



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY

**ÚSTAV POČÍTAČOVÝCH SYSTÉMŮ**

DEPARTMENT OF COMPUTER SYSTEMS

**KOMUNIKACE NA VĚTŠÍ VZDÁLENOSTI V PÁSMU  
2.4GHZ**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**MARTIN PENTRÁK**

**VEDOUcí PRÁCE**

SUPERVISOR

**doc. Ing. ZDENĚK VAŠÍČEK, Ph.D.**

BRNO 2025

## Zadání bakalářské práce



164484

Ústav: Ústav počítačových systémů (UPSY)  
Student: **Pentrák Martin**  
Program: Informační technologie  
Název: **Komunikace na větší vzdálenosti v pásmu 2.4GHz**  
Kategorie: Vestavěné systémy  
Akademický rok: 2024/25

### Zadání:

1. Seznamte se s technologiemi pro bezdrátovou komunikaci pracujícími v pásmu 2.4GHz umožňujícími zvýšit dosah linky jako je Bluetooth LE, LoRa a point-to-point (P2P) komunikace.
2. Navrhněte vestavěný systém na bázi rodiny mikrokontrolerů ESP32, pomocí kterého bude možné vyhodnotit dosah jednotlivých technologií. V případě P2P linky uvažujte využití opravných kódů.
3. Navržený systém implementujte formou prototypu, tj. např. s využitím vývojových desek a využijte jej k experimentálnímu vyhodnocení dosahu jednotlivých technologií v závislosti na parametrech zvolené technologie a prostředí (volné prostranství, vnitřní prostory, ideální spoj, apod.). Dbejte na statistickou věrohodnost a opakovatelnost měření.
4. Vytvořte sadu úloh, které budou demonstrovat princip obousměrné komunikace pro obě technologie.
5. Zhodnotě dosažené výsledky a diskutujte možné využití.

### Literatura:

Dle pokynů vedoucího.

Při obhajobě semestrální části projektu je požadováno:

- Splnění bodů č. 1 a 2 zadání.

Podrobné závazné pokyny pro vypracování práce viz <https://www.fit.vut.cz/study/theses/>

Vedoucí práce: **Vašíček Zdeněk, doc. Ing., Ph.D.**  
Vedoucí ústavu: Sekanina Lukáš, prof. Ing., Ph.D.  
Datum zadání: 1.11.2024  
Termín pro odevzdání: 14.5.2025  
Datum schválení: 31.10.2024

## Abstrakt

Táto bakalárska práca sa zameriava na bezdrôtovú komunikáciu v pásme 2.4GHZ, konkrétne na technológie Bluetooth Low Energy (BLE) a LoRa. Cieľom práce je analyzovať možnosti dosahu z ohľadom na rýchlosť komunikácie a možnú dosažitelnú vzdialenosť a navrhnúť experimentálny systém založený na rodine mikrokontrolerov ESP32. V teoretickej časti sú podrobne rozobrané princípy modulácii, charakteristiky daných technológií a kľúčové parametre ovplyvňujúce dosah. Praktická časť práce predstavuje návrh a implementáciu meracieho systému, ktorý umožňuje porovnávať dosah a efektívnosť prenosu dát medzi BLE a LoRa v otvorenom priestranstve. Získané výsledky poskytujú cenné informácie k ďalšiemu vývoji IoT s využitím týchto technológií.

## Abstract

This thesis focus field is wireless communication at 2.4GHZ range. This thesis will examine wireless technologies such as LoRa and BLE and will compare range vs bit rate ratio of these two technologies and design embeded system based on ESP32 microcontroller family. In the theoretical section, the modulation principles of the respective technologies, the characteristics of the respective technologies, and the key parameters affecting the range – such as the spreading factor or the bandwidth – are discussed in detail. Practical part talks about desing and implementation of test system. Which compare effectivity and range of LoRa and BLE in open field. This will provide usefull infromation for developing IoT devices using this technologies.

## Klíčová slova

LoRa, BLE, dosah, prenosová rýchlosť, bezdrôtové technológie, Bluetooth

## Keywords

LoRa, BLE, range, data rate, wireless technology, Bluetooth

## Citace

PENTRÁK, Martin. *Komunikace na větší vzdálenosti v pásmu 2.4GHz*. Brno, 2025. Bakalárska práca. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce doc. Ing. Zdeněk Vašíček, Ph.D.

# Komunikace na větší vzdálenosti v pásmu 2.4GHz

## Prohlášení

Prehlasujem, že som túto bakalársku prácu vypracoval samostatne pod vedením pána docenta Vašíčka. Uviedol som všetky literárne pramene, publikácie a ďalšie zdroje, z ktorých som čerpal.

.....  
Martin Pentrák  
19. května 2025

## Poděkování

Rád by som poďakoval vedúcemu práce pánovi docentovi Vašíčkovi za odboorné vedenie, cenné rady a usmernenia behom konzultácií tejto práce. Ďalej sa chcem poďakovať svojim blízkym, za pomoc pri meraní, trpezlivosť a podporu vďaka ktorej som bol schopný túto prácu dokončiť.

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Teoretický úvod</b>	<b>5</b>
2.1	Bluetooth Low Energy (BLE)	5
2.1.1	Dosah	6
2.1.2	spotreba energie	6
2.1.3	BLE packet	7
2.2	LoRa v pásme 2.4GHZ	7
2.2.1	Fyzická vrstva	8
2.2.2	Formát LoRa rámca	9
2.3	Point to Point komunikácia	9
2.3.1	P2P v rámci LoRa	10
2.3.2	P2p v rámci Bluetooth LE	10
2.3.3	Výhody a nevýhody P2P komunikácie	10
<b>3</b>	<b>Predošlé výskumy</b>	<b>11</b>
3.1	Štúdie BLE	11
3.2	Štúdie LoRa v pásme 2.4GHZ	11
3.3	Ďalšie technológie	12
3.3.1	Zigbee	12
3.3.2	z-Wawe	13
3.3.3	Wi-SUN	13
<b>4</b>	<b>Návrh merania</b>	<b>15</b>
4.1	Cieľ merania	15
4.2	Popis testovacích technológií	15
4.2.1	Merané parametre	16
4.2.2	Podmienky merania	16
4.2.3	Hardwarove a Softwarove nastavenia	16
4.3	Metodika vyhodnocovania výsledkov	16
4.4	Štatistické spracovanie dát	17
4.5	Riziká a možné chyby merania	17
<b>5</b>	<b>Implementácia meracieho systému</b>	<b>18</b>
5.1	Použitý hardvér	18
5.2	Softvérová implementácia	19
5.2.1	Štruktúra softvéru LoRa	20
5.2.2	Prijímač	21

5.3	Implementácia kódu pre BLE . . . . .	23
5.3.1	Prijímač . . . . .	23
5.3.2	Vysielač . . . . .	24
5.4	Meranie vzdialenosti . . . . .	25
<b>6</b>	<b>výsledky</b>	<b>26</b>
6.1	výsledky BLE . . . . .	26
6.1.1	RSSI . . . . .	26
6.1.2	Čas prenosu . . . . .	27
6.1.3	Dosiahnutá vzdialenosť . . . . .	27
6.2	Výsledky LoRa . . . . .	28
6.2.1	Rýchlosť prenosu . . . . .	28
6.3	Vzdialenosť . . . . .	31
<b>7</b>	<b>Záver</b>	<b>32</b>
7.1	Problémy pri meraní . . . . .	32
7.2	Možnosti ďalšieho rozšírenia experimentu . . . . .	33
7.2.1	Meranie v lesnatom poraste . . . . .	33
7.2.2	Meranie pohybujúcich sa objektov . . . . .	33
7.2.3	Nasadenie v sieti s viacerými uzlami . . . . .	34
	<b>Literatura</b>	<b>35</b>

# Seznam obrázků

2.1	BLE packets [7] . . . . .	7
2.2	LoRa PHY frame [17] . . . . .	9
5.1	Upevnenie meracieho systému v teréne . . . . .	19
6.1	Vzťah medzi vzdialenosťou a RSSI . . . . .	27
6.2	Mapa merania . . . . .	28
6.3	Porovnanie SF a rýchlosti prenosu pre jednotlivé šírky pásma pri paketoch o veľkosti 255B . . . . .	29
6.4	Porovnanie SF a rýchlosti prenosu pre jednotlivé šírky pásma pri paketoch o veľkosti 110B . . . . .	30
6.5	Porovnanie SF a rýchlosti prenosu pre jednotlivé šírky pásma pri paketoch o veľkosti 11B . . . . .	30

# Kapitola 1

## Úvod

Bezdrôtová komunikácia sa v posledných desaťročiach stala neoddeliteľnou súčasťou moderných technológií a každodenného života. Frekvenčné pásmo 2.4 GHz patrí medzi najvyužívanejšie pásma, pretože ponúka vhodný kompromis medzi dosahom, objemom prenesených dát a dostupnosťou hardvéru. Toto pásmo je využívané v mnohých štandardoch, ako sú Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee a ďalšie, ktoré nachádzajú uplatnenie v domácnostiach, priemyselných riešeniach aj v oblasti internetu vecí (IoT). [2]

Táto práca sa zameriava predovšetkým na porovnanie dvoch bezdrôtových technológií, ktoré sú optimalizované pre rôzne druhy komunikácie na väčšie vzdialenosti – Bluetooth Low Energy (BLE) a LoRa (Long Range). Obe technológie sa stali základom mnohých IoT aplikácií, pričom každá z nich má špecifické výhody a limity. BLE je známe nízkou spotrebou energie pri relatívne vysokej prenosovej rýchlosti na krátke až stredné vzdialenosti. [4] LoRa naopak vyniká mimoriadne veľkým dosahom a vysokou odolnosťou voči rušeniu, avšak za cenu nižšieho objemu prenesených dát. [5] Cieľom tejto práce je systematicky analyzovať a porovnať tieto dve technológie z hľadiska ich dosahu, kvality spojenia a spoľahlivosti prenosu dát rôznych veľkostí. Experimentálne merania budú prebiehať v otvorenom priestranstve s rôzne nastavenými parametrami (napr. Spreading Factor, Coding Rate, Šírka pásma ...), aby bolo možné identifikovať ich optimálne využitie v praxi. Výsledky tejto analýzy môžu pomôcť pri rozhodovaní, ktorá technológia je vhodnejšia pre konkrétne IoT aplikácie v reálnom svete. Ďalším cieľom tejto bakalárskej práce je preskúmať možnosti komunikácie na väčšie vzdialenosti v pásme 2.4 GHz a navrhnúť vstavaný systém na báze mikrokontrolérov ESP32, ktorý umožní experimentálne vyhodnotenie dosahu vybraných technológií. Táto práca najskôr rozoberie teoretické základy týchto technológií a následne rozoberie návrh a implementáciu týchto technológií. Na záver práce budú prezentované výsledky meraní ktoré sme získali počas experimentálneho merania a na záver budú tieto výsledky interpretované. Táto práca si klade za cieľ prispieť k lepšiemu pochopeniu výkonnosti bezdrôtových komunikačných technológií v pásme 2.4 GHz, čo môže byť užitočné pre budúci vývoj v oblasti IoT a iných aplikácií vyžadujúcich spoľahlivú a efektívnu komunikáciu na väčšie vzdialenosti.

## Kapitola 2

# Teoretický úvod

Táto kapitola poskytuje prehľad aktuálneho stavu bezdrôtových komunikačných technológií v pásme 2.4 GHz Bluetooth LE a LoRa. Taktiež vysvetľuje FEC (Forward error correction) v tomto kontexte.

