



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY

**ÚSTAV INTELIGENTNÍCH SYSTÉMŮ**

DEPARTMENT OF INTELLIGENT SYSTEMS

**LOKÁTOR NA BÁZI UWB**

UWB LOCATOR

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**MAREK JANČIAR**

**VEDOUcí PRÁCE**

SUPERVISOR

**doc. Ing. VLADIMÍR JANOUŠEK, Ph.D.**

BRNO 2023

## Zadání bakalářské práce



147116

Ústav: Ústav inteligentních systémů (UITS)  
Student: **Jančiar Marek**  
Program: Informační technologie  
Specializace: Informační technologie  
Název: **Lokátor na bázi UWB**  
Kategorie: Vestavěné systémy  
Akademický rok: 2022/23

### Zadání:

1. Seznamte se s technologiemi „Ultrawide Band“ (UWB) a „Bluetooth Low Energy“ (BLE).
2. Najděte vhodný UWB vývojový modul, navrhnete a implementujete lokátor.
3. Pro porovnání s technologií Bluetooth najděte vhodný vývojový modul a navrhnete a implementujete lokátor použitím BLE.
4. Navrhnete parametry a způsob měření a změřte parametry obou lokátorů. Zaměřte se na přesnost, spotřebu a maximální vzdálenost.
5. Porovnejte naměřené hodnoty, srovnajte a najděte výhody a nevýhody obou technologií a jejich praktického využití.

### Literatura:

Dle pokynů vedoucího.

Při obhajobě semestrální části projektu je požadováno:

Bod 1 a návrh bodů 2 a 3.

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

Vedoucí práce: **Janoušek Vladimír, doc. Ing., Ph.D.**

Vedoucí ústavu: Hanáček Petr, doc. Dr. Ing.

Datum zadání: 1.11.2022

Termín pro odevzdání: 10.5.2023

Datum schválení: 3.11.2022

## Abstrakt

Predmetom tejto práce je implementácia a vyhodnotenie parametrov lokalizačného systému s využitím technológie UWB. Táto práca sa zameriava na dve lokalizačné metódy a to konkrétne TWR a TDoA. Na porovnanie schopností UWB s inou bezdrôtovou technológiou je súčasťou tejto práce aj implementácia s využitím technológie BLE a to konkrétne metóda ktorá používa hodnotu RSSI. Parametre ako presnosť alebo spotreba energie implementácie týchto metód na konkrétnom hardwari boli prakticky zmerané a zakomponované do textu tejto práce. Čitateľ si pomocou tejto práce môže vytvoriť obraz o schopnostiach zmienených technológií a o spôsobe implementácie lokalizačných metód.

## Abstract

The subject of this work is the implementation and evaluation of the parameters of the localization system using UWB technology. This work focuses on two localization methods, namely TWR and TDoA. To compare the capabilities of UWB with other wireless technology, this work also includes an implementation using BLE technology, specifically a method that uses the RSSI value. Parameters such as the accuracy or energy consumption of the implementation of these methods on specific hardware were practically measured and incorporated into the text of this work. With the help of this work, the reader can create an image of the capabilities of the mentioned technologies and the way of implementing the localization methods.

## Klíčové slová

UWB, TWR, TDoA, RTLS, BLE, Bluetooth, RSSI

## Keywords

UWB, TWR, TDoA, RTLS, BLE, Bluetooth, RSSI

## Citácia

JANČIAR, Marek. *Lokátor na bázi UWB*. Brno, 2023. Bakalárska práca. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce doc. Ing. Vladimír Janoušek, Ph.D.

# Lokátor na bázi UWB

## Prehlásenie

Prehlasujem, že som túto bakalársku prácu vypracoval samostatne pod vedením pána doc. Ing. Vladimíra Janouška, Ph.D. Uviedol som všetky literárne pramene, publikácie a ďalšie zdroje, z ktorých som čerpal.

.....  
Marek Jančiar  
6. mája 2023

## Podakovanie

Chcel by som poďakovať vedúcemu mojej práce, pánovi doc. Ing. Vladimírovi Janouškovi, Ph.D., za pomoc a rady pri realizácii tejto práce. Taktiež by som chcel poďakovať zamestnancom firmy NXP a to hlavne pánovi Markovi Trmačovi za vytvorenie zadania tejto práce a odborné konzultácie počas jej riešenia.

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Použité bezdrôtové technológie</b>	<b>3</b>
2.1	Ultra-wideband . . . . .	3
2.2	Bluetooth Low Energy . . . . .	8
2.3	Bluetooth Mesh . . . . .	10
<b>3</b>	<b>Metódy na určovanie polohy pomocou bezdrôtových technológií</b>	<b>14</b>
3.1	Metóda s využitím RSSI . . . . .	14
3.2	Metódy založené na čase . . . . .	15
<b>4</b>	<b>Návrh a implementácia</b>	<b>21</b>
4.1	Zvolený hardware . . . . .	21
4.2	Všeobecné detaily implementácie . . . . .	25
4.3	Obsluha DWM3000EVB pomocou nRF5340 DK . . . . .	26
4.4	Kalibrácia oneskorenia UWB antény . . . . .	26
4.5	Implementácia metódy SDS-TWR . . . . .	28
4.6	Implementácia metódy s využitím RSSI . . . . .	29
4.7	Implementácia metódy 2D TDoA . . . . .	30
<b>5</b>	<b>Testovanie výslednej implementácie</b>	<b>33</b>
5.1	Presnosť merania . . . . .	33
5.2	Maximálny dosah . . . . .	35
5.3	Spotreba energie . . . . .	36
5.4	Porovnanie výsledkov UWB a BLE . . . . .	38
<b>6</b>	<b>Záver</b>	<b>39</b>
	<b>Literatúra</b>	<b>40</b>

# Kapitola 1

## Úvod

Využitie technológie ultra-wideband (UWB) na účely lokalizácie zaznamenalo v posledných rokoch veľký rozmach a to hlavne z dôvodu vysokej presnosti a spoľahlivosti tejto technológie v rôznych aplikáciách. Cieľom tejto bakalárskej práce je poskytnúť detailné informácie o využití tejto technológie v tomto kontexte.

Táto práca poskytuje komplexný pohľad na využitie technológie UWB, ktorý sa skladá z teoretického rozboru tejto technológie, popisu možných lokalizačných metód, informácií o implementácii na konkrétnom hardwari a v neposlednom rade vyhodnocuje testované parametre implementovaného riešenia. Predmetom tejto práce je taktiež vyhodnotiť implementáciu s použitím alternatívnej bezdrôtovej technológie, konkrétne s využitím veľmi rozšírenej technológie Bluetooth Low Energy (BLE).

Úvodná časť tejto práce pozostáva z teoretického rozboru bezdrôtových technológií UWB a BLE. Táto časť taktiež rozoberá technológiu Bluetooth mesh ktorá bola využitá v spojení s technológiou UWB pri implementácii jednej z lokalizačných metód. V kapitole 3 sú na teoretickej úrovni popísané rôzne lokalizačné metódy ktoré môžu byť implementované s využitím technológie UWB alebo BLE.

Lokalizačné metódy ktoré boli zvolené na implementáciu v rámci tejto práce sú metódy two-way ranging (TWR) a time difference of arrival (TDoA) v kontexte UWB a na porovnanie s BLE bola implementovaná metóda s využitím hodnoty RSSI. Kapitola 4 popisuje spôsob a detaily implementácie týchto metód na konkrétnom komerčne dostupnom vývojom hardwari.

V závere tejto práce sú poskytnuté detaily o spôsobe testovania výslednej implementácie a interpretácia výsledkov tohto testovania. Toto testovanie bolo zamerané hlavne na vyhodnotenie presnosti výstupných hodnôt implementovaných metód, meranie spotreby energie jednotlivých zariadení vystupujúcich v implementovaných systémoch a v neposlednom rade skúma maximálny dosah použitých bezdrôtových technológií.

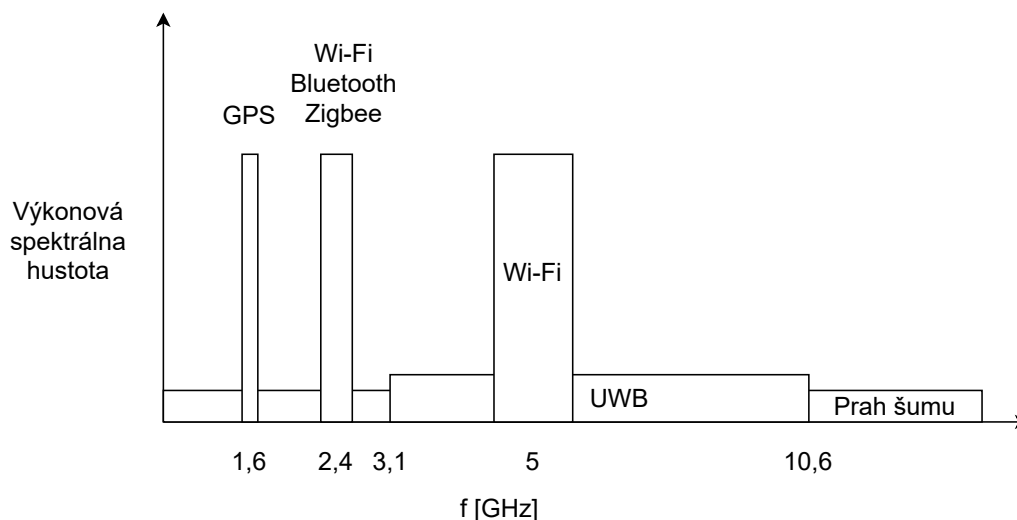
## Kapitola 2

# Použité bezdrôtové technológie

### 2.1 Ultra-wideband

Ultra-wideband (UWB) je technológia v štandarde IEEE 802.15.4 optimalizovaná na účely bezpečného a veľmi presného zisťovania polohy na krátke vzdialenosti. Umožňuje určiť vzdialenosť alebo pozíciu objektov vo vnútorných alebo vonkajších priestoroch v ráde niekoľkých centimetrov [8]. Podľa [12] je UWB technológia definovaná ako technológia pre rádiokomunikáciu na krátke vzdialenosti, ktorá vysiela signál ktorý sa rozprestiera naprieč veľmi širokým spektrom frekvencií, tento signál môže zasahovať do frekvenčných pásiem vyhradených pre iné rádiokomunikačné technológie. Zariadenia využívajúce UWB majú typicky šírku pásma s poklesom úrovne signálu o 10 dB aspoň 500 MHz alebo percentuálnu šírku pásma pre rovnaký pokles úrovne signálu aspoň 20 %.

Výkonová spektrálna hustota UWB signálu je extrémne nízka, čo umožňuje UWB systémom využívať rovnaké frekvenčné spektrum zároveň s inými úzkopásmovými technológiami bez toho aby dochádzalo k nežiadúcemu vzájomnému rušeniu [10].



Obr. 2.1: Porovnanie výkonovej spektrálnej hustoty UWB technológie s inými úzkopásmovými technológiami.

Vďaka svojmu ultra širokému frekvenčnému pásmu, UWB využíva na prenos dát krátke sekvencie veľmi úzkych impulzov (len 2 nanosekundy dlhé) v ktorých sú zakódované informácie pomocou kľúčovania binárno-fázovým posunom (BPSK) a/alebo s využitím burst position modulácie (BPM). Vo výsledku to zabezpečuje že UWB signály majú veľmi vysoké časové rozlíšenie čím je možné zistiť veľmi presný údaj o čase po ktorý putuje signál od vysielača k prijímaču. Toto vysoké časové rozlíšenie a krátka vlnová dĺžka taktiež zabraňujú viaccestnému rušeniu spôsobeného odrazmi signálu [8].

Štandard IEEE 802.15.4 rozlišuje dva UWB módy a to mód s nízkou frekvenciou impulzov (LRP) a mód s vysokou frekvenciou impulzov (HRP). Pre oba módy je maximálna vyžarovaná energia rovnaká nakoľko je limitovaná maximálnou strednou hodnotou vyžarovaného výkonu. Výsledkom je že mód LRP vysiela menší počet širších impulzov a mód HRP väčší počet užších impulzov [2].

	LRP UWB		HRP UWB	
	IEEE 802.15.4	Pridané v IEEE 802.15.4z	IEEE 802.15.4	Pridané v IEEE 802.15.4z
Dátový tok	1,25 kb/s 250 kb/s 1 Mb/s	2, 3, 4, 5, 6 Mb/s 8 Mb/s 10 Mb/s	110 kb/s 850 kb/s 6,81 Mb/s 27,24 Mb/s	
Najvyššia frekvencia opakovania impulzov	2 MHz	4 MHz	499,2 MHz	
Podpora pre určovanie polohy	Nie	Áno	Áno	
Potlačenie rušenia medzi viacerými používateľmi	Nie		Áno	
Typ modulácie	OOK PPM	PBFSK BPFSK + 8/16/32 PPM	BPSK + BPM	BPSK
Oprava chýb	SECDED konvolučná		SECDED konvolučná (K=3) Reed-Solomon	kovolučná (K=7)

Tabuľka 2.1: Parametre LRP a HRP UWB módov.

UWB operuje v regulovaných bezlicenčných frekvenčných spektrách, čo umožňuje komukoľvek využívať UWB komunikáciu bez nutnosti telekomunikačnej licencie za podmienok že sa toto vysielať signálu bude držať v predpísaných rozsahoch frekvencie a sily signálu [8]. Európska komisia dovoľuje využívanie UWB technológie v Európe v pásme od 6 do 8,5 GHz s maximálnou strednou hodnotou vyžarovaného výkonu -41,3 dBm/MHz EIRP. Taktiež povoľuje využívanie pásma od 3,4 do 4,8 GHz s rovnakou maximálnou hodnotou výkonu ale s obmedzením striedy. Toto obmedzenie je definované hodnotou 5 % za čas jed-



nej sekundy a 0,5 % za čas jednej hodiny. Individuálne zhluky vysielaní nesmú prekročiť dĺžku 5 milisekúnd.

Štandard IEEE 802.15.4 definuje pre HRP UWB 16 kanálov alebo inak pásiem. Každý kanál je definovaný ako kombinácia strednej frekvencie a maximálnej šírky pásma. Prehľad HRP UWB kanálov je vyobrazený v tabuľke 2.2. Je možné vidieť že minimálna šírka pásma je 499,2 MHz a taktiež že niektoré kanály zdieľajú strednú frekvenciu ale líšia sa v šírke pásma. Môžeme to pozorovať u kombinácií kanálov 2 a 4, 5 a 7, 9 a 11 a taktiež medzi 13 a 15. Aj keď štandard obsahuje 16 kanálov nie je u UWB zariadení nutná podpora všetkých týchto kanálov. Pre zariadenia operujúce v sub-gigahertzovom pásme je povinná podpora len pre kanál 0, pre zariadenia operujúce v nízkom pásme je povinná podpora len pre kanál 3 a pre zariadenia operujúce vo vysokom pásme je povinná podpora len pre kanál 9 [2].

Pásmová skupina	Kanál	Stredná frekvencia [MHz]	Šírka pásma [MHz]	Región	Povinnosť
0 (pásma <1 GHz)	0	499,2	499,2	proprietárne	povinné
1 (nízke pásmo)	1	3494,4	499,2	USA, EU	voliteľné
	2	3993,6	499,2	USA, EU, JP , KOR	voliteľné
	3	4492,8	499,2	USA, EU, JP , KOR	povinné
	4	3993,6	1331,2	USA, EU	voliteľné
2 (vysoké pásmo)	5	6489,6	499,2	USA, EU, CN	voliteľné
	6	6988,8	499,2	USA, EU, CN	voliteľné
	7	6489,6	1081,6	USA	voliteľné
	8	7488,0	499,2	USA, EU, KOR, CN	voliteľné
	9	7987,2	499,2	USA, EDU, JP , KOR, CN	povinné
	10	8486,4	499,2	USA, EDU, JP , KOR, CN	voliteľné
	11	7987,2	1331,2	USA, JP , KOR	voliteľné
	12	8985,6	499,2	USA, JP , KOR	voliteľné
	13	9484,8	499,2	USA, JP , KOR	voliteľné
	14	9484,0	499,2	USA, JP , KOR	voliteľné
	15	9484,8	1354,97	USA, JP , KOR	voliteľné

Tabuľka 2.2: Prehľad HRP UWB kanálov definovaných v štandarde IEEE 802.15.4.

HRP UWB má v štandarde IEEE 802.15.4z definované štyri možné štruktúry rámcov na fyzickej vrstve. Špecifikácia týchto rámcov sa skladá z kombinácie niektorých z nasledujúcich polí:

- Synchronizačné pole (SYNC) alebo inak preambula slúži na synchronizáciu vysieláča a prijímača. Prijímač detekuje preambulu a synchronizuje sa s vysieláčom. Samotná preambula pozostáva z ternárneho kódu (1, 0, -1) kde 1 symbolizuje pozitívny impulz, -1 negatívny impulz a 0 žiadny impulz. Každý kanál disponuje minimálne dvoma kompatibilnými kódmi. Kódy pre jednotlivé kanály sú zvolené tak aby mali nízku vzájomnú koreláciu, čo umožňuje viacerým zariadeniam využívať rovnaký kanál súčasne.
- Pole označujúce začiatok rámca (SFD) označuje koniec preambuly a presný začiatok hlavičky na fyzickej vrstve (PHR). Toto pole je taktiež využívané na určenie časových

razítek kedy signál začalo vysielajúce zariadenie vysielat a kedy ho začalo prijímajúce zariadenie prijímať. Z tohoto dôvodu je toto pole kľúčové pre hlavné využitie technológie UWB, určovanie polohy. Ako v prípade preamble, jedná sa o ternárny kód ktorý podľa štandardu IEEE 802.15.4z môže mať dĺžku 4, 8, 16 alebo 32 znakov. Táto dĺžku musí byť rovnaká ako u vysielateľa tak aj prijímateľa inak nie je možné správne určiť časové razítko prijatia signálu. Nie každý UWB mikročip podporuje všetky možné dĺžky tohoto poľa.

