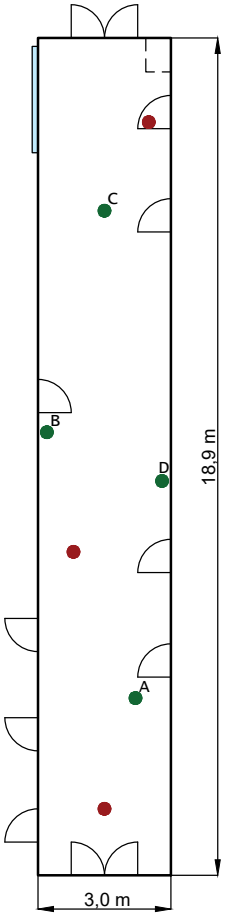
Obr. 6.29: Závislost průměrné odchylky lokalizace na vysílacím výkonu

6.4 Prostředí – Chodba

Chodba je poslední přenosové prostředí, kde byla provedena lokalizace systémem LoRa®. Jedná se o dlouhý úzký koridor. Z hlediska rádiové komunikace má téměř ideální přenosové podmínky - komunikace s přímou viditelností (LOS). Náhled na prostředí zachycuje Obr. 6.30a, přičemž půdorys interiéru naznačuje Obr. 6.30b.

Na půdorysu je v pravém horním rohu patrný objekt, což je dřevěný nábytek o výšce 1 m. Naproti tomu se nachází prosklená příčka sloužící jako světlík. Obvod místnosti dále ohraničují celkem desatery dveře.

(a) Fotografie



(b) Půdorys

Obr. 6.30: Přenosové prostředí – Chodba (- - skříňka, ● vysílače, ● lokalizované pozice, ■ skleněná příčka).

Path Loss Model

Závislost RSSI na vzdálenosti, neboli path loss model, byla naměřena stejným způsobem jako je zmíněno v podkapitole 6.2. V prostředí Chodba bylo provedeno měření

pro vzdálenosti do 14 m, což je dostatečný rozsah pro místnost s rozměry 3 x 18,9 m. V tomto případě byla aplikována velikost $A = $-47,44 dBm dle průměru hodnot RSSI, jelikož vykazovala lepší výsledky oproti mediánu ($A = $-47 dBm). Hodnota A platila pro všechny varianty měření stejná. Podle procentuálně vyjádřeného koeficientu determinace (R-square) se vypočtený model shodoval na 92%.

V tomto prostředí byla provedena také lokalizace mezi větším počtem pater, proto bylo zapotřebí upravit path loss model do tvaru inspirovaného dle [31]. Z toho důvodu byl do původní rovnice 5.2 navíc přičten parametr FAF (Floor Attenuation Factors), který představuje útlum mezi podlažími. Následně ještě koeficient ztrát n byl aplikován jako n_{SF}, který označuje koeficient ztrát výchozího patra. Při volbě modelu byla zohledněna i skutečnost, že v naší situaci měly jednotlivá patra přibližně stejný charakter z hlediska přenosových podmínek. Prostředí umožňovalo realizovat lokalizaci ze třetího do druhého patra, respektive ze třetího do prvního patra. To znamená, že bylo nutné využít dvou hodnot *FAF*.

Nejprve byly měřeny hodnoty RSSI při umístění vysílače ve výchozím patře a přijímače v ose nad ním o patro výš. Následoval výpočet rozdílu naměřené a teoretické hodnoty RSSI odpovídající dané vzdálenosti mezi vysílačem a přijímačem. Tento postup byl opakován celkem na dvou různých místech v místnosti. Z těchto měření byl vypočten medián hodnot, což představovalo výslednou hodnotu FAF. Mezi 3. a 2. patrem činil $FAF = $-21 dB a pro komunikaci mezi 3. a 1. patrem nabýval hodnoty $FAF = $-35 dB. Hodnoty parametrů n_{SF}, A a FAF jsou uvedené v Tab. 6.7.

Na základě měření a stanovených parametrů byla sestrojena závislost (viz 6.31) RSSI na vzdálenosti.

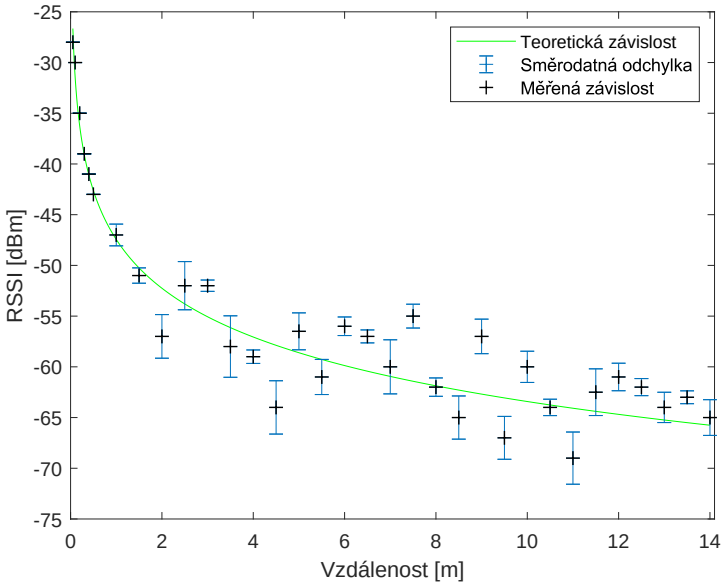
Tab. 6.7: Parametry path loss modelu – Chodba

$\mathbf{n}_{\mathrm{SF}}$	**A** [dBm]	**FAF** [dB]		**R-square**	
1.598	-47,44	-21	-35	0,920	92 %

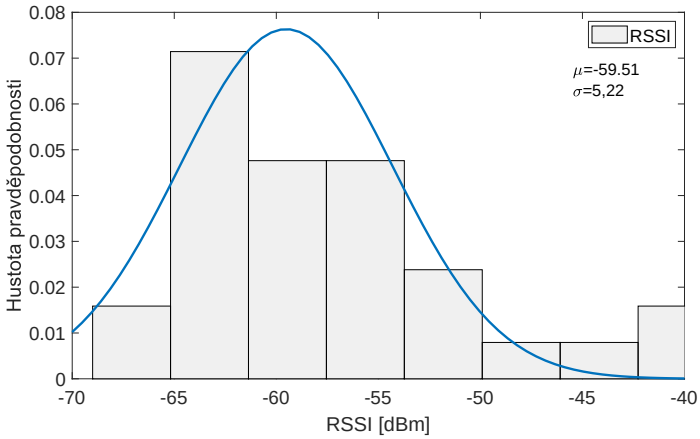
Hustotu pravděpodobnosti RSSI pro toto prostředí ukazuje obrázek 6.32. Histogramu hodnot RSSI v rozsahu -70 až -45 dBm nejvíce odpovídalo rozdělení se směrodatnou odchylkou $\sigma = 5{,}22$ a střední hodnotou $\mu = $-59,51. Za zmínku stojí hodnota rozptylu 27,31. Ve srovnání s hodnotami rozptylů (75,34 a 63,24) předchozích prostředí je tato hodnota výrazně nižší, což poukazuje na charakter prostředí.

Parametry komunikace

První dvě varianty konfigurace parametrů byly nastaveny dle robustnosti LoRa® signálu. Kombinace BW = 200 kHz, SF = 12 jakožto nejrobustnější nastavení signálu



Obr. 6.31: Závislost RSSI na vzdálenosti v prostředí – Chodba.



Obr. 6.32: Hustota pravděpodobnosti RSSI pro vzdálenosti 0,5-14 m – Chodba.

představovala 1. variantu konfigurace. V případě 2. varianty bylo využito naopak nejméně odolné nastavení signálu tj. kombinace BW = 1600 kHz, SF = 12.

V tomto prostředí proběhla měření s cílem prozkoumat technologii LoRa® pro aplikování lokalizace mezi více patry budovy. Za tímto účelem byly realizované lokalizace se 3., 4. a 5. variantou konfigurace LoRa® signálu (BW = 1600 kHz, SF = 12). 3. varianta se týkala lokalizace v rámci výchozího třetího patra. Následně při 4. variantě proběhla lokalizace tak, že se referenční vysílače nacházely ve třetím patře a přijímač na daných pozicích v patře druhém. Poslední 5. varianta konfigurace byla využita pro lokalizaci ze třetího do prvního patra, tudíž v přenosové cestě stály dvě stropní příčky. Kombinace BW = 1600 kHz, SF = 12 byla zvolena z důvodu snížení doby měření stejně jako v předchozím prostředí, neboť větší šířka pásma souvisí s vyšším datovým tokem a tím pádem i časově rychlejším přenosem zpráv.

Přehled variant konfigurací signálu LoRa® dle parametrů (kromě CR) ukazuje Tab. 6.8. Přenášená data nejsou pro účel lokalizace důležitá, proto byl kódový poměr nastaven na nejnižší hodnotu 4/5.

Tab. 6.8: Varianty konfigurací signálu LoRa® v prostředí – Chodba

Varianta	**1.**	**2.**	**3.**	**4.**	**5.**
Modulace	LoRa®	LoRa®	LoRa®	LoRa®	LoRa®
Frekvence [GHz]	2,45 (1)	2,45 (1)	2,45 (1)	2,45 (1)	2,45 (1)
Šířka pásma [kHz]	200	1600	1600	1600	1600
Činitel rozprostření	12	5	12	12	12
Vysílací výkon [dBm]	8	8	8	8	8

(1) $f_c = 2\,450\,000\,122\,\text{Hz}$

Vyhodnocení měření

Lokalizace byla provedena pro tři pozice s náhodně vybranými polohami vzhledem k rozloze místnosti. K dosažení vyšší přesnosti lokalizace nebyly použity referenční vysílače tři, nýbrž čtyři – A, B, C, D. Vysílače se nacházely na souřadnicích **A** [2,2 ; 4,0], **B** [0,2 ; 10,0], **C** [1,5 ; 15,0], **D** [2,8 ; 8,9]. Jejich umístění naznačuje také obrázek půdorysu (Obr. 6.30b). Navýšení počtu vysílačů bylo již zdůvodněno u přenosového prostředí Chodba, viz část kapitoly 6.2.

