



**ČVUT**

ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE

**F3**

**Fakulta elektrotechnická  
Katedra radioelektroniky**

**Bakalářská práce**

# **Systém pro bezkontaktní kontroly v orientačních sportech**

**Josef Nagy**

**Elektronika a komunikace**

**2023**

**Vedoucí práce: Ing. Václav Navrátil, Ph.D.**



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Nagy** Jméno: **Josef** Osobní číslo: **499260**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávací katedra/ústav: **Katedra radioelektroniky**  
Studijní program: **Elektronika a komunikace**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**System pro bezkontaktní kontroly v orientačních sportech**

Název bakalářské práce anglicky:

**Contactless Checkpoint System for Orienteering Sports**

Pokyny pro vypracování:

Navrhněte a sestrojte zařízení pro bezkontaktní kontroly závodníků orientačních sportů (orientační běh, horská cyklistika, běh na lyžích). Zaměřte se na využití technologie Bluetooth Low Energy (BLE), případně dalších technologií IoT. Definujte požadavky na funkčnost a energetickou náročnost uživatelského zařízení i statického zařízení kontroly. Proveďte rovněž rešerši řešení dostupných na trhu.

Proveďte možnosti sledování pohybu závodníků v reálném čase. Sestrojte vývojovou variantu zařízení (využijte vývojové kity), která bude sloužit k ověření funkčnosti.

Seznam doporučené literatury:

- [1] V. Sesma and V. Egorov, Improved Accuracy for Indoor Positioning with Bluetooth 5.1: From Theory to Measurements, Online <<https://lup.lub.lu.se/student-papers/search/publication/9027829>>
- [2] G. Pau, F. Arena, Y.E. Gebremariam, I. You, Bluetooth 5.1: An Analysis of Direction Finding Capability for High-Precision Location Services. Sensors, 2021. doi: 10.3390/s21113589
- [3] J. Schmalenstroeer and R. Haeb-Umbach, "Investigations into Bluetooth low energy localization precision limits," 2016 24th European Signal Processing Conference (EUSIPCO), 2016, pp. 652-656, doi: 10.1109/EUSIPCO.2016.7760329.
- [4] Bluetooth, Bluetooth Core Specification v5.1, 2019
- [5] S.J. Orfanidis, Electromagnetic Waves and Antennas. 2016, online <<https://www.ece.rutgers.edu/~orfanidi/ewa/>>

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Václav Navrátil, Ph.D. katedra radioelektroniky FEL**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **01.02.2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: **26.05.2023**

Platnost zadání bakalářské práce: **22.09.2024**

Ing. Václav Navrátil, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Stanislav Vítek, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta





## Poděkování / Prohlášení

Děkuji vedoucímu práce Ing. Václavu Navrátilovi, Ph.D. za velké množství cenných rad, připomínek a podnětů, bez kterých by tato práce rozhodně nevznikla. Dále děkuji své rodině a přítelkyni za nekonečnou podporu a trpělivost při tvorbě této práce.

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 26. 5. 2023

.....

## Abstrakt / Abstract

Práce se zabývá návrhem systému pro bezkontaktní kontroly v orientačních sportech. Nejprve byl proveden rozbor a volba použitých technologií. Zde jsou za nejvhodnější zvoleny technologie Bluetooth low energy pro komunikaci mezi kontrolou a závodníkem a LoRa pro komunikaci mezi kontrolou a centrem závodů. Práce se dále zaměřuje pouze na přenos dat mezi kontrolou a závodníkem, kde byl vytvořen experimentální firmware pro obě zařízení, definována struktura přenosu dat a navržen způsob vyhodnocení vzdálenosti zařízení na základě změřených dat.

**Klíčová slova:** Bezdrátové komunikace, orientační sporty, Bluetooth low energy, LoRa, sub-1 GHz, STM32WB

The thesis deals with the design of a contactless checkpoint system for orienteering. Firstly, the analysis and selection of the technologies used was performed. Bluetooth low energy technology for communication between checkpoint and athlete and LoRa for communication between checkpoint and event centre are chosen as the most suitable technologies. The thesis then focuses on the data transmission between the checkpoint and the athlete. The experimental firmware for both devices has been developed, the data transmission structure has been defined and a method for evaluating the distance of the devices based on the measured data has been proposed.