- Pole s hlavičkou rámca na fyzickej vrstve (PHR) nesie meta informácie o dátach prenášaných v tomto rámci. Hlavička sa skladá z nasledujúcich polí:
  - Pole s prenosovou rýchlosťou dát určuje prenosovú rýchlosť dát nasledujúcich za hlavičkou. Samotná hlavička je vysielaná rýchlosťou 850 kb/s pre všetky prenosové rýchlosti dát väčšie než alebo rovné 850 kb/s a pre prenosovú rýchlosť dát 110 kb/s je hlavička vysielaná rovnakou rýchlosťou 110 kb/s.
  - Pole s dĺžkou rámca je kladné celé číslo určujúce dĺžku prenášaných dát v bajtoch.
  - Pole označujúce že rámec sa používa na určenie pozície. Má hodnotu 1 ak je tomu tak a 0 ak to nie je účel tohto rámca.
  - Pole s dĺžkou preamble reprezentuje počet symbolov v synchronizačnom poli SYNC.
  - Posledné pole slúži na opravu chýb. Jedná sa o Hammingov kód schopný opraviť chybu v rozsahu jedného bitu alebo detekovať chybu v rozsahu dvoch bitov.

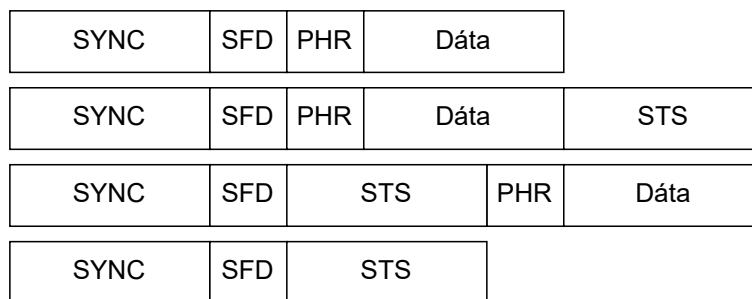
V štandarde IEEE 802.15.4 je maximálna dĺžka prenášaných dát obmedzená maximálnou hodnotou poľa určujúceho túto dĺžku. Toto pole má veľkosť 7 bitov čím je maximálna dĺžka prenášaných dát obmedzená hodnotou 128 bajtov. Novšia verzia štandardu 802.15.4z zvyšuje tento limit a to tak že polia s dĺžkou preamble, prenosovou rýchlosťou a rezervované pole môžu byť voliteľne vynechané a tým môže byť veľkosť poľa s dĺžkou rámca zväčšená na 12. Tým sa maximálna dĺžka prenášaných dát zvýši na hodnotu 4096 bajtov.

Bity	0 - 1	2 - 8	9	10	11 - 12	13 - 18
Účel	prenosová rýchlosť	dĺžka rámca	určovanie polohy	rezervované	dĺžka preamble	SECDED

Tabuľka 2.3: Štruktúra hlavičky UWB rámca na fyzickej vrstve podľa štandardu IEEE 802.15.4.

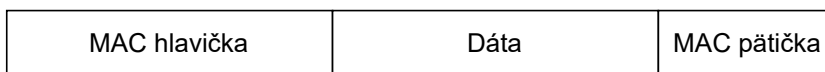
- Voliteľné pole so zakódovanou sekvenciou časových razítek (STS) bolo zavedené v štandarde IEEE 802.15.4z s účelom ochrany UWB vysielania voči útokom. Množstvo preambleových kódov je limitované a tieto kódy sú niekoľko krát zopakované v synchronizačnom poli SYNC. Tohto faktu môže využiť potencionálny útočník. Útokom ktoré by to mohli zneužiť môžeme zabrániť pridaním poľa STS do rámca. Štandard dovoľuje umiestnenie tohto poľa na tri rôzne pozície v rámci. Pole STS funguje podobne ako preamble ale na rozdiel od preamble sa jeho obsah neopakuje. Pozostáva z pseudo-randomizovaných impulzov generovaných deterministickým náhodným generátorom bitov (DRBG) umiestnených v jednom až štyroch aktívnych segmentov zapuzdrených v tichých intervaloch. Vďaka pseudo-náhodnosti tejto sekvencie tu

nevzniká periodicita čo umožňuje spoľahlivý, veľmi presný odhad kanálu prijímačom bez artefaktov. Na vytvorenie STS, DRBG generuje 128 bitové pseudo-náhodné čísla. Každý bit týchto čísel s hodnotou 0 generuje negatívny impulz a bit s hodnotou 1 generuje pozitívny impulz. Počom STS nie je možné nahradiť preambulu a vždy musí nasledovať až za počom SFD, nakoľko STS korelácia funguje len keď je spustená v rovnakom čase. Prijímač potrebuje na dekódovanie STS mať k dispozícii jeho lokálnu kópiu pred začiatkom prijímania. To je možné len v prípade že pozná kľúč a kryptografickú schému STS generátora. Spôsob akým sú kľúče distribuované nie je štandardom definované. Tento problém je riešený vyššími vrstvami s využitím iných bezdrôtových komunikačných technológií než UWB. UWB zariadenia podporujúce len základný štandard IEEE 802.15.4 toto pole nepodporujú a u zariadení vyhovujúcich štandardu IEEE 802.15.4z je podpora tohto pola povinná nakoľko je to nevyhnutné pri aplikáciách kde je bezpečnosť veľmi dôležitá, napríklad hands-free alebo využitie UWB zariadenia na bezkľúčový prístup [2].



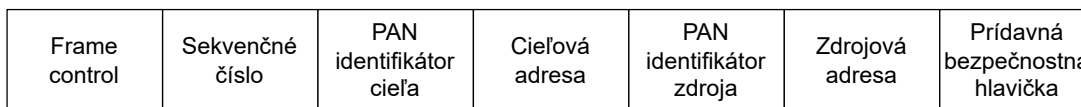
Obr. 2.2: Štyri možné štruktúry UWB rámca na fyzickej vrstve definované v štandarde 802.15.4.z.

Na linkovej vrstve ISO/OSI modelu je v štandarde IEEE 802.15.4 pre UWB komunikáciu definovaná štruktúra MAC rámca. MAC rámec tvorí dátové pole rámca na fyzickej vrstve. Štruktúra MAC rámca pozostáva z MAC hlavičky, prenášaných dát a MAC pätičky. Pätička pozostáva z kódu pre cyklickú kontrolu (CRC) využívaného pre detekciu chýb vzniknutých počas prenosu rámca.



Obr. 2.3: Štruktúra UWB rámca na linkovej vrstve.

Hlavička MAC rámca má premenlivú štruktúru a dĺžku podľa toho o aký typ rámca sa jedná. Jej dôležitou súčasťou je informácia o zdrojovej a cieľovej adrese zariadení.



Obr. 2.4: Jedna z možných štruktúr hlavičky MAC UWB rámca.

Prvým poľom každej hlavičky IEEE 802.15.4 MAC UWB rámca je 16 bitové pole frame control ktoré slúži na definíciu štruktúry zvyšku MAC hlavičky. Toto pole pozostáva z nasledujúcich poľí [2]:

- Pole označujúce typ rámca. Možné typy rámcov sú beacon, data, acknowledgement, MAC command, multipurpose a fragment.
- Pole označujúce prítomnosť prídavnej bezpečnostnej hlavičky.
- Pole označujúce že vysielať zariadenie má pripravené ešte ďalšie dáta pre prijímajúce zariadenie.
- Pole označujúce že vysielať zariadenie vyžaduje zaslanie správy o potvrdení doručenia.
- Pole označujúce že hlavička obsahuje len jeden identifikátor PAN spoločný pre vysielať aj prijímajúce zariadenie.
- Pole ktoré špecifikuje prítomnosť a veľkosť cieľovej adresy.
- Pole ktoré špecifikuje verziu rámca. Toto pole je nutné pretože vo verzii štandardu IEEE 802.15.4 z roku 2003 bola špecifikácia rámca zmenená.
- Pole ktoré špecifikuje prítomnosť a veľkosť zdrojovej adresy.

Bitsy	Účel
0 - 2	typ rámca
3	prítomnosť dodatočnej bezpečnostnej hlavičky
4	ďalšie rámce na odoslanie
5	vyžiadané potvrdenie doručenia
6	kompresia PAN identifikátoru
7 - 9	rezervované
10 - 11	adresný mód cieľa
12 - 13	verzia rámca
14 - 15	adresný mód zdroja

Tabuľka 2.4: Štruktúra poľa frame control UWB MAC hlavičky.

## 2.2 Bluetooth Low Energy

Bluetooth Low Energy (BLE) protokol sa skladá z dvoch úrovní protokolov a tými sú BLE core a BLE application. BLE core obsahuje dve časti, BLE controller a BLE host. Fyzická vrstva je spodná vrstva BLE core protokolu. Jej úlohou je špecifikovať frekvenčné pásmo, typ modulácie a demodulácie [4].

BLE využíva frekvenčné pásmo 2,4 GHz taktiež známe ako industriálne, vedecké alebo medicínske pásmo. Frekvenčné pásmo 2,4 GHz je bezlicenčné pásmo čo umožňuje využívať BLE na vysielať na krátke vzdialenosti bez nutnosti disponovať telekomunikačnou licenciou. Je to zároveň aj nevýhodou tejto technológie nakoľko toto frekvenčné pásmo má

tendenciu byť často zahľtené. Na fyzickej vrstve BLE kóduje informácie pomocou Gaussovského kľúčovania frekvenčným posunom (GFSK). Jedná sa o vylepšenú verziu kľúčovania frekvenčným posunom (FSK) kde sú informácie reprezentované diskretnými zmenami frekvencie nosného signálu. Podľa spôsobu modulácie, niekoľko symbolov môže reprezentovať jeden bit alebo jeden symbol môže reprezentovať niekoľko bitov. GFSK je digitálna modulačná metóda pri ktorej sú vstupné dáta pred-modulované a filtrované Gaussovským nízko-priepustným filtrom a následne je vykonaná modulácia typu FSK. GFSK umožňuje zbaviť sa Gaussovského šumu zo vstupného signálu. Konkrétne BLE využíva na zakódovanie logickej jednotky pozitívny výkyv frekvencie o aspoň 185 kHz. logická nula je zakódovaná pomocou negatívneho výkyvu frekvencie o aspoň rovnakú hodnotu. Vo verzii BLE 5.0 bola špecifikovaná nová konfigurácia na fyzickej vrstve ktoré umožňuje zvýšiť priepustnosť symbolov až na hodnotu 2 miliónov symbolov za sekundu, kde jeden symbol reprezentuje jeden bit. Pre porovnanie s predchádzajúcou konfiguráciou ktorá umožňovala priepustnosť 1 Mb/s, nová konfigurácia môže znížiť čas potrebný na prenos dát o polovicu čím dochádza k zníženiu spotreby energie. Táto nová konfigurácia vyžaduje vyšší výkyv frekvencie a to aspoň o 370 kHz oproti predchádzajúcim 185 kHz. Aj keď sa priepustnosť dvojnásobne zvýšila, efektivita sa nezvýšila rovnakým pomerom. Jedným z dôvodov je že intervaly medzi jednotlivými rámcami zostali rovnako dlhé [4].

Pri BLE rádio frekvenčnom (RF) module má na maximálny dosah silný vplyv dizajn antény a dráhový útlm. BLE RF moduly najčastejšie využívajú antény vytlačené na doske plošných spojov, čipové antény alebo prúťové antény. Dráhový útlm vyjadruje rozdiel sily signálu medzi vysielateľom a prijímačom. Všeobecnú rovnicu pre dráhový útlm je

$$L = 10 \cdot n \cdot \log_{10}(d) + C \quad (2.1)$$

kde  $L$  je dráhový útlm v dB,  $n$  je exponent dráhového útlmu,  $d$  je vzdialenosť medzi vysielateľom a prijímačom zvyčajne udávaná v metroch a  $C$  je konštanta zohľadňujúca straty systému [4].

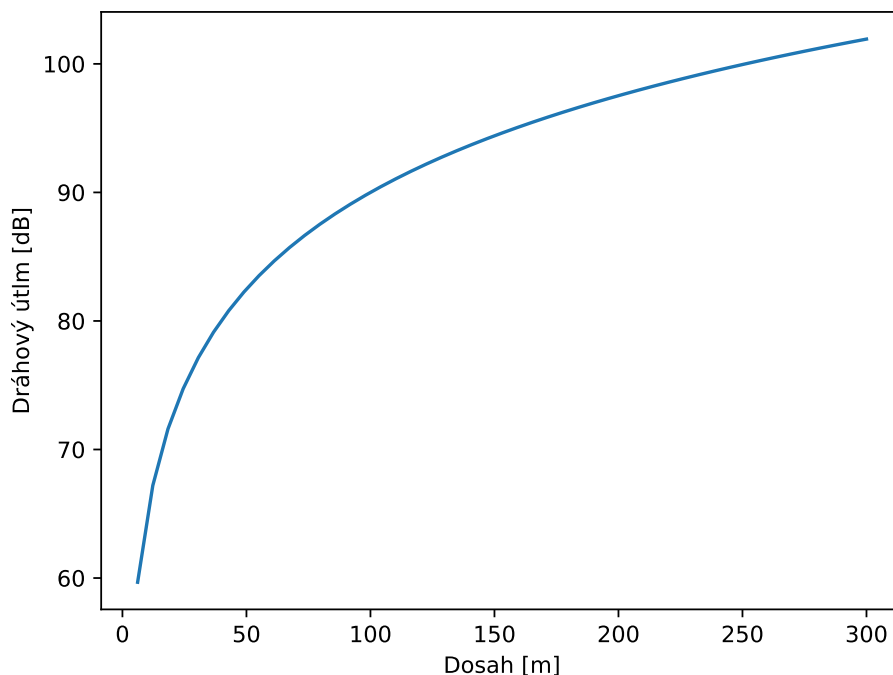
Citlivosť BLE prijímača je podľa BLE špecifikácie maximálne -70 dBm a sila vysielaného signálu je striktné limitovaná medzi hodnotami -20 dBm a +20 dBm. Z toho vyplýva že maximálna hodnota dráhového útlmu je 90 dB a tým pádom maximálny teoretický dosah BLE signálu je niečo cez 100 metrov [4].

S využitím indikátoru sily prijímaného signálu (RSSI) je možné využiť BLE na odhad vzdialenosti medzi jednotlivými BLE zariadeniami. Rovnica vzťahu medzi vzdialenosťou a RSSI je

$$RSSI = -10 \cdot n \cdot \log_{10}(d) + a \quad (2.2)$$

kde  $n$  je hodnota ovplyvnená podmienkami prostredia, hodnota  $n$  je typicky medzi 2 a 4,  $d$  je vzdialenosť medzi zariadeniami a  $a$  je sila signálu v arbitrárnej vzdialenosti od vysielajúceho zariadenia [4].

V porovnaní s predchádzajúcimi špecifikáciami Bluetooth technológie je najväčším pokrokom BLE nižšia spotreba energie. S účelom znížiť spotrebu energie je BLE väčšinu času v režime spánku a prebúdzá sa len keď nastane nejaká aktivita. BLE má definovaný stav hlbokého spánku ktorý nahrádza stav nečinnosti tradičného Bluetooth. V tomto stave hlbokého spánku je spotreba približne 1  $\mu$ A. S účelom znížiť spotrebu boli upravené aj skenovací mód a mód broadcast [4].



Obr. 2.5: Vzťah maximálneho dosahu na dráhovom útlme pre parametre  $n = 2.5$  a  $C = 40$ .

## 2.3 Bluetooth Mesh

BLE je veľmi rozšírená bezdrôtová technológia na krátke vzdialenosti. Má dominantné zastúpenie na trhu vďaka svojej jednoduchosti, nízkej spotrebe, nízkej cene a robustnosti. Technológiou BLE sú v dnešnej dobe vybavené takmer úplne všetky smartfóny, tablety, počítače a spotrebiteľská elektronika vo všeobecnosti. Toto umožnilo vývoj širokého spektra nových služieb a aplikácií v sektoroch ako zdravotníctvo, automatizácia domácnosti, bezpečnosť alebo vozidlová komunikácia. BLE je veľmi efektívne v sledovaní objektov alebo osôb pri použití vo vnútorných alebo vonkajších priestoroch kde sa kladie dôraz na nízku spotrebu, vysokú škálovateľnosť a spoľahlivosť [3].

Na rozdiel od iných populárnych bezdrôtových technológií ako WiFi alebo ZigBee, BLE dlho nedisponovalo možnosťami ako ho využiť v topológii typu mesh. Siete s mesh topológiou umožňujú prenos dát medzi pármí zariadení dynamickým a nie hierarchickým spôsobom. Jednotlivé zariadenie navzájom spolupracujú a umožňujú efektívne preposielanie správ od a k iným zariadeniam. Mesh topológie sú atraktívnou alternatívou k tradičným centralizovaným alebo stromovým topológiám. Preto v roku 2017 bol do BLE štandardu zakomponovaný BLE mesh [3].