Analýzy výsledků

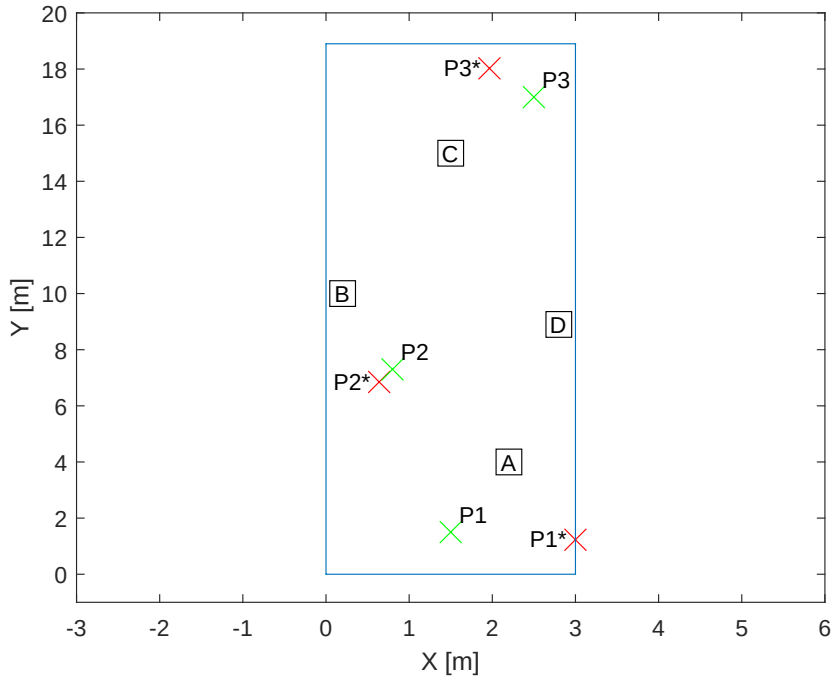
K bližší představě konkrétních pozic slouží Obr. 6.33 až Obr. 6.37, jenž nabízí grafické znázornění výsledků jednotlivých variant měření.

Porovnáme-li výsledné polohy lokalizovaných pozic pro 1. a 2 variantu konfigurace, pak si lze všimnout výraznějších odchylek u pozic `P1` a `P3` (Obr. 6.34) vlivem nejméně robustní konfigurace signálu (BW = 200 kHz, SF = 12).

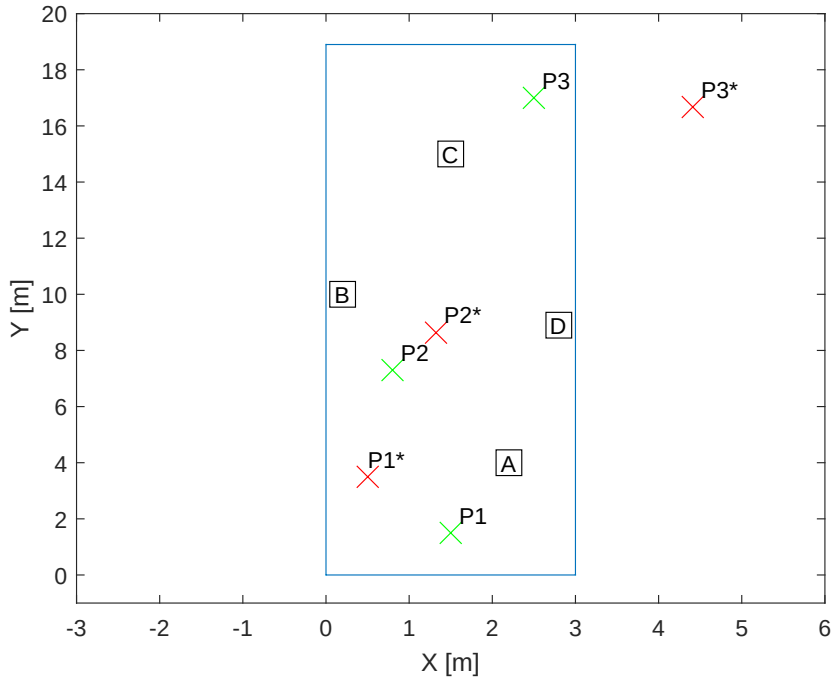
Dále je z Obr. 6.33 a 6.35 patrná srovnatelná výkonnost z hlediska lokalizace konfigurace signálu BW = 200 kHz, SF = 12 a konfigurace BW = 1600 kHz, SF = 12, respektive 1. a 3. varianty konfigurace signálu.

Graficky vyjádřené polohy lokalizovaných pozic mezi více podlažími ukazují Obr. 6.36 a 6.37. Lokalizace v těchto případech vykazovaly znatelné výkyvy odchylek, takže tyto vypočtené polohy lze využít pouze pro orientační nalezení polohy v rámci místnosti.

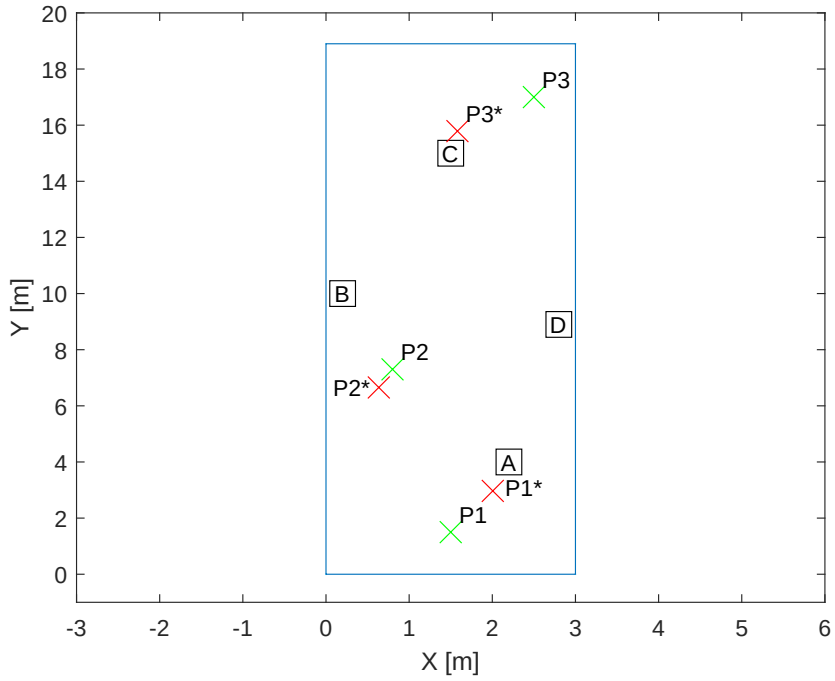
Detailní výsledky obsahují tabulky v příloze A.3, kde jsou přesné údaje o skutečných a vypočtených souřadnicích a k nim příslušných odchylkách.



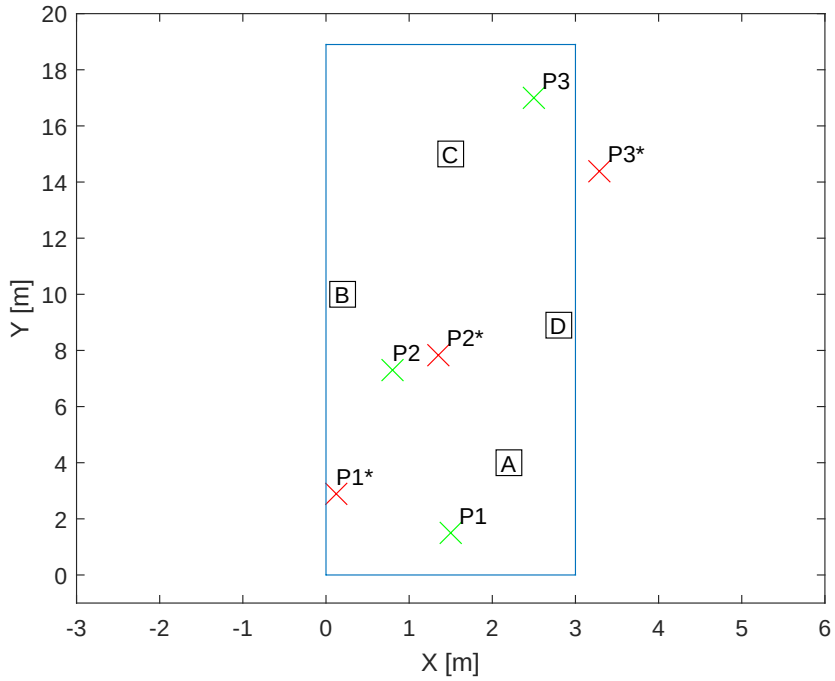
Obr. 6.33: Polohy lokalizovaných pozic v prostředí Chodba – 1. varianta konfigurace (LoRa® - BW = 200 kHz, SF = 12) (× – skutečná poloha, × – vypočtená poloha).