**Keywords:** Wireless communication, orienteering, Bluetooth low energy, LoRa, sub-1 GHz, STM32WB

**Title translation:** Contactless Checkpoint System for Orienteering Sports

# Obsah /

<b>1 Úvod</b>	<b>1</b>	4.3 Parametry testovacích kitů . . .	22
<b>2 Teoretický úvod a volba technologie</b>	<b>2</b>	4.3.1 NUCLEO-WB55RG . . . . .	22
2.1 Orientační sporty . . . . .	2	4.3.2 NUCLEO-WL55JC1 . . . . .	22
2.2 Stávající systémy pro záznam průchodu kontrolami . . . . .	2	4.4 Koncepce celého systému . . . . .	22
2.3 Požadavky na navrhovaný systém . . . . .	4	4.5 Vývoj programu pro závodníkovou jednotku a kontrolu . . . . .	24
2.4 Volba technologie pro komunikaci „kontrola ⇔ závodník“ . . . . .	6	4.6 Přenos a struktura dat komunikace „kontrola ⇔ závodník“ . . . . .	24
2.4.1 „Klasický“ Bluetooth . . . . .	6	4.7 Stanovení vzdálenosti zařízení při komunikaci „kontrola ⇔ závodník“ . . . . .	26
2.4.2 Bluetooth low energy (BLE) . . . . .	6	4.8 Další vývoj . . . . .	33
2.4.3 Wi-Fi . . . . .	7	<b>5 Závěr</b>	<b>34</b>
2.4.4 Ultra wide band (UWB) . . . . .	7	<b>Literatura</b>	<b>36</b>
2.4.5 Zigbee . . . . .	8	<b>A Měření a simulace RSSI v poloze A</b>	<b>43</b>
2.4.6 Proprietární systém v ISM pásmu . . . . .	8	<b>B Měření a simulace RSSI v poloze B</b>	<b>44</b>
2.4.7 Výběr technologie . . . . .	8	<b>C Měření a simulace RSSI v poloze C</b>	<b>49</b>
2.5 Volba technologie pro komunikaci „kontrola ⇒ centrum závodu“ . . . . .	9	<b>D Zpracování dat v kontrole a jednotce závodníka</b>	<b>54</b>
2.5.1 Mobilní (celulární) sítě . . . . .	9	<b>E Struktura zdrojových kódů</b>	<b>57</b>
2.5.2 LoRa . . . . .	10	E.1 Firmware kontroly . . . . .	57
2.5.3 Sigfox . . . . .	10	E.2 Firmware závodníkovy jednotky . . . . .	57
2.5.4 NB-IoT . . . . .	10	E.3 Programy pro měření a zpracování RSSI . . . . .	57
2.5.5 Proprietární systém v ISM pásmu . . . . .	11	<b>F Seznam zkratk</b>	<b>58</b>
2.5.6 Výběr technologie . . . . .	11		
<b>3 BLE – detailní popis technologie</b>	<b>12</b>		
3.1 Fyzická vrstva . . . . .	12		
3.2 Spojová vrstva . . . . .	12		
3.2.1 Advertising . . . . .	13		
3.2.2 Scanning . . . . .	13		
3.3 Generic Attribute Profile (GATT) . . . . .	14		
3.3.1 Servis . . . . .	15		
3.3.2 Charakteristika . . . . .	15		
3.4 Generic Access Profile (GAP) . . . . .	16		
3.5 Security manager (SM) . . . . .	17		
<b>4 Praktická realizace</b>	<b>19</b>		
4.1 Výrobci požadovaných technologií . . . . .	19		
4.2 Volba MCU a testovacího kitu . . . . .	21		