V porovnaní s inými bezdrôtovými technológiami ako ZigBee, Thread, Z-Wave alebo WiFi ktoré využívajú rôzne smerovacie techniky, BLE aktuálne podporuje len managed flooding. Managed flooding je niekde na polceste medzi floodingom a smerovaním. Absencia štandardizovaného a efektívneho smerovacieho algoritmu obmedzuje použiteľnosť BLE v priestorovo distribuovaných sieťach. Výhodami floodingu je jeho jednoduchosť, redundancia a nie je nutné počítat smerovacie tabuľky. Na druhej strane smerovanie je robustné a

spotrebuje len málo energie ale implikuje oneskorenie a výpočet optimálnej cesty je náročný. V BLE mesh je každá nová správa preposielaná viacerými uzlami typu relay. Počet uzlov typu relay a počet preposielaní by mal byť limitovaný a vyladený tak aby nedochádzalo k zahľteniu siete čo spôsobuje stratu paketov a veľké oneskorenia pri prístupe založenom na súperení. Zahľtenie siete je najväčšou nevýhodou floodingu. Pri zahľtení taktiež stúpa spotreba energie. Managed flooding používaný v BLE zlepšuje základný flooding pridaním niekoľkých optimalizácií. Jednou z optimalizácií je time-to-live (TTL) pečiatka, caching správ, heartbeat správy a funkcie priateľských uzlov. Aj keď flooding môže vyzeráť neefektívne v mnohých kontextoch, je veľmi žiadaný keď posielanie dát je urgentné, sieť je malá alebo konfigurácia sa mení veľmi dynamickým spôsobom. Takéto nároky má napríklad ovládanie osvetlenia. Absencia smerovacieho algoritmu nie je jediná odlišnosť od ostatných mesh technológií. BLE mesh nevyužíva internetový protokol (IP) ale je postavené nad BLE, len využíva jeho advertising a scanning stavy. Aktuálne, hlavným zameraním BLE mesh štandardu je ovládanie osvetlenia a to z dôvodu že implementácia BLE mesh je v takomto systéme jednoduchá. Avšak BLE mesh nie je týmto použitím limitované a môže byť využité v mnohých iných prípadoch. Štandard definuje niekoľko modelov pre použitia ako napríklad konfigurácia zariadení alebo čítanie stavu senzorov [3].

Hlavnou črtou BLE mesh je že je definovaný aby fungoval s využitím BLE core špecifikácie. Protokolové dátové jednotky (PDU) pre BLE mesh sú prenášané medzi uzlami s využitím bez-spojových a bez-skenovacích advertising udalostí. Avšak štruktúra týchto paketov a časovanie vysielania musí byť adaptované pre využitie v mesh topológii. Napríklad advertising intervaly sú upravené a randomizované a pasívne skenovanie má nastavenú triedu najbližšie k 100 % ako je to možné z dôvodu aby nedošlo k prepásnutiu prichodzej správy. BLE zariadenia majú niekoľko nevhodných črt ktoré bránia k ideálnemu fungovaniu BLE mesh. Často BLE zariadenia majú takzvané slepé intervaly spojené s dekodovaním a prepínaním frekvencií čo zabraňuje kontinuálnemu skenovaniu a môže spôsobovať väčšiu stratu paketov než môže byť očakávané [3].

Zariadenia ktoré vystupujú v BLE mesh sieti, konkrétne zariadenia ktoré sú schopné prijímať a odosielať správy v BLE mesh sieti sa nazývajú uzly alebo provisioned zariadenia a zariadenia ktoré nie sú schopné prijímať a odosielať správy v BLE mesh sieti sú označované ako unprovisioned zariadenia. Provisioning proces je spôsob akým sa zo zariadenia ktoré ešte nie je schopné plne participovať v BLE mesh sieti stane uzol BLE mesh siete. Každý uzol disponuje minimálne jedným elementom. Element je adresovateľná položka uzla ktorá zastupuje nejakú funkciu, napríklad ovládanie osvetlenia, zisťovanie teploty, detekcia dymu a iné. Uzol môže pozostávať z rôznej kombinácie elementov a aj z viacerých elementov rovnakého typu, napríklad uzol môže slúžiť na nezávislé ovládanie samostatných častí osvetlenia. Výmena správ medzi elementami sa riadi publish/subscribe modelom kde vystupujú tri druhy adresy a to unicast adresy, skupinové adresy a virtuálne adresy. Keď uzol zverejní správu s cieľovou adresou typu unicast tak adresátom je konkrétny jeden element jediného uzlu a je automaticky spracovaná týmto elementom po jej prijatí. Keď uzol zverejní správu so skupinovú alebo virtuálnou cieľovou adresou, bude spracovaná len tými elementmi ktoré majú nastavený odber správ s touto adresou [3].

Uzly disponujú množinou voliteľných funkcií a podľa týchto funkcií môžu v sieti zastávať rôzne úlohy [3]:

- Uzol typu relay preposiela prijaté správy všetkým ostatným uzlom v jeho dosahu s využitím techniky managed flooding. Uzly tohoto typu umožňujú posielanie správ medzi uzlami vo veľkých sieťach ktoré by boli inak mimo vzájomného dosahu. Aby

uzly typu relay sieť nezahlcovali v správach je zahrnutý údaj o maximálnom počte preposlaní (TTL) ktorý je pri každom preposlaní dekrementovaný a správa s hodnotou TTL nula sa už ďalej nepreposiela. Z rovnakého dôvodu si tieto uzly vedú záznam o tom aké správy už preposlali aby zbytočne nepreposielali rovnakú správu viac krát.

- Low power uzol je schopný pracovať s výrazne zníženým odberom energie v porovnaní s ostatnými uzlami v BLE mesh sieti. Je toho dosiahnuté tým že na rozdiel od iných typov uzlov na prijatie správ nečaká neustále ale len v určitých intervaloch. Takto sú konfigurované hlavne zariadenia na ktoré je kladený nárok dlhej výdrže pri napájaní pomocou akumulátora. Zväčša sa jedná o uzly ktoré predominantne správy posielajú ale občas aj správy prijímajú. Takéto nároky majú väčšinou senzory rôzneho druhu.
- Uzol typu friend je nutnou súčasťou BLE mesh siete aby low power uzol mohol prijímať správy. Low power uzol pracuje v páre s friend uzlom a to takým spôsobom že friend uzol prijíma a uchováva správy adresované low power uzlu s ktorým je vo friendship vzťahu. Tieto uchované správy sú preposlané low power uzlu až po tom čo low power uzol pošle friend uzlu požiadavku na ich preposlanie.
- Proxy uzol umožňuje preposielanie správ medzi zariadeniami v BLE mesh sieti a Bluetooth zariadeniami ktoré nie sú súčasťou mesh siete alebo touto funkcionalitou nedisponujú.
- Uzol typu provisioner je uzol ktorý je schopný vykonávať provisioning proces teda je schopný pridávať nové uzly do BLE mesh siete. Provisioning proces začína keď uzol provisioner zachytí mesh beacon advertisement správu od nenakonfigurovaného zariadenia ktoré touto správou oznamuje že je k dispozícii byť nakonfigurované. Po zachytení tejto správy, uzol provisioner zašle tomuto zariadeniu požiadavku na poskytnutie informácií o podporovaných zabezpečovacích algoritmoch, počte podporovaných elementov, parametroch verejného kľúča a iné. Ako ďalšie nasleduje výmena verejných kľúčov a autentifikácia pomocou Bluetooth spojenia alebo inej technológie ako Near Field Communications (NFC) alebo Quick Response (QR) kódu. Po úspešnej autentifikácii uzol provisioner poskytne konfigurovanému uzlu sieťové a aplikačné kľúče, unicastové adresy, východziu hodnotu TTL a ostatné potrebné informácie o konfigurácii siete.

BLE mesh špecifikácia definuje celkovú funkcionalitu BLE mesh zariadení pomocou štandardizovaných stavebných blokov zvaných modely. Model definuje množinu stavov, stavových prechodov, stavové väzby, správy a iné s tým súvisiace charakteristiky. Element uzla musí podporovať jeden alebo viacero modelov a tieto modely definujú akú funkcionalitu tento element poskytuje. Existuje niekoľko štandardných modelov definovaných organizáciou Bluetooth SIG a mnohé z nich sú navrhnuté ako všeobecné modely poskytujúce využitie pre široké spektrum druhov zariadení. Mimo štandardne definovaných modelov majú vývojári možnosť definovať si vlastné takzvané vendor modely. Štandard však hovorí že vendor modely by mali byť použité len v prípade ak neexistuje spôsob akým využiť štandardne definované modely tak aby splnili požiadavky aplikácie. Modely sú rozdelené na klient modely, ktoré neobsahujú stavy alebo server modely ktoré stavy obsahujú. Stavy môžu reprezentovať určité vlastnosti zariadenia alebo informácie ktoré zariadenie zisťuje, napríklad aktuálna teplota alebo či je ovládané osvetlenie zapnuté a iné [13].



Modely navzájom komunikujú pomocou správ. Rôzne druhy správ sú definované v špecifikácii každého modelu aby bolo jasné aké správy môže model vysielat a aké správy môže prijímať a spracovávať [13].

Modely môžu mať špecifikované závislosti na iných modeloch. Model môže rozširovať iný model napríklad pridaním stavov k rozširovanému modelu. Model môže taktiež vyžadovať aby bol rozšírený iným modelom a nemožno ho použiť samotný. Modely ktoré nerozširujú žiadne iné modely sú označované ako koreňové. Špecifikácie modelov sú podobné triedam v objektovo orientovanej paradigme a implementácia modelu v kóde je podobná inštancii triedy alebo objektu. BLE mesh špecifikácia nedefinuje konkrétny spôsob implementácie modelov v kóde ale spôsob akým sú modely definované nabáda k použitiu objektovo orientovaného prístupu [13].

## Kapitola 3

# Metódy na určovanie polohy pomocou bezdrôtových technológií

### 3.1 Metóda s využitím RSSI

Received signal strength indicator (RSSI) je v štandarde 802.11 definovaný ako relatívna hodnota sily prijímaného signálu v bezdrôtovom prostredí udávaná v arbitrárnych jednotkách. RSSI určuje úroveň výkonu prijímaného signálu prijímacím zariadením až za anténou a ovplyvnenú možnými stratami vo vodičoch. Čím je hodnota RSSI vyššia tým je sila prijímaného signálu vyššia. Tým pádom ak je RSSI hodnota reprezentovaná zápornou formou (napríklad -80 dB), čím je táto hodnota bližšie k 0 dB tým je signál silnejší. Niektoré bezdrôtové technológie ako napríklad BLE majú v štandarde definované že hodnotu RSSI má používateľ k dispozícii. Nakoľko hodnota RSSI sa so zvyšujúcou vzdialenosťou medzi vysielateľom a prijímačom znižuje, predmetom viacerých výskumov bolo využitie tejto hodnoty na určenie vzdialenosti medzi zariadeniami. Väčšina výskumov modelovala vzťah RSSI a vzdialenosti pomocou exponenciálnych modelov. Kalibrácia modelu je vo všeobecnosti založená na znalosti dvoch kalibračných bodov ktoré sú použité na určenie propagačného koeficientu špecifických prostredí a taktiež na určenie RSSI offsetu. Problémom je však že signály ako BLE môžu byť veľmi nestabilné a ich sila je ovplyvnená množstvom viacerých externých faktorov. Tieto okolnosti obmedzujú celkovú úroveň presnosti odhadov vzdialenosti získaných z mobilných zariadení určených na všeobecné využitie. Z tohoto dôvodu je pre využitie RSSI na určovanie vzdialenosti fundamentálnym predpokladom dôkladná charakterizácia vzťahu RSSI a vzdialenosti za známých okolností [1].

Vzťah medzi RSSI a vzdialenosťou je vo všeobecnosti reprezentovaný exponenciálnym modelom ktorý je vyjadrený rovnicou 2.2. Vyjadrením vzdialenosti z tejto rovnice získame:

$$d = 10^{\frac{-RSSI+a}{10 \cdot n}} \quad (3.1)$$

Mimo tohto exponenciálneho modelu so základom 10 existujú iné regresné modely. Napríklad rovnica pre exponenciálny model so základom  $e$  je:

$$d = a \cdot e^{b \cdot RSSI} \quad (3.2)$$

Rovnica pre mocninový model je:

$$d = a \cdot RSSI^b + c \quad (3.3)$$

Rovnica pre polynomiálny model je:

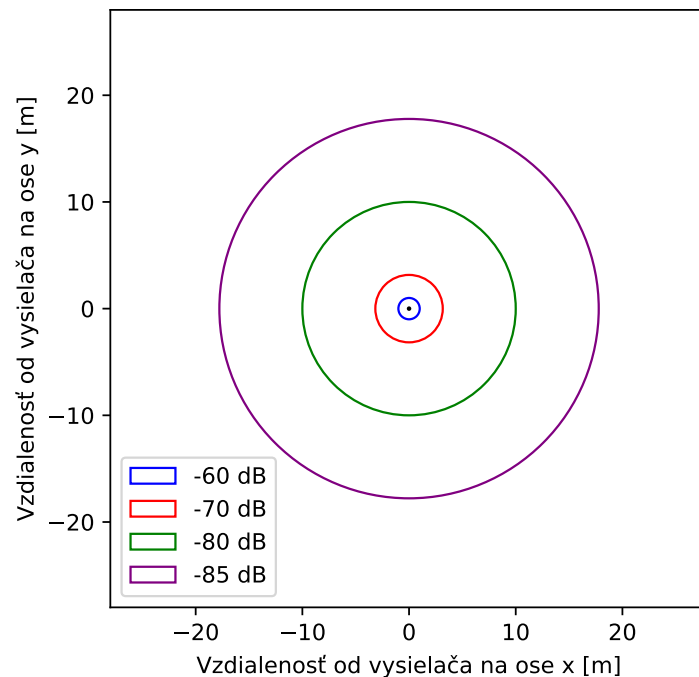
$$d = a \cdot RSSI^2 + b \cdot RSSI + c \quad (3.4)$$

Určenie parametrov týchto modelov vyžaduje znalosť niekoľkých experimentálnych hodnôt. Počet týchto hodnôt musí byť rovný alebo vyšší než počet parametrov modelu. Pre spomenuté modely vzťahu RSSI a vzdialenosti sú kalibračné modely najjednoduchšie pre exponenciálne modely so základom 10 alebo  $e$  ktoré obsahujú len dva parametre. Hodnoty týchto parametrov sú získavané z nameraných hodnôt RSSI pre rôzne vzdialenosti. Pre hodnoty RSSI namerané pri vzdialenostiach 1 m a 3 m je výpočet parametrov nasledovný:

$$n = -\frac{RSSI_{3m} - RSSI_{1m}}{10 \cdot \log_{10}(3 - 1)} \quad (3.5)$$

$$a = RSSI_{1m} \quad (3.6)$$

Tieto rovnice boli odvodené pre exponenciálny model so základom 10 ale ekvivalentné riešenia môžu byť jednoducho odvodené aj pre exponenciálny model so základom  $e$ . Ak sú k dispozícii viaceré experimentálne hodnoty, táto redundancia môže byť využitá na spresnenie kalibračnej procedúry [1].



Obr. 3.1: Vzťah úrovně RSSI na polohe relatívnej k vysieláču pri použitých parametroch  $a = -60$  dB a  $n = 2$ .

## 3.2 Metódy založené na čase

Metódy určovania vzdialenosti založené na čase sa spoliehajú na presné časové razítka prichádzajúcich a odchádzajúcich správ. Tieto časové razítka môžu byť získané rôznymi

spôsobmi. Napríklad metódou chirp spread spectrum kde je signál vysielateľom modulovaný a vysielaný a na strane prijímača je signál porovnávaný s referenčným signálom a vďaka tomu je možné určiť časové razítka prijatia. Alternatívna metóda porovnáva preambulovú sekvenciu prijatých správ s lokálnou referenciou. Pomocou algoritmu na detekciu nábežnej hrany signálu je možné zachytiť presný čas prijatia správy. Práve táto druhá spomenutá metóda je využívaná technológiou UWB a metóda chirp spread spectrum už nie je od štandardu IEEE 802.15.4a z roku 2007 organizáciou IEEE zvažovaná na použitie pre presné určovanie vzdialenosti [6].

Pre určovanie presných časových razítok je veľmi dôležitá presná časová báza. Rádiové vlny sa šíria priestorom rýchlosťou blízkej rýchlosti svetla ktorá je približne 300 000 km/s. Nároky na presnosť odhadovanej vzdialenosti pre systémy určovania polohy vo vnútorných priestoroch sú v ráde desiatok centimetrov a rádiové vlny urazia takéto vzdialenosti v zlomkoch nanosekúnd. Takéto presné časové bázy sú však získané pomocou kryštálov ktoré nedisponujú ideálnymi vlastnosťami. Nepresnosti hodín sú hlavným zdrojom chýb v metódach založených na čase. Typická hodnota nepresnosti hodín je okolo 10 parts per million (ppm). Čím je čas merania dlhší tak sa tým zvyšuje odchýlka merania [6].