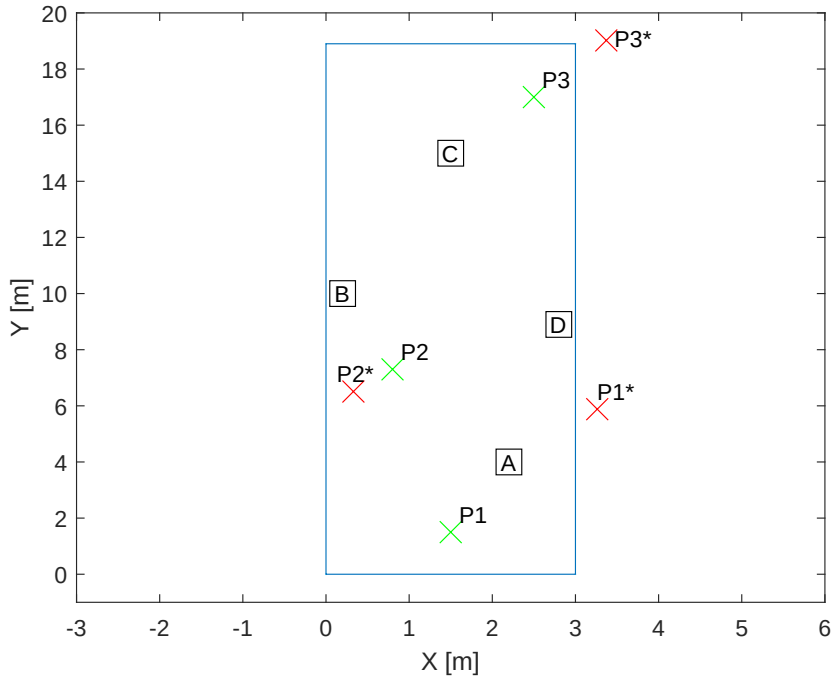
Obr. 6.34: Polohy lokalizovaných pozic v prostředí Chodba – 2. varianta konfigurace (LoRa® - BW = 1600 kHz, SF = 5) (× – skutečná poloha, × – vypočtená poloha).



Obr. 6.35: Polohy lokalizovaných pozic v prostředí Chodba – 3. varianta konfigurace (LoRa® - BW = 1600 kHz, SF = 12) (× – skutečná poloha, × – vypočtená poloha).



Obr. 6.36: Výsledné polohy lokalizace ze 3. do 2. patra v prostředí Chodba – 4. varianta konfigurace (LoRa® - BW = 1600 kHz, SF = 12) (× – skutečná poloha, × – vypočtená poloha).



Obr. 6.37: Výsledné polohy lokalizace ze 3. do 1. patra v prostředí Chodba – 5. varianta konfigurace (LoRa® - BW = 1600 kHz, SF = 12) (× – skutečná poloha, × – vypočtená poloha).

Tabulka 6.9 obsahuje hodnoty průměrných odchylek všech variant konfigurací. Z těchto hodnot vyplývá, že při lokalizaci ze 3. do 2. patra měla stropní příčka v přenosové cestě za následek zvýšení odchylek. Dle očekávání narostly hodnoty odchylek ještě více v případě lokalizace ze 3. do 1. patra, neboli v případě komunikace přes dvě stropní příčky.

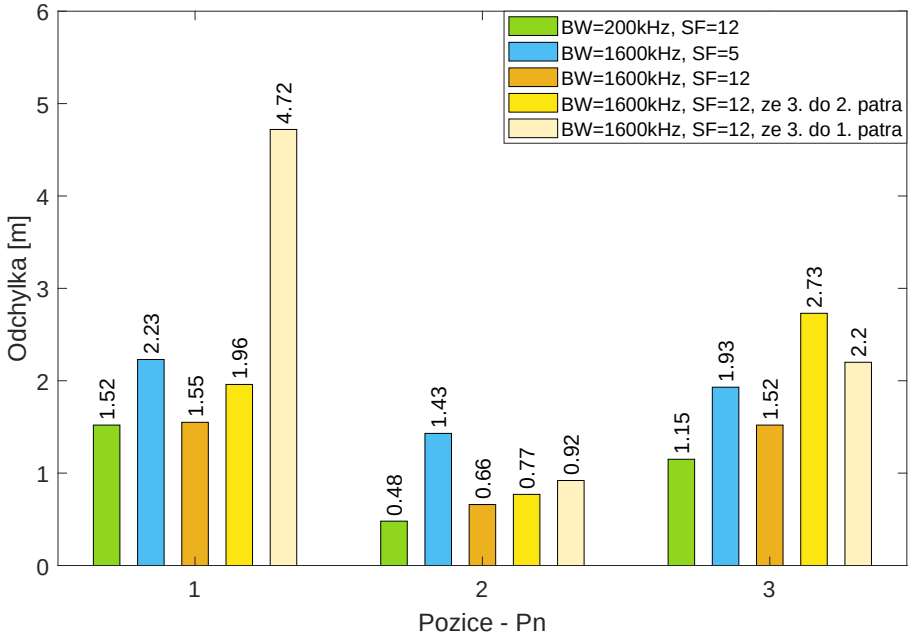
Tab. 6.9: Průměrné odchylky jednotlivých variant konfigurací signálu – Chodba

Varianta konfigurace	**Průměrná odchylka [m]**
1. BW = 200 kHz, SF = 12	1,052
2. BW = 1600 kHz, SF = 5	1,868
3. BW = 1600 kHz, SF = 12	1,247
4. BW = 1600 kHz, SF = 12	1,818
5. BW = 1600 kHz, SF = 12	2,613

Souhrn výsledných odchylek pro jednotlivé pozice nabízí Graf 6.38. Je vidět, že lokalizace přes větší počet pater dosahovala vyšších odchylek než ostatní případy. Kromě toho se odchylky nezvyšovaly úměrně s větším počtem pater, což dokazují výsledky v případě pozice `P1` a `P3`. Toto ovlivnění výsledků mohlo být způsobeno povahou místností v jednotlivých patrech. Půdorysy místností v prvních dvou pat-

rech se totiž mírně lišily oproti půdorysu (6.30b) výchozího 3. patra. V 1. a 2. patře se nacházelo navíc okno v čele místností a především v 1. patře nebyly vstupy do okolních místností uzavřeny dveřmi, takže zde byly odrazy šířícího se signálu jiné než v ostatních podlažích.

Ze sloupcového grafu také vyplývá skutečnost, že konfigurace BW = 200 kHz, SF = 12 a konfigurace BW = 1600 kHz, SF = 12 vykazují podobnou přesnost lokalizace.



Obr. 6.38: Odchylky lokalizace jednotlivých pozic pro všechny varianty konfigurací v přenosovém prostředí – Chodba.

6.5 Shrnutí

Na základě již popsaných měření a jejich výsledků můžeme přibližně diskutovat potenciál systému LoRa® pro lokalizaci uvnitř budov. Dosažené výsledky jsou závislé na charakteru daného přenosového prostředí, aplikované metodě, ale také na podmínkách měření.

Samotné parametry technologie LoRa® dokáží ovlivnit přesnost lokalizace. Měření ve třech prostředích potvrdily teoretické předpoklady, že obecně odolnost LoRa® signálu závisí především na použité šířce pásma a činiteli rozprostření. Nejlépe je tato skutečnost patrná z výsledků při využití nejrobustnější konfigurace BW = 200 kHz, SF = 12 a nejméně robustní BW = 1600 kHz, SF = 5. V prostředí s charakterem LOS komunikace, tj. v našem případě Aula, se průměrná odchylka skutečné a vypočtené polohy zvýšila o 0,49 m (při BW = 1600 kHz, SF = 5) oproti odchylce 1,42 m

při kombinaci BW = 200 kHz, SF = 12, což je podobná hodnota odchylky jako 1,54 m v případě FLRC – BW = 300 kHz, BR = 260 kb/s. Méně robustní konfigurace v prostředí Chodba způsobila zvýšení průměrné odchylky o 0,81 m z původní hodnoty 1,052 m pro nejodolnější konfiguraci. V prostředí Šatna obsahující překážky (komunikace NLOS) tento rozdíl mezi průměrnými odchylkami činil až 1,72 m. Jinými slovy lze v testovaných prostředích vhodnou konfigurací ovlivnit přesnost lokalizace o přibližně dvojnásobek v prostředí s překážkami, o 77 % v prostředí bez překážek s úzkým profilem místnosti a také o 35 % v prostředí bez překážek. Zde byla z hlediska přesnosti lokalizace (pro šest pozic) porovnána technologie LoRa® také s její speciální variantou FLRC a systémem (G)FSK. Ve srovnání se zmíněnými výsledky vykazovala FLRC při konfiguraci BW = 1200 kHz, BR = 1300 kb/s průměrnou odchylku 2,43 m. (G)FSK v tomto prostředí dosahoval průměrně odchylky 2,18 m při nastavení BW = 2400 kHz, BR = 2000 kb/s a 2,83 m při nastavení BW = 300 kHz, BR = 125 kb/s.

Dalším poznatkem vyplývajícím z výsledků, je závislost průměrné hodnoty odchylky na hodnotě SF (viz Graf 6.28), která dokazuje přímý dopad při nastavení vyšší hodnoty SF na snížení odchylky v prostředí s překážkami. V prostředích Šatna a Chodba byly testovány také konfigurace BW = 200 kHz, SF = 12 a BW = 1600 kHz, SF = 12. Rozdíl výsledných odchylek pro tyto konfigurace činil průměrně 0,16 m v Šatně a 0,20 m v Chodbě, z čehož vyplývá, že přesnost lokalizace závisí především na hodnotě SF a BW má vliv znatelně nižší.

Poslední parametr technologie, který má vliv na přesnost lokalizace, je vysílací výkon. Z dosažených výsledků byla sestrojena závislost průměrné odchylky na hodnotě vysílacího výkonu (viz Obr. 6.29). Z výsledků vyplývá, že s využitím nižší hodnoty vysílacího výkonu narůstá průměrná odchylka.

Obecně tedy v případě lokalizace v prostředí, které je vlivem překážek náročné na šíření rádiového signálu, můžeme zvýšit přesnost využitím vysoké hodnoty SF a nejvyššího možného vysílacího výkonu (kompromis mezi přesností lokalizace a spotřebou el. energie). V prostředích s vhodnými přenosovými podmínkami (komunikace LOS, minimální členitost místnosti, nízký počet překážek atd.) nemá volba těchto parametrů tak výrazný vliv na přesnost lokalizace. Z hlediska přesnosti lokalizace je vhodné využít LoRa® signál s konfigurací BW = 200 kHz, SF = 12, P_{Tx} = 8 dBm. Nicméně hodnota BW by mohla být zvolena i vyšší, například v případě potřeby snížení doby měření, respektive zvýšení rychlosti komunikace.