### 2.1 Bluetooth Low Energy (BLE)

Bluetooth Low Energy (BLE) predstavuje modernú bezdrôtovú komunikačnú technológiu, ktorá bola vyvinutá s dôrazom na minimalizáciu spotreby elektrickej energie. Jej architektúra a fungovanie sú navrhnuté tak, aby umožňovali dlhodobú prevádzku zariadení bez potreby častého nabíjania alebo výmeny batérií, čo je mimoriadne dôležité najmä v oblasti internetu vecí (IoT), kde sa často pracuje so senzormi alebo inými malými zariadeniami umiestnenými na miestach s obmedzeným prístupom. Táto energetická efektivita je dosiahnutá vďaka použitiu rôznych režimov spánku a optimalizovanej komunikácií, čo umožňuje dosahovať veľmi nízku spotrebu v porovnaní s klasickým Bluetooth. [4] Klasický Bluetooth má oproti BLE v niektorých aplikáciách isté obmedzenia, z ktorých najvýraznejším je pomerne krátky dosah. Tento nedostatok pramení najmä z faktu, že Bluetooth bol pôvodne určený na krátkodobú, rýchlu výmenu väčšieho množstva dát medzi zariadeniami, ktoré sa nachádzajú v tesnej blízkosti. Typickými príkladmi sú slúchadlá, inteligentné hodinky alebo klávesnice, kde dlhý dosah nie je prioritou, ale požiadavka na vysokú priepustnosť dát zostáva. Komerčné využitie technológie Bluetooth sa preto historicky sústreďovalo skôr na situácie, kde nie je potrebná veľká vzdialenosť medzi komunikujúcimi zariadeniami, avšak kladie sa dôraz na rýchlosť a objem prenosu. [7] Zásadný posun v tejto oblasti však nastal s príchodom štandardu Bluetooth LE vo verzii 5.0, ktorá bola oficiálne predstavená v roku 2016. Táto verzia priniesla viaceré technické vylepšenia, z ktorých najvýznamnejším bolo práve výrazné rozšírenie maximálneho dosahu. Okrem toho priniesla aj vyššiu flexibilitu pri voľbe medzi dosahom a rýchlosťou prenosu, čo výrazne rozšírilo možnosti jej využitia aj v aplikáciách, ktoré predtým boli doménou iných technológií, ako napríklad LoRa. Bluetooth 5.0 tak vytvoril nové príležitosti pre nasadenie BLE v širšom spektre IoT scenárov vrátane tých, ktoré vyžadujú komunikáciu na väčšie vzdialenosti. [20] Technológia Bluetooth Low Energy (BLE) pracuje vo frekvenčnom pásme 2,4 GHz, ktoré je dostupné pre voľné použitie. Presnejšie povedané, BLE využíva frekvenčný rozsah od 2402 MHz až po 2480 MHz, čím sa radí medzi bezdrôtové technológie pracujúce v tzv. priemyselnom, vedeckom a lekárskom (ISM) pásme. Toto pásmo je globálne uvoľnené pre voľné použitie, čo významne prispieva k rozšíreniu BLE vo svete, najmä v oblasti spotrebnej elektroniky a internetu vecí. Celý

tento frekvenčný rozsah je v BLE rozdelený na celkovo 40 samostatných kanálov. Každý z týchto kanálov zaberá šírku pásma 2 MHz, čo predstavuje kompromis medzi prenosovou kapacitou a schopnosťou odolávať rušeniu v prostredí s vysokou hustotou bezdrôtových zariadení. Z týchto 40 kanálov sú tri špeciálne vyhradené pre tzv. reklamné (advertising) správy – konkrétne ide o kanály číslo 37, 38 a 39. Tieto slúžia na inicializáciu spojenia a rozosielanie informačných rámcov, pomocou ktorých zariadenia signalizujú svoju prítomnosť a dostupnosť pre komunikáciu. Výber týchto troch konkrétnych kanálov zabezpečuje minimalizáciu kolízií so štandardmi ako sú napríklad Wi-Fi a pod., ktoré taktiež pôsobia v rovnakom pásme, ale využívajú odlišné frekvenčné segmenty. [10]

### 2.1.1 Dosah

Jedným z kľúčových aspektov pri hodnotení bezdrôtových komunikačných technológií je ich dosah – teda vzdialenosť, na ktorú môžu spoľahlivo prenášať dáta. V prípade Bluetooth Low Energy (BLE) závisí efektívny dosah od viacerých faktorov, ako typ antény a celkový útlm signálu (napr. kvôli absorpcii alebo odrazom) významne ovplyvňujú efektívny komunikačný dosah BLE zariadení. [4] Ďalším z technických parametrov, ktorý má výrazný vplyv na dosah bezdrôtového prenosu v technológii Bluetooth Low Energy (BLE), je použitie tzv. Coded PHY režimu. Tento režim, predstavený v rámci štandardu BLE 5.0, umožňuje zvýšiť spoľahlivosť prenosu prostredníctvom implementácie doprednej korekcie chýb (FEC – Forward Error Correction). Vďaka tejto metóde je možné zachovať integritu prenášaných dát aj v prípade, že počas prenosu dôjde k čiastočnej strate alebo narušeniu signálu, čo je obzvlášť výhodné pri komunikácii na väčšie vzdialenosti alebo v rušivom prostredí. Coded PHY režim ponúka dve varianty kódovania – S2 a S8, ktoré definujú mieru redundancie vlozenej do prenášaného signálu. Pri konfigurácii S2 sú na prenos jedného dátového bitu použité dva bity fyzickej vrstvy, zatiaľ čo pri S8 sa na prenos toho istého bitu využíva až osem fyzických bitov. Tento princíp zvyšovania redundancie má za následok výrazné predĺženie dosahu komunikácie, pretože prijímač má omnoho väčšiu šancu správne dekodovať pôvodné dáta aj pri zníženej kvalite signálu. Avšak, tento benefit je dosiahnutý na úkor prenosovej rýchlosti, ktorá pri režime S8 exponenciálne klesá v porovnaní so štandardnou nekódovanou komunikáciou. V praxi teda Coded PHY umožňuje spoľahlivý prenos dát tam, kde by bežný režim zlyhal, no za cenu nižšej dátovej priepustnosti. [7] [10]

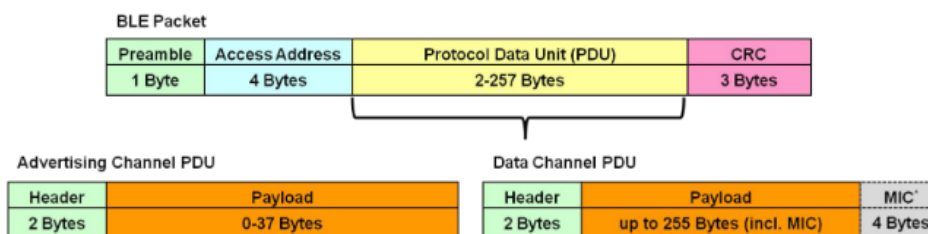
### 2.1.2 spotreba energie

Jednou z najzásadnejších vlastností technológie Bluetooth Low Energy (BLE) je jej mimoriadne nízka energetická náročnosť. Práve nízka spotreba je jedným z hlavných dôvodov, prečo sa BLE stal populárnym riešením v oblasti internetu vecí (IoT), najmä pri napájaní zariadení z malých batérií alebo v aplikáciách s dlhodobou prevádzkou bez zásahu človeka. BLE dosahuje tieto úspory energie prostredníctvom viacerých optimalizácií. Jednou z najefektívnejších je režim hlbokého spánku, v ktorom dokáže zariadenie znížiť spotrebu prúdu na úroveň približne 1 mikroampér (uA). V tomto režime je väčšina vnútorných obvodov neaktívna a čip čaká na vonkajší podnet (napr. signál prerušenia), ktorý ho prebudí do aktívneho režimu. Takáto architektúra umožňuje extrémne dlhú výdrž batérií aj pri pravidelnej komunikácii. [7] [10]

### 2.1.3 BLE packet

Bluetooth Low Energy (BLE) používa jednotnú štruktúru dátového paketu nielen pri samotnom prenose dát, ale aj v procese vyhľadávania a inicializácie spojenia medzi zariadeniami. Tento zjednotený formát zjednodušuje návrh komunikačných protokolov a zároveň prispieva k energetickej efektívnosti celého systému. Proces nadviazania spojenia v BLE sa riadi princípom asymetrie medzi dvoma zariadeniami: jedno z nich sa nachádza v tzv. advertising móde (vysielač režim), zatiaľ čo druhé pracuje v scanning móde (skenovací režim).

Zariadenie v advertising móde pravidelne vysiela krátke broadcastové pakety, ktoré obsahujú identifikačné informácie a potrebné parametre na nadviazanie spojenia – napríklad adresa zariadenia, typ služby alebo časovanie spojenia. Tieto pakety sú vysielať prostredníctvom vyhradených reklamných kanálov a ich obsah je definovaný v súlade s BLE špecifikáciou. Zariadenie, ktoré je v scanning móde, pasívne počúva reklamné kanály a pri zachytení relevantného paketu dokáže nadviazať spojenie s vysielačím zariadením. Samotný proces párovania a výmeny údajov potom prebieha podľa vopred definovaného komunikačného protokolu BLE. Ako vyzerá BLE paket je zobrazené na tomto obrázku 2.1 [7] [10]



Obrázek 2.1: BLE packets [7]

## 2.2 LoRa v pásme 2.4GHZ

LoRa, alebo aj „Long Range“, ako aj z názvu plynie predstavuje bezdrôtovú komunikačnú technológiu navrhnutú špeciálne pre prenos dát na veľké vzdialenosti pri zachovaní veľmi nízkej spotreby energie. Tento názov nám prezrádza, že hlavným cieľom tejto technológie je umožniť efektívnu komunikáciu medzi zariadeniami na väčšie vzdialenosti, čo ju predurčuje na použitie v aplikáciách internetu vecí (IoT), najmä vo vonkajšom alebo priemyselnom prostredí. Jej architektúra pozostáva z dvoch základných vrstiev. Prvou je fyzická vrstva (PHY), ktorá definuje spôsob, akým sú dáta modulované a prenášané cez rádiové frekvenčné pásmo. Táto vrstva využíva technológiu chirp spread spectrum (CSS), vďaka ktorej je signál odolný voči šumu a interferenciám, čo prispieva k jeho vysokému dosahu aj v náročnejších podmienkach. Druhou vrstvou je MAC vrstva, známa ako LoRaWAN (LoRa Wide Area Network), ktorá definuje komunikačný protokol a sieťovú logiku medzi zariadeniami. Zabezpečuje riadenie spojenia, autentifikáciu, triedy zariadení, bezpečnosť prenosu a ďalšie aspekty fungovania siete. Kým fyzická vrstva LoRa je uzavretá a vlastnená spoločnosťou Semtech, LoRaWAN je otvorený protokol spravovaný alianciou LoRa Alliance, čím sa podporuje interoperabilita medzi výrobcami a zariadeniami. Táto dvojvrstvová štruktúra umožňuje LoRa technológií flexibilne reagovať na požiadavky rôznych aplikácií, od jednoduchých point-to-point prenosov s využitím fyzickej vrstvy až po komplexné sieťové topológie s bránami a cloudovou infraštruktúrou. [5] Táto práca sa bude zaoberať analýzou

a praktickým skúmaním dosahu fyzickej vrstvy technológie LoRa, pričom dôraz bude kladený najmä na jej špecifické vlastnosti v oblasti modulácie a spracovania signálu. Fyzická vrstva LoRa využíva na prenos dát vyššie spomínaný spôsob modulácie známy ako Chirp Spread Spectrum (CSS), tento spôsob modulácie je kľúčový v rámci umožnenia spoľahlivého prenosu informácií na veľké vzdialenosti. Veľkou výhodou použitia CSS v technológii LoRa je aj fakt, že umožňuje spoľahlivú komunikáciu pri veľmi úzkej šírke pásma, čo priamo prispieva k nižšej spotrebe energie. Zároveň je systém schopný zachytiť aj veľmi slabé signály, ktoré by iné technológie považovali za šum. Vďaka tomu sa LoRa stáva ideálnym riešením pre komunikáciu na veľké vzdialenosti, ako sú poľnohospodárske plochy, lesy alebo priemyselné areály, kde je dôležitá stabilita a dosah spojenia pri čo najnižšej energetickej náročnosti. [2] [5]

### 2.2.1 Fyzická vrstva

Fyzická vrstva LoRa používa na posielanie správ spomínanú CSS moduláciu signálu, kde princíp fungovania CSS, funguje na princípe zakódovania jednotlivých symbolov pomocou tzv. chirpov, čo sú signály, ktorých frekvencia sa lineárne zvyšuje alebo znižuje v čase – hovoríme teda o tzv. vzostupných (upchirp) a zostupných (downchirp) signáloch. [9] Pričom rôzne symboly poznáme podľa posunutia daného chirpu v čase. Použitie tejto modulácie nám umožňuje komunikovať na veľké vzdialenosti, vďaka jej odolnosti voči šumu a rušeniu. [2] [28]

### SF (Spreading Factor)

Spreading Factor (SF) určuje, koľko bitov obsahuje jeden symbol pri komunikácii medzi zariadeniami v technológii LoRa. Inak povedané, ide o exponent v rovnici 2.1, ktorý definuje počet možných hodnôt (symbolov), ktoré môže prenesený signál nadobúdať. Napríklad pri  $SF = 7$  existuje 128 možných symbolov, zatiaľ čo pri  $SF = 12$  ich je už 4096.

$$M = 2^{SF} \quad (2.1)$$

[11] Z praktického hľadiska má hodnota SF výrazný vplyv na dosah a rýchlosť komunikácie. Vyššia hodnota SF znamená, že symbol trvá dlhšie, čo umožňuje spoľahlivejší prenos na väčšie vzdialenosti, keďže signál je odolnejší voči rušeniu a šumu. Táto odolnosť však prichádza za cenu zníženého objemu prenesených dát – keďže každý symbol síce nesie väčší počet bitov, ale jeho prenos trvá dlhšie, pretože navýšením počtu bitov o jeden sa čas potrebný na prenesenie  $N+1$  bitov zdvojnásobí oproti času, ktorý je potrebný na prenesenie  $N$  bitov. Spreading Factor je teda kompromisom medzi dosahom a rýchlosťou: čím vyšší SF zvolíme, tým lepší dosah získame, ale za cenu pomalšieho prenosu dát. V praxi sa preto vhodná hodnota SF vyberá podľa konkrétnych požiadaviek aplikácie – napríklad pri senzoroch, ktoré odosielajú malé množstvo údajov raz za čas, je vyšší SF výhodný kvôli spoľahlivosti na veľkú vzdialenosť. [11][5]