Metódy určovania vzdialenosti alebo polohy založené na čase môžeme rozdeliť do dvoch skupín a to two-way ranging a one-way ranging. V metódach typu two-way ranging jednotlivé zariadenia vystupujú ako vysielateľ ale aj ako prijímač. V metódach tohto typu spravidla nie je nutná synchronizácia hodín medzi jednotlivými zariadeniami. Metódy tohto typu sa ďalej rozdeľujú podľa počtu a sekvencie správ ktoré si medzi sebou dvojice zariadení vymenia. Alternatívnou skupinou metód je one-way ranging, tieto metódy vo všeobecnosti vyžadujú presnú synchronizáciu hodín aspoň medzi určitými zariadeniami. Komunikácia pri týchto metódach prebieha len jedným smerom a jednotlivé zariadenia majú určitú rolu a podľa toho vystupujú len ako vysielateľ alebo len ako prijímač [6].

## Two-way ranging

Základný two-way ranging (TWR) je najjednoduchšia metóda určovania vzdialenosti založená na čase. Časový priebeh správ prenášaných touto metódou možno vidieť na obrázku 3.2.

Zariadenie typu initiator pošle správu zariadeniu typu responder. Časové razítka  $t_1$  označuje čas kedy zariadenie initiator začalo správu vysielateľ a razítka  $t_2$  označuje kedy zariadenie responder začalo správu prijímať. Keby zariadenia initiator a responder mali synchronizované hodiny, výpočtom  $t_2 - t_1$  by sme mohli zistiť dobu šírenia signálu od zariadenia initiator k zariadeniu responder a z tejto hodnoty by sme mohli jednoducho vypočítať vzdialenosť týchto zariadení. Avšak výsadou metód typu two-way ranging je že nevyžadujú synchronizáciu hodín zariadení. Z tohto dôvodu je ešte nutné aby zariadenie typu responder odoslalo odpovedajúcu správu. Aby zariadenie initiator mohlo vykonať výpočet vzdialenosti, zariadenie responder musí zahrnúť časové razítka  $t_2$  a  $t_3$  v odpovedajúcej správe. Zo všetkých získaných časových razítok vieme vypočítať hodnotu obojsmerného oneskorenia (RTT) ako

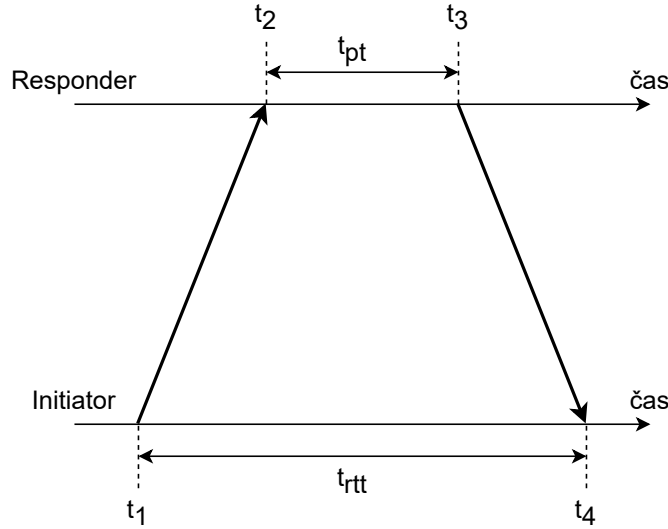
$$t_{rtt} = t_4 - t_1 \quad (3.7)$$

a dobu po ktorú trvalo zariadeniu responder spracovanie prvej správy a príprava odoslania druhej ako

$$t_{pt} = t_3 - t_2 \quad (3.8)$$

Z týchto dvoch hodnôt vieme jednoducho vypočítať dobu letu (ToF) signálu ako:

$$t_{tof} = t_{rtt} - t_{pt} \quad (3.9)$$



Obr. 3.2: Časový priebeh správ u metódy TWR.

Vynásobením tejto hodnoty rýchlosťou šírenia signálu v priestore získame vzdialenosť použitých zariadení [6].

Z dôvodu že hodiny použitých zariadení sa prejavujú javom clock drift dochádza pri meraní k nepresnostiam ktoré môžeme vyjadriť v jednotkách ppm ako

$$chyba = t_{tof} \cdot e_A + \frac{t_{pt}}{2}(e_A - e_B) \quad (3.10)$$

kde  $e_A$  je hodnota clock drift pre zariadenie iniciator udávaná v ppm a  $e_B$  je hodnota clock drift pre zariadenie responder v rovnakých jednotkách. Vzhľadom na to že hodnota  $t_{pt}$  (bežne v jednotkách stoviek mikrosekúnd) je neporovnateľne väčšia než hodnota  $t_{tof}$  (v jednotkách nanosekúnd), hodnota  $t_{pt}$  má najväčší vplyv na nepresnosť merania. Za účelom zníženia odchýlky merania je nutné znížiť čas nutný na spracovanie prijatej správy a prípravu novej správy na odoslanie na čo najnižšiu hodnotu [6].

### Symmetrical double-sided two-way ranging

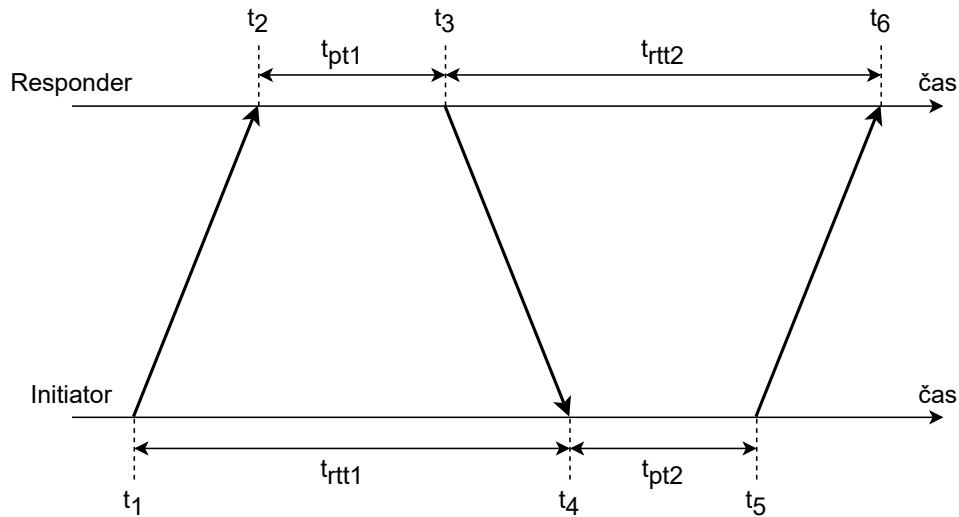
Symmetrical double-sided two-way ranging (SDS-TWR) znižuje vplyv javu clock drift na nepresnosti merania rozšírením základného TWR o tretiu správu [6].

Táto metóda je efektívne zložená z dvoch meraní pomocou obyčajného TWR, najskôr smerom od zariadenia iniciator k zariadeniu responder a potom opačne. Druhá správa prvého merania je zdieľaná s prvou správou druhého merania čím je celkový počet nutných správ 3 a nie 4. Vďaka symetrii ktorú je nutné zabezpečiť rovnakou dĺžkou intervalov  $t_{pt1}$  a  $t_{pt2}$  sa eliminuje odchýlka merania spôsobená asymetriou u základnej verzii TWR. Výpočet doby šírenia signálu pomocou tejto metódy je nasledovný:

$$t_{tof} = \frac{t_{rtt1} - t_{pt1} + t_{rtt2} - t_{pt2}}{4} \quad (3.11)$$

Nevýhodou SDS-TWR je väčší počet správ čo znižuje maximálnu frekvenciu meraní a zvyšuje dobu behu. Vplyv javu clock drift je výrazne znížený a môžeme ho vyjadriť ako

$$chyba = \frac{t_{tof}}{2}(e_A + e_B) + \frac{t_{pt1} - t_{pt2}}{4}(e_A - e_B) \quad (3.12)$$



Obr. 3.3: Časový priebeh správ u metódy SDS-TWR

a za predpokladu že hodnoty  $t_{pt1}$  a  $t_{pt2}$  majú presne rovnaké hodnoty, rovnicu 3.12 môžeme ďalej zjednodušiť na:

$$chyba = \frac{t_{tof}}{2}(e_A + e_B) \quad (3.13)$$

### Asymmetrical double-sided two-way ranging

Metóda asymmetrical double-sided two-way ranging (ADS-TWR) je modifikáciou metódy SDS-TWR kde sú intervaly  $t_{pt1}$  a  $t_{pt2}$  rôznej dĺžky. Toto dovoľuje flexibilnejšiu implementáciu pre individuálne zariadenia vystupujúce v meraní a umožňuje efektívnejšiu implementáciu keď skupina  $N$  zariadení chce zistiť  $N \cdot (N - 1)/2$  vzdialeností medzi jednotlivými zariadeniami. Pri takomto použití, namiesto samostatných meraní môžu byť správy kombinované. Napríklad odpoveď od zariadenia B zariadeniu A môže slúžiť ako iniciačná správa pre iné zariadenia. Týmto spôsobom môže byť teoreticky znížený počet správ až na úroveň  $2 \cdot N$  [9].

Použitím rovnice na výpočet doby šírenia signálu

$$t_{tof} = \frac{t_{rtt1} \cdot t_{rtt2} - t_{pt1} \cdot t_{pt2}}{t_{rtt1} + t_{rtt2} + t_{pt1} + t_{pt2}} \quad (3.14)$$

sa zabezpečí eliminácia vplyvu asymetrie na výsledok merania. Postup akým spôsobom bol tento vzorec odvodený je podrobne vysvetlené v [9]. Úroveň odchýlky merania za predpokladu využitia rovnice 3.14 na výpočet  $t_{tof}$  môžeme vyjadriť pomocou rovnice 3.13. Ak uvažujeme hodnotu pre clock drift 20 ppm tak aj pri meraniach na vzdialenosť 100 m je úroveň odchýlky spôsobená javom clock drift zanedbateľná, nakoľko doba šírenia signálu na túto vzdialenosť je približne 333 ns z čoho môžeme odvodiť hodnotu chyby merania 6.7 pikosekúnd [9].

### Time of arrival

Time of Arrival (ToA) je najjednoduchšia a najrozšírenejšia metóda na určovanie polohy. Najznámejším využitím tejto metódy je systém GPS. Táto metóda je založená na tom že

poznáme presný čas kedy bol signál vyslaný zo zariadenia ktorého polohu chceme určiť a taktiež poznáme presné časové razítka kedy signál dorazil k referenčným zariadeniam ktorých polohu poznáme. Z týchto časových údajov vieme vypočítať vzdialenosť medzi hľadaným zariadením a referenčným zariadením  $i$  ako

$$d_i = (t_{rx_i} - t_{tx}) \cdot c \quad (3.15)$$

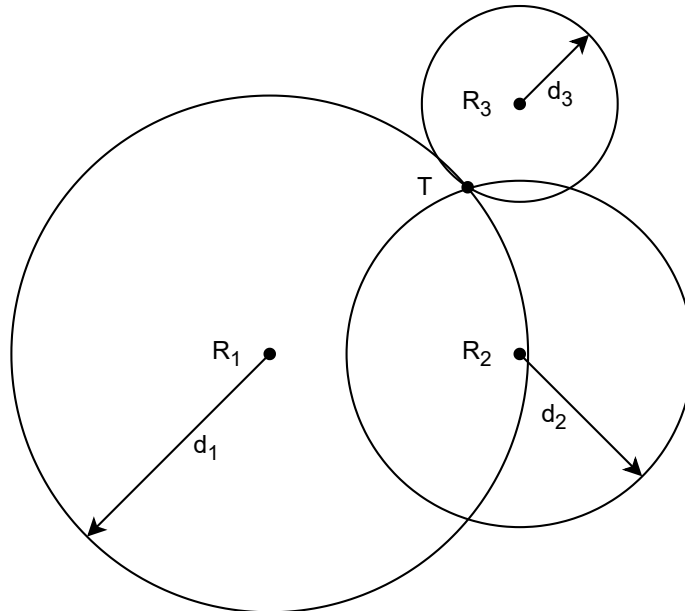
kde  $t_{rx_i}$  je čas prijatia správy referenčným zariadením  $i$ ,  $t_{tx}$  je čas odoslania správy hľadaným zariadením a  $c$  je rýchlosť šírenia signálu prostredím blízka rýchlosti svetla. ToA metóda môže byť implementovaná aj v opačnom prevedení kde sú vysielacími zariadeniami referenčné zariadenia a zariadenie ktorého polohu určujeme signál prijíma. Zo vzdialenosti hľadaného zariadenia od referenčného zariadenia vieme určiť množinu bodov kde sa hľadané zariadenie môže nachádzať. V dvojrozmernom priestore sa jedná o kruh vyjadrený rovnicou

$$d_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \quad (3.16)$$

a v trojrozmernom priestore sa jedná o sférickú plochu s rovnicou

$$d_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} \quad (3.17)$$

kde  $x_i, y_i$  a  $z_i$  sú súradnice referenčného zariadenia  $i$  a  $x, y$  a  $z$  sú súradnice hľadaného zariadenia. Keď disponujeme dátami z dostatočného počtu referenčných zariadení, aspoň tri pre určenie pozície v dvoch dimenziách a aspoň štyri pre určenie pozície v troch dimenziách, tak výpočtom sústavy rovníc 3.16 alebo 3.17 je možné vypočítať priesečník zmienených kružníc alebo sférických plôch. Tento priesečník je polohou hľadaného zariadenia. Nevýhodou tejto metódy je že všetky vystupujúce zariadenia musia mať navzájom veľmi presne synchronizované hodiny. Týmto stúpajú nároky na réžiu a na zložitost všetkých zariadení čo sa môže odzrkadliť v ich vyššej finančnej náročnosti [5].



Obr. 3.4: Určenie polohy zariadenia T pomocou metódy ToA s využitím troch referenčných zariadení  $R_1, R_2$  a  $R_3$

## Time difference of arrival

Metóda Time Difference of Arrival (TDoA) je podobná metóde ToA ale na rozdiel od nej je veľmi presná synchronizácia hodín nutná len medzi referenčnými zariadeniami. Vďaka tomuto faktoru môže byť zariadenie ktorého polohu chceme určovať veľmi jednoduché, finančne nenáročné a jeho spotreba energie môže byť veľmi nízka. Nevýhodou oproti metóde ToA je že výpočet pozície zo získaných dát je značne zložitejší [5].

Princípom tejto metódy je že referenčné zariadenia ktorých poloha je známa zaznamenajú časové razítka prijatia správy typu broadcast od zariadenia ktorého poloha je zisťovaná. Z týchto časových razítok je možné získať hodnotu rozdielu vzdialenosti medzi hľadaným zariadením a referenčným zariadením  $i$  a vzdialenosti medzi hľadaným zariadením a referenčným zariadením  $j$  ako

$$d_{\Delta ij} = (t_i - t_j) \cdot c \quad (3.18)$$

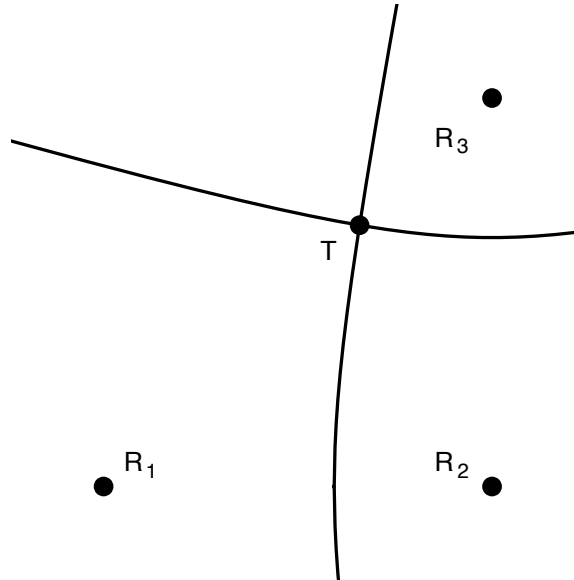
kde  $c$  je rýchlosť šírenia signálu v priestore a  $t_i$  a  $t_j$  sú časové razítka získané z respektívnych referenčných zariadení. Z týchto rozdielov vzdialeností je možné zostrojiť množinu možných súradníc na ktorých sa hľadané zariadenie nachádza. V dvojrozmernom priestore sa jedná o hyperbolu vyjadrenú rovnicou

$$d_{\Delta ij} = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} - \sqrt{(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2} \quad (3.19)$$

a v trojrozmernom priestore sa jedná o hyperboloid s rovnicou:

$$d_{\Delta ij} = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} - \sqrt{(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2 + (z - z_j)^2} \quad (3.20)$$

Pri dostatočnom počte referenčných zariadení, pre výpočet v dvojrozmernom priestore aspoň tri a v trojrozmernom aspoň štyri, je poloha hľadaného zariadenia riešením sústavy rovníc 3.19 alebo 3.20 [5].



Obr. 3.5: Určenie polohy zariadenia T pomocou metódy TDoA s využitím troch referenčných zariadení R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub> a R<sub>3</sub>



## Kapitola 4

# Návrh a implementácia

Zadaním tejto bakalárskej práce je navrhnuť a implementovať lokalizačný systém s využitím technológie UWB a na porovnanie s alternatívnymi technológiami, implementovať lokalizačný systém s využitím BLE. Aktuálne trendy vo využití technológie UWB ukazujú že vo sfére osobných zariadení nachádza UWB uplatnenie hlavne na účely lokalizácie predmetov pomocou mobilného zariadenia vybaveného UWB hardwarom. Lokalizovanými predmetmi môžu byť osobné veci netechnického charakteru a to s využitím samostatného externého zariadenia typu tag alebo iné osobné zariadenia popripade elektronické príslušenstvo ktoré na tieto účely disponuje nutnou hardwarovou a softwarovou výbavou. V industriálnej sfére nachádza UWB uplatnenie hlavne v RTLS systémoch kde vystupujú viaceré základové stanice nazývané kotvy ktoré majú známu statickú polohu a s využitím dát z týchto staníc je možné určovať polohu sledovaných zariadení nazývaných tagy. Modelovou situáciou pre využitie systému RTLS je napríklad sledovanie polohy tovaru v sklade.