Kromě nastavení systémových parametrů LoRa® má na přesnost lokalizace vliv také způsob zpracování a vyhodnocení měřených hodnot. V prostředí s NLOS komunikací nebo úzkým profilem místnosti se tedy nabízí například alternativní metoda fingerprinting, která využívá znalosti RSSI hodnot charakterizujících jednotlivé body daného prostředí [42].

Vhodné podmínky měření představují další faktor, který by mohl částečně ovlivnit přesnost a spolehlivost lokalizace. Měření v této práci proběhla pomocí LoRa® modulů připevněných na stativech, jenž byly postupně přemisťovány mezi jednotlivými pozicemi. Vhodnější by bylo kupříkladu pevné umístění LoRa® modulů na stěnách místnosti. V neposlední řadě také množství a rozvržení referenčních vysílačů ovlivňuje přesnost lokalizace. Z výsledků měření je totiž patrné, že nižších odchylek dosahovaly právě pozice, které se nacházely v prostoru mezi trojicí referenčních vysílačů. Vliv počtu aplikovaných vysílačů na výslednou průměrnou odchylku byl již podrobněji komentován v části podkapitoly 6.2. Obecně lze konstatovat, že použití většího množství referenčních vysílačů umožňuje snížit hodnotu odchylky [43]. Jako perspektivní způsob, jak zvýšit přesnost lokalizace, se jeví využití různých technik strojového učení (ML – Machine Learning) [44].

6.6 Machine Learning

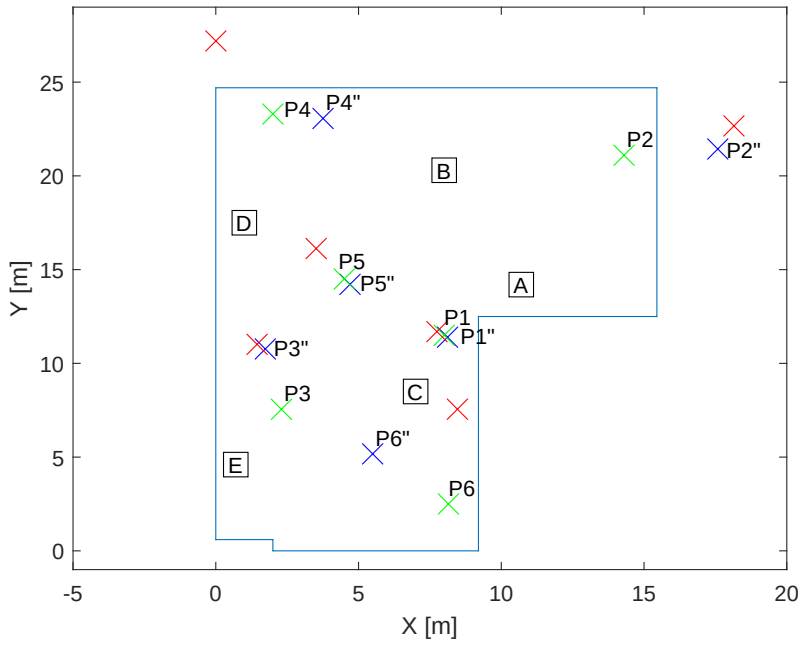
Obecně ML představuje různé druhy technik lišících se algoritmy, kterými se daný systém učí. Již bylo zmíněno, že ML je v oblasti lokalizace perspektivní způsob, jak dosáhnout přesnějších výsledků [44]. Pro přibližné ověření potenciálu ML byla navíc experimentálně aplikována tato technika pro jeden konkrétní případ lokalizace.

Za tímto účelem byla z předchozích výsledků pro prostředí Šatna zvolena 4. varianta konfigurace (LoRa® - BW = 1600 kHz, SF = 5). Tedy nejméně robustní konfigurace LoRa® signálu, při níž průměrná odchylka činila 3,23 m (viz Tab. 6.6) a tím tato varianta nabízela velký potenciál pro zpřesnění lokalizace.

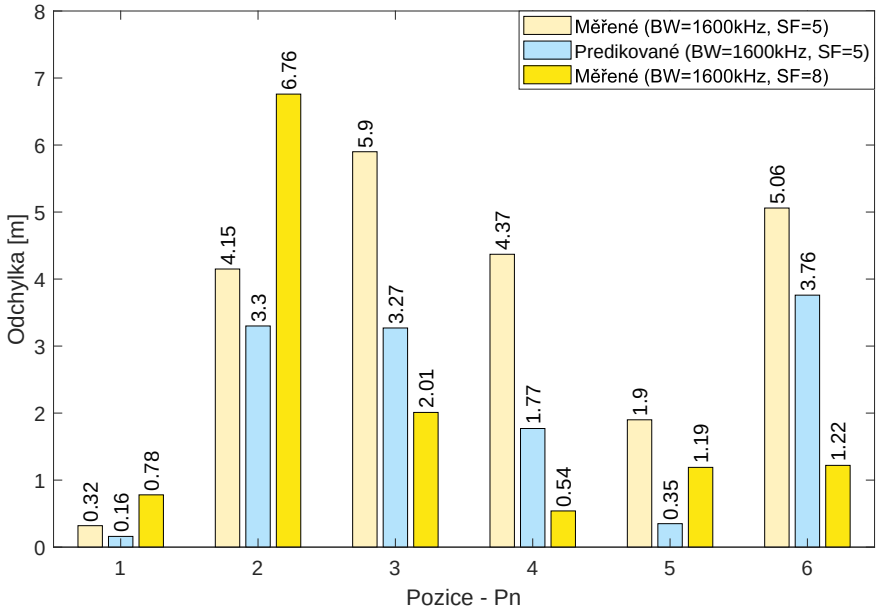
Strojové učení bylo realizováno v aplikaci `Classification Learner` programového prostředí MATLAB. Použitý model byl typu podpůrných vektorů (SVM – Support Vector Machines) s kubickou funkcí jádra. Model byl trénovaný dle RSSI hodnot pro jednotlivé pozice, které byly naměřené v případě tří konfigurací BW = 1600 kHz a SF = 8, 10 a 12. Následně pomocí tohoto modelu došlo k predikování nových RSSI hodnot na základě dat naměřených při 4. variantě konfigurace.

Predikované hodnoty byly použity při nové lokalizaci, jejíž výsledné polohy ukazuje Obr. 6.39. Zde jsou vyznačeny červen původní polohy stanovené dle naměřených hodnot a modře polohy vypočtené dle predikovaných hodnot. Číselně vyjádřené odchylky jednotlivých pozic nabízí Graf 6.40, který obsahuje nejenom výsledky s využitím měřených a predikovaných hodnot konfigurace BW = 1600 kHz, SF = 5, ale také pro srovnání odchylky pro konfiguraci BW = 1600 kHz, SF = 8. Průměrná odchylka v případě využití predikovaných hodnot činila 2,11 m, což je srovnatelné například s hodnotou 2,08 m při konfiguraci BW = 1600 kHz, SF = 8. Oproti původní průměrné odchylce 3,23 m tedy došlo ke snížení o 1,12 m, což potvrzuje přibližný vliv

ML na snížení odchylky. Zároveň se nabízí prostor pro podrobné ověření vlivu ML na přesnost lokalizace při hlubším zkoumání.



Obr. 6.39: Polohy lokalizovaných pozic v prostředí Šatna s využitím ML – konfigurace LoRa® - BW = 1600 kHz, SF = 5 (× – skutečná poloha, × – původní vypočtená poloha, × – vypočtená poloha s využitím ML).



Obr. 6.40: Odchylky lokalizace v prostředí Šatna pro vybrané konfigurace.

Závěr

Diplomová práce měla za cíl prozkoumat a ověřit potenciál technologie LoRa® pro lokalizaci uvnitř budov. Konkrétně bylo k vytvoření bezdrátové sítě LoRa® v ISM pásmu 2,4 GHz využito vývojového kit SK-iM282A a s tím souvisejícího softwaru (WiMOD LR Studio). V rámci práce byla detailně specifikována samotná technologie LoRa®. Pozornost byla věnována především její fyzické vrstvě. Dále byly popsány nejpoužívanější metody pro lokalizaci bezdrátových zařízení uvnitř budov. Další část se věnuje rozboru konceptu lokalizace založeného na měření RSSI, kde bylo nejprve specifikováno přenosové prostředí a podmínky, zvolený princip lokalizace a také vyhodnocení samotného měření.

Koncept je popsán na případu měření v domácích podmínkách (z důvodu protiepidemických opatření). Experimentální lokalizace proběhla za použití tří referenčních vysílačů a jednoho přijímače. Celkem bylo lokalizováno šest náhodných pozic pro ověření správnosti konceptu. Výsledkem byly vypočtené polohy jednotlivých pozic a k nim odpovídající odchylky, jenž vyjadřují vzdálenost mezi skutečnou a vypočtenou polohou. V případě 1. varianty (BW = 800 kHz, SF = 12) robustní konfigurace LoRa® se odchylky pohybovaly v rozmezí 0,24 m až 2,82 m. Průměrná odchylka činila 1,06 m, což splňovaly všechny pozice, kromě jedné. Při 2. variantě (BW = 1600 kHz, SF = 5) byla nastavena nejméně robustní konfigurace LoRa®, která se projevila sníženou přesností lokalizace. Pro tuto variantu odchylky nabývaly hodnot od 0,91 m až do 4,62 m, přičemž průměrná odchylka činila 2,24 m. Přesnost měření lze porovnat například s článkem [39], kde provedli lokalizaci ve dvou odlišných prostředích na vzdálenostech do 5 m. V jejich případě činila průměrná odchylka měření 0,84 m pro 1. prostředí (kancelářská místnost) a 1,53 m pro 2. prostředí (školní učebna).