## Tabulky / Obrázky

<b>2.1</b> Požadované parametry závodníkovy jednotky .....	5
<b>2.2</b> Požadované parametry stanice na kontrole .....	5
<b>2.3</b> Parametry komunikace <i>kontrola ↔ závodník</i> .....	5
<b>2.4</b> Parametry komunikace <i>kontrola → centrum závodu</i> .....	6
<b>4.1</b> Výrobci a řady MCU a modulů s BLE .....	20
<b>4.2</b> Výrobci a řady MCU a modulů s LoRa .....	20
<b>4.3</b> Výrobci a řady MCU a modulů s sub 1-GHz.....	20
<b>4.4</b> Výrobci a řady MCU obsahujících kombinaci více technologií .....	21
<b>4.5</b> Vyhodnocení přijatých dat.....	32
<b>2.1</b> Mapa pro LOB .....	3
<b>2.2</b> Kontrola od společnosti SPORTIdent.....	4
<b>2.3</b> Závodníková jednotka od společnosti SPORTIdent .....	4
<b>3.1</b> Alokace kanálů BLE .....	12
<b>3.2</b> Struktura BLE .....	13
<b>3.3</b> BLE Advertising .....	14
<b>3.4</b> BLE aktivní advertising .....	14
<b>3.5</b> BLE struktura GATT profilu..	15
<b>3.6</b> Příklad GATT profilu pro senzoru tepu.....	16
<b>3.7</b> Komunikace broadcaster/observer.....	16
<b>3.8</b> Komunikace peripheral/central .....	17
<b>3.9</b> BLE průběh zajištění komunikace .....	18
<b>4.1</b> Vývojový kit NUCLEO-WB55 .....	21
<b>4.2</b> Blokové schéma kompletního systému .....	23
<b>4.3</b> Komunikace mezi kontrolou a jednotkou závodníka .....	24
<b>4.4</b> ADV_SCAN_IND paket .....	25
<b>4.5</b> SCAN_RSP paket .....	25
<b>4.6</b> Struktura názvu v ADV_SCAN_IND paketu ..	25
<b>4.7</b> Struktura dat v ADV_SCAN_IND paketu ..	26
<b>4.8</b> Polohy kontroly a jednotky závodníka při měření RSSI ....	28
<b>4.9</b> Závislost RSSI na vysílacím výkonu (poloha A) .....	29
<b>4.10</b> Závislost RSSI na vzdálenosti (poloha A).....	29
<b>4.11</b> Závislost RSSI na vzdálenosti a vysílacím výkonu (poloha A) .....	30
<b>4.12</b> Počty vzorků pro dané RSSI a vzdálenost (poloha A) .....	31
<b>4.13</b> Distribuční funkce naměřených dat (poloha A) .....	31
<b>4.14</b> Distribuční funkce normálního rozdělení (poloha A).....	32

<b>A.1</b>	Hustoty pravděpodobnosti naměřených dat (poloha A) ...	43
<b>A.2</b>	Hustoty pravděpodobnosti normálního rozdělení (poloha A) .....	43
<b>B.3</b>	Závislost RSSI na vysílacím výkonu (poloha B) .....	44
<b>B.4</b>	Závislost RSSI na vzdálenosti (poloha B) .....	45
<b>B.5</b>	Závislost RSSI na vzdálenosti a vysílacím výkonu (poloha B) .	46
<b>B.6</b>	Počty vzorků pro dané RSSI a vzdálenost (poloha B) .....	46
<b>B.7</b>	Distribuční funkce naměřených dat (poloha B) .....	47
<b>B.8</b>	Hustoty pravděpodobnosti naměřených dat (poloha B)....	47
<b>B.9</b>	Distribuční funkce normálního rozdělení (poloha B) .....	48
<b>B.10</b>	Hustoty pravděpodobnosti normálního rozdělení (poloha B) .....	48
<b>C.11</b>	Závislost RSSI na vysílacím výkonu (poloha C) .....	49
<b>C.12</b>	Závislost RSSI na vzdálenosti (poloha C) .....	50
<b>C.13</b>	Závislost RSSI na vzdálenosti a vysílacím výkonu (poloha C) .....	51
<b>C.14</b>	Počty vzorků pro dané RSSI a vzdálenost (poloha C) .....	51
<b>C.15</b>	Distribuční funkce naměřených dat (poloha C) .....	52
<b>C.16</b>	Hustoty pravděpodobnosti naměřených dat (poloha C)....	52
<b>C.17</b>	Distribuční funkce normálního rozdělení (poloha C) .....	53
<b>C.18</b>	Hustoty pravděpodobnosti normálního rozdělení (poloha C) .....	53
<b>D.19</b>	Procesní diagram fungování jednotky závodníka .....	54
<b>D.20</b>	Procesní diagram zpracování typu přijaté kontroly .....	55
<b>D.21</b>	Procesní diagram fungování kontroly .....	56