Vzhľadom na tieto aktuálne trendy som za jednu z metód pre implementáciu lokalizačného systému s využitím UWB zvolil two-way ranging, ktorý sa svojimi vlastnosťami hodí na účely lokalizácie osobných zariadení alebo iných premetov pomocou mobilného zariadenia. Na demonštráciu možností UWB v RTLS systémoch som sa rozhodol implementovať RTLS systém s využitím metódy TDoA ktorá sa pre toto využitie javí ako najvýhodnejšia, nakoľko oproti metóde ToA má nižšie nároky na synchronizáciu času medzi zariadeniami a oproti metóde TWR má TDoA vyššiu kapacitu nakoľko vyžaduje vysielanie drasticky nižšieho počtu správ.

K implementácii lokalizačného systému s využitím BLE sú k dispozícii tri možné metódy. Jednou z nich je metóda využívajúca údaj RSSI. Ostatné dve metódy boli zahrnuté v Bluetooth verzii 5.1 pod názvom Bluetooth Direction Finding. Konkrétne sa jedná o metódu angle of arrival a metódu angle of departure. Nakoľko sa v čase písania tejto správy jedná o relatívne nedávny prírastok do Bluetooth štandardu tak dostupnosť špeciálnych antén ktoré Bluetooth Direction Finding vyžaduje je problematická a ich cena je z pohľadu tejto bakalárskej práce, ktorá sa hlavne zameriava na technológiu UWB, astronomická. Z týchto dôvodov som zvolil pre implementáciu BLE lokátoru len metódu využívajúcu hodnotu RSSI.

### 4.1 Zvolený hardware

Vzhľadom na dostupnosť vývojových dosiek a vývojových modulov pre technológiu UWB ako aj pre technológiu BLE som na účely tejto bakalárskej práce zvolil implementáciu na komerčne dostupnom vývojovom hardwari na rozdiel od vlastného návrhu elektrických ob-

vodov. Využitím už overeného hardwaru je možné eliminovať všetky možné negatívne vplyvy ktoré by mohli vzniknúť počas návrhu alebo zostavovania vlastného obvodového riešenia. Použitím už existujúceho a komerčne dostupného vývojového hardwaru je možné venovať väčší dôraz na softwarovú realizáciu a prípadný záujemca o využitie riešenia popisovaného v tejto bakalárske práci si môže rovnaký hardware jednoducho zadovážiť a softwarovú výbavu vyvinutú v rámci tejto práce na toto zariadenie nahráť.

Z UWB a BLE lokalizačných metód ktoré boli zvolené na implementáciu vznikli nároky na výbavu hardwaru na ktorom budú tieto metódy prevádzkované. Na implementáciu metód TWR a TDoA pomocou UWB postačuje UWB modul ktorý je vybavený iba jednou anténou. Moduly podporujúce metódu AoA sú vybavené viacerými anténami a to dvoma keď podporujú 2D AoA a tromi pri podpore 3D AoA. Keďže táto bakalárska práca opisuje len implementáciu metód TWR a TDoA je výhodnejšie využiť jednoduchší modul bez podpory AoA. Na komunikáciu medzi jednotlivými bazovými stanicami TDoA metódy je vhodné použiť bezdrôtovú technológiu podporujúcu mesh topológiu. Použitím technológie podporujúcej mesh topológiu sa uľahčí implementácia vzájomnej komunikácie medzi viacerými zariadeniami nakoľko správa tejto komunikácie prechádza zo zodpovednosti vývojára do takmer výhradnej správy zvolenej bezdrôtovej technológie. Z tohoto dôvodu bola jednou z požiadaviek na zvolený vývojový hardware podpora mesh topológie aspoň pomocou jednej z bezdrôtových technológií. Bezdrôtové technológie ktoré podporujú mesh topológiu sú napríklad ZigBee, BLE mesh, Thread a iné. Na implementáciu metódy využívajúcu hodnotu RSSI pomocou BLE poslúži efektívne akýkoľvek BLE vývojový hardware pretože prístup k tejto hodnote je definovaná v samotnom štandarde BLE.

Výrobca	Názov	UWB chipset	MCU	mesh podpora	AoA podpora
Mobile Knowledge	MK UWB Kit Mobile edition	NXP SR150 + NXP SR040	NXP QN9090	nie	3D
Mobile Knowledge	MK UWB Kit SR150/SR040	NXP SR150 + NXP SR040	NXP QN9090	nie	3D
Mobile Knowledge	MK UWB Kit RTLS	NXP SR150 + NXP SR040	NXP QN9090	?	?
Murata	Type2BP EVK	NXP SR150	NXP QN9090	nie	3D
Qorvo	DWS1000	Qorvo DWM1000	vyžaduje externé	-	nie
Qorvo	DWM3000EVB	Qorvo DWM3000	vyžaduje externé	-	nie

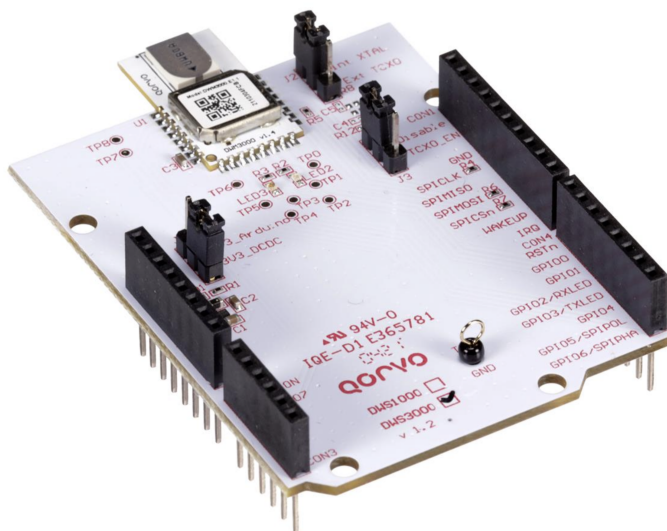
Tabuľka 4.1: Prehľad UWB vývojových sád a modulov dostupných v čase písania tejto bakalárskej práce.

V tabuľke 4.1 možno vidieť všetky UWB vývojové sady a moduly ktoré by bolo možné zabezpečiť v časovom horizonte určenom pre túto bakalársku prácu. Je nutné však zmieniť že vývojové sady od spoločnosti Mobile Knowledge sú skôr učené na vývoj samotných aplikácií a systémov ktoré UWB využívajú a implementácia UWB funkcionality je dodávaná spoločne s hardwarom. Druhou nevýhodou vývojových sád od Mobile Knowledge je ich vysoká finančná náročnosť kde najzákladnejšia sada začína na cene 650 € bez DPH a RTLS sada sa pohybuje na cene 2600 € bez DPH. Atraktívnejšie sa javí vývojová doska od spoločnosti Murata, tá však nedisponuje podporou pre bezdrôtovú technológiu s mesh

topológiou. Na účely tejto bakalárskej práce sa najvhodnejšie javia vývojové moduly od spoločnosti Qorvo a to nie len ich cenovou dostupnosťou. Tieto moduly nie sú schopné fungovať samostatne a vyžadujú pripojenie k externému mikrokontroléru. Na účely pripojenia tohto modulu k mikrokontroléru sú tieto moduly vybavené Arduino Uno konektorom. Konektorom Arduino Uno je vybavené široké spektrum vývojových dosiek s rôznym typom mikrokontrolérov, čo používateľovi dáva veľkú flexibilitu pri výbere mikrokontroléru vhodného práve na jeho zvolené využitie. Rozdiel medzi modulom DWS1000 a DWM3000EVB je že DWS1000 je starší modul navrhnutý podľa štandardu IEEE 802.15.4 a DWM3000EVB je novší modul navrhnutý podľa revízie štandardu IEEE 802.15.4z. Vzhľadom na všetky spomenuté detaily bol na implementáciu tejto bakalárskej práce zvolený modul DWM3000EVB.

Požiadavky na vývojový hardware ktorý bude slúžiť ako mikrokontrolér pre modul DWM3000EVB a požiadavky na zariadenie na ktorom bude implementovaná BLE metóda využívajúca hodnotu RSSI možno splniť výberom spoločného hardwaru pre obe využitia. Vývojový hardware ktorý spolu s modulom DWM3000EVB spĺňa požiadavky na implementáciu UWB metódy TDoA v drvivej väčšine prípadov má podporu aj pre BLE. BLE metódu s využitím hodnoty RSSI by mohlo byť možné implementovať aj na jednoduchšom zariadení ale použitím spoločného zariadenia sa zníži finančná náročnosť a čas nutný na zoznámenie sa s vývojom na dvoch rôznych zariadeniach. Vo finále bola za zariadenie na implementáciu metódy pomocou BLE a taktiež ako mikrokontrolér pre modul DWM3000EVB zvolené vývojová doska nRF5340 DK od spoločnosti Nordic Semiconductors. Rozhodujúcou bola cena, dostupnosť, nízka spotreba, široká podpora rôznych bezdrôtových technológií a aktívna komunita vyvíjajúca na tomto hardware.

## DWM3000EVB



Obr. 4.1: Vývojový modul Qorvo DWM3000EVB.

Modul DWM3000EVB je modul vyhotovený v Arduino kompatibilnom tvare vybavený UWB modulom Qorvo DWM3000. DWM3000 je plne integrovaný UWB transceiver modul založený na integrovanom obvode DW3110. Integruje anténu, všetky rádiové frekvenčné

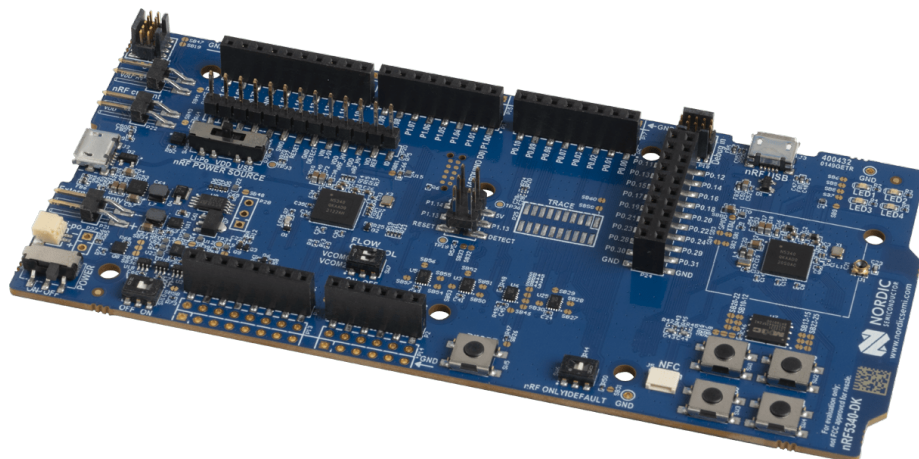
obvody, power management a hodinové obvody v jednom module čím zjednodušuje hardwarovú implementáciu. Môže byť využívaný napríklad na metódy TWR alebo TDoA. Výrobcom udávaná presnosť merania je +/- 10 cm. Kľúčové vlastnosti modulu DWM3000:

- vyhovuje štandardu IEEE 802.15.4 a IEEE 802.15.4z
- podporuje UWB kanály 5 (6.5 GHz) a 9 (8 GHz)
- programovateľný výkon vysielača
- prenosové rýchlosti 850 kb/s alebo 6,5 Mb/s
- maximálna dĺžka paketu 1023 bajtov
- SPI rozhranie na komunikáciu s mikrokontrolérom

Stav	Prúd
DEEP SLEEP	260 nA
SLEEP	850 nA
CH5 INIT	6 mA
CH9 INIT	6 mA
CH5 IDLE	12 mA
CH9 IDLE	20 mA
CH5 TX	40 mA
CH9 TX	45 mA
CH5 RX	50 mA
CH9 RX	55 mA

Tabuľka 4.2: Odber prúdu modulu DWM3000 pri rôznych stavoch s napájacím napätím s hodnotou 3,3 V.

## nRF5340 DK



Obr. 4.2: Vývojová doska Nordic Semiconductor nRF5340 DK.

nRF5340 DK je hardwarová vývojárska platforma určená na návrh a vývoj aplikácií využívajúcich nRF5340 SoC. nRF5340 je dvojjadrový Bluetooth 5.3 SoC s podporou pre viaceré bezdrôtové technológie ktorými sú BLE, Bluetooth mesh, NFC, Thread a Zigbee. Hlavnou črtou tohto SoC je že s cieľom znížiť spotrebu energie je vybavený dvoma jadrami. Jedným z nich je sieťové jadro optimalizované na nízku spotrebu pracujúce na frekvencii 64 MHz. Hlavnou úlohou tohto jadra obsluha protokolového zásobníku bezdrôtových technológií. Druhým jadrom je aplikačné jadro orientované na výpočetný výkon. Toto jadro pracuje na frekvencii 64 alebo 128 MHz. Dôležitou vlastnosťou tejto vývojovej dosky je že je vybavená Arduino Uno konektorom čo umožňuje jednoduché spojenie s vývojovým modulom DWM3000EVB. Kľúčové vlastnosti nRF5340 SoC:

- aplikačné jadro
  - 64/128 MHz Arm Cortex-M33 s FPU a DSP inštrukciami
  - 1 MB Flash + 512 kB RAM
  - 8 KB obojsmerná asociatívna cache
- sieťové jadro
  - 64 MHz Arm Cortex-M33 s 2 KB cache pre inštrukcie
  - 256 KB Flash + 64 KB RAM
- Full-speed USB
- 96 MHz šifrovaná QSPI
- 32 MHz vysoko rýchlostná SPI

## 4.2 Všeobecné detaily implementácie

Implementáciu som sa rozhodol riešiť s využitím operačného systému reálneho času (RTOS) na rozdiel od takzvaného bare metal programovania. Na toto rozhodnutie mal hlavný dopad fakt že implementácia metódy TDoA bude vyžadovať obsluhu dvoch rôznych bezdrôtových technológií zároveň a využitie RTOS správu úloh s tým spojených značne uľahčí. Ostatné výhody RTOS sú abstrakcia hardwaru, jednoduchšie ladenie a iné. Jediná značná nevýhoda použitia RTOS je že dodatočná réžia s ním spojená môže zaberať až 5 % zdrojov procesora [11]. Zo širokej škály dostupných operačných systémov reálneho času som pre implementáciu zvolil Zephyr RTOS. Jedná sa o open source RTOS vydaný pod licenciou Apache 2.0 zameraný hlavne na mikrokontroléry. Zephyr pozostáva z kernelu, knižníc, ovládačov, súborového systému a iných súčastí nutných na vývoj kompletného aplikačného softwaru. Jedným z dôvodov prečo som zvolil práve Zephyr RTOS je že disponuje protokolovým zásobníkom pre rôzne bezdrôtové technológie, napríklad BLE, Thread, ZigBee a iné. Zephyr RTOS využíva hierarchickú štruktúru devicetree ktorá slúži na špecifikáciu hardwarových vlastností zariadenia.

Všetka funkcionálna spojená s UWB ako jeho inicializácia a UWB funkcionálna nutná pre implementáciu metód TWR a TDoA bola implementovaná v zdrojovom súbore *UWB.c* a v s ním spojenom hlavičkovom súbore *UWB.h*. UWB komunikácie tejto implementácie využíva kanál 5 a prenosovú rýchlosť 6.8 Mb/s. Čo sa týka implementácie funkcionality Bluetooth mesh v kontexte metódy TDoA, tak táto funkcionálna bola implementovaná

v zdrojovom súbore *BluetoothMesh.c* a v s ním spojenom hlavičkovom súbore *BluetoothMesh.h*. Funkcionalitu nutnú pre implementáciu BLE metódy s využitím RSSI nebolo nutné implementovať nakoľko je možné využiť funkcionalitu ktorú poskytuje Zephyr RTOS.

### 4.3 Obsluha DWM3000EVB pomocou nRF5340 DK

Spoločnosť Qorvo k integrovaným obvodom rady DW3xxx dodáva ovládač ktorý implementuje množinu funkcií nízkej úrovne. Tento ovládač umožňuje vykonávať hlavné funkcie transceiveru bez potreby sa zaoberať detailmi ako pristupovať k zariadeniu priamo cez registre jeho SPI rozhrania. Tento ovládač je dodávaný formou statickej knižnice skompilovanej pre architektúry Arm Cortex-M33 a Arm Cortex-M4. Prístup k tejto knižnici je zabezpečený pomocou API definovaného v hlavičkovom súbore jazyka C *deca\_device\_api.h* dodávaného spolu s preloženou knižnicou. Tento ovládač je koncipovaný ako nezávislý na použitom type mikrokontroléru. Z tohto dôvodu súčasťou ovládača nie je konfigurácia SPI rozhrania, konfigurácia GPIO portov a konfigurácia obsluhy prerušení na strane mikrokontroléru, nakoľko implementácia tejto funkcionality je závislá na konkrétnom použitom zariadení. Na zabezpečenie tejto funkcionality spojenej s konfiguráciou SPI, GPIO a prerušení som využil existujúce riešenie ktoré túto funkcionality implementuje v prostredí Zephyr RTOS, vyvinuté používateľom br101 a je verejne dostupné v repozitári *zephyr-dw3000-decadriver* na platforme GitHub. Jedná sa o Zephyr modul ktorý môže byť pridaný do vyvíjaného programu pomocou konfigurácie v súbore *CMakeLists.txt*. V tomto module som vykonal drobné úpravy a opravy spojené s konfiguráciou rýchlosti rozhrania SPI a prebúdzania modulu DWM3000 cez pin WAKEUP. Tento prevzatý Zephyr modul som taktiež rozšíril o metódy umožňujúce dočasné vypnutie GPIO pinov a SPI rozhrania s cieľom znížiť spotrebu počas spánku zariadenia. Mapovanie jednotlivých pinov vývojovej dosky nRF5340 DK na piny modulu DWM3000EVB je riešené pomocou súboru typu overlay. Overlay súbory modifikujú alebo rozširujú devicetree štruktúru zariadenia.