Hlavní část diplomové práce je věnována rozsáhlým měřením ve třech různých prostředích (různé přenosové podmínky), kde byly použity čtyři referenční vysílače kromě druhého prostředí. První prostředí s označením Aula umožňovalo ve většině případu LOS komunikaci. LoRa® v nejrobustnější konfiguraci signálu (BW = 200 kHz, SF = 12) zde vykazovala průměrnou odchylku 1,42 m. Naopak nejméně odolná konfigurace vůči rušení signálu LoRa® (BW = 1600 kHz, SF = 5) dokázala lokalizovat pozice s odchylkou průměrně 1,92 m.

V prostředí Šatna se nacházely překážky v přenosové cestě. Zde byla technologie LoRa®, při aplikování pěti referenčních vysílačů, testována (na šesti pozicích) pro různé hodnoty činitele rozprostření a také pro různé vysílací výkony. Naměřená závislost odchylky na hodnotě SF ukazuje, že z nejvyšší průměrné odchylky 3,23 m (BW = 1600 kHz, SF = 5) lze změnou SF na hodnotu SF = 12 odchylku snížit o 1,56 m. Také volba vysílacího výkonu měla výrazný vliv na výsledné odchylky. Při nejnižším vysílacím výkonu P_{Tx} = -18 dBm dosahovaly odchylky průměrně hod-

noty 3,45 m, naopak nejvyšší možný výkon $P_{Tx} = 8$ dBm umožňoval lokalizaci s průměrnou odchylkou 1,67 m. Je tedy patrné, že přesnost lokalizace uvnitř budov pomocí technologie LoRa® můžeme ovlivnit vhodným nastavením hodnoty SF a vysílacím výkonem.

Poslední prostředí - Chodba bylo sice prostředí bez překážek, ale také s úzkým profilem místnosti. V tomto případě došlo k aplikování technologie LoRa® na lokalizaci tří náhodných pozic mezi větším počtem pater. Při využití modelu s útlumem stropní příčky a konfigurace BW = 1600 kHz, SF = 12 byly provedeny lokalizace s jedním a dvěma podlažími v přenosové cestě. Při lokalizaci ze 3. do 2. patra měla stropní příčka v přenosové cestě za následek zvýšení průměrné odchylky z 1,25 m na hodnotu 1,82 m. Dle očekávání narostly hodnoty odchylek ještě více v případě lokalizace ze 3. do 1. patra, neboli při komunikaci přes dvě stropní příčky. V tomto případě činila odchylka průměrně 2,62 m.

Lokalizace a dosažené výsledky je třeba hodnotit s ohledem na skutečnost, že jsou závislé na charakteru daného přenosového prostředí, aplikované metodě a také na podmínkách měření. Nabízí se tedy prostor pro zdokonalení jednotlivých částí konceptu lokalizace. Samotnou přesnost lokalizace by bylo možné zvýšit například aplikováním metody fingerprinting v prostředí s překážkami nebo například využitím moderních technik ML [42], [44]. ML byl experimentálně testován pro jeden případ lokalizace s výsledným snížením odchylky o 30%. Využití většího počtu LoRa® modulů a jejich pevné a vhodné umístění v dané místnosti, neboli zajištění vhodnějších podmínek, by také umožňovalo zvýšit spolehlivost a přesnost lokalizace. Tato práce měla za cíl především prozkoumat a ověřit potenciál technologie LoRa® pro lokalizaci uvnitř budov, proto bylo provedeno velké množství měření pro různá systémová nastavení technologie. Nicméně na základě dosažených výsledků lze konstatovat, že LoRa® v pásmu 2,4 GHz představuje novou alternativní technologii pro lokalizaci uvnitř budov.

Část diplomové práce byla zpracována formou článku a následně prezentována na konferenci Student EEICT 2021 [45].

Literatura

[1] MEKKI, K., BAJIC, E., CHAXEL, F., MEYER, F. *Overview of Cellular LPWAN Technologies for IoT Deployment: Sigfox, LoRaWAN, and NB-IoT* [online]. 2018 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops), Athens, 2018, [cit. 2020-10-5], pp. 197-202, doi: 10.1109/PERCOMW.2018.8480255. Dostupné z URL: <https://doi.org/10.1109/PERCOMW.2018.8480255.

[2] LoRa Alliance, Inc. *LoRaWAN® Regional Parameters* [online]. February 2020, Fremont, [cit. 2020-10-28], version RP002-1.0.1. Dostupné z URL: <https://lora-alliance.org/sites/default/files/2020-02/rp_2-1.0.1.pdf.

[3] LoRa Alliance™ Strategy Committee. *LoRa Alliance Geolocation Whitepaper* [online]. January 2018, [cit. 2020-11-12]. Dostupné z URL: <https://lora-alliance.org/sites/default/files/2018-04/geolocation_whitepaper.pdf.

[4] YASSIN, A. et al. *Recent Advances in Indoor Localization: A Survey on Theoretical Approaches and Applications* [online]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 19, no. 2, pp. 1327-1346, Secondquarter 2017, [cit. 2020-10-8], doi: 10.1109/COMST.2016.2632427. Dostupné z URL: <https://doi.org/10.1109/COMST.2016.2632427.

[5] AL AMMAR, M. A. et al. *Comparative Survey of Indoor Positioning Technologies, Techniques, and Algorithms* [online]. 2014 International Conference on Cyberworlds, Santander, 2014, pp. 245-252, [cit. 2020-10-8], doi: 10.1109/CW.2014.41. Dostupné z URL: <https://www.researchgate.net/publication/288484594_Comparative_Survey_of_Indoor_Positioning_Technologies_Techniques_and_Algorithms.

[6] MOUSER ELECTRONICS. *Semtech's Low-Power SX128x 2.4GHz Transceivers, Available from Mouser, Deliver Integrated Long-Range RF for IoT* [online]. In: Mouser Press Room, July 31 2017, [cit. 2020-11-15]. Dostupné z URL: <https://cz.mouser.com/publicrelations_semtech_sx128x_transceivers_2017final/>.

[7] ZEINAB, K. A. M., and ELMUSTAFA, S. A. A. *Internet of Things Applications, Challenges and Related Future Technologies* [online]. World Scientific News, vol. 67, s. 126-148, 2017, [cit. 2020-11-19]. Dostupné z URL: <http://www.worldscientificnews.com/wp-content/uploads/2017/01/WSN-672-2017-126-148-2.pdf.

[8] ZAFARI, F., GKELIAS, A., LEUNG, K. *A Survey of Indoor Localization Systems and Technologies* [online]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 21, no. 3, pp. 2568-2599, thirdquarter 2019, [cit. 2020-11-18], doi: 10.1109/COMST.2019.2911558. Dostupné z URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8692423.

[9] LIU, H., DARABI, H., BANERJEE, P., LIU, J. *Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems* [online]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews), vol. 37, no. 6, pp. 1067-1080, Nov. 2007, [cit. 2020-11-18], doi: 10.1109/TSMCC.2007.905750. Dostupné z URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4343996.

[10] MAHMOUD, M.S. and MOHAMAD, A.A.H. *A Study of Efficient Power Consumption Wireless Communication Techniques/Modules for Internet of Things (IoT) Applications* [online]. Advances in Internet of Things, Computer Technology Engineering Department, Al-Mansour University College, Baghdad, Iraq, 2016, 6, 19-29, [cit. 2020-10-23]. Dostupné z URL: <http://dx.doi.org/10.4236/ait.2016.62002>.

[11] MEKKI, K., BAJIC, E., CHAXEL, F., MEYER, F. *A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment* [online]. ICT Express, Volume 5, Issue 1, 2019, Pages 1-7, [cit. 2020-10-11] ISSN 2405-9595, Dostupné z URL: <https://doi.org/10.1016/j.icte.2017.12.005>.

[12] MROUE, H., NASSER, A., HAMRIOUI, S., PARREIN, B., MOTTA-CRUZ, E., ROUYER, G. *MAC layer-based evaluation of IoT technologies: LoRa, SigFox and NB-IoT* [online]. 2018 IEEE Middle East and North Africa Communications Conference (MENACOMM), Jounieh, 2018, pp. 1-5, [cit. 2020-10-24], doi: 10.1109/MENACOMM.2018.8371016. Dostupné z URL: <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.lib.vutbr.cz/document/8371016>.

[13] PETAJAJARVI, J., MIKHAYLOV, K., ROIVAINEN, A., HANNINEN, T., PETTISSALO, M. *On the coverage of LPWANs: range evaluation and channel attenuation model for LoRa technology* [online]. 14th International Conference on ITS Telecommunications (ITST), Copenhagen, 2015, pp. 55-59, [cit. 2020-10-24], doi: 10.1109/ITST.2015.7377400. Dostupné z URL: <http://cc.oulu.fi/~kmikhayl/site-assets/pdfs/2015_ITST.pdf>.

[14] BARDYN, J., MELLY, T., SELLER, O., SORNIN, N. *IoT: The era of LPWAN is starting now* [online]. ESSCIRC Conference 2016: 42nd European Solid-State Circuits Conference, Lausanne, 2016, [cit. 2020-11-2], pp. 25-30, doi: 10.1109/ESSCIRC.2016.7598235. Dostupné z URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7598235>.

[15] KATSUHIRO, N. *A Survey on the Internet-of-Things: Standards, Challenges and Future Prospects* [online]. Journal of Information Processing, 2017, [cit. 2020-10-23], 25. 23-31.

[16] SEMTECH. *Long Range, Low Power, 2.4 GHz Transceiver with Ranging Capability* [online]. Data Sheet SX1280/SX1281/SX1282, 2019, rev. 3.0, [cit. 2020-11-8]. Dostupné z URL: <https://semtech.my.salesforce.com/sfc/p/#E0000000JelG/a/2R000000HVET/HfcgiChyabtiPTh6EjcDM6ZEwAOQV7IirEmRULgggMM>.