# Kapitola 1

## Úvod

Elektronické systémy pro záznam času a průchodu kontrolou mají v orientačních sportech z dnešního pohledu již dlouhou historii. Původně používané systémy byly mechanické, kdy závodník musel kleštičkami procvaknout záznamovou kartičku na každé kontrole a čas byl měřen na stopkách. Tento systém byl ovšem velmi nepraktický, protože pořadatelé museli po každém závodě zkontrolovat každou kartičku a každé oražení, aby zjistili, zda daný závodník navštívil všechny kontroly. Jak šel ovšem vývoj elektroniky kupředu, stávala se dostupnější i pro použití ve sportu a tak začaly v 90. letech minulého století vznikat první elektronické systémy. Ty byly postaveny na technologii RFID, kdy závodník si nesl svůj RFID tag a když přiběhl na kontrolu, přiložil jej k RFID čtečce, jenž mu do něj zapsala ID a čas kontroly. V cíli pak místo kontrolování průkazky stačilo informace z tagu vyčíst a závodník ihned věděl, jestli proběhl trať správně. Tyto systémy měly i další velkou výhodu – zpětně poskytují informaci o čase pohybu mezi jednotlivými kontrolami. Závodník tak jednoduše může zjistit, kde udělal chybu a jak velkou a porovnat se se soupeři. Tyto systémy se postupně zdokonalovaly a byly běžné na závodech všech úrovní až do druhé dekády tohoto století. Jak šel vývoj dál, začaly je postupně nahrazovat systémy využívající rádiový přenos na větší vzdálenost. Informace o čase a kontrole se tak přenesou na vzdálenost i několika metrů a závodník u kontroly vůbec nemusí zastavovat. To je výhodné zejména u štafetových a obecně hromadných závodů, kdy na kontrolu mohou přiběhnout i desítky závodníků. Jak již bylo zmíněno, tyto systémy umožňují informaci o ID a čase průchodu závodníka zaznamenat do čipu v terénu a zpětně se vyčítá až v cíli v centru závodů. Z hlediska atraktivity se ovšem velmi vybízí tyto informace odesílat z terénu do centra závodů již v době ražení a sledovat pohyb závodníka a jeho průběžné umístění živě. V současnosti toto umí pouze několik ojedinělých komerčně dostupných systémů, které mají často velké rozměry, cenu a lze je použít pouze na několika kontrolách.

Cílem této práce je tedy vytvořit systém umožňující nejen bezdrátovou komunikaci mezi kontrolou a závodníkem, ale i přenos dat mezi kontrolou a centrem závodů. Práce se bude zabývat nejprve definováním požadavků pro tyto systémy, následně porovnáním použitelných technologií pro obě komunikace a volbou nejvýhodnější z nich. Také budou zvoleny součástky a vývojové kity pro ověření funkčnosti technologie právě pro dané použití. Následně bude definován způsob přenosu a strukturování dat pro komunikaci mezi kontrolou a závodníkem, vytvořen experimentální firmware pro obě zařízení, jenž bude komunikaci realizovat a jeho vlastnosti budou otestovány.

# Kapitola 2

## Teoretický úvod a volba technologie

### 2.1 Orientační sporty

Orientační sporty je jednotné označení sportů spojujících schopnost orientace v neznámém terénu za použití mapy a busoly. Dle fyzického způsobu pohybu v terénu se dělí na orientační běh (OB), lyžařský orientační běh (LOB), orientační jízdu na horských kolech (MTBO) a přesnou orientaci (Trail-O). Při standardním závodě závodník na startu dostane mapu, na níž má vyznačenou řadu kontrolních stanovišť (kontrol), jimiž musí v přesně daném pořadí projít. Na obrázku 2.1 je příklad mapy pro lyžařský orientační běh.