### 4.4 Kalibrácia oneskorenia UWB antény

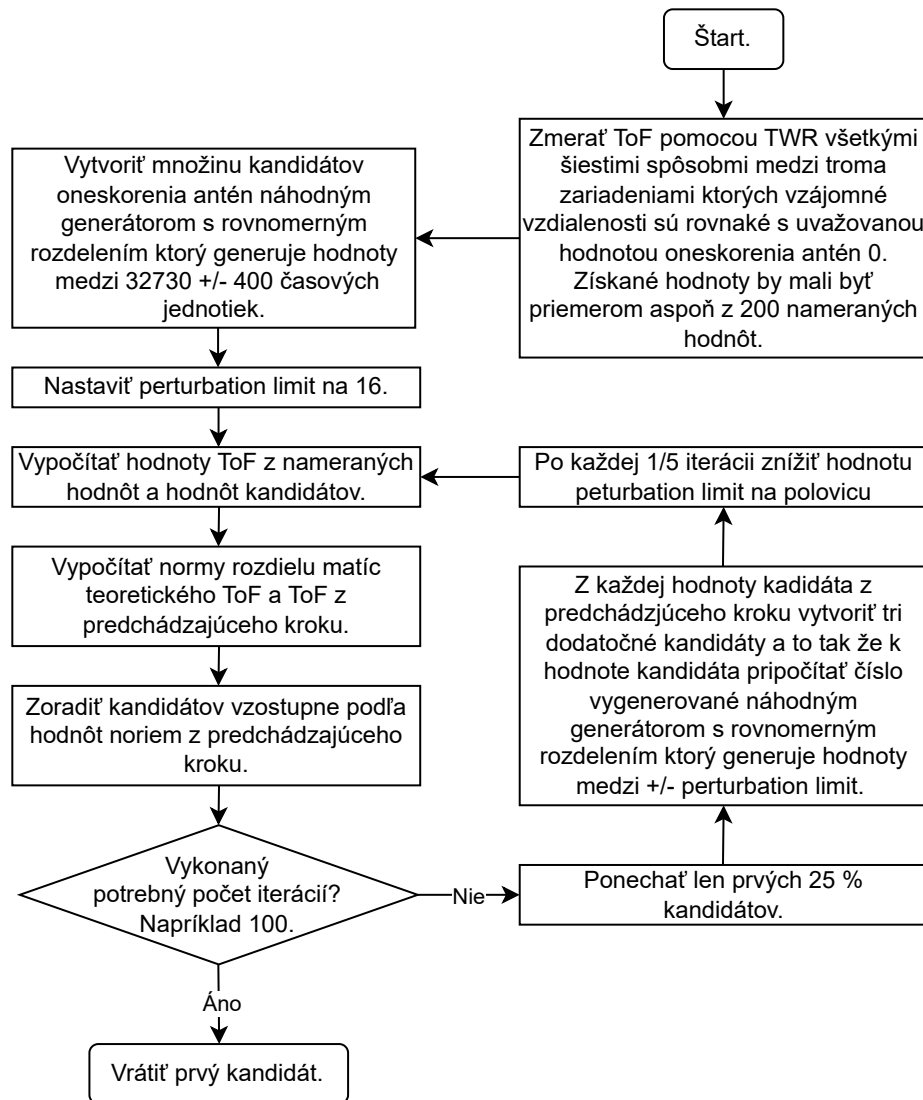
Časové razítka vysielania a prijímania signálu, ktoré modul DWM3000 zaznamenáva, udávajú čas kedy signál prešiel digitálnym vysielacím alebo prijímacím obvodom a nie skutočný čas kedy signál začal byť fyzicky vysielaný alebo prijímaný anténou. Časové rozdiely medzi týmito udalosťami spôsobené internou propagáciou a propagáciou cez súčiastky medzi samotným čipom a anténou sú nazývané vysielacie respektíve prijímacie oneskorenie antény. Hodnoty týchto oneskorení sú závislé od konkrétneho zariadenia a aj u zariadení rovnakého typu sa líšia zariadenie od zariadenia. Pre zistenie skutočnej hodnoty ToF musia byť tieto oneskorenia známe. Pri meraní ToF medzi vysielateľom a prijímačom ktorých hodiny sú synchronizované je hodnota ToF vyjadrená ako

$$t_{tof} = t_{trx} - t_{ttx} - t_{adtx} - t_{adrx} \quad (4.1)$$

kde  $t_{ttx}$  je vysielacie časové razítko,  $t_{trx}$  je prijímacie časové razítko,  $t_{adtx}$  je vysielacie oneskorenie antény a  $t_{adrx}$  je prijímacie oneskorenie antény.

Podľa [7] je agregovaná hodnota oneskorenia antény zložená z 44 % vysielacím oneskorením a z 56 % prijímacím oneskorením antény. Na zistenie hodnoty agregovaného oneskorenia antény modulu je potrebné mať k dispozícii referenčný modul ktorého hodnota oneskorenia

antény je známa. Rozdielom medzi reálnou vzdialenosťou a vzdialenosťou získanou meraním pomocou metódy TWR medzi referenčným zariadením a neskalibrovaným zariadením je možné vypočítať hodnotu agregovaného oneskorenia antény neskalibrovaného zariadenia. Pri absencii referenčného zariadenia je kalibrácia oneskorenia antény taktiež možná no počet zariadení musí byť aspoň tri. Na diagrame 4.3 je znázornený algoritmus pre kalibráciu oneskorenia antény s využitím troch zariadení.



Obr. 4.3: Upravený algoritmus pre odhad hodnoty oneskorenia antény s využitím troch neskalibrovaných zariadení opísaný v [7].

Zmienovaný algoritmus som implementoval pomocou skriptu v jazyku Python s názvom *calibrateAntennaDelay.py*. Tento skript načíta ToF hodnoty v časových jednotkách DWM3000 modulu získané metódou SDS-TWR zo šiestich vstupných súborov. Každý zo vstupných súborov odpovedá jednej variácii SDS-TWR merania pomocou dvoch z celkového počtu troch zariadení. Výstupom tohto skriptu sú odhadované agregované hodnoty oneskorenia antén pre respektívne zariadenia.

Ovládač pre modul DWM3000 poskytuje pomocou metód `dwt_settxantennadelay` a `dwt_setrxantennadelay` spôsob ktorým je možné zabezpečiť aby získané hodnoty časových razítiek prijatia alebo odoslania správ odzrkadľovali skutočný čas prijatia alebo odoslania týchto správ neovplyvnený oneskorením antény. Avšak tieto hodnoty budú správne len za predpokladu že nakonfigurované hodnoty oneskorenia antény sú taktiež správne. Za účelom konfigurácie oneskorenia antény na hodnotu získanu pre každé zariadenie kalibračným procesom bola implementovaná metóda `setAntennaDelay`. Táto metóda má k dispozícii tabuľku v ktorej pomocou unikátnej hodnoty identifikátoru UWB modulu, ktorý je zapísaný do OTP pamäti počas výroby, vyhľadáva zadané oneskorenie antény pre toto konkrétne zariadenie. Ak sa hodnota pre toto zariadenie v tabuľke nenachádza použije sa preddefinovaná východzia hodnota. Veľkosť odchýlky merania pri použití východziej hodnoty môže dosahovať až +/- 30 cm. V produkčnom nasadení by bolo vhodnejším riešením uložiť hodnotu oneskorenia antény do OTP pamäti UWB modulu z ktorej môže byť načítaná počas každej inicializácie modulu.

## 4.5 Implementácia metódy SDS-TWR

Implementácia metódy SDS-TWR pozostáva zo samostatného zdrojového kódu pre zariadenia typu iniciator a receiver. TWR meranie sa spúšťa implementovanou metódou `startTWRIInitiator` na strane zariadenia iniciator a metódou `startTWRResponder` na strane zariadenia responder. Ešte pred volaním týchto metód je potrebné inicializovať UWB modul volaním metódy `initializeUWB`, nastaviť zdrojovú a cieľovú UWB adresu a callback metódy ktoré sú volané po úspešnom TWR meraní. Do callback metódy na strane zariadenia responder je ako parameter posiadaná štruktúra typu `DSTWRResult` ktorá obsahuje časové razítka odoslania a prijatia všetkých vymenených správ. Na strane zariadenia responder boli implementované tri rôzne callback metódy ktorých spoločnou črtou je že na výstup používajú konzolové rozhranie a následne zariadenie uspie na definovanú dobu a po prebudení inicializujú ďalšie TWR meranie. Jedna z nich slúži na výpis nespracovaných časových razítok a ďalšie spracovanie necháva na inom zariadení pripojenom cez sériové rozhranie. Ďalšia z implementovaných callback metód vypisuje vypočítanú hodnotu ToF v časových jednotkách UWB modulu a posledná implementovaná metóda vypisuje vypočítanú hodnotu vzdialenosti v centimetroch. Na strane zariadenia iniciator bola implementovaná len jediná callback metóda ktorá slúži na dočasné uspanie a následné spustenie ďalšieho TWR merania.

Prvým krokom v procese TWR merania je že zariadenie responder aktivuje prijímanie správ. Táto akcia sa vykoná prostredníctvom metódy `startTWRResponder` ale ešte pred samotným spustením prijímania správ táto metóda nakonfiguruje prerušenia ktoré budú vyvolané po úspešnom alebo neúspešnom prijatí správy a taktiež nastaví callback metódy ktoré budú spracovávať tieto prerušenia. Pokiaľ počas prijímania správy nastane nejaká chyba prijímanie správ sa rešartuje.

Druhým krokom TWR merania je že zariadenie iniciator odošle prvú správu. Frame control pole tejto správy je nastavené na hodnotu 0x8841 ktorá indikuje že sa jedná o dátový rámec s kompresiou PAN identifikátoru a 16 bitovou zdrojovou aj cieľovou adresou. Dátová časť tohto rámca obsahuje len funkčný kód ktorý označuje že sa jedná o prvú správu TWR merania. Ešte pred samotným odoslaním tejto správy je opäť nutné nastaviť prerušenia a spracovanie týchto prerušení. Zariadenie iniciator očakáva na túto správu odpoveď a preto je metóda ovládača `dwt_starttx`, ktorá spúšťa odoslanie správy, volaná s príznakom `DWT_RESPONSE_EXPECTED` ktorý zapríčiní že po odoslaní správy sa automaticky



spustí prijímanie správy. S ohľadom na spotrebu energie by bolo nežiadúce spustiť toto prijímanie okamžite po odoslaní správy nakoľko spracovanie správy zariadením responder a odoslanie odpovede zaberie určitú dobu. Z tohoto dôvodu je vhodné nastaviť oneskorenie prijímania pomocou metódy ovládača `dwt_setrxaftertxdelay` na maximálnu možnú hodnotu po ktorej je ešte možné zachytiť odpoveď zariadenia responder. Ak odpoveď nedorazí do definovaného časového limitu, čo môže indikovať neprítomnosť zariadenia responder, zariadenie iniciator sa uspí na definovanú dobu a následne opakuje odoslanie prvej správy TWR merania.

Zariadenie responder po prijatí prvej správy skontroluje či sedia všetky polia tohto rámca ako zdrojová a cieľová adresa, pole frame control a funkčný kód. Ak všetko súhlasí zariadenie si uloží spodných 32 bitov časového razítka prijatia tejto správy získaných skrz metódu ovládača `dwt_readrxtimestamplo32`. Celková dĺžka časových razítiek modulu DWM3000 je 40 bitov a hodnota 1 odpovedá času 15.56 ps. Použitím len spodných 32 bitov tejto hodnoty je maximálna dĺžka časového intervalu, ktorý môžeme zmerať, približne 66.8 ms čo viac než dosť postačuje na časové intervaly ktoré vystupujú pri TWR meraní. S cieľom zaistiť symetriu TWR merania, sa odoslanie odpovede nastaví na presný okamih po prijatí správy. Na túto funkcionality slúži metóda ovládača `dwt_setdelayedtrxtime` ktorá umožňuje nastaviť vrchných 31 bitov časového razítka kedy sa má správa odoslať. Spodných 9 bitov nastaví na hodnotu 0. S cieľom znížiť spotrebu energie a znížiť nepresnosti merania je žiadúce nastaviť interval medzi prijatím správy a odoslaním odpovede na najnižšiu možnú hodnotu. Hlavička rámca tejto odpovede je rovnaká ako pri prvej správe s výnimkou že zdrojová a cieľová adresa je prehodená. Dátová časť pri druhej správe obsahuje pochopiteľne iný funkčný kód značiaci druhú správu.

Zariadenie iniciator po prijatí druhej správy taktiež skontroluje správnosť všetkých polí. Následne sa na odoslanie pripraví posledný rámec ktorého dátová časť okrem funkčného kódu obsahuje aj časové razítka odoslania prvej správy, prijatia druhej správy a odoslania tretej správy. Nakoľko časové razítka odoslania tretej správy je potrebné poznať ešte pred odoslaním samotnej správy, využitie metódy ovládača `dwt_readtxtimestamplo32` na jeho zistenie nie je možné. Je potrebné ho manuálne vypočítať a to tak že sa použije hodnota ktorá bola predaná metóde ovládača `dwt_setdelayedtrxtime`. Najspodnejší bit tejto hodnoty musí byť vynulovaný nakoľko metóda ovládača `dwt_setdelayedtrxtime` použije len vrchných 31 bitov tejto hodnoty. Následne je potrebné vykonať bitový posun tejto hodnoty doľava o 8 bitov a pripočítanie aktuálne nastaveného oneskorenia vysielacej antény. Po úspešnom odoslaní poslednej správy zariadenie iniciator zavolá callback metódu nastavenú pomocou `setTWRIInitiatorDone`.

Zariadenie responder po korektnom prijatí poslednej správy zavolá callback metódu nastavenú pomocou `setTWRResultProcessor` a predá jej štruktúru s časovými razítkami získanými lokálne a taktiež od zariadenia iniciator prijaté v poslednej správe.

## 4.6 Implementácia metódy s využitím RSSI

Implementácia BLE metódy na meranie vzdialenosti s využitím RSSI pozostáva zo samostatného zdrojového kódu pre zariadenie typu scanner, ktoré monitoruje RSSI hodnotu advertising paketov iných zariadení a samostatného zdrojového kódu pre zariadenie beacon ktoré v definovaných intervaloch vysiela advertising pakety.

Na strane zariadenia scanner je nutné nastaviť viaceré parametre skenovania. Jedným z parametrov skenovania sú interval medzi skenovaniami, ďalším je dĺžka okna skenovania, ak sa dĺžka okna rovná dĺžke intervalu jedná sa o kontinuálne skenovanie. Je možné nastaviť

či sa má jednať o aktívne skenovanie pri ktorom si zariadenie scanner po prijatí advertising paketu vyžiada dodatočné informácie, na účely tejto bakalárskej práce postačuje pasívne skenovanie. V implementácii funkcionality zariadenia scanner bola využitá možnosť filtrovania pomocou accept zoznamu. Takto je možné definovať adresy len konkrétnych zariadení ktorých hodnotu RSSI chceme zisťovať. Spracovanie prijatého advertising paketu prebieha pomocou nastavenej callback metódy. Na tento účel boli implementované dve callback metódy, jedna ktorá vypisuje len samotnú hodnotu RSSI a druhá ktorá vypisuje vypočítanú vzdialenosť.

Konfigurácia advertisingu zariadenia typu beacon pozostáva z nastavenia minimálneho a maximálneho intervalu medzi advertisingom. S cieľom minimalizovať kolízie vysielania medzi ostatnými zariadeniami je interval medzi jednotlivými advertisingami zvolený náhodne medzi nakonfigurovanými hodnotami minima a maxima. Samotné advertising pakety sú nastavené tak aby ako zdrojovú adresu využívali identitu zariadenia a to s cieľom aby táto adresa bola nemenná a inak tieto advertising pakety neprenášajú žiadne užitočné dáta, nakoľko nás zaujíma len adresa vysielajúceho zariadenia a hodnota RSSI.

BLE na advertising využíva tri rôzne kanály. Zariadenie beacon počas každého advertisingu použije všetky tri kanály. Na druhú stranu, zariadenie scanner počas jedného skenovacieho okna využíva len jediný z týchto troch kanálov a v nasledujúcom skenovanom okne použije iný kanál. Z pohľadu spotreby energie by bolo výhodnejšie využívať iba jediný z týchto kanálov. BLE štandard umožňuje obmedziť advertising iba na jeden z kanálov ale neumožňuje skenovanie iba na jednom z nich. Nastavením advertisingu s využitím iba jedného kanálu by tak k žiadnej úspore nedošlo lebo scanner by zachytil v priemere len každú tretiu advertising správu.