[17] SLATS, Laurens. *A Brief History of LoRa®: Three Inventors Share Their Personal Story at The Things Conference* [online]. Semtech's Corporate Blog, LoRaWAN Academy, 2020, 08 January 2020 [cit. 2020-10-24].
Dostupné z URL: <https://blog.semtech.com/author/laurens-slats>.

[18] Český telekomunikační úřad *Všeobecné oprávnění č. VO-R/10/12.2019-9 k využívání rádiových kmitočtů a k provozování zařízení krátkého dosahu* [online]. Praha, 17. prosince, 2019, [cit. 2020-11-18]. Dostupné z URL: <https://www.ctu.cz/sites/default/files/obsah/ctu/vseobecne-opravneni-c.vo-r/10/12.2017-10/obrazky/vo-r10-122017-10.pdf>.

[19] LoRa Alliance, Inc. *LoRaWAN™ What is it?: A technical overview of LoRa® and LoRaWAN™* [online]. Semtech Corporation, November 2015, 2400 San Ramon, s. 20, [cit. 2020-10-11]. Dostupné z URL: <https://lora-alliance.org/resource_hub/what-is-lorawan/>.

[20] AUGUSTIN, A., YI, J., CLAUSEN, T.; TOWNSLEY, W. *A study of LoRa: Long range & low power networks for the internet of things* Sensors, 2016, 16.9: 1466., [cit. 2020-10-25]. Dostupné z URL: <https://doi.org/10.3390/s16091466>.

[21] MROUE, H., NASSER, A., HAMRIOUI, S., PARREIN, B., MOTTA-CRUZ, E., ROUYER, G. *Analytical and Simulation study for LoRa Modulation* [online]. 2018 25th International Conference on Telecommunications (ICT), St. Malo, 2018, pp. 655-659, [cit. 2020-11-9], doi: 10.1109/ICT.2018.8464879. Dostupné z URL: <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.lib.vutbr.cz/document/8371016>.

[22] SEMTECH. *LoRa and LoRaWAN: A Technical Overview* [online]. Technical paper In:. December 2019, s. 26, [cit. 2020-10-29]. Dostupné z URL: <https://lora-developers.semtech.com/uploads/documents/files/LoRa_and_LoRaWAN-A_Tech_Overview-Downloadable.pdf>.

[23] TELKAMP, Thomas. *LoRa, LoRaWAN, and the challenges of long-range networking in shared spectrum* [online]. NL: Cognitve Radio Platform, December 2015, [cit. 2020-10-11]. Dostupné z URL: <https://www.kivi.nl/uploads/media/584e9180f3822/cr-platform-lora-workshop-shared.pdf>.

[24] JANSSEN, T., BNILAM, N, AERNOUTS, M., BERKVENS, R., WEYN, M., *LoRa 2.4 GHz Communication Link and Range* [online]. Sensors 2020, 20, 4366, [cit. 2020-10-15]. Dostupné z URL: <https://doi.org/10.3390/s20164366>.

[25] LoRa Alliance, Inc. *LoRaWAN™ 1.1 Specification* [online]. 2017, Beaverton, [cit. 2020-11-5]. Dostupné z URL: <https://lora-alliance.org/sites/default/files/2018-04/lorawantm_specification_-v1.1.pdf.

[26] SIKKEN, B. *Project DecodingLoRa* [online]. 2020-05-11, [cit. 2020-10-29]. Dostupné z URL: <https://revspace.nl/DecodingLora>.

[27] MARINA, D., MANIAM, N., *Review of indoor localization techniques* [online]. International Journal of Engineering and Technology(UAE), 2018, [cit. 2020-12-07]. 7. 201-204. 10.14419/ijet.v7i2.14.12980. Dostupné z URL: <https://www.researchgate.net/publication/326982013_Review_of_indoor_localization_techniques>.

[28] *Location Tracking Approaches: Chapter 2* [online]. Wi-Fi Location-Based Services 4.1 Design Guide, Cisco, 2014, , 1-14 [cit. 2020-12- 8]. Dostupné z URL: <https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/solutions/Enterprise/Mobility/WiFiLBS-DG/wifich2.html?bookSearch=true>.

[29] BUCHMAN, A., LUNG, C. *On the relationship between received signal strength and received signal strength index of IEEE 802.11 compatible radio transceivers* [online]. Carpathian Journal of Electronic and Computer Engineering. 2013, 15-20, [cit. 2020-12- 12]. Dostupné z URL: <http://cjece.ubm.ro/vol/6-2013/203-6127.pdf>.

[30] CANTÓN PATERNA, V., CALVERAS AUGÉ, A., PARADELLS ASPAS, J., PÉREZ BULLONES, M.A. *A Bluetooth Low Energy Indoor Positioning System with Channel Diversity, Weighted Trilateration and Kalman Filtering* [online]. Sensors 2017, 17, 2927, [cit. 2020-12-06]. Dostupné z URL: <https://doi.org/10.3390/s17122927>.

[31] RAPPAPORT, T. S. *Wireless Communications Principles and Practices*. Upper Saddle River, N.J., Prentice Hal, 2002, [cit. 2020-12-06], ISBN: 0130422320.

[32] ITU-R. *Recommendation ITU-R P.1238-10* [online]. P Series Radiowave propagation, Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 450 GHz, Geneva, 2019, [cit. 2020-12-07]. Dostupné z URL: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.1238-10-201908-I/en>.

[33] IMST GMBH. *iM282A – High range with LoRa® on worldwide 2.4 GHz band* [online]. Wireless Solutions, [cit. 2020-11-16]. Dostupné z URL: <https://wireless-solutions.de/blog/2020/07/24/im282a-high-range-with-lora-on-worldwide-2-4-ghz-band/>.

[34] IMST GMBH. *SK-iM282A – LoRa® Starter Kit with iM282A Radio Module* [online]. Wireless Solutions, [cit. 2020-11-16]. Dostupné z URL: <https://wireless-solutions.de/products/lora-solutions-by-imst/development-tools/sk-im282a/>.

[35] IMST GMBH. *iM282A Datasheet* [online]. WiMOD iM282A, ver 1.0, 2018-03-26, s. 28, [cit. 2020-11-17]. Dostupné z URL: <https://shop.imst.de/media/pdf/d1/84/8a/iM282A_Datasheet_1v04I9tLIvWhowj3.pdf>.

[36] IMST GMBH. *WiMOD LR Base Plus Firmware* Feature Specification Version 1.1, s. 17, june 2018, [cit. 2020-11-27]. Dostupné z URL: <https://wireless-solutions.de/downloadfile/wimod-lr-base-plus-documents/?ind=1587558266576&filename=WiMOD_LR_Base_Plus_Feature_Spec_V1_1.pdf&wpdmdl=7260&refresh=5fc2962bd35c81606587947>.

[37] KAUČIARIK, F. *Koexistence systémů LoRa a Wi-Fi v RF pásmu 2.4 GHz*. Brno, 2020, 60s., 11s. příloh. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky. Vedoucí práce Ladislav Polák. Dostupné z URL: <https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=209078>.

[38] LI, G., GENG, E., YE, Z., XU, Y., LIN, J., PANG, Y. *Indoor Positioning Algorithm Based on the Improved RSSI Distance Model* [online]. Sensors 2018, 18, 2820, [cit. 2020-12-02]. Dostupné z URL: <https://doi.org/10.3390/s18092820>.

[39] SADOWSKI, S., SPACHOS, P. *RSSI-Based Indoor Localization with the Internet of Things* [online]. IEEE Access. 2018 [cit. 2020-11-27], 6, 30149-30161. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2843325. ISSN 2169-3536. Dostupné z URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8371230/>.

[40] ANUGRAH, T. W., RAKHMATSYAH, A., WARDANA, A. A. *Non-Line of Sight LoRa –Based Localization using RSSI-Kalman-Filter and Trilateration* [online]. International Journal on Information and Communication Technology (IJoICT), May 2020, s. 1-14, [cit. 2020-11-16]. Dostupné z URL: <https://doi.org/10.21108/IJOICT.2020.00.495>.

[41] WANG, P., LUO, Y. *Research on WiFi Indoor Location Algorithm Based on RSSI Ranging* [online]. 2017 4th International Conference on Information Science and Control Engineering (ICISCE), 2017, pp. 1694-1698, [cit. 2021-4-29], doi: 10.1109/ICISCE.2017.354. Dostupné z URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8110581>.

[42] IRSAN, T. A., MUIS, A., SARI, R.F. *Performance Evaluation of RSS Fingerprinting for Indoor Location using LoRa* [online]. International Journal of Simulation–Systems, Science & Technology, 2019, [cit. 2020-12-12]. Dostupné z URL: <https://ijssst.info/Vol-20/No-5/paper8.pdf>.

[43] YANG, S., YUAN, Z., LI, W. *Error data analytics on RSS range-based localization* [online]. In Big Data Mining and Analytics, vol. 3, no. 3, pp. 155-170, Sept. 2020, [cit. 2021-05-12], doi: 10.26599/BDMA.2020.9020001. Dostupné z URL: <https://doi.org/10.26599/BDMA.2020.9020001>.

[44] GIDLUND, M., ANJUM, M., KHAN, M. A., HASSAN S. A., MAHMOOD, A., QURESHI H. K. *RSSI Fingerprinting-Based Localization Using Machine Learning in LoRa Networks* [online]. In IEEE Internet of Things Magazine, vol. 3, no. 4, pp. 53-59, December 2020, [cit. 2020-04-18], doi: 10.1109/IOTM.0001.2000019. Dostupné z URL: <https://doi.org/10.1109/IOTM.0001.2000019>.

[45] ŠIMKA, M. *LoRa-based indoor localization* [online]. Proceedings of the 27 th Conference STUDENT EEICT 2021, 2021, s. 3, [cit. 2021-05-10], ISBN 978-80-214-5942-7.