### CR - CodeRate

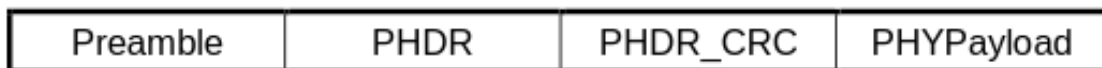
Code Rate (CR) je parameter, ktorý sa vzťahuje na techniku doprednej korekcie chýb (FEC – Forward Error Correction) používanej vo fyzickej vrstve LoRa. Táto metóda zvyšuje spoľahlivosť prenosu tým, že do prenášaných dát vkladá redundantné bity, ktoré umožňujú prijímaču identifikovať a prípadne opraviť chyby spôsobené rušením, šumom alebo stratou časti signálu počas prenosu. Vyššia hodnota CR znamená väčší podiel redundantných bitov,

čo síce zlepšuje odolnosť voči rušeniu, ale zároveň spôsobuje predĺženie času vysielania, a tým aj zníženie celkovej dátovej priepustnosti. V praxi sa preto musí hľadať kompromis medzi spoľahlivosťou a efektivitou prenosu, podobne ako pri výbere spreading faktoru. LoRa na FEC používa Hammingovo kódovanie, konkrétne kódy v rozsahu od 4/5 až po 4/8. To znamená, že ku každým 4 dátovým bitom sa pridáva 1 až 4 paritných (ochranných) bitov. Napríklad pri  $CR = 4/5$  sa každý blok 4 bitov prenáša ako 5 bitov, zatiaľ čo pri  $CR = 4/8$  sa ten istý objem dát rozšíri až na 8 bitov, čo poskytuje najvyššiu ochranu, no na úkor dlhšieho času potrebného na prenesenie bloku dát. [2]

### 2.2.2 Formát LoRa rámca

Formát rámca v LoRa na úrovni fyzickej vrstvy (PHY) má špecifickú štruktúru, ktorá zaisťuje robustnosť a spoľahlivosť prenosu aj v podmienkach s vysokou mierou šumu alebo rušenia. Každý LoRa rámec sa začína úvodnou sekvenciou (preamble), ktorá je tvorená  $N$  vzostupnými chirpami (upchirp) a ukončená presne 2,25 zostupnými chirpami (downchirp). Táto sekvencia slúži na synchronizáciu prijímača s vysielaným signálom a jeho prípravu na správne dekódovanie nasledujúcej dátovej časti. Typická dĺžka úvodnej sekvencie býva vo väčšine prípadov 12,25 symbolu, hoci konkrétna hodnota môže byť upravená podľa nastavenia zariadenia a aplikácie. Za úvodnou sekvenciou nasleduje voliteľná hlavička (header), ktorá obsahuje základné metadata o rámci – napríklad informáciu o dĺžke prenášaných dát. Táto hlavička je kódovaná s použitím maximálnej úrovne doprednej korekcie chýb, konkrétne s Code Rate (CR) 4/8, čo zaisťuje jej vysokú odolnosť voči chybám.

Samotná dátová časť rámca (payload) je potom zakódovaná podľa CR parametra, ktorý je definovaný v hlavičke rámca. Tento prístup umožňuje flexibilne nastaviť úroveň ochrany dát v závislosti od potrieb konkrétnej aplikácie. Na konci rámca môže byť voliteľne pripojená kontrolná suma v podobe CRC (Cyclic Redundancy Check), ktorá slúži na detekciu chýb vzniknutých počas prenosu. Ako vyzerá celý paket je znázornené na obrázku.2.2 [2] Táto viacvrstvomá štruktúra rámca, ktorá kombinuje synchronizačné sekvencie, robustné kó-



Obrázek 2.2: LoRa PHY frame [17]

dovanie hlavičky a voliteľnú kontrolu dát, umožňuje LoRa technológii spoľahlivo prenášať informácie aj na veľké vzdialenosti a v prostrediach s nízkym signálom alebo vysokým rušením. [2]

## 2.3 Point to Point komunikácia

Point-to-point komunikácia (P2P) označuje komunikáciu dvoch zariadení, pri ktorej dochádza k priamemu prenosu dát bez použitia ďalšieho komunikačného uzlu. Na rozdiel od iných odlišných metód, ako je multicast (zdroj simultánne vysiela istej skupine prijímačov) či broadcast (zdroj vysiela všetkým zariadeniam v okolí), pri využití P2P sa jedná o cieľený prenos výhradne medzi týmito dvoma zariadeniami, pričom obidve môžu byť zároveň prijímačmi aj vysielačmi. [8]

### 2.3.1 P2P v rámci LoRa

Technológia LoRa (Long Range) umožňuje bezdrôtový prenos na veľké vzdialenosti s nízkou spotrebou energie. V režime P2P umožňuje dvom zariadeniam priamu komunikáciu bez potreby centrálnnej brány alebo siete. Tento režim je mimoriadne užitočný v oblastiach s obmedzeným alebo neexistujúcim prístupom k iným bezdrôtovým sieťam, typicky hovoríme o lokalitách vidieckych alebo odľahlých. Veľkou výhodou tohto režimu je jeho jednoduchosť a flexibilita. P2P režim nevyžaduje zložité technické vybavenie, takže je jednoduché ho využiť takmer kdekoľvek. Zároveň má aj nízke náklady, pretože nevyžadujú centrálnu bránu alebo serveru a znižujú sa tak náklady potrebné na implementáciu a údržbu systému. LoRa v P2P režime má aj nízku spotrebu energie a je schopná fungovať na batériách dlhú dobu, čo je ideálne pre aplikácie, kde nie je jednoduchý prístup k napájaniu. Ako bolo už vyššie spomenuté, LoRa je obzvlášť efektívna na miestach, kde je obmedzený alebo žiadny prístup k Wi-Fi alebo mobilným sieťam, ako sú odľahlé oblasti a poľnohospodárske oblasti. Typickým príkladom využitia sú senzory v poľnohospodárstve pre riadenie zavlažovania, zariadenia v priemyslových aplikáciách pre spoľahlivý monitoring procesov, alebo priame spojenie senzorov v inteligentných domácnostiach bez potreby centrálnnej riadiacej jednotky. [24] [26]

### 2.3.2 P2p v rámci Bluetooth LE

Technológia Bluetooth Low Energy (BLE) umožňuje energeticky úspornú, bezdrôtovú komunikáciu na kratšie vzdialenosti. V režime P2P môžu dve zariadenia, rovnako ako u LoRa, komunikovať priamo medzi sebou bez potreby centrálnneho uzlu alebo prístupového bodu. Táto priama komunikácia je ideálna pre aplikácie, kde je dôležitá rýchla odozva a efektívna výmena dát medzi zariadeniami. Výhody P2P BLE komunikácie sú vcelku podobné ako u LoRa (nízka spotreba energie, jednoduché prevedenie), líšia sa dosahom, odozvou a praktickým využitím. Tým môže byť použitie napríklad v inteligentných hodinkách alebo fitness náramkoch, ktoré môžu priamo komunikovať s inými zariadeniami, ako sú slúchadlá. Ďalej sa dajú využiť v zdravotníctve. Lekárske zariadenia, ako sú monitory srdiečného tepu, môžu priamo komunikovať s ďalšími zariadeniami alebo aplikáciami, čo umožňuje rýchle zdieľanie dát o zdravotnom stave pacienta, čo zlepšuje a zrýchľuje starostlivosť o pacientov. [1]

### 2.3.3 Výhody a nevýhody P2P komunikácie

Point-to-point komunikácia ponúka celú radu výhod, ktoré z nej robia atraktívne riešenie v mnohých oblastiach, od priemyslu po domácnosti. Jednou z hlavných predností je jednoduchosť a nízka náročnosť na infraštruktúru, pretože prenos prebieha priamo medzi dvoma zariadeniami bez nutnosti centrálnneho serveru. Vďaka tomu je tento model lacnejší na nasadenie a zároveň odolnejší voči výpadkom. P2P komunikácia sa dá ľahko implementovať a zároveň prenáša dáta rýchlo bez veľkej odozvy, čo je užitočné napríklad pri komunikácii v reálnom čase. Na druhú stranu však môže byť náročnejšia na zabezpečenie – každé zariadenie musí byť chránené samostatne. S rastúcim počtom uzlov sa navyše zvyšujú nároky na správu a môže dôjsť k preťaženiu niektorých častí siete. [6]

## Kapitola 3

# Predošlé výskumy

Cieľom tejto kapitoly je pozrieť sa na analýzu a prehľad výsledkov predošlých výskumov zaoberajúcich sa touto problematikou, ktoré sa taktiež zaoberali vyhodnotením dosahu bezdrôtových komunikačných technológií LoRa a Bluetooth Low Energy (BLE). V tejto kapitole budú zhromaždené a systematicky spracované poznatky z odbornej literatúry, ktoré sa zaoberajú možným dosahom týchto technológií v rôznych podmienkach. Špeciálna pozornosť bude venovaná základným parametrom ako sú šírka pásma, spreading factor, code rate (u technológie LoRa), alebo u BLE sa bude pozornosť zameriavať na použitý režim, ktorý môže byť 1M PHY, 2M PHY alebo Coded PHY a ich vplyv na dosah daných technológií. Táto analýza posluží ako východiskový bod pre plánovanie a implementáciu meraní, ktoré budú prezentované v ďalších kapitolách tejto práce.

### 3.1 Štúdie BLE

Bluetooth core podľa špecifikácie slúžil na prenos dát na krátke vzdialenosti. Z príchodom BLE 5 sme dostali aj PHY pre prenos dát na veľké vzdialenosti, ktorý podľa Thordarssona [29] pomocou coded PHY môže dosiahnuť dosah až do vzdialenosti 1 km, ak sa jedná o otvorené priestranstvo. Zároveň spomenul, že použil vysielačiu silu 0 dBm, pričom maximálna vysielačiasila bola +5 dBm, takže by teoreticky mohol dosiahnuť ešte väčší dosah. Ďalšia štúdia, ktorá sa zaoberala možným dosahom BLE s využitím coded PHY, bola štúdia od H. Karvonena a spol. [14] kde namerali dosah BLE 800 metrov pri sile vysielača 9 dBm. Ďalej pri porovnávaní BLE coded PHY s ostatnými typmi prenosu na fyzickej vrstve Cornel Andrew Lyatu [18] nameral úspešne dosah BLE coded PHY až do vzdialenosti 450 metrov. Z týchto prác nám plyní, že BLE môžeme používať v IoT aj pre zariadenia, ktoré potrebujú komunikovať na dlhú vzdialenosť. Zvýšenie dosahu v týchto výskumoch však aj zvýšilo spotrebu energie. Preto je vhodné bluetooth LE používať u zariadení, u ktorých prebieha komunikácia sporadicky (napríklad raz za deň odošleme informácie o vlhkosti pôdy). Pričom zvyšok času je zariadenie v režime spánku.

### 3.2 Štúdie LoRa v pásme 2.4GHZ

Aj napriek tomu, že LoRa v frekvenčnom pásme 2.4GHZ máva menší dosah ako LoRa v pásme menšom ako 1 GHz. Podľa Falanjho a kolegov [22] môže LoRa v pásme 2.4 GHz dosiahnuť dosah až 1.1 km. Tento výsledok bol dosiahnutý v otvorenom priestranstve (line-of-sight), kde sú podmienky pre šírenie signálu ideálne. Na tento výsledok nadväzuje štúdia

Hochet a kolegov [12], ktorí namerali maximálny dosah LoRa v rovnakom pásme až 2 km, takisto v otvorenom prostredí. Najvyšší nameraný dosah uvádza Janssen [27], podľa ktorého môže LoRa v pásme 2.4 GHz dosiahnuť až približne 3.5 km. Aj v tomto prípade ide o testovanie v podmienkach bez prekážok a bez významného rušenia. Všetky tieto merania sa zhodujú v tom, že ide o výsledky dosiahnuté za ideálnych, laboratórnych alebo kontrolovaných podmienok, ktoré v reálnych aplikáciách nemusia byť vždy splnené. Napriek tomu tieto výskumy jednoznačne ukazujú, že LoRa aj pri implementácii v pásme 2.4 GHz má relatívne dobrý dosah, ktorý môže byť vhodný pre mnohé aplikácie, najmä tie, kde nižšie pásma nie sú dostupné alebo sú príliš preťažené. Samozrejme, dosah LoRa v pásme 2.4 GHz je menší než dosah LoRa pracujúcej v pásmach pod 1 GHz, kde sa bežne dosahujú vzdialenosti v niekoľko km. Z uvedených výskumov teda vyplýva, že aj napriek určitým limitom má LoRa v pásme 2.4 GHz potenciál pre efektívne nasadenie v bezdrôtových sieťach, najmä ak sú požiadavky na pokrytie primerané možnostiam tohto pásma a ak sú zariadenia schopné využiť výhody lepšej dostupnosti a medzinárodnej kompatibility frekvenčného spektra.

### 3.3 Ďalšie technológie

Okrem technológií Bluetooth Low Energy (BLE) a LoRa, ktoré boli predmetom praktického porovnania v tejto práci, existuje viacero ďalších bezdrôtových komunikačných technológií, ktoré sa využívajú v rámci internetu vecí (IoT), automatizácie domácností či senzorových sietí. Každá z týchto technológií má svoje špecifiká, výhody aj obmedzenia, a jej nasadenie závisí najmä od konkrétnych požiadaviek na dosah, energetickú náročnosť, bezpečnosť, dátovú priepustnosť či topológiu siete. Nižšie sú stručne predstavené tieto konkurenčné technológie.