## 4.7 Implementácia metódy 2D TDoA

Rozhodol som sa pre implementáciu UWB metódy 2D TDoA s bezdrôtovou synchronizáciou času. Na komunikáciu medzi jednotlivými zariadeniami ktoré v tejto metóde vystupujú som sa rozhodol použiť technológiu Bluetooth mesh a to z dôvodu že som nenašiel žiadny UWB RTLS systém ktorý by túto technológiu využíval a preto by mohlo byť prínosné túto technológiu na toto využitie otestovať.

V implementácii metódy 2D TDoA opisovanej v tejto bakalárskej práci vystupujú tri druhy zariadení. Konkrétne tu vystupuje premenlivé množstvo zariadení typu tag, jedná sa práve o zariadenia ktorých polohu táto metóda zisťuje. Ďalej tu vystupujú tri zariadenia typu anchor, tieto zariadenia zachytávajú UWB správy od zariadení typu tag a ďalej informácie o týchto správach predávajú poslednému typu zariadenia master. Zariadenie typu master má v tejto implementácii okrem úlohy zbierať informácie od zariadení typu anchor aj úlohu zabezpečiť synchronizáciu ich hodín.

Pre správne fungovanie tejto metódy je kľúčová veľmi presná synchronizácia hodín zariadení typu anchor. Výrobca modulu DWM3000 udáva že odchýlka hodín modulu môže dosahovať hodnotu až +/- 20 ppm od referenčnej frekvencie. Navyše táto hodnota nie je konštantná a počas behu zariadenia sa mení. Pri uvažovaní najhoršieho možného prípadu sa po dobe jednej sekundy od synchronizácie hodín dvoch zariadení typu anchor ich hodiny teoreticky môžu rozísť takým spôsobom že nepresnosť merania by dosahovala hodnotu okolo 10 km čo je na účely tohto systému neprípustné. S cieľom maximalizovať presnosť synchronizácie hodín, bol v rámci tejto práce implementovaný systém v ktorom zariadenie master v presne určených intervaloch vysiela synchronizačné UWB správy. Dĺžka tohto intervalu je známa všetkým zariadeniam anchor. Jednotlivé zariadenia typu anchor sú schopné vy-

počítať časové razítko prijatia správy od zariadenia tag synchronizované s referenčnými hodinami ako

$$t_{tg} = (t_{tl} - t_{si-1}) \cdot \frac{t_{ref}}{t_{si} - t_{si-1}} \quad (4.2)$$

kde  $t_{tg}$  je globálne časové razítko prijatia správy od zariadenia tag,  $t_{tl}$  je lokálne časové razítko prijatia správy od zariadenia tag,  $t_{si-1}$  je časové razítko synchronizačnej správy prijatej pred správou od zariadenia tag,  $t_{si}$  je časové razítko synchronizačnej správy prijatej po správe od zariadenia tag a  $t_{ref}$  je referenčná dĺžka synchronizačného intervalu. Testovaním rôznych synchronizačných intervalov sa ukázala ako vhodná hodnota 62 ms.

Vzhľadom na to že neexistuje štandardný Bluetooth mesh model ktorý by plnohodnotne poskytoval funkcionality vyžadovanú TDoA systémom, bolo potrebné implementovať vlastný takzvaný vendor model. V tomto modeli boli implementované dva druhy správ a to inicializačná správa od zariadenia master ktorá je prijímaná zariadeniami anchor a slúži na inicializáciu zariadení anchor. Táto správa obsahuje UWB adresu zariadenia master aby zariadenia anchor boli schopné správne identifikovať synchronizačné správy a táto správa taktiež obsahuje referenčnú dĺžku synchronizačného intervalu. Druhý typ správy slúži na prenos informácií k zariadeniu master o zachytenej UWB správe od zariadenia tag zariadením anchor. S cieľom zabezpečiť čo najvyššiu kapacitu implementovaného RTLS systému je nežiadúce aby správy od zariadení anchor k zariadeniu master boli segmentované, nakoľko pri použití segmentovaných správ sa zvýši celkový počet prenesených správ nie len z dôvodu samotnej segmentácie ale aj preto že prijatie každého segmentu musí byť potvrdené potvrzovacou správou. Prenos nesegmentovanej správy potvrdenie nevyžaduje. To však kladie veľmi reštriktívne požiadavky na maximálnu dĺžku tejto správy. Maximálna dĺžka nesegmentovanej Bluetooth mesh správy je len 15 bajtov a z toho 4 bajty tvorí message integrity check (MIC) a ďalšie 3 bajty sú použité na operačný kód. Na užitočné dáta tak zostáva len 8 bajtov. To postačuje akurát na 8 bitové sekvenčné číslo, 16 bitovú adresu zariadenia tag a zvyšných 40 bitov zostáva na časové razítko prijatia UWB správy. Vzhľadom na to že bol zvolený synchronizačný interval 62 ms postačuje na prenos časového razítka aj 32 bitová hodnota. V prípade že by bolo potrebné tento interval zvýšiť je možné využitie aj zostávajúcich 8 bitov.

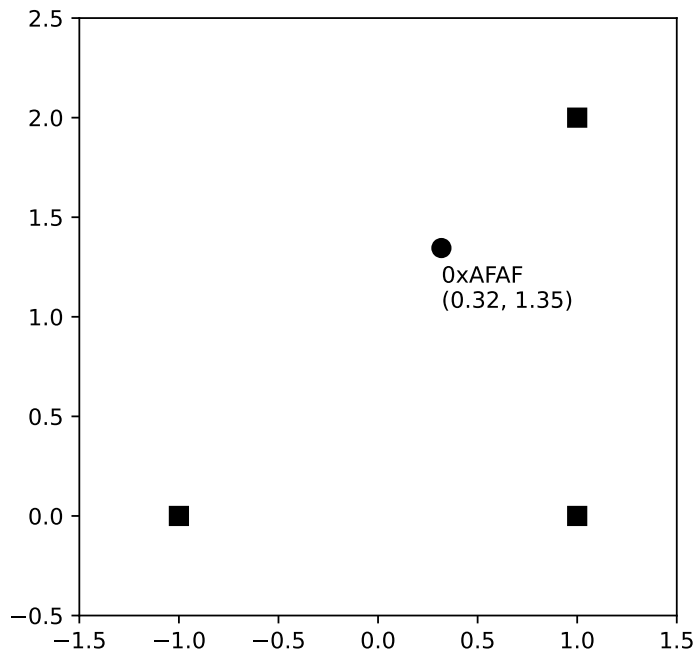
Najjednoduchším zariadením ktoré v tejto metóde vystupuje je zariadenie typu tag. Toto zariadenie je implementované tak že využíva len technológiu UWB a pomocou Bluetooth mesh s ostatnými zariadeniami nekomunikuje. Toto zariadenie využíva implementovanú metódu `startLowPowerBeacon`. Táto metóda spustí periodické vysielanie UWB rámcov typu beacon. Intervaly medzi jednotlivými vysielaniami sú náhodne generované s rovnomerným rozdelením medzi definovanou minimálnou a maximálnou hodnotou. Táto náhodnosť je tu zavedená s cieľom obmedziť možné kolízie vysielania viacerých zariadení typu tag. Zariadenie tag je mimo samotného periodického vysielania v stave hlbokého spánku.

Zariadenie master bolo implementované tak že po spustení čaká na stisk jedného z tlačidiel prítomných na zariadení nRF5340 DK. Po stisku jedného z tlačidiel vyšle zariadeniam anchor inicializačnú Bluetooth mesh správu a začne periodicky vysielat synchronizačné UWB správy. Uskanie UWB modulu medzi jednotlivými synchronizačnými vysielaniami nie je možné, nakoľko kryštálový oscilátor je v stave spánku alebo hlbokého spánku vypnutý a tak by nebolo možné vysielat synchronizačné správy v presných časových intervaloch. Popri vysielaní synchronizačných UWB správ má zariadenie master ešte na starosti príjem Bluetooth mesh správ od zariadení anchor. Informácie z týchto správ si uchováva a keď disponuje časovými razítkami určitého zariadenia tag od všetkých zariadení anchor s rov-

nakým sekvenčným číslom, vypíše tieto údaje spolu s adresou zariadenia tag na konzolový výstup.

Anchor zariadenia boli implementované tak že neustále zachytávajú synchronizačné správy od zariadenia master a taktiež správy od zariadení tag. Vždy si tieto zariadenia uchovávajú časové razítka poslednej synchronizačnej UWB správy. Po prijatí synchronizačnej UWB správy si taktiež uchovávajú časové razítka správ od zariadení tag. Po prijatí nasledujúcej synchronizačnej správy, časové razítka správ od zariadení tag upraví pomocou rovnice 4.2 a odošlú ich pomocou Bluetooth mesh správ zariadeniu master.

Výpočet a vizualizácia polohy zo získaných dát je riešená pomocou implementovaného skriptu *visualizeTDoA.py* v jazyku Python ktorý je spustený na počítači ku ktorému je zariadenie master pripojené cez sériové rozhranie. Tento skript číta textové dáta posielať na sériové rozhranie a zostaví z nich hyperbolické rovnice. Následne vypočíta priesečník týchto rovníc čím získa polohu určitého zariadenia tag. Vypočítanú polohu vizualizuje v reálnom čase pomocou Python modulu *pyplot*. Tento vizualizačný skript kladie podmienku na vzájomnú polohu zariadení anchor. Úsečka medzi zariadením 1 a 2 musí byť kolmá na úsečku medzi zariadením 2 a 3. Takéto rozmiestnenie zariadení anchor umožňuje zjednodušiť hyperbolické rovnice čím sa značne zjednoduší výpočet ich priesečníkov.

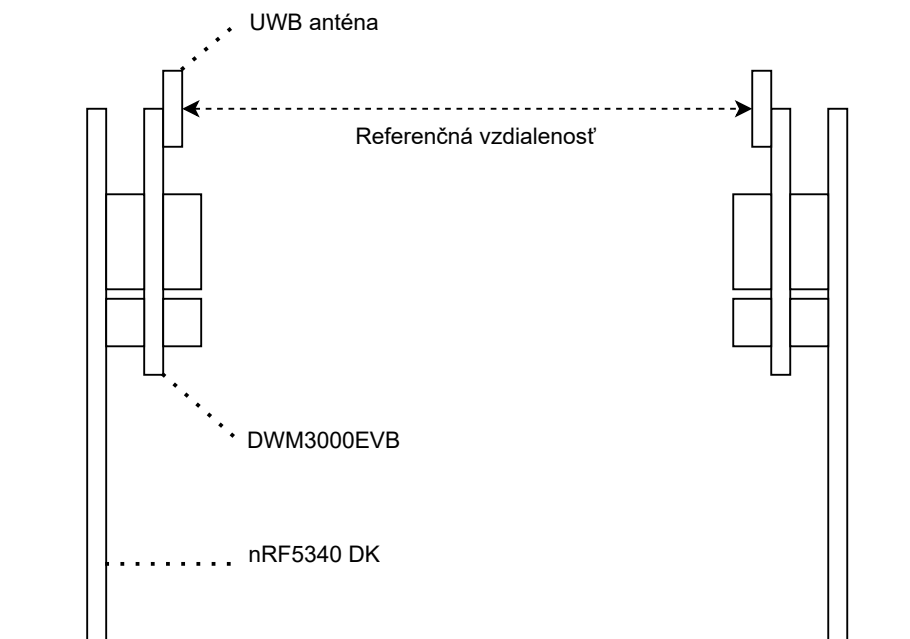


Obr. 4.4: Výstup skriptu *visualizeTDoA.py*.

## Kapitola 5

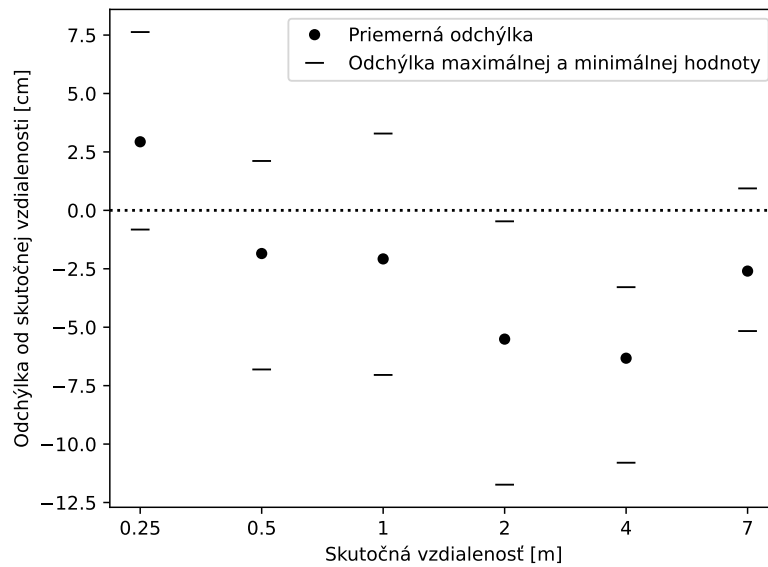
# Testovanie výslednej implementácie

### 5.1 Presnosť merania



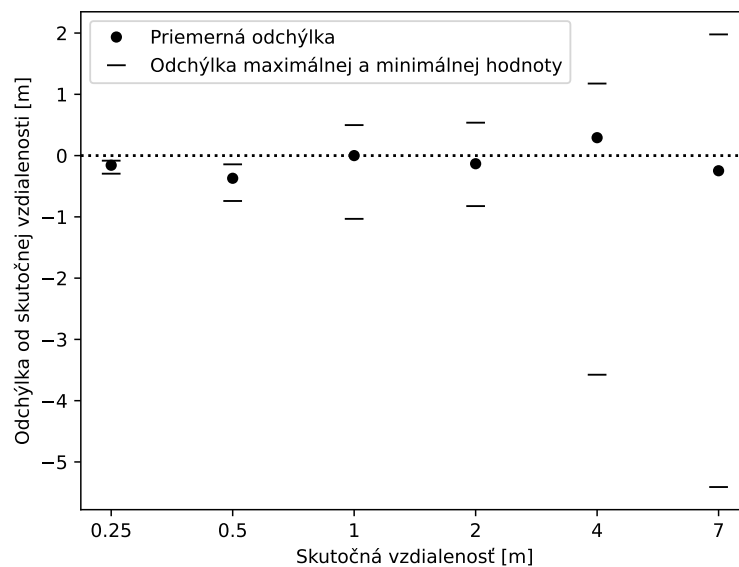
Obr. 5.1: Nákres spôsobu merania vzdialenosti.

Všetky testy spojené s vyhodnocovaním presnosti merania boli vykonávané v interiéro-  
vých priestoroch. Testovanie presnosti merania metódy TWR a metódy s využitím hodnoty  
RSSI prebiehalo rovnakým spôsobom kde dvojica zariadení bola postavená voči sebe ako  
je vyobrazené na nákrese 5.1. Meranie bolo vykonávané postupne pri viacerých vzdialenos-  
tiach, kde pri každej vzdialenosti bolo zaznamenaných 200 vzoriek merania s rozstupom  
jednej sekundy.



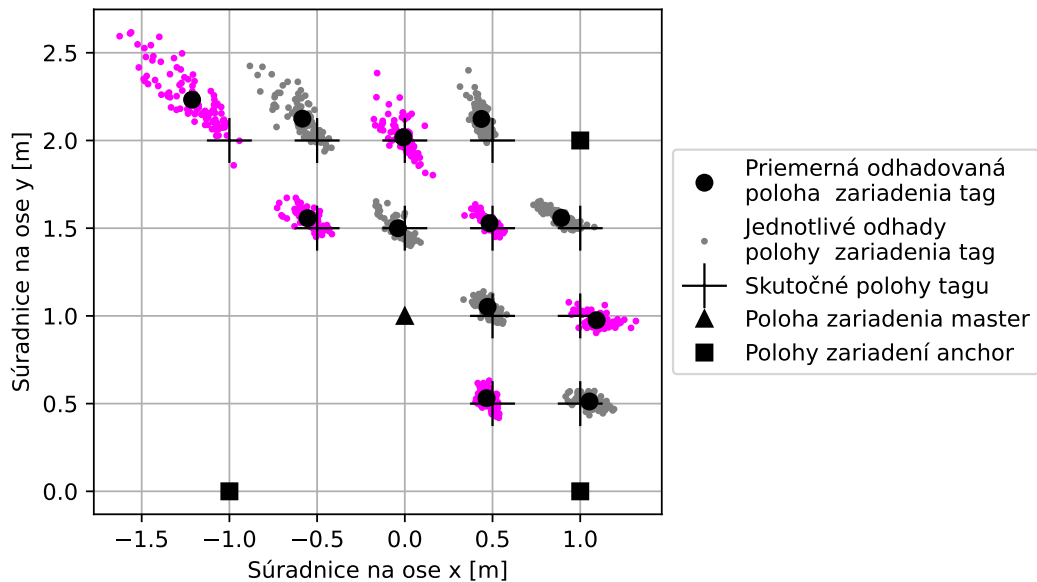
Obr. 5.2: Odchýlka vzdialenosti získanej pomocou metódy TWR od skutočnej vzdialenosti.