Seznam zkratek

bps	Bits per second
BW	Bandwidth
cps	Chips per second
CRC	Cyclic Redundancy Check
CSS	Chirp Spread Spectrum
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
FEC	Forward Error Correction
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum
FLRC	Fast Long Range Communication
FSK	Frequency Shift Keying
GFSK	Gaussian Frequency Shift Keying
GMSK	Gauss Minimum Shift Keying
HCI	Host Controller Interface
IoT	Internet of Things
LOS	Line Of Sight
LPWAN	Low Power Wide Area Network
MAC	Medium Access Control
NLOS	Non Line Of Sight
PER	Packet Error Rate
RSS	Received Signal Strength
RSSI	Received Signal Strength Indication
SAW	Surface Acoustic Wave
SNR	Signal to Noise Ratio
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter

A Přílohy

A.1 Tabulky souřadnic lokalizovaných pozic – Aula

Tab. A.1: Souřadnice lokalizovaných pozic s odpovídajícími odchylkami v prostředí Aula – 1. varianta konfigurace (LoRa® - BW = 1600 kHz, SF = 5)

Pozice	**Skutečné souřadnice**		**Vypočtené souřadnice**		**Odchylka**
	X [m]	Y [m]	X [m]	Y [m]	[m]
P1	2,50	1,60	3,97	1,65	1,476
P2	1,70	10,55	4,03	11,51	2,530
P3	4,75	10,00	4,44	9,85	0,341
P4	10,55	11,10	7,00	9,48	3,897
P5	11,00	4,00	8,81	3,26	2,307
P6	3,15	18,00	2,61	17,22	0,940

Souřadnice vysílačů: **A** [4,5 ; 13,8], **B** [9,0 ; 9,0], **C** [2,5 ; 6,0], **D** [7,0 ; 3,5]

Tab. A.2: Souřadnice lokalizovaných pozic s odpovídajícími odchylkami v prostředí Aula – 2. varianta konfigurace (LoRa® - BW = 200 kHz, SF = 12)

Pozice	**Skutečné souřadnice**		**Vypočtené souřadnice**		**Odchylka**
	X [m]	Y [m]	X [m]	Y [m]	[m]
P1	2,50	1,60	3,67	1,07	1,284
P2	1,70	10,55	1,69	9,33	1,219
P3	4,75	10,00	4,55	10,07	0,206
P4	10,55	11,10	9,84	8,50	2,691
P5	11,00	4,00	12,13	3,28	1,344
P6	3,15	18,00	4,76	17,31	1,749

Souřadnice vysílačů: **A** [4,5 ; 13,8], **B** [9,0 ; 9,0], **C** [2,5 ; 6,0], **D** [7,0 ; 3,5]

Tab. A.3: Souřadnice lokalizovaných pozic s odpovídajícími odchylkami v prostředí Aula – 3. varianta konfigurace (FLRC - BW = 1200 kHz, BR = 1300 kb/s)

Pozice	**Skutečné souřadnice**		**Vypočtené souřadnice**		**Odchylka**
	X [m]	Y [m]	X [m]	Y [m]	[m]
P1	2,50	1,60	1,65	6,49	4,971
P2	1,70	10,55	2,47	12,42	2,027
P3	4,75	10,00	5,19	10,23	0,503
P4	10,55	11,10	12,33	8,44	3,200 kHz
P5	11,00	4,00	8,53	4,17	2,475
P6	3,15	18,00	2,17	17,05	1,361

Souřadnice vysílačů: **A** [4,5 ; 13,8], **B** [9,0 ; 9,0], **C** [2,5 ; 6,0], **D** [7,0 ; 3,5]

Tab. A.4: Souřadnice lokalizovaných pozic s odpovídajícími odchylkami v prostředí Aula – 4. varianta konfigurace (FLRC - BW = 300 kHz, BR = 260 kb/s)

Pozice	**Skutečné souřadnice**		**Vypočtené souřadnice**		**Odchylka**
	X [m]	Y [m]	X [m]	Y [m]	[m]
P1	2,50	1,60	4,44	3,15	2,491
P2	1,70	10,55	0,80	11,32	1,188
P3	4,75	10,00	3,86	10,69	1,126
P4	10,55	11,10	9,92	10,26	1,042
P5	11,00	4,00	10,95	4,71	0,718
P6	3,15	18,00	4,28	15,75	2,518

Souřadnice vysílačů: **A** [4,5 ; 13,8], **B** [9,0 ; 9,0], **C** [2,5 ; 6,0], **D** [7,0 ; 3,5]

Tab. A.5: Souřadnice lokalizovaných pozic s odpovídajícími odchylkami v prostředí Aula – 5. varianta konfigurace ((G)FSK - BW = 2400 kHz, BR = 200 kb/s)

Pozice	**Skutečné souřadnice**		**Vypočtené souřadnice**		**Odchylka**
	X [m]	Y [m]	X [m]	Y [m]	[m]
P1	2,50	1,60	0,37	0,09	2,600
P2	1,70	10,55	2,59	11,00	0,998
P3	4,75	10,00	4,46	10,66	0,717
P4	10,55	11,10	13,74	5,92	6,077
P5	11,00	4,00	11,41	5,00	1,09
P6	3,15	18,00	4,34	16,97	1,575

Souřadnice vysílačů: **A** [4,5 ; 13,8], **B** [9,0 ; 9,0], **C** [2,5 ; 6,0], **D** [7,0 ; 3,5]

Tab. A.6: Souřadnice lokalizovaných pozic s odpovídajícími odchylkami v prostředí Aula – 6. varianta konfigurace ((G)FSK - BW = 300 kHz, BR = 125 kb/s)

Pozice	**Skutečné souřadnice**		**Vypočtené souřadnice**		**Odchylka**
	X [m]	Y [m]	X [m]	Y [m]	[m]
P1	2,50	1,60	1,16	3,29	2,153
P2	1,70	10,55	3,28	11,47	1,830
P3	4,75	10,00	4,14	9,66	0,692
P4	10,55	11,10	12,93	6,16	5,479
P5	11,00	4,00	9,71	5,11	1,697
P6	3,15	18,00	2,11	12,97	5,13

Souřadnice vysílačů: **A** [4,5 ; 13,8], **B** [9,0 ; 9,0], **C** [2,5 ; 6,0], **D** [7,0 ; 3,5]

A.2 Tabulky souřadnic lokalizovaných pozic – Šatna

Tab. A.7: Souřadnice lokalizovaných pozic s odpovídajícími odchylkami v prostředí Šatna – 1. varianta konfigurace (LoRa® - BW = 200 kHz, SF = 12, $f_c = 2{,}479\,999\,939$ Hz)

Pozice	**Skutečné souřadnice**		**Vypočtené souřadnice**		**Odchylka**
	X [m]	Y [m]	X [m]	Y [m]	[m]
P1	8,00	11,50	8,11	11,39	0,157
P2	14,30	21,10	12,69	19,27	2,431
P3	2,30	7,50	3,62	6,85	1,495
P4	2,00	23,30	0,87	25,55	2,521
P5	4,50	14,50	4,95	13,95	0,715
P6	8,20	2,50	8,75	1,28	1,355

Souřadnice vysílačů: **A** [10,7 ; 14,2], **B** [8,0 ; 20,3], **C** [7,0 ; 8,5], **D** [1,0 ; 17,5], **E** [0,7 ; 4,6]

Tab. A.8: Souřadnice lokalizovaných pozic s odpovídajícími odchylkami v prostředí Šatna – 2. varianta konfigurace (LoRa® - BW = 200 kHz, SF = 12, $f_c = 2\,450\,000\,122$ Hz)

Pozice	**Skutečné souřadnice**		**Vypočtené souřadnice**		**Odchylka**
	X [m]	Y [m]	X [m]	Y [m]	[m]
P1	8,00	11,50	7,66	12,02	0,624
P2	14,30	21,10	11,67	20,07	2,818
P3	2,30	7,50	3,12	6,84	1,081
P4	2,00	23,30	2,74	23,30	0,749
P5	4,50	14,50	4,92	13,79	0,828
P6	8,20	2,50	5,52	3,83	2,944

Souřadnice vysílačů: **A** [10,7 ; 14,2], **B** [8,0 ; 20,3], **C** [7,0 ; 8,5], **D** [1,0 ; 17,5], **E** [0,7 ; 4,6]

Tab. A.9: Souřadnice lokalizovaných pozic s odpovídajícími odchylkami v prostředí Šatna – 3. varianta konfigurace (LoRa® - BW = 200 kHz, SF = 5)

Pozice	**Skutečné souřadnice**		**Vypočtené souřadnice**		**Odchylka**
	X [m]	Y [m]	X [m]	Y [m]	[m]
P1	8,00	11,50	8,28	11,39	0,302
P2	14,30	21,10	10,15	17,31	5,615
P3	2,30	7,50	2,40	8,91	1,365
P4	2,00	23,30	3,51	22,34	1,791
P5	4,50	14,50	5,49	15,29	1,277
P6	8,20	2,50	3,81	7,73	6,796

Souřadnice vysílačů: **A** [10,7 ; 14,2], **B** [8,0 ; 20,3], **C** [7,0 ; 8,5], **D** [1,0 ; 17,5], **E** [0,7 ; 4,6]

Tab. A.10: Souřadnice lokalizovaných pozic s odpovídajícími odchylkami v prostředí Šatna – 4. varianta konfigurace (LoRa® - BW = 1600 kHz, SF = 5)

Pozice	**Skutečné souřadnice**		**Vypočtené souřadnice**		**Odchylka**
	X [m]	Y [m]	X [m]	Y [m]	[m]
P1	8,00	11,50	7,74	11,69	0,320
P2	14,30	21,10	18,14	22,66	4,155
P3	2,30	7,50	1,44	11,01	5,906
P4	2,00	23,30	0,01	27,19	4,377
P5	4,50	14,50	3,51	16,12	1,898
P6	8,20	2,50	8,46	7,55	5,065