#### 3.3.1 Zigbee

Technológia Zigbee bola vyvinutá v roku 2001 a na trh uvedená Zigbee Alliance v roku 2003. Názov tejto technológie nám odhaľuje princíp fungovania, ktorý vychádza z konceptu komunikácie v sieti typu mesh (zig-zag). Pracuje v pásme 2.4 GHz a má prenosovú rýchlosť 250 kb/s. Zigbee je navrhnutá ako nízkoenergetická bezdrôtová komunikačná technológia, ktorá umožňuje efektívny prenos dát medzi zariadeniami pomocou architektúry rozdelenej na tri základné typy zariadení, ktoré spolu tvoria funkčnú sieťovú architektúru. Prvým typom zariadenia je koordinátor, ktorý hraje kľúčovú úlohu v celej sieti, je zodpovedný za inicializáciu siete, správu adres, synchronizáciu a riadenie všetkých pripojených prvkov. Druhou súčasťou siete sú smerovače (routre), ktoré predlžujú dosah komunikácie preposielaním správ medzi zariadeniami. Tretím typom zariadení sú tzv. koncové zariadenia, ktoré predstavujú senzory alebo aktuátory. Ďalším dôležitým prvkom Zigbee architektúry je bezpečnosť. Samotný štandard v sebe zahrnuje niekoľko mechanizmov pre zabezpečenie komunikácie, vrátane symetrickej výmeny šifrovacích kľúčov, ktorá umožňuje zašifrovať dátové prenosy medzi zariadeniami. Aj napriek týmto mechanizmom je systém náchylný na isté typy útokov ako napríklad odpočúvanie pri výmene šifrovacích kľúčov. V praxi aj napriek týmto slabším je Zigbee považované za bezpečné riešenie pre väčšinu bežných aplikácií. Vďaka týmto vlastnostiam Zigbee nachádza svoje uplatnenie okrem iného v oblasti inteligentných domácností, kde je využívané pre prepojenie a ovládanie rôznych zariadení, ako sú napríklad inteligentné svetlá, zámky, žalúzie, termostaty alebo rôzne typy senzorov. Ďalej vďaka implementácii úsporného režimu kedy sa deaktivuje rádio počas režimu spánku, je možné dosiahnuť mimoriadne nízku spotrebu energie. To zaisťuje dlhú výdrž batérie a činí

z technológie Zigbee vhodné riešenie pre bezdrôtové senzorové siete (WSN), kde je kladený dôraz na nízku spotrebu a vysokú spoľahlivosť prenosu. Prakticky dosah technológie Zigbee z pravidla pohybuje v rade desiatok metrov. [3] [16]

### 3.3.2 z-Wave

Technológia Z-Wave je bezdrôtová komunikačná technológia určená predovšetkým pre aplikácie v oblasti inteligentných domácností. Jej vývoj začal už v roku 1999, keď ju pôvodne navrhla spoločnosť ZenSys, v roku 2005, jej propagáciu prevzala Z-Wave Alliance [19]. Z-Wave využíva frekvenčné pásmo pod 1 GHz, čo mu umožňuje vyhnúť sa rušeniu, ktoré je typické pre frekvenčné pásmo 2,4 GHz, využívané technológiami ako Wi-Fi alebo Zigbee, vďaka čomu sa znižuje pravdepodobnosť interferencie a zvyšuje sa spoľahlivosť spojenia. Z-Wave štandardne využíva tri komunikačné kanály a pri optimálnych podmienkach je schopný dosahovať prenosovú rýchlosť až 100 kb/s. Komunikačný dosah protokolu je maximálne 30 metrov, pričom vďaka podpore mesh topológie môže byť signál medzi zariadeniami opakovane prenášaný cez ďalšie uzly, čo výrazne predlžuje dosah siete a zvyšuje jej robustnosť. [13] Z hľadiska topológie siete rozlišuje Z-Wave dva základné typy zariadení. Prvým z nich je tzv. kontrolér, ktorý plní úlohu riadiaceho uzla čiže posiela príkazy ostatným zariadeniam, spravuje sieť a v prípade hlavného kontrolera (master controller) plní úlohu správy siete, čiže pridáva o odstraňuje zariadenia zo siete, žiadne iné zariadenie túto úlohu vykonávať nemôže. Druhým typom je tzv. sluha (slave), ktorého hlavnou úlohou je vykonávanie prijatých príkazov od kontrolera, pokiaľ má takéto zariadenie nepretržitý prístup k napájaniu, môže zároveň pôsobiť ako opakovač (repeater), čím prispieva k prepojeniu celej siete a umožňuje komunikáciu aj na väčšie vzdialenosti. Z-Wave obmedzuje počet tzv. skokov (hopov) skokov medzi zariadeniami na maximálne päť čo dáva zmysel v rámci kontextu používania v inteligentných domácnostiach. [19] Funkcionalita každého uzla je definovaná pomocou tried (classes), pričom jedno zariadenie môže využívať viacero tried naraz. [13] Táto modularita zjednodušuje konfiguráciu a umožňuje kompatibilitu s rôznymi zariadeniami v sieti. Jedným z kľúčových benefitov Z-Wave je jeho užívateľská prívetivosť. V Z-Wave technológii po spárovaní zariadenia so sieťou väčšinou nie je potrebná ďalšia manuálna konfigurácia. Tento aspekt však zároveň prináša určité bezpečnostné riziká, ktorým sa venuje bezpečnostný rámec Z-Wave Security Command Class, známy aj pod označením S0. Tento framework zavádza základné šifrovanie prenášaných správ, čím zvyšuje bezpečnosť siete. Napriek tomu sa v minulosti vyskytli vážne zraniteľnosti – napríklad používanie predvoleného kľúča zloženého zo samých núl, čo výrazne znižovalo bezpečnosť tejto technológie, aby sa eliminovali tieto a ďalšie slabiny, bol navrhnutý vylepšený bezpečnostný štandard S2, ktorý ponúka vyššiu úroveň ochrany, a to bez negatívneho dopadu na energetickú efektívnosť či užívateľskú prívetivosť. Vylepšený štandard S2 využíva pokročilejšie kryptografické algoritmy a dôslednejšie riadenie výmeny kľúčov, vďaka čomu zvyšuje celkovú bezpečnosť Z-Wave siete pri zachovaní nízkej spotreby energie a jednoduchého užívateľského zážitku. [30]

### 3.3.3 Wi-SUN

Wi-SUN (Wireless Smart Utility Network) je moderný bezdrôtový komunikačný protokol, ktorý vychádza z technických základov štandardu Zigbee a je navrhnutý pre potreby inteligentných energetických a senzorových sietí [25], jeho hlavným cieľom je umožniť spoľahlivú a energeticky efektívnu komunikáciu medzi veľkým množstvom zariadení, rozmiestnených na rozsiahlej ploche, a to s minimálnou spotrebou energie. Wi-SUN operuje v pásme pod

1 GHz, čo mu zabezpečuje výborné šírenie signálu v mestských aj vidieckych oblastiach. Využíva GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying) moduláciu a môže dosahovať prenosovú rýchlosť až 300 kb/s [15, 25]. Vzhľadom na svoje vlastnosti je Wi-SUN vhodný najmä pre aplikácie, kde je potrebné spoľahlivo komunikovať na vzdialenosti v rádoch stoviek metrov až vzdialenosti blížiac sa 1 kilometru, a zároveň zachovať dlhú výdrž zariadení pri použití batériového napájania. V praxi našiel Wi-SUN rozsiahle využitie napríklad v Japonsku, kde sa stal štandardom v oblasti monitorovania a riadenia spotreby elektrickej energie a plynu. Umožňuje prenos údajov z meračov do centrálnych systémov v reálnom čase, čo zvyšuje efektívnosť správy energetickej infraštruktúry a umožňuje presnejšie a efektívnejšie účtovanie energií. [15] Architektúra Wi-SUN je rozdelená do niekoľkých technických špecifikácií, ktoré sa nazývajú profily. Medzi najpoužívanejšie patria Wi-SUN HAN (Home Area Network) a Wi-SUN FAN (Field Area Network). Profil Wi-SUN HAN je určený pre domáce aplikácie, kde zabezpečuje obojsmernú komunikáciu medzi elektromerom a systémom HEMS (Home Energy Management System) a ďalej medzi samotným HEMS a jednotlivými domácimi zariadeniami, ako sú solárne panely, batériové úložiská či klimatizačné jednotky. Tento profil podporuje vytváranie decentralizovanej siete v rámci jednej domácnosti, ktorá efektívne riadi spotrebu a výrobu energie. Naopak, Wi-SUN FAN je určený pre rozsiahle exteriérové siete, kde slúži na zber dát z rôznych vonkajších senzorov – napríklad na sledovanie kvality ovzdušia, dopravnej situácie alebo meteorologických údajov. Tieto dáta sú následne odosielané do cloudových systémov na ďalšie spracovanie a analýzu. [15] Jednou z výziev pri nasadení Wi-SUN FAN je však relatívne pomalé vytváranie spojenia v sieťach s veľkým počtom uzlov, kde je potrebných viacero tzv. „hopov“ (medziskokov) na doručenie dát do cieľového uzla. [21]

# Kapitola 4

## Návrh merania

Táto kapitola sa venuje popisu návrhu experimentu. Súčasťou návrhu experimentu je nielen špecifikácia použitého hardvéru a softvéru, ale taktiež definovanie metodík zberu a vyhodnocovania dát, ktoré zaistia konzistentné a reprodukovateľné výsledky. Úrčia sa spôsoby merania kľúčových parametrov, ako napríklad najväčšia dosiahnuteľná vzdialenosť, úspešnosť prenosu dát (Packet Delivery Ratio) a rýchlosť prenášania dát v rôznych vzdialenostiach.

### 4.1 Cieľ merania

Cieľom merania je porovnať dosah a spoľahlivosť dvoch bezdrôtových technológií Bluetooth Low Energy (BLE) a LoRa pracujúcich vo frekvenčnom pásme 2.4 GHz. Hlavným zámerom je pripraviť testovacie podmienky, ktoré budú pre obe technológie čo najviac porovnateľné a umožnia objektívne hodnotenie ich výkonu. Cieľom celého merania je získať čo najucelenejší obraz o tom, ako si tieto dve technológie správajú pri praktickom nasadení a aké sú ich výhody a obmedzenia. Vzhľadom na to, že technológia BLE verzie 5 ako aj technológia LoRa v pásme 2.4 GHz umožňujú komunikáciu na relatívne veľké vzdialenosti oproti iným technológiám na tejto frekvencii, bude cieľom tejto práce porovnať kľúčové komunikačné parametre týchto dvoch bezdrôtových technológií a ich vplyv na dosah a vlastnosti komunikácie. Konkrétne sa experiment zameria na meranie vyhodnotenia percenta doručených správ (Packet Delivery Rate, PDR) a rýchlosti prenosu, ktorej sa dá pri danej vzdialenosti efektívne dosiahnuť. Na základe získaných výsledkov bude v ďalších kapitolách vykonané porovnanie týchto dvoch technológií z hľadiska ich vhodnosti pre rôzne scenáre z ohľadom na vzdialenosť a požadované parametre komunikácie. Cieľom bude pomôcť k porozumeniu vlastností týchto technológií a určiť ich vhodnosť pre konkrétne typy použití, a tým poskytnúť základ pre ich praktické využitie napríklad v aplikáciách internetu vecí (IoT), kde sú požiadavky na dosah a spoľahlivosť komunikácie veľmi dôležité.

### 4.2 Popis testovacích technológií

Ako bolo uvedené vyššie pri technológii LoRa vieme nastaviť viacero parametrov, jednými z týchto parametrov u technológii LoRa budú spreading factor (SF), šírka pásma (BW) a coding rate (CR). U BLE budeme nastavovať režim kódovania na fyzickej vrstve, teda PHY ktoré sa bude používať pre zasielanie správ. Najdôležitejším PHY v porovnaní s LoRa bude práve Codebook PHY, ktoré môže byť buď S2 alebo S8. Tieto režimy umožňujú BLE

zvýšiť dosah komunikácie oproti štandardným režimom, a preto budú hrať zásadnú úlohu pri porovnávaní oboch technológií z hľadiska dosahu a spoľahlivosti prenosu.

#### 4.2.1 Merané parametre

V tejto práci bude medzi merané parametre patriť PDR pričom pri experimente sa budú vysielat tri skupiny 10 paketov veľkostí 11 B, 111 B a 255, pre každú kombináciu vstupných parametrov pre LoRa a BLE následne podľa počtu prijatých paketov sa vypočíta PDR. Ďalším meraným parametrom bude sila prijatého signálu (RSSI) a vzdialenosť, ktorá sa bude postupne zväčšovať pokiaľ sa podarí úspešný prenos dát až do vzdialenosti 1 km, pričom dôležitá bude hlavne maximálna dosiahnutá vzdialenosť. Tieto parametre sa budú merať u oboch technológií, čo nám umožní ich objektívne porovnanie.

#### 4.2.2 Podmienky merania

Meranie by malo prebiehať v otvorenom priestranstve, kde bude medzi obidvoma anténami zabezpečená priama viditeľnosť bez prekážok (Line of Sight). Tým sa minimalizuje vplyv prípadných prekážok, odrazov alebo tienenia, ktoré by mohli ovplyvniť výsledok jednotlivých meraní. Teda v tesnej blízkosti vysielateľa ani prijímateľa by sa nemali nachádzať žiadne ďalšie bezdrôtové vysielateľa, stožiare vysokého napätia, oceľové káble alebo iné potencionálne zdroje rušenia, ktoré by mohli negatívne ovplyvniť kvalitu vysielaného signálu. Meranie by malo prebiehať za priaznivých poveternostných podmienok.

#### 4.2.3 Hardwarové a Softwarové nastavenia

Na meranie technológie BLE sa budú v tejto práci používať dva typy vývojových dosiek. Prvým typom sú dve vývojové dosky, ESP32-S3-DevKitC-1, kde jedna bude v úlohe prijímateľa a druhá v úlohe vysielateľa, pričom obe sú vybavené integrovanou PCB anténou. Druhým typom sú dve dosky ESP32-S3 Feather, ktoré disponujú externou PCB anténou pripojenou prostredníctvom konektoru w.FL, pričom táto anténa dosahuje zisku približne 3 dBi. Na softvérovej úrovni obidve platformy postupne menia jednotlivé režimy PHY (napríklad 1M PHY, 2M PHY, Coded PHY S2 a S8) a testujú vytvorenie spojenia. Sila vysielaného signálu je u všetkých zariadení nastavená na hodnotu 9 dBm, pričom rovnaká vysielacia sila je použitá taktiež pri meraniach s technológiou LoRa. Pri technológii LoRa budú postupne menené kľúčové parametre prenosu. Konkrétne sa začne s najvyššou hodnotou spreading factoru (SF), ktorý je  $SF = 12$ , a postupne sa budú testovať nižšie hodnoty až po  $SF = 7$ , podobne sa bude postupovať pri nastavení šírky pásma (bandwidth), ktorá bude nadobúdať štyri rôzne hodnoty a to: 203,125 kHz, 406,25 kHz, 812,5 kHz a 1625 kHz. Ďalším dôležitým konfigurovatelným parametrom bude code rate (CR), ktorý svoje hodnoty bude postupne meniť od hodnoty Hammingovho kódu 4/5 až po 4/8. Tieto kombinácie nastavení nám umožnia získať ucelený pohľad na správanie a výkon technológie LoRa pri rôznych vzdialenostiach.

### 4.3 Metodika vyhodnocovania výsledkov

Počas komunikácie bude zariadenie v úlohe prijímateľa odosielať prijaté dáta prostredníctvom serialového spojenia do pripojeného notebook. Na notebooku bude spustený Python skript, ktorého úlohou bude prijaté logy, ktoré obsahujú informácie o komunikácii spracovať

do požadovanej podoby a následne ich uložiť do súboru. Pre zaistenie prehľadnej organizácie meraných dát bude pri každej zmene podmienok, čo znamená pri zmene vzdialenosti, alebo zmene hardvéru vytvorený nový priečinok, ktorého názov bude jednoznačne identifikovať konkrétne meranie. Tento systematický prístup umožní jednoduchšie vyhodnocovanie a porovnanie výsledkov a zároveň minimalizuje riziko korupcie dát.

#### 4.4 Štatistické spracovanie dát

U prenášaných paketov sa bude počítat hodnota Packet Delivery Ratio (PDR), teda percentuálna úspešnosť doručenia jednotlivých paketov z celkového množstva odoslaných paketov. Tieto hodnoty budú následovne zapísané pomocou grafu, ktorý bude reprezentovať ako zmena vstupných parametrov zmení PDR. Ďalej budeme mať grafy ktoré budú porovnávať rôzne parametre týchto dvoch technológií ako napríklad rýchlosť prenosu medzi týmito dvoma technológiami. Cieľom tohto štatistického spracovania je poskytnúť ucelený prehľad o tom, ako sa obidve technológie líšia a v akých scenároch je ktorá technológia výhodnejšia.

#### 4.5 Riziká a možné chyby merania

Meranie môže vykazovať určité odchýlky, napríklad v určení vzdialenosti medzi komunikujúcimi bodmi, ktoré budú primárne stanovené pomocou polohy na online mape. Pre zvýšenie presnosti merania však bude použitá kombinácia polohy podľa online mapy a orientácia podľa kľúčových orientačných bodov v teréne, ako sú cesty, stromy, stavby či iné výrazne objekty. Tento postup by mal zaistiť presnejšie určenie vzdialenosti pri daných meraniach a tým zvýšiť spoľahlivosť získaných dát. Je dôležité brať do úvahy, že meranie môžu ovplyvniť rôzne enviromentálne faktory ako sú prítomnosť budov, stromov, kopcov, alebo iných prekážok, ktoré môžu spôsobiť útlm alebo odraz signálu. Preto je zásadne aby meranie prebiehalo v čo najviac otvorenom priestranstve s minimom prekážok, aby bola strata signálu vplyvom okolitého prostredia čo najviac obmedzená. Ďalším nezanedbateľným faktorom, ktorá môže negatívne ovplyvniť maximálny dosah a kvalitu celého spojenia, je počasie. Pre dosiahnutie konzistentných výsledkov je dôležité vykonávať jednotlivé merania v priaznivých poveternostných podmienkach teda v dobe, kedy nedochádza k zrážkam, nie je nízka oblačnosť ani extrémna vlhkosť, je priaznivá snežná aktivita a ostatné faktory ktoré by mohli narušiť šírenie signálu. Šum zo strany iných zariadení v pásme 2.4 GHz môže taktiež výrazne ovplyvniť namerané výsledky. Preto je vhodné aby v danej lokalite bolo čo najmenšie elektromagnetické rušenie, ideálne vykonávať meranie mimo mestskú zástavbu a mimo miest z vysokou hustotou bezdrôtovej komunikácie. V neposlednej rade hraje dôležitú úlohu aj smerovanie antény, ktoré priamo ovplyvňuje kvalitu a silu prenášaného signálu. Ďalej si treba dať pozor na prechod zvierat a ľudí, ktorý ak sa dostanú priamo medzi prijímač a vysielač môžu taktiež negatívne ovplyvniť kvalitu signálu.

## Kapitola 5

# Implementácia meracieho systému

Táto kapitola popisuje realizáciu meracieho systému, ktorý bol vytvorený s cieľom experimentálne porovnať bezdrôtové technológie Bluetooth Low Energy (BLE) a LoRa v pásme 2.4 GHz. Systém bol navrhnutý tak, aby umožňoval flexibilné prepínanie medzi rôznymi komunikačnými režimami, zber dát v reálnom čase, ich ukladanie a následnú analýzu.

### 5.1 Použitý hardvér

Pre realizáciu experimentálneho meracieho systému boli použité mikrokontrolery z rodiny ESP32, konkrétne pre Bluetooth boli použité dva mikrokontrolery ESP32-S3-DevKitC-1, ktoré disponujú integrovanou PCB anténou pre Bluetooth a WiFi a majú k dispozícii dvojicu mikro USB portov, pričom jeden slúži pre USB a druhý pre UART. Port pre UART bude slúžiť ako napájací a zároveň seriálový port pre nahrávanie kódu a komunikáciu s prijímacím zariadením. Ďalší použitý mikro-kontroler bude 2x ESP32-S3 Feather, ktorý disponuje w.fl konektorom na pripojenie antény, v tomto pokuse bude používaná anténa Airgain N2425D, ktorá má zisk 4 dBi a je vybavená USB-C portom ktorý zabezpečuje ako komunikáciu pomocou serialového pripojenia tak aj napájanie zariadenia. Pre LoRa budú použité dve vývojové dosky ESP32 UNO R3 D1, k obom týmto doskám bude pripojený rozširujúci shield modul Arduino UNO click shield pre mikroBUS komunikáciu, ku ktorému bude pripojený modul pre LoRa komunikáciu SX1280. K vysielacej stanici bude pripojené tlačidlo, po ktorého stlačení sa začne test komunikácie. Pre všetky tieto systémy bude pre napájanie u vysielča použitá powerbanka s kapacitou 10000 mAh napájanie prijímača je implementované pomocou laptopu, pričom laptop zároveň bude slúžiť na logovanie prijatých správ. Tieto systémy budú upevnené k dvojici záhradných tyčí, pričom prvá tyč bude mať na sebe upevnené zariadenia fungujúce v role vysielča, pričom druhá tyč bude mať na sebe upevnené zariadenia slúžiace v role prijímača. Tieto tyče budú klasické záhradné tyče ktoré dosahujú výšku približne 210 cm, pričom k spodnej časti budú mať pripevnenú kratšiu oceľovú tyč ktorá bude slúžiť na upevnenie stanice do zeme na danom mieste, tieto tyče sú zobrazené na obrázku nižšie.[5.1](#) Tieto vývojové dosky boli zvolené vďaka ich výkonu, nízkej spotrebe a integrovaným komunikačným rozhraniam, pričom jedným z najdôležitejších parametrov bola schopnosť komunikovať pomocou protokolu BLE 5.x, ktorý umožňuje komunikáciu na väčšie vzdialenosti.



Obrázek 5.1: Upevnenie meracieho systému v teréne

## 5.2 Softvérová implementácia

Pri programovaní aplikácií pre meranie dosahu Lora a BLE boli použité programovacie jazyky C a C++, pri ktorých som využil vývojových nástrojov ako sú Arduino IDE a ESP-IDF SDK, ktoré umožňujú efektívny vývoj softvérových aplikácií pre mikrokontroleri z rodiny ESP32. Implementácia meracieho systému bola rozdelená do dvoch vzájomne nezávislých častí. Prvá časť slúži pre technológiu LoRa, druhá časť slúži pre technológiu BLE. Pričom

tieto časti sa ďalej delia na kód pre prijímač a kód pre vysielač. Takéto rozvrhnutie kódu umožňuje flexibilné nastavenie a testovanie jednotlivých technológií nezávisle na sebe.

### 5.2.1 Štruktúra softvéru LoRa

#### Vysielač

Softvérová implementácia určená pre komunikáciu prostredníctvom technológie LoRa bola navrhnutá s dôrazom na zabezpečenie stability a obnovy spojenia aj v prípadoch, kedy dochádza k dočasnej strate komunikácie spôsobenej nevhodne zvolenými parametrami prenosu. Zmena parametrov, ako sú šírka pásma (BW), Spreading Factor (SF) a Code Rate (CR), je realizovaná cyklicky pomocou vnorených rاديaciich štruktúr, ktoré postupne nastavujú jednotlivé kombinácie uvedených parametrov podľa algoritmu znázorneného v nasledujúcom kóde. 5.1

```
1  for(int sf = MAX_SF; sf >= MIN_SF;sf--) {
2      params.sf=sf;
3      for(int bw_i = 3; bw_i >= 0; bw_i--) {
4          params.bw = bw[bw_i];
5          for(int cr = MIN_CR; cr <= MAX_CR; cr++) {
6              params.cr=cr;
7              ...
8              loRaServer->setParams(params);
9              ...
10         }
11     }
12 }
```

Výpis 5.1: Cyklická zmena parametrov

V rámci uvedeného cyklu program pred samotnou zmenou komunikačných parametrov vykonáva ešte kontrolný mechanizmus, ktorého cieľom je zabezpečiť, aby bol prijímač vopred informovaný o plánovaných zmenách nastavení. Táto synchronizácia prebieha prostredníctvom odoslania tzv. synchronizačného paketu vysielačom, ktorý následne čaká na odpoveď od prijímača. Synchronizačný paket je najprv odoslaný s využitím posledných platných komunikačných parametrov. V prípade, že prijímač na tento paket nezareaguje, vysielač automaticky prepne svoje nastavenia na vopred definovanú konfiguráciu, ktorá umožňuje spoľahlivú dátovú komunikáciu aj na väčšie vzdialenosti. Po prepnutí do tohto stabilného režimu vyšle vysielač synchronizačný paket opakovane a čaká na potvrdenie zo strany prijímača. Tento mechanizmus zabezpečuje robustnosť celého komunikačného systému a minimalizuje riziko straty spojenia v dôsledku nekompatibility nastavení medzi vysielačom a prijímačom.5.2

```
1  while (!params_set) {
2      if(retry<2) {
3          sync_message->setParams(params);
4          xSemaphoreTake (radioSemaphore,portMAX_DELAY);
5          loRaServer->sendMessage(sync_message);
6          if(answer(loRaServer)) {
7              params_set=true;
8              break;
9          }
10         else {
11             retry++;

```

```

12     }
13     xSemaphoreGive(radioSemaphore);
14 }
15 else {
16     loRaServer->setParams(defaultParams);
17     sync_message->setParams(params);
18     loRaServer->sendMessage(sync_message);
19     if(answer(loRaServer)) {
20         params_set=true;
21         break;
22     }
23 }
24 }
25 }

```

Výpis 5.2: Synchronizácia zmeny parametrov

Po úspešnom dokončení synchronizácie a potvrdení nastavenia nových komunikačných parametrov medzi vysielacou a prijímacou jednotkou pristupuje program k samotnému prenosu správ. V tejto fáze sú odosielané správy rôznych veľkostí (malé, stredné a veľké pakety). Účelom prenosu paketov rôznych veľkostí je posúdenie spoľahlivosti a efektivity prenosu pre konkrétne nastavenia komunikačných parametrov. Každá skupina paketov je odosielaná opakovane, pričom jednotlivé správy sú zaradené do vysielacej fronty [5.3](#)

```

1 message->setParams(params);
2 for(int i = 0;i <10; i++) {
3     enqueueLoRaPacket(message, sizeof(SyncLoRaPacket12));
4     packet.packet_id++;
5 }
6 //medium message
7 //big message

```

Výpis 5.3: Synchronizácia zmeny parametrov

Vo fronte čakajú na uvoľnenie vysielča, ktorý ich postupne spracuje a odošle prijímaciemu zariadeniu.[5.4](#) Tento prístup zabezpečuje systematické a objektívne testovanie prenosovej kapacity a spoľahlivosti systému pri rôznych konfiguráciách.

```

1 while (true) {
2     if (xQueueReceive(radioTxQueue, &pkt, portMAX_DELAY)) {
3         ...
4         xSemaphoreTake(radioSemaphore,portMAX_DELAY);
5         ulTaskNotifyTake(pdTRUE,portMAX_DELAY);
6         localLora->startSendingMessage((SyncLoRaPacket12 *) (pkt.data), pkt.length);
7         xSemaphoreGive(radioSemaphore);
8         ...
9     }

```

Výpis 5.4: Spracovanie správ v rade

## 5.2.2 Prijímač

### Prijímanie dát

Po úspešnej inicializácii prijímacieho zariadenia prechádza program do hlavného cyklu, v ktorom čaká na príjem dát. Príjem samotných dát je realizovaný pomocou prerušenia

(interrupt), ktoré je aktivované automaticky vždy v momente prijatia správy modulom LoRa. V rámci tohto prerušenia je nastavený príznak (dataAvaliabe), ktorý signalizuje hlavnému cyklu, že sú k dispozícii nové dáta. Po detekcii tohto príznaku hlavný cyklus prevezme prijaté dáta z komunikačného modulu, uloží ich do štruktúry správy a následne ich zaradí do obslužnej fronty, v ktorej čakajú na ďalšie spracovanie. Presný postup tohto procesu je znázornený v nasledujúcom útržku kódu 5.5. Tento prístup umožňuje efektívnu správu prijímaných dát a zároveň minimalizuje oneskorenie pri spracovaní jednotlivých paketov a tým pádom možnú stratu dát.

```

1     ...
2 void LoRaCallbackFunction() {
3     dataAvaliabe=true;
4     timestamp = millis();
5 }
6     ...
7 void setup() {
8     loRaServer->startListening(LoRaCallbackFunction);
9 }
10    ...
11 void loop() {
12    ...
13    if(dataAvaliabe == true) {
14        dataAvaliabe=false;
15        recieverParams = loRaServer->readToBuffer((char *)buffer,255);
16        ...
17        xQueueSend(messageQueue, &params,0) != pdTRUE
18        ..
19        loRaServer->startListening(LoRaCallbackFunction);
20    ...}
21 }

```

Výpis 5.5: (Prijímanie dát)

## PacketHandler

Táto časť kódu implementuje dôležitú funkciu HandleMyPacket, ktorá je určená na spracovanie jednotlivých paketov zaradených do fronty prijatých správ. Funkcia vykonáva dve hlavné činnosti v závislosti od typu prijatého paketu. V prípade, že sa jedná o bežný dátový paket ľubovoľnej veľkosti, program zaznamená základné informácie o tomto pakete do sériovej linky, odkiaľ môžu byť ďalej spracované alebo vizualizované. Ak však funkcia identifikuje paket ako synchronizačný, tak okrem samotného logovania dát nastaví aj nové komunikačné parametre podľa informácií obsiahnutých v tomto pakete, ktoré boli odoslané vysielateľom (uvedené v časti 5.2). Navyše nastaví špeciálny príznak sendMessage, ktorý signalizuje hlavnému cyklu programu, že je potrebné odoslať spätnú odpoveď o úspešnom prijatí synchronizačného paketu. Úryvok implementácie uvedeného mechanizmu je znázornený vo výpise kódu 5.6.

```

1
2 bool HandleMyPacket(const TaskParams buffer,int comm_id,LoRaParams * loraParams,
3     bool * sendMessage) {
4     ...
5     if(packet->comm_id==comm_id)
6     {

```

```

6   decodeParams(packet->params,packetType,sf,cr,bw_i,txPower);
7
8   String data;
9   data = ... ;
10
11   Serial.println("small packet: ");
12   Serial.println(data);
13 }
14 ...
15 else if (packetType==SYNC_PACKET_T){
16     loraParams->sf = sf;
17     ...
18     Serial.println(data);
19     (*sendMessage) = true;
20 }
21 return true;
22 }
23 else {
24     Serial.println("wrong comm id");
25     return false;
26 }
27 }

```

Výpis 5.6: (Spracovanie paketov)

## 5.3 Implementácia kódu pre BLE

Implementácia softvéru pre technológiu Bluetooth Low Energy (BLE) je založená na oficiálnom príklade spoločnosti Espressif s názvom „BLE throughput demo“, ktorý je dostupný pod otvorenou licenciou Unlicense, prípadne CC0-1.0. Tento pôvodný zdrojový kód bol upravený a rozšírený tak, aby plne zodpovedal špecifickým požiadavkám a potrebám realizovaného experimentu v rámci tejto práce. Kompletný zdrojový kód pôvodnej implementácie je dostupný vo verejnom repozitári na platforme GitHub [23].

### 5.3.1 Prijímač

Na strane klienta bola implementovaná obsluha udalosti `ESP_GATTC_NOTIFY_EVT`, ktorá sa automaticky vykoná po prijatí notifikačného paketu zaslaného z BLE serveru. Pokiaľ prijatá správa má naozaj požadovaný typ notifikácie (`is_notify == true`), tak sa v jednotlivých krokoch získa aktuálny časový údaj pomocou funkcie `esp_timer_get_time()`. Potom sa vytvorí dátová štruktúra `ble_packet_t`, do ktorej sú uložené dáta a dodatočné informácie o danom pakete ako sú dĺžka dát a už vyššie zmienený aktuálny čas (v milisekundách). Takto pripravená štruktúra je následne odoslaná do fronty, kde čaká na následné spracovanie.

```

1   case ESP_GATTC_NOTIFY_EVT: {
2       if (p_data->notify.is_notify) {
3           notify_time = esp_timer_get_time();
4           ble_packet_t packet;
5           packet.len = p_data->notify.value_len;
6           packet.timestamp = notify_time / 1000; // us to ms
7           memcpy(packet.data, p_data->notify.value, p_data->notify.value_len);
8           xQueueSend(messageQue, &packet, 0);

```

```

9     }
10    if (start == false) {
11        start_time = esp_timer_get_time();
12        break;
13    }
14    break;

```

Výpis 5.7: (Prijímanie BLE paketov)

### 5.3.2 Vysielač

Vysielacia časť bola implementovaná na základe referenčného príkladu "BLE throughput server" dostupného v rámci frameworku ESP-IDF [23]. Tento pôvodný kód bol následne upravený tak aby umožňoval simuláciu prenosu dát rôznej veľkosti za použitia rôzneho kódovania cez rozhranie BLE s využitím notifikácií. Ako už bolo spomenuté v predchádzajúcich kapitolách kód postupne prepína medzi rôznymi fyzickými vrstvami (tzv. PHY), konkrétne režimy 1M PHY, 2M PHY a CODED PHY S2, S8. Prepínanie PHY režimu je riešené pomocou obsluhy callbacku disconnect, kde sa po odpojení od BLE spojenia nastaví nové parametre 5.8

```

1    case ESP_GATTS_DISCONNECT_EVT:
2        ...
3        update_advertisement_parameters();
4        ...

```

Výpis 5.8: (Zmena parametrov po ukončení vysielania)

a začne sa nová inzercia (advertising) za použitia nového nastavenia PHY 5.9

```

1    static void update_advertisement_parameters(void) {
2        static int phy = 1;
3        phy = phy % 4;
4        switch (phy) {
5        case 1:
6            esp_ble_gap_ext_adv_set_params(EXT_ADV_HANDLE, &ext_adv_params_1m);
7            break;
8            ...
9        case 0:
10           esp_ble_switch_phy_coded(true);
11           esp_ble_gap_ext_adv_set_params(EXT_ADV_HANDLE, &ext_adv_params_coded);
12           ...
13        }
14        phy++;
15        // Update extended advertising parameters

```

Výpis 5.9: (Nastavenie PHY)

Po úspešnom nadviazaní spojenia je odoslaný blok dát, následne je spojenie prerušené a celý cyklus sa opakuje s novými nastaveniami. Tento kolobek sa opakuje, pokiaľ nenastane chyba, alebo pokiaľ je zariadenie napájané. Tento prístup umožňuje automatizované testovanie rôznych režimov prenosu dát a zabezpečuje zmenu parametrov PHY pre každé nové nadviazané spojenie.

## 5.4 Meranie vzdialenosti

Meranie vzdialenosti prebiehalo v otvorenom priestranstve s minimálnym rušením, konkrétne na rovnom poli v odľahlej lokalite na východnom Slovensku, v ktorej okolí sa nenachádzajú žiadne veľké mestá ani priemyselné podniky. Miesto merania je zobrazené na obrázku vyššie 5.1. Takéto prostredie poskytovalo ideálne podmienky pre testovanie možného dosahu bezdrôtovej komunikácie pomocou technológie Bluetooth s využitím rôznych variantov PHY, takisto pre testovanie možného dosahu technológie LoRa s využitím rôznych kombinácií nastaviteľných parametrov, ktoré sú podrobnejšie rozobrané v predchádzajúcich kapitolách tejto práce. Meranie prebiehalo postupným zväčšovaním vzdialenosti medzi zariadeniami, pričom sa testovali na štyroch rôznych vzdialenostiach s postupným zväčšovaním vzdialenosti o 200 metrov, teda konkrétne vzdialenosti boli 200, 400, 600 a 800 metrov. Pri každom kroku boli zaznamenané výsledky pre rôzne varianty PHY u BLE a rôzne varianty parametrov u LoRa. Vďaka čomu bola získaná dostatočná množina dát pre analýzu dosahu jednotlivých technológií. Celý experiment bol vykonaný opakovane, aby boli výsledky čo najviac dôveryhodné. Meranie na vzdialenosť 800 metrov bolo vykonané konkrétne dva krát, pričom pri prvom pokuse došlo k čiastočnej korupcii niektorých nameraných dát v dôsledku chyby skriptu pri logovaní, táto chyba bola spôsobená nie ideálne vytvoreným softvérom a nevhodne navrhnutým plánom merania. Aj napriek tomu sa ukázalo, že získané dáta z oboch meraní sú vzájomne veľmi podobné, a dajú sa teda považovať za relevantné. Pre určenie vzdialenosti medzi jednotlivými bodmi merania bola využitá kombinácia online máp a orientácia podľa charakteristických prvkov terénu, ako bolo spomenuté v predchádzajúcej kapitole.

# Kapitola 6

## výsledky

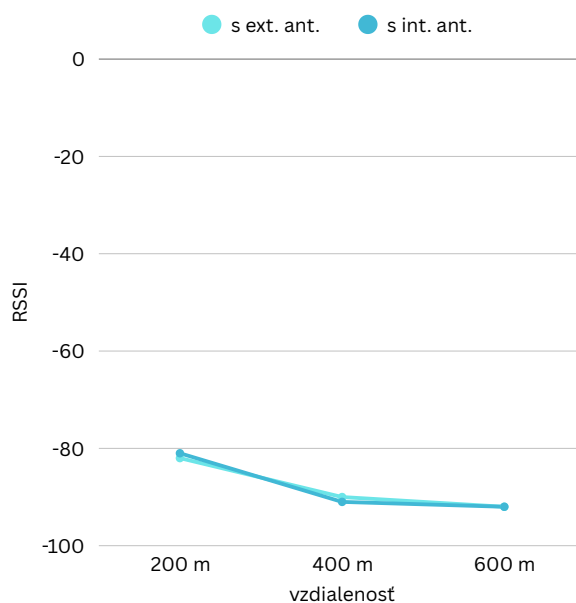
V tejto kapitole sú prezentované výsledky merania, ktorého účelom bolo porovnanie dosahu prenosu bezdrôtových technológií Bluetooth Low Energy (BLE) a LoRa, v pásme 2.4 GHz. Meranie prebiehalo vo vonkajšom prostredí s minimálnym rušením na vzdialenosti približne 200, 400, 600 a 800 metrov. V každej vzdialenosti boli odosielané dátové pakety rôznej veľkosti a bolo zaznamenávané percento doručených paketov. Zatiaľ čo u technológie LoRa bol menený spreading factor (SF), šírka pásma (BW) a code rate (CR), pri BLE boli testované rôzne režimy PHY. Nasledujúca časť obsahuje tabuľky a grafy zobrazujúce získane údaje.

### 6.1 výsledky BLE

V tejto časti sú prezentované výsledky merania rozoberajúce technológiu Bluetooth Low Energy (BLE) v pásme 2.4 GHz.

#### 6.1.1 RSSI

Jedným z hlavných sledovaných parametrov bola intenzita signálu vyjadrená pomocou hodnoty RSSI. Táto veličina poskytuje priamu predstavu o kvalite bezdrôtového spojenia a jej závislosť na vzdialenosti. Na obrázku 6.1 je zobrazený graf, ktorý znázorňuje tento vzťah.



Obrázek 6.1: Vztah medzi vzdialenosťou a RSSI

### 6.1.2 Čas prenosu

Informácie ohľadom času potrebného k doručení skupiny 10 paketov rôznych veľkostí a ich prehľad je uvedený v tabulke nižšie 6.1 V rámci analýzy týchto dát bolo zistené, že sa v niektorých prípadoch vyskytli hodnoty, ktoré v rámci merania BLE výrazne neodpovedali očakávaným hodnotám a z hľadiska reálneho priebehu komunikácie nedávali zmysel. Jednalo sa o prípady kde náhodná skupina paketov mala mimoriadne vysoký čas doručenia a to aj v prípadoch keď by dané kódovanie malo byť rýchlejšie ako ostatné. Pravdepodobná príčina týchto nepresností bola nesprávna obsluha prerušení v kóde. Tieto dáta som sa rozhodol odfiltrovať.

[H]

Tabulka 6.1: Průměrný čas doručení 10 paketů [ms] v závislosti na PHY režimu a velikosti paketu

PHY režim	11 B	111 B	255 B
1M PHY	<1 ms	12 ms	27 ms
2M PHY	<1	8	15 ms
Coded PHY S2	16 ms	34 ms	64 ms
Coded PHY S8	25 ms	83 ms	193 ms

### 6.1.3 Dosaženutá vzdialenosť

Maximálna dosiahnutá vzdialenosť, pri ktorej sa podarilo úspešne realizovať meranie, bola 600 metrov. Pokus o meranie na vzdialenosť 800 metrov sa nepodarilo úspešne vykonať, čo

bolo pravdepodobne spôsobené zhoršenými podmienkami v danej lokalite. Medzi vysielačom a prijímačom sa v tomto prípade nachádzal terénny výbežok (kopec), ktorý mohol výrazne narušiť kvalitu signálu, prípadne úplne znemožniť jeho zachytenie. Aby bolo možné zabezpečiť priamu viditeľnosť (LOS – Line of Sight) medzi zariadeniami, bolo nutné umiestniť prijímač na poľovnícky posed, ktorý bol síce dostatočne vyvýšený, avšak jeho plechová strecha mohla zároveň pôsobiť ako tieniaci alebo odrazový prvok, čo mohlo negatívne ovplyvniť schopnosť zariadenia prijímať signál. Tieto faktory výrazne ovplyvnili výsledok merania na 800 metroch a pravdepodobne prispeli k jeho neúspechu. Pre lepšiu ilustráciu testovanej lokality a konkrétneho usporiadania meracích bodov je nižšie uvedená mapa meracieho priestranstva 6.2, ktorá zachytáva aj polohu poľovníckeho posedu a vyznačuje jednotlivé vzdialenosti.



Obrázek 6.2: Mapa merania

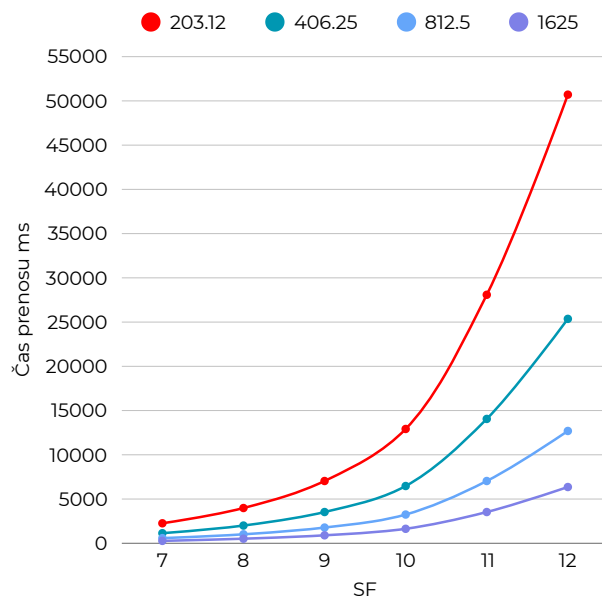
## 6.2 Výsledky LoRa

V tejto časti sú prezentované výsledky merania týkajúce sa bezdrôtovej technológie LoRa pracujúcej v pásme 2.4 GHz. Cieľom experimentu bolo analyzovať správanie tejto technológie pri rôznych komunikačných nastaveniach. Rovnako ako pri BLE sa testovanie realizovalo v otvorenom priestore s postupným zvyšovaním vzdialenosti medzi vysielačom a prijímačom. Merania boli vykonané na vzdialenostiach 200, 400, 600 a 800 metrov ako je zobrazené na mape vyššie 6.1. Nasledujúce podkapitoly obsahujú podrobné grafy získaných výsledkov, ktoré ukazujú, ako jednotlivé nastavenia ovplyvnili výkonnosť LoRa pri rôznych vzdialenostiach.

### 6.2.1 Rýchlosť prenosu

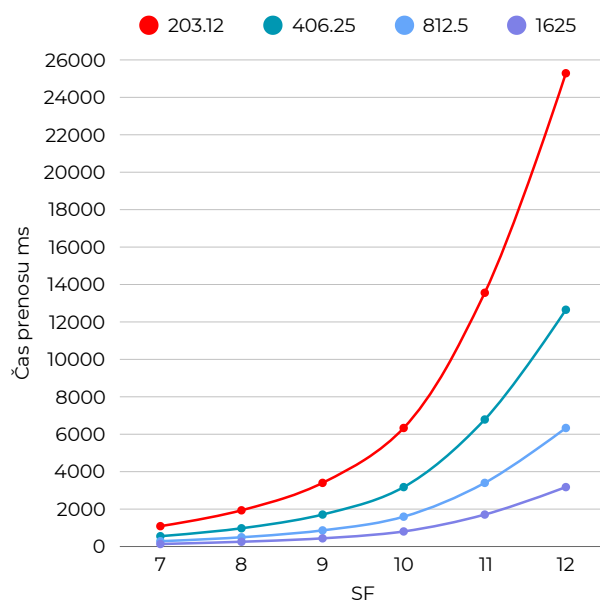
Tieto výsledky ukazujú, ako spreading factor (SF) a šírka pásma (BW) ovplyvňujú celkovú rýchlosť prenosu u technológie LoRa. Nižšie sú uvedené tri samostatné grafy. Všetky grafy vychádzajú z rovnakého nastavenia code rate (CR) = 4/5, aby boli výsledky porovnateľné. Každý z grafov reprezentuje iný rozmer paketu: konkrétne 255 bajtov, 110 bajtov a 11 bajtov.

Na obrázku 6.3 je znázornený vzťah medzi SF a rýchlosťou prenosu pri najväčšom testovanom pakete o veľkosti 255 bajtov. Graf jasne ukazuje, že pri šírke pásma 1625 kHz a nižších SF je dosiahnutá najvyššia prenosová rýchlosť, no za cenu nižšieho dosahu.



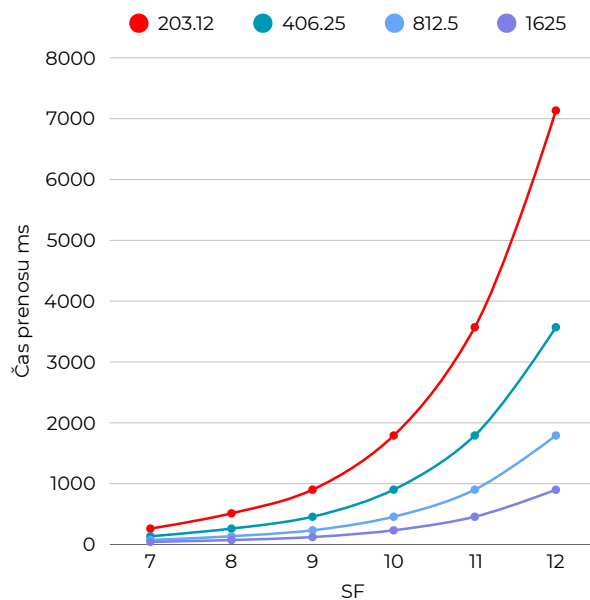
Obrázek 6.3: Porovnanie SF a rýchlosti prenosu pre jednotlivé šírky pásma pri paketoch o veľkosti 255B

Obrázok 6.4 predstavuje rovnaké porovnanie pre stredne veľké pakety s veľkosťou 110 bajtov.



Obrázek 6.4: Porovnanie SF a rýchlosti prenosu pre jednotlivé šírky pásma pri paketoch o veľkosti 110B

Napokon, obrázok 6.5 ukazuje vývoj prenosovej rýchlosti pre najmenšie pakety s veľkosťou 11 bajtov.



Obrázek 6.5: Porovnanie SF a rýchlosti prenosu pre jednotlivé šírky pásma pri paketoch o veľkosti 11B

Počas experimentu boli okrem  $CR = 4/5$  testované aj iné hodnoty code rate (CR), konkrétne  $CR = 4/6$ ,  $4/7$  a  $4/8$ . Na základe pozorovaných výsledkov sa však ukázalo, že v rámci testovaného rozsahu a typických podmienok merania tieto hodnoty neprinesli zásadné rozdiely z hľadiska prenosovej rýchlosti ani kvality spojenia. Z tohto dôvodu boli z grafickej analýzy vynechané, aby zostala prehľadná a zameraná na najrelevantnejšie konfigurácie. Rovnako sa použili dáta zo vzdialenosti 200M, pretože dĺžka prenosu sa v závislosti na vzdialenosti výrazne nemenila, odchýlky neprekročili hodnotu 2ms.

### 6.3 Vzdialenosť

Technológia LoRa počas merania dosiahla spoľahlivý prenos dát až na vzdialenosť 800 metrov, čo predstavuje maximálnu overenú vzdialenosť v rámci realizovaného experimentu. Po tejto hranici už meranie nepokračovalo, keďže sa na rovnakej vzdialenosti nepodarilo zaznamenať úspešné merania pomocou technológie Bluetooth, čím by ďalšie porovnávanie stratilo zmysel. Merania prebiehali v rovnakých podmienkach, ktoré boli podrobne opísané v predchádzajúcej kapitole, vrátane vplyvu terénnych nerovností, výškového umiestnenia zariadení a možného rušenia spôsobeného kovovou strechou poľovníckeho posedu. Pre lepšiu orientáciu a ilustráciu prostredia, v ktorom boli merania vykonávané, je mapa meracej trasy uvedená v kapitole vyššie (obrázok 6.2).

# Kapitola 7

## Záver

Cieľom tejto bakalárskej práce bolo navrhnuť plán merania a porovnať výkonnosť dvoch bezdrôtových komunikačných technológií Bluetooth Low Energy (BLE) a LoRa v pásme 2.4 GHz z hľadiska ich dosahu a prenosovej rýchlosti. V teoretickej časti boli podrobne popísané princípy fungovania oboch technológií, ich štruktúra, možnosti kódovania a parametre ovplyvňujúce kvalitu spojenia. V praktickej časti bol vytvorený merací systém založený na mikrokontroléroch ESP32, ktorý umožnil objektívny zber a spracovanie dát. Experimenty prebiehali vo vonkajšom prostredí za minimálneho rušenia a prebiehali na vzdialenostiach 200 až 800 metrov. Pre každú technológiu sa sledovala hodnota RSSI, rýchlosť doručenia paketov rôznych veľkostí a počet úspešne doručených paketov (PDR). Výsledky potvrdili očakávania: technológia LoRa dosiahla spoľahlivý prenos až do vzdialenosti 800 metrov pre všetky kombinácie parametrov, zatiaľ čo BLE preukázala funkčný prenos maximálne do 600 metrov pre všetky možnosti PHY, a to za ideálnych podmienok. LoRa sa ukázala ako robustnejšia technológia z hľadiska dosahu a odolnosti voči rušeniu, pričom BLE vynikla vyššou prenosovou rýchlosťou pri kratších vzdialenostiach. Z meraní vyplýva, že BLE je vhodnejšie riešenie pre aplikácie s vyšším objemom dát v kratších intervaloch a kratšom dosahu, do vzdialenosti približne 600 m, zatiaľ čo LoRa je výhodná v scenároch vyžadujúcich dlhý dosah a nízky objem prenesených dát a kde nie je pomalá odozva problém, typicky v IoT aplikáciách s nízkou dátovou záťažou, ako sú senzorové siete v poľnohospodárstve alebo monitorovanie prostredia. Práca zároveň poukázala na dôležitosť správneho nastavenia komunikačných parametrov (napr. SF, BW, CR) pri LoRa a výberu vhodného PHY režimu pri BLE. Výsledky tejto práce môžu slúžiť ako východisko pre návrh energeticky efektívnych a spoľahlivých bezdrôtových systémov v pásme 2.4 GHz, a zároveň ako základ pre ďalší výskum alebo vývoj praktických riešení v oblasti internetu vecí.

### 7.1 Problémy pri meraní

Počas návrhu a realizácie experimentu sa vyskytlo niekoľko technických a organizačných komplikácií, ktoré mali vplyv na priebeh vývoja, merania a následného spracovania dát. Tieto problémy spomalili prácu a v niektorých prípadoch si vyžiadali operatívne zásahy, aby bolo možné experiment úspešne dokončiť. Jedným z hlavných problémov sa ukázal byť výber vhodnej BLE knižnice, ktorá by podporovala dynamickú zmenu PHY režimov počas behu aplikácie. Väčšina dostupných knižníc pre ESP32 neumožňovala túto funkcionalitu alebo bola zle zdokumentovaná, čo výrazne predĺžilo čas vývoja softvéru. Po viacerých pokusoch a testovaniach rôznych riešení sa nakoniec podarilo nájsť knižnicu, ktorá umožnila

prepínanie medzi PHY režimami, no jej nasadenie si vyžadovalo úpravy v kóde a prispôbenie logiky celej aplikácie. Ďalší problém nastal pri samotnom výbere miesta pre meranie. Pôvodne zvolená lokalita nespĺňala podmienky pre zabezpečenie priamej viditeľnosti (Line of Sight – LoS) medzi zariadeniami. Terénne prekážky ako nerovnosti neumožnili meranie LoS, a preto bolo meranie v tejto oblasti opustené. Následne bola vybraná nová lokalita na otvorenom poli, ktorá už spĺňala požiadavky na minimalizáciu rušenia a zabezpečenie čo najobjektívnejších výsledkov. Technické problémy sa vyskytli aj na úrovni hardvéru. Použité vývojové dosky ESP32, mali slabo upevnené microUSB konektory, ktoré sa počas manipulácie alebo opakovaného pripájania odtrhli od plošného spoja. Tieto poškodenia si vyžiadali okamžité opravy, konkrétne provizórnu opravu dosiek, čo spôsobilo ďalšie oneskorenia v harmonograme experimentu. Napokon, počas zberu dát sa prejavil problém aj na úrovni softvérového skriptu určeného na logovanie výsledkov ako už bolo spomenutú. V dôsledku nedostatočného návrhu správy výstupných súborov došlo k prepísaniu časti predchádzajúcich meraní. Niektoré experimenty tak bolo potrebné vykonať opakovane, aby bola zabezpečená konzistencia a úplnosť dátovej sady. Napriek týmto komplikáciám sa všetky problémy podarilo vyriešiť a finálny experiment bol úspešne zrealizovaný so spoľahlivými výsledkami, ktoré boli spracované v predošlých kapitolách tejto práce.

## 7.2 Možnosti ďalšieho rozšírenia experimentu

Aj keď sa táto práca zameriava na meranie v otvorenom priestranstve, kde majú zariadenia priamy výhľad, existuje viacero spôsobov, ako experiment rozšíriť a zvýšiť jeho výpovednú hodnotu.

### 7.2.1 Meranie v lesnatom poraste

Špecifické výzvy a príležitosti prináša prostredie hustého lesného porastu. Rádiový signál sa tu síce bude šíriť s minimálnym rušením od ostatných bezdrôtových zariadení, ale na druhú stranu tu narastajú rušivé vplyvy prostredia, ako sú odrazy od okolitých stromov, pohlcovanie signálu okolitou vegetáciou a viaccestné šírenie. Ďalším problémom je schopnosť zaistiť, aby na seba mali zariadenia priamy výhľad, čo môže mať zásadný dopad na dosiahnutý PDR i pri menších vzdialenostiach. Toto meranie by umožnilo lepšie pochopiť možný dosah a kvalitu signálu v týchto podmienkach a tým by umožnilo skúmanie potenciálneho využitia v lesníctve alebo poľnohospodárstve.

### 7.2.2 Meranie pohybujúcich sa objektov

Meranie s pohybujúcimi sa objektami zásadne mení základný charakter experimentu, pretože mení jednu zo zásadných vlastností experimentu a to fixnú polohu zariadenia. Testovanie pohybujúcich sa objektov, napríklad dronov alebo autonómnych vozidiel, by umožnilo posúdiť spoľahlivosť prenosu signálu, kde jednotlivé zariadenia nemajú stálu polohu a občasne môže byť priama viditeľnosť (line of sight) prerušená inými objektmi. Takýto experiment by priniesol cenné poznatky o správaní bezdrôtovej komunikácie v dynamických scenároch, ktoré sú bežné napríklad pri monitorovaní pohybu zvierat, v dopravných systémoch alebo v priemyselnej automatizácii. Umožnil by taktiež overiť, ako rýchlo technológia LoRa a BLE dokážu reagovať na zmeny podmienok a udržať spojenie bez výpadku pri pohybe v reálnom prostredí.

### 7.2.3 Nasadenie v sieti s viacerými uzlami

Zatiaľ bol experiment postavený na point-to-point komunikácii. Ďalším krokom by mohlo byť testovanie v sieti s viacerými zariadeniami, kde by sa testovala napríklad výmena dát medzi uzlami a rýchlosť prenosu dát na dané vzdialenosti pre LoRa a BLE. LoRa by mohla mať teoreticky väčšie vzdialenosti medzi uzlami zatiaľ čo BLE by bolo schopné dosiahnuť väčší objem prenesených dát. Experiment by sa mohol zameriavať na vhodnú kombináciu týchto dvoch technológií.

# Literatura

- [1] *STM32WBA Bluetooth® LE – Peer 2 Peer Applications* online. STM, 2024. Dostupné z: <https://www.pcbonline.com/blog/lora-peer-to-peer.html#1>. [cit. 2025-05-16].
- [2] ABOUD, S. *Study and improvement of long range communication technologies for wireless sensor networks*. Auvergne, 2020. Disertační práce. Université Clermont Auvergne. [cit. 23.1.2025].
- [3] ADI, P. D. P.; SIHOMBING, V.; SIREGAR, V. M. M.; YANRIS, G. J.; SIANTURI, F. A. et al. A Performance Evaluation of ZigBee Mesh Communication on the Internet of Things (IoT). In: *2021 3rd East Indonesia Conference on Computer and Information Technology (EIConCIT)*. 2021, s. 7–13.
- [4] AL., C. L. et. A comprehensive Study of Bluetooth Low Energy. In: *J. Phys.: Conf. Ser. 2093*. 2021.
- [5] ALOÏS AUGUSTIN<sup>1</sup>, T. C. a TOWNSLEY, W. M. *A Study of LoRa: Long Range Low Power Networks for the Internet of Things*. 91128 Palaiseau, France, 2016. Disertační práce. École polytechnique Route de Saclay. [cit. 22.1.2025].
- [6] ANUKRUTI<sup>16</sup>. *What is P2P (Peer-to-Peer Process)?* online. geeksforgeeks, 2024. Dostupné z: <https://www.geeksforgeeks.org/what-is-p2p-peer-to-peer-process/>.
- [7] ARACHCHIGE, Y. W. *BLUETOOTH LOW ENERGY (BLE) DATA STREAMING AND INTEGRATION OF BLE AND 5G MOBILE CONNECTIVITY IMPLEMENTATION*. 2023. Diplomová práce. University of Oulu. [cit. 25.1.2025].
- [8] BALBI, G. a JOHN, R. *Point-to-Point: Telecommunications Networks from the Optical Telegraph to the Mobile Telephone*. In: De Gruyter Mouton, Leden 2014. ISBN 9783110271355.
- [9] BRECHT REYNDERS, S. P. *Chirp Spread Spectrum as a Modulation Technique for Long Range Communication*. Heverlee, B-3001 Belgium, 2022. Disertační práce. Department of Electrical Engineering KU Leuven. [cit. 22.1.2025].
- [10] GROUP, R. E. *Bluetooth Low Energy – Regulatory Aspects Document (RAD)*. 1.0.1. 2023. [cit. 25.1.2025].
- [11] GUILLAUME FERRÉ, A. G. *Physical Layer Principle and Performance Analysis*. Bordeaux, 2018. Disertační práce. ICECS 2018 25th IEEE International Conference on Electronics Circuits and Systems. [cit. 24.1.2025].

- [12] GWENDOLINE HOCHET DERÉVIANCKINE, O. I. B. N. F. V. Opportunities and Challenges of LoRa 2.4 GHz. *IEEE Communications Magazine*, *In press*, 10.1109/MCOM.010.2200566. hal-04020100, 2023.
- [13] HALAJ, J. *Detekce anomálií v IoT sítích*. Brno, CZ, 2020. Master's thesis. Brno University of Technology, Faculty of Information Technology. Dostupné z: <https://www.fit.vut.cz/study/thesis/23118/>.
- [14] HEIKKI KARVONEN, M. H. J. I. *Experimental Performance Evaluation of BLE 4 vs BLE 5 in Indoors and Outdoors Scenarios*. Finland, 2019. Disertační práce. Centre for Wireless Communications University of Oulu. [cit. 26.1.2025].
- [15] HIRAKAWA, R.; MIZUTANI, K. a HARADA, H. *Specification and Performance Analysis of Wi-SUN FAN*. Listopad 2022. Dostupné z: <https://doi.org/10.36227/techrxiv.21545493.v1>.
- [16] HOFER SCHMITZ, K. a STOJANOVIĆ, B. Towards formal verification of IoT protocols: A Review. *Computer Networks*, 2020, sv. 174, s. 107233. ISSN 1389-1286. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128619317116>.
- [17] *LoRa WAN 1.0.3 Specification*. 2018. [cit. 24.1.2025].
- [18] LYATUU, C. A. An analysis of bluetooth 5 in comparison to bluetooth 4.2. *Europub Journal of Education Research, Portugal*, v.3, n.1, p. 112-120, 2022, 2022.
- [19] MERDIS, V. *Wireless communication protocols for home automation exploring the security and privacy aspects of smart home IoT devices communicating over the Z-Wave protocol*. April 2019. Dostupné z: <http://essay.utwente.nl/77879/>.
- [20] PANCHAM, J.; MILLHAM, R. a FONG, S. J. Analysis of Bluetooth Low Energy Detection Range Improvements for Indoor Environments. In: SHI, Y.; FU, H.; TIAN, Y.; KRZHIZHANOVSKAYA, V. V.; LEES, M. H. et al., ed. *Computational Science – ICCS 2018*. Cham: Springer International Publishing, 2018, s. 598–609. ISBN 978-3-319-93713-7.
- [21] QUISPE A.A., I. L. M. L. F. E. Analysis of Wi-SUN FAN Network Formation Time, 2024. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/s24041142>.
- [22] REYHANE FALANJI, A. D. *Range and Capacity of LoRa 2.4 GHz*. 2013.
- [23] SYSTEMS, E. *Espressif IoT Development Framework. Official development framework for Espressif SoCs*. online. 2016. Dostupné z: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/index.html>. [cit. 2025-05-04].
- [24] TAN, J. *What is Peer-To-Peer (P2P) LoRa Communication?* online. Seedstudio, 2021. Dostupné z: [https://www.seedstudio.com/blog/2021/04/26/what-is-peer-to-peer-p2p-lora-communication/?srsltid=AfmBOopkS0Tf\\_F\\_Ps\\_WC1\\_XG\\_6fhvor4l0o2CgsWtMtsEJ1iQ-XhhD0p](https://www.seedstudio.com/blog/2021/04/26/what-is-peer-to-peer-p2p-lora-communication/?srsltid=AfmBOopkS0Tf_F_Ps_WC1_XG_6fhvor4l0o2CgsWtMtsEJ1iQ-XhhD0p). [cit. 2025-05-16].
- [25] TANGSUNANTHAM N., P. C. Experimental Performance Analysis of Wi-SUN Channel Modelling Applied to Smart Grid Applications. *Energies* 15, 2417, 2022. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/en15072417>.

- [26] TEAM, P. *LoRa Peer to Peer: LoRa for P2P Wireless Communication* online. PCBONLINE, 2024. Dostupné z: <https://www.pcbonline.com/blog/lora-peer-to-peer.html#1>. [cit. 2025-05-16].
- [27] THOMAS JANSSEN, M. A. R. B. a WEYN, M. LoRa 2.4 GHz Communication Link and Range. *IDLab-Faculty of Applied Engineering, University of Antwerp-imec, Sint-Pietersvliet 7, 2000 Antwerp, Belgium*, 2020.
- [28] VANGELISTA, L. Frequency Shift Chirp Modulation: The LoRa Modulation. *IEEE signal processing letters*. PISCATAWAY: IEEE, 2017, sv. 24, č. 12, s. 1818–1821. ISSN 1070-9908.
- [29] ÞÓRÐARSON, H. *IoT Readiness of BLE 5: Evaluation, Implementation and Improvements*. Stockholm, Sweden, 2018. Disertační práce. KTH ROYAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMPUTER SCIENCE. [cit. 26.1.2025].
- [30] ŠTEFUNKO, S. *Honeypot for wireless IoT networks*. 2018. Diplomová práce. Faculty of Information Technology CTU in Prague.