Zmerané hodnoty odchýlky merania metódy TWR sú vyobrazené v grafe 5.2. Je možné vidieť že nameraná hodnota vzdialenosti sa v najhoršom prípade odchýlila od referenčnej vzdialenosti len približne o 12 cm. Maximálna hodnota priemernej odchýlky bola približne len 6 cm.



Obr. 5.3: Odchýlka vzdialenosti získanej pomocou metódy s využitím RSSI od skutočnej vzdialenosti.

Zmerané hodnoty odchýlky merania pomocou metódy s využitím RSSI sú vyobrazené v grafe 5.2. Je zjavné že maximálne hodnoty odchýlky merania tejto metódy sú niekoľkonásobne väčšie než pri metóde TWR. Odchýlky merania metódy TWR boli v jednotkách centimetrov a pri tejto metóde sa jedná o jednotky metrov. Taktiež je možné spozorovať že veľkosti maximálnej odchýlky merania pri tejto metóde stúpajú spolu s meranou vzdialenosťou. Pri metóde TWR je možné skonštatovať že tieto odchýlky nie sú závislé na vzdialenosti. Avšak priemerné hodnoty namerané metódou s využitím RSSI dosahujú oveľa vyššiu presnosť ktorá sa drží pod hodnotou  $\pm 50$  cm. Z tohto dôvodu je veľmi vhodné nevyužívať pri tejto metóde okamžité hodnoty ale priemer niekoľkých hodnôt. Ešte je nutné podotknúť veľmi dôležitý fakt že výpočet hodnôt pre metódu s využitím RSSI bol kalibrovaný pre konkrétne prostredie v ktorom bolo meranie vykonávané. V inom prostredí s neznámymi parametrami by boli absolútne hodnoty vzdialenosti nepoužiteľné a z nameraných hodnôt by bolo možné zistiť iba či sa zariadenia vzájomne približujú alebo vzdalujú. Metóda TWR je takmer úplne nezávislá na prostredí v ktorom je meranie vykonávané.



Obr. 5.4: Výsledky merania pomocou metódy TDoA.

Testovanie presnosti implementovanej metódy TDoA prebiehalo tak že zariadenie tag bolo umiestňované postupne na rôzne pozície. Na každej pozícii bolo zaznamenaných 100 vzoriek merania s rozstupom jednej sekundy. Výsledok tohto merania je znázornený v grafe 5.4. Je možné vidieť že rozptyl nameraných hodnôt rastie s kumulatívnou vzdialenosťou od zariadení anchor. Napriek tomu priemerná hodnota odchýlky v bode kde bolo meranie najmenej presné dosahovala len hodnotu približne 25 cm.

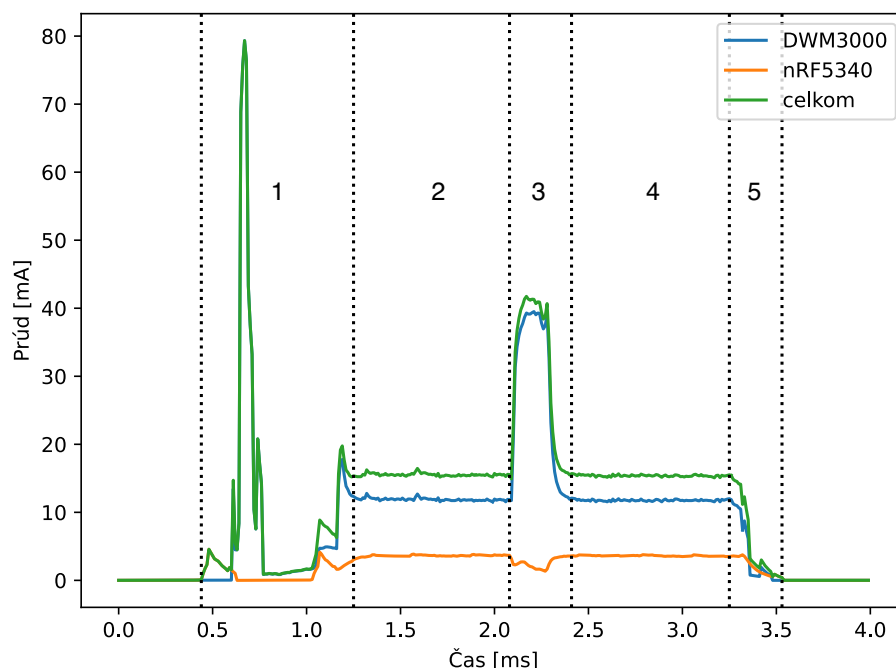
## 5.2 Maximálny dosah

Zisťovanie maximálneho dosahu technológie BLE na zariadení nRF5340 DK a dosahu technológie UWB s využitím modulu DWM3000 prebiehalo v exteriéri. Vysielač výkon zariadenia nRF5340 DK bol nastavený na jeho maximálnu hodnotu 3 dBm čo je hodnota nižšia než maximálny výkon definovaný nariadeniami pre BLE technológiu. Vysielač výkon

modulu DWM3000 bol nastavený na hodnotu  $-41$  dBm/MHz čo je hodnota tesne pod maximálnou hodnotou  $-41,3$  dBm/MHz stanovenou v nariadeniach pre UWB technológiu. V takejto konfigurácii bola zistená maximálna vzdialenosť pri ktorej boli zariadenia schopné navzájom spoľahlivo komunikovať približne 73 m pre BLE a 21 m pre UWB pri prenosovej rýchlosti 850 Kb/s.

### 5.3 Spotreba energie

Zaznamenávanie časového priebehu odberu elektrického prúdu modulmi DWM3000 a nRF5340 bolo vykonávané s využitím na to určeného zariadenia nRF-PPK2. Na účely merania spotreby energie sú na doskách plošných spojov zariadení DWM3000EVB a nRF5340 DK vyvedené konektory. Použitie týchto konektorov na zariadení DWM3000EVB je možné bez dodatočných modifikácií. Zariadenie nRF5340 DK však vyžaduje fyzické prerušenie kontaktu SB40 aby mohli byť zmienené konektory použité na účel merania odberu prúdu.

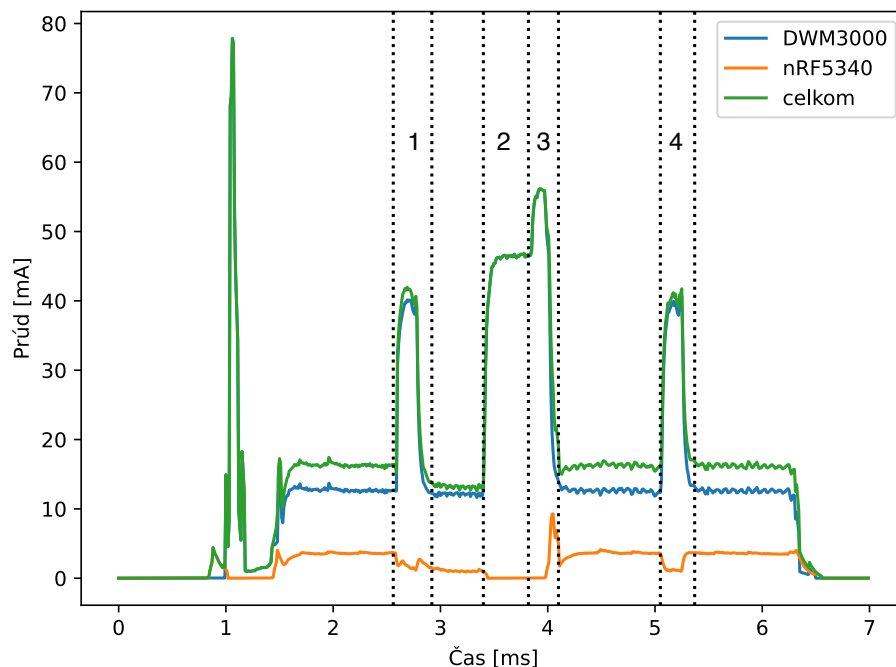


Obr. 5.5: Časový priebeh odberu prúdu zariadenia tag metódy TDoA pri napájacom napätí 3 V. 1 – prebúdzanie, 2 – inicializácia, 3 – vysielanie, 4 – deinicializácia, 5 – prechod do stavu hlbokého spánku

Graf 5.5 je vizualizáciou nameraných hodnôt odberu prúdu zariadenia tag vystupujúceho v metóde TDoA. V počiatočnej fáze je toto zariadenie v stave hlbokého spánku kde ober prúdu činí približne len  $3,5 \mu\text{A}$ . V čase prebúdzania dochádza k veľmi krátkemu výkyvu odberu modulu DWM3000 až na hodnotu 80 mA. V bdelom stave pred a po samotnom vysielaní je celkový odber prúdu okolo 15 mA. Počas samotného vysielania ktoré trvá približne 0,3 ms sa vyšplhá celkový odber prúdu až na hodnotu tesne nad 40 mA. Pri vysielacej frekvencii 1Hz je priemerná hodnota odberu prúdu približne  $50 \mu\text{A}$ . Pri zanedbaní samovybájania by na neustálu prevádzku tohto zariadenia po dobu celého roka postačovala batéria s kapacitou aspoň 438 mAh. Ak by využitie tohto zariadenia vyžadovalo dlhšiu výdrž, je ju



možné zabezpečiť na úkor vysielacej frekvencie. Čo však ešte kladie podmienky na výber batérie je tiež maximálny odber prúdu tohto zariadenia. Nároky na tento parameter by bolo možné znížiť použitím kondenzátora zapojeného paralelne s batériou.



Obr. 5.6: Časový priebeh odberu prúdu zariadenia iniciator metódy TWR pri napájanom napätí 3 V. 1 – prvé vysielanie, 2 – očakávanie správy, 3 – prijímanie správy, 4 – druhé vysielanie

Časový priebeh odberu prúdu zariadenia iniciator metódy TWR vyobrazený grafom 5.6 je podobný časovému priebehu zariadenia tag metódy TDoA. Na rozdiel od toho zariadenia obsahuje aj prijímanie správy a ďalšie vysielanie. Celkový odber prúdu počas očakávania správy je približne 48 mA a počas samotného prijímania správy stúpne na 58 mA. Priemerná spotreba tohto zariadenia pri neustálom meraní s frekvenciou 1 Hz je približne 120  $\mu\text{A}$ .

Zariadenie	Prúd
TWR Initiator	120 $\mu\text{A}$
TWR Responder	1 mA
RSSI Beacon	7 $\mu\text{A}$
RSSI Scanner	4,2 mA
TDoA Tag	50 $\mu\text{A}$
TDoA Master	20 mA
TDoA Anchor	50 mA

Tabuľka 5.1: Prehľad celkového priemerného odberu prúdu zariadení implementovaných v tejto práci pri napájanom napätí 3V.

Tabuľka 5.1 obsahuje priemerné hodnoty celkového odberu prúdu všetkých zariadení ktoré boli implementované v tejto práci. Obdivuhodný je extrémne nízky odber prúdu zariadenia beacon ktorý s frekvenciou 1 Hz vysiela BLE advertising správy. Na druhú stranu,

zariadenie s najväčším odberom je zariadenie anchor. Tento vysoký odber je spôsobený povahou tohto zariadenia keďže je neustále pripravené prijímať UWB správy.

## **5.4 Porovnanie výsledkov UWB a BLE**

Výsledky testovania ukázali že presnosť lokalizácie pomocou technológie UWB dosahuje rádovo vyššiu presnosť než s využitím technológie BLE. Cenou tejto vyššej presnosti je však rádovo vyššia spotreba energie. Avšak určovanie vzdialenosti s využitím hodnoty RSSI je v praxi takmer nepoužiteľné z dôvodu že úzko súvisí na externých faktoroch ktoré ovplyvňujú odrazy signálu. Využitie tejto metódy má zmysel v prípade zisťovania informácie či je iné zariadenie v dosahu, prípadne pri zisťovaní približnej informácie o tom či sa toto zariadenie vzdaluje alebo približuje.

## Kapitola 6

### Záver

Hlavným cieľom tejto práce bolo navrhnúť, implementovať a otestovať lokalizačný systém s využitím technológie UWB a ako sekundárny cieľ tejto práce bolo porovnať tento systém so systémom implementovaným pomocou technológie BLE. Všetky ciele nastavené touto prácou boli úspešne splnené.

Úvodná časť tejto práce obsahuje teoretický popis bezdrôtových technológií ktoré boli využité v implementácii. Ako súčasť tejto práce boli implementované dve lokalizačné metódy s použitím technológie UWB a to konkrétne metóda TWR a TDoA. Pomocou technológie BLE bola implementovaná metóda ktorá na určenie vzdialenosti využíva hodnotu RSSI. Tieto metódy boli implementované na komerčne dostupnom vývojovom hardwari nRF5340 DK a DWM3000EVB. Výsledné implementácie týchto metód boli otestované z pohľadu presnosti ich výsledkov, maximálneho dosahu a spotreby energie. Maximálne hodnoty odchýlky merania pomocou implementovanej metódy TWR sa držali v rozmedzí +/- 10 cm. Za zmienku tiež stojí že priemerný odber prúdu lokalizovaného zariadenia vystupujúceho v implementácii metódy TDoA je približne len 50  $\mu\text{A}$  pri napájanom napätí 3 V.

Táto práca by v budúcnosti mohla byť rozšírená napríklad vytvorením mobilnej aplikácie ktorá by slúžila na používateľsky prívetivejšiu konfiguráciu RTLS systému a taktiež na praktickejšiu vizualizáciu zistených polôh. Taktiež je tu otvorený priestor na rozšírenie implementácie tak aby mohla spolupracovať s inými zariadeniami s podporou UWB technológie ako sú napríklad niektoré mobilné telefóny.

# Literatúra

- [1] BERTULETTI, S., CEREBATTI, A., CALDARA, M., GALIZZI, M. a DELLA CROCE, U. Indoor distance estimated from Bluetooth Low Energy signal strength: Comparison of regression models. In: *2016 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS)*. 2016, s. 1–5. DOI: 10.1109/SAS.2016.7479899.
- [2] COPPENS, D., SHAHID, A., LEMEY, S., VAN HERBRUGGEN, B., MARSHALL, C. et al. An Overview of UWB Standards and Organizations (IEEE 802.15.4, FiRa, Apple): Interoperability Aspects and Future Research Directions. *IEEE Access*. 2022, zv. 10, s. 70219–70241. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3187410.
- [3] HERNÁNDEZ SOLANA, , PÉREZ DÍAZ DE CERIO, D., GARCÍA LOZANO, M., BARDAJÍ, A. V. a VALENZUELA, J.-L. Bluetooth Mesh Analysis, Issues, and Challenges. *IEEE Access*. 2020, zv. 8, s. 53784–53800. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2980795.
- [4] LIU, C., ZHANG, Y. a ZHOU, H. A Comprehensive Study of Bluetooth Low Energy. *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing. nov 2021, zv. 2093, č. 1, s. 012021. DOI: 10.1088/1742-6596/2093/1/012021. Dostupné z: <https://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/2093/1/012021>.
- [5] O’KEEFE, B. *Finding Location with Time of Arrival and Time Difference of Arrival Techniques*. Dostupné z: [https://sites.tufts.edu/eesenior/designhandbook/files/2017/05/FireBrick\\_0Keefe\\_F1.pdf](https://sites.tufts.edu/eesenior/designhandbook/files/2017/05/FireBrick_0Keefe_F1.pdf).
- [6] PELKA, M., AMANN, D., CIMDINS, M. a HELLBRICK, H. Evaluation of time-based ranging methods: Does the choice matter? In: *2017 14th Workshop on Positioning, Navigation and Communications (WPNC)*. 2017, s. 1–6. DOI: 10.1109/WPNC.2017.8250066.
- [7] QORVO. *APS014 APPLICATION NOTE: ANTENNA DELAY CALIBRATION OF DW1000-BASED PRODUCTS AND SYSTEMS*. Dostupné z: <https://www.qorvo.com/products/d/da008449>.
- [8] QORVO. *Getting Back to Basics with Ultra-Wideband (UWB)*. Dostupné z: <https://www.qorvo.com/resources/d/qorvo-getting-back-to-basics-with-ultra-wideband-uwband-white-paper>.
- [9] QORVO. *The mathematics of two-way ranging*. Dostupné z: <https://forum.qorvo.com/uploads/short-url/toATZSWY0alHWE1TU18x4nUkw0m.pdf>.
- [10] SANA, U., MURAD, A., ASDAQUE, H. a KYUNG, K. Applications of UWB Technology. *ArXiv*. November 2009. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/45883282\\_Applications\\_of\\_UWB\\_Technology](https://www.researchgate.net/publication/45883282_Applications_of_UWB_Technology).

- [11] SKØIEN, K. R. *RTOS: Real-Time Operating Systems for Embedded Developers*. Dostupné z: <https://blog.nordicsemi.com/getconnected/what-is-rtos-real-time-operating-systems-for-embedded-developers>.
- [12] UNION, I. T. *RECOMMENDATION ITU-R SM.1755-0\*: Characteristics of ultra-wideband technology*. 2006. Dostupné z: [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/sm/R-REC-SM.1755-0-200605-I!!PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/sm/R-REC-SM.1755-0-200605-I!!PDF-E.pdf).
- [13] WOOLLEY, M. *Bluetooth Mesh Models: Technical Overview*. Dostupné z: [https://www.bluetooth.com/wp-content/uploads/2019/04/1903\\_Mesh-Models-Overview\\_FINAL.pdf](https://www.bluetooth.com/wp-content/uploads/2019/04/1903_Mesh-Models-Overview_FINAL.pdf).