Souřadnice vysílačů: **A** [10,7 ; 14,2], **B** [8,0 ; 20,3], **C** [7,0 ; 8,5], **D** [1,0 ; 17,5], **E** [0,7 ; 4,6]

Tab. A.11: Souřadnice lokalizovaných pozic s odpovídajícími odchylkami v prostředí Šatna – 5. varianta konfigurace (LoRa® - BW = 1600 kHz, SF = 8)

Pozice	**Skutečné souřadnice**		**Vypočtené souřadnice**		**Odchylka**
	X [m]	Y [m]	X [m]	Y [m]	[m]
P1	8,00	11,50	8,00	10,72	0,780
P2	14,30	21,10	8,55	17,54	6,760
P3	2,30	7,50	1,29	9,29	2,018
P4	2,00	23,30	1,81	23,80	0,541
P5	4,50	14,50	5,15	13,50	1,190
P6	8,20	2,50	8,37	1,30	1,217

Souřadnice vysílačů: **A** [10,7 ; 14,2], **B** [8,0 ; 20,3], **C** [7,0 ; 8,5], **D** [1,0 ; 17,5], **E** [0,7 ; 4,6]

Tab. A.12: Souřadnice lokalizovaných pozic s odpovídajícími odchylkami v prostředí Šatna – 6. varianta konfigurace (LoRa® - BW = 1600 kHz, SF = 10)

Pozice	**Skutečné souřadnice**		**Vypočtené souřadnice**		**Odchylka**
	X [m]	Y [m]	X [m]	Y [m]	[m]
P1	8,00	11,50	8,24	11,61	0,268
P2	14,30	21,10	11,39	18,30	4,029
P3	2,30	7,50	2,96	7,74	0,697
P4	2,00	23,30	3,28	24,47	1,738
P5	4,50	14,50	4,13	12,83	1,707
P6	8,20	2,50	10,38	3,02	2,293

Souřadnice vysílačů: **A** [10,7 ; 14,2], **B** [8,0 ; 20,3], **C** [7,0 ; 8,5], **D** [1,0 ; 17,5], **E** [0,7 ; 4,6]

Tab. A.13: Souřadnice lokalizovaných pozic s odpovídajícími odchylkami v prostředí Šatna – 7. varianta konfigurace (LoRa® - BW = 1600 kHz, SF = 12, P_{Tx} = 8 dBm)

Pozice	**Skutečné souřadnice**		**Vypočtené souřadnice**		**Odchylka**
	X [m]	Y [m]	X [m]	Y [m]	[m]
P1	8,00	11,50	7,60	11,15	0,524
P2	14,30	21,10	11,47	20,48	2,894
P3	2,30	7,50	1,76	9,92	2,436
P4	2,00	23,30	2,99	23,27	0,996
P5	4,50	14,50	5,00	14,49	0,505
P6	8,20	2,50	10,77	2,08	2,657

Souřadnice vysílačů: **A** [10,7 ; 14,2], **B** [8,0 ; 20,3], **C** [7,0 ; 8,5], **D** [1,0 ; 17,5], **E** [0,7 ; 4,6]

Tab. A.14: Souřadnice lokalizovaných pozic s odpovídajícími odchylkami v prostředí Šatna – 8. varianta konfigurace (LoRa® - BW = 1600 kHz, SF = 12, P_{Tx} = 0 dBm)

Pozice	**Skutečné souřadnice**		**Vypočtené souřadnice**		**Odchylka**
	X [m]	Y [m]	X [m]	Y [m]	[m]
P1	8,00	11,50	7,84	11,97	0,495
P2	14,30	21,10	7,63	12,90	10,565
P3	2,30	7,50	2,41	7,77	0,256
P4	2,00	23,30	2,19	25,19	1,908
P5	4,50	14,50	4,25	13,41	1,115
P6	8,20	2,50	8,93	4,58	2,233

Souřadnice vysílačů: **A** [10,7 ; 14,2], **B** [8,0 ; 20,3], **C** [7,0 ; 8,5], **D** [1,0 ; 17,5], **E** [0,7 ; 4,6]

Tab. A.15: Souřadnice lokalizovaných pozic s odpovídajícími odchylkami v prostředí Šatna – 9. varianta konfigurace (LoRa® - BW = 1600 kHz, SF = 12, P_{Tx} = -8 dBm)

Pozice	**Skutečné souřadnice**		**Vypočtené souřadnice**		**Odchylka**
	X [m]	Y [m]	X [m]	Y [m]	[m]
P1	8,00	11,50	7,43	12,39	1,060
P2	14,30	21,10	11,41	16,00	5,857
P3	2,30	7,50	0,90	13,02	5,655
P4	2,00	23,30	2,34	25,35	2,086
P5	4,50	14,50	5,902	15,32	1,625
P6	8,20	2,50	5,52	3,55	2,834

Souřadnice vysílačů: **A** [10,7 ; 14,2], **B** [8,0 ; 20,3], **C** [7,0 ; 8,5], **D** [1,0 ; 17,5], **E** [0,7 ; 4,6]

Tab. A.16: Souřadnice lokalizovaných pozic s odpovídajícími odchylkami v prostředí Šatna – 10. varianta konfigurace (LoRa® - BW = 1600 kHz, SF = 12, P_{Tx} = -18 dBm)

Pozice	**Skutečné souřadnice**		**Vypočtené souřadnice**		**Odchylka**
	X [m]	Y [m]	X [m]	Y [m]	[m]
P1	8,00	11,50	8,44	11,46	0,446
P2	14,30	21,10	8,68	17,89	6,467
P3	2,30	7,50	3,47	6,89	1,347
P4	2,00	23,30	1,11	27,56	4,358
P5	4,50	14,50	5,35	19,78	5,350
P6	8,20	2,50	9,48	4,87	2,722

Souřadnice vysílačů: **A** [10,7 ; 14,2], **B** [8,0 ; 20,3], **C** [7,0 ; 8,5], **D** [1,0 ; 17,5], **E** [0,7 ; 4,6]

A.3 Tabulky souřadnic lokalizovaných pozic – Chodba

Tab. A.17: Souřadnice lokalizovaných pozic s odpovídajícími odchylkami v prostředí Chodba – 1. varianta konfigurace (LoRa® - BW = 200 kHz, SF = 12)

Pozice	**Skutečné souřadnice**		**Vypočtené souřadnice**		**Odchylka**
	X [m]	Y [m]	X [m]	Y [m]	[m]
P1	1,50	1,50	2,99	1,23	1,524
P2	0,80	7,30	0,64	6,85	0,477
P3	2,50	17,00	1,96	18,02	1,155

Souřadnice vysílačů: **A** [2,2 ; 4,0], **B** [0,2 ; 10,0], **C** [1,5 ; 15,0], **D** [2,8 ; 8,9]

Tab. A.18: Souřadnice lokalizovaných pozic s odpovídajícími odchylkami v prostředí Chodba – 2. varianta konfigurace (LoRa® - BW = 1600 kHz, SF = 5)

Pozice	**Skutečné souřadnice**		**Vypočtené souřadnice**		**Odchylka**
	X [m]	Y [m]	X [m]	Y [m]	[m]
P1	1,50	1,50	0,50	3,50	2,233
P2	0,80	7,30	1,32	8,63	1,432
P3	2,50	17,00	4,41	16,67	1,938

Souřadnice vysílačů: **A** [2,2 ; 4,0], **B** [0,2 ; 10,0], **C** [1,5 ; 15,0], **D** [2,8 ; 8,9]

Tab. A.19: Souřadnice lokalizovaných pozic s odpovídajícími odchylkami v prostředí Chodba – 3. varianta konfigurace (LoRa® - BW = 1600 kHz, SF = 12)

Pozice	**Skutečné souřadnice**		**Vypočtené souřadnice**		**Odchylka**
	X [m]	Y [m]	X [m]	Y [m]	[m]
P1	1,50	1,50	2,00	2,97	1,553
P2	0,80	7,30	0,63	6,65	0,666
P3	2,50	17,00	1,58	15,78	1,521

Souřadnice vysílačů: **A** [2,2 ; 4,0], **B** [0,2 ; 10,0], **C** [1,5 ; 15,0], **D** [2,8 ; 8,9]

Tab. A.20: Souřadnice lokalizovaných pozic s odpovídajícími odchylkami (lokalizace ze 3. do 2. patra) v prostředí Chodba – 4. varianta konfigurace (LoRa® - BW = 1600 kHz, SF = 12)

Pozice	**Skutečné souřadnice**		**Vypočtené souřadnice**		**Odchylka**
	X [m]	Y [m]	X [m]	Y [m]	[m]
P1	1,50	1,50	0,12	2,89	1,957
P2	0,80	7,30	1,35	7,83	0,765
P3	2,50	17,00	3,29	14,38	2,732

Souřadnice vysílačů: **A** [2,2 ; 4,0], **B** [0,2 ; 10,0], **C** [1,5 ; 15,0], **D** [2,8 ; 8,9]

Tab. A.21: Souřadnice lokalizovaných pozic s odpovídajícími odchylkami (lokalizace ze 3. do 1. patra) v prostředí Chodba – 5. varianta konfigurace (LoRa® - BW = 1600 kHz, SF = 12)

Pozice	**Skutečné souřadnice**		**Vypočtené souřadnice**		**Odchylka**
	X [m]	Y [m]	X [m]	Y [m]	[m]
P1	1,50	1,50	3,26	5,88	4,722
P2	0,80	7,30	0,33	6,51	0,920
P3	2,50	17,00	3,37	19,02	2,199

Souřadnice vysílačů: **A** [2,2 ; 4,0], **B** [0,2 ; 10,0], **C** [1,5 ; 15,0], **D** [2,8 ; 8,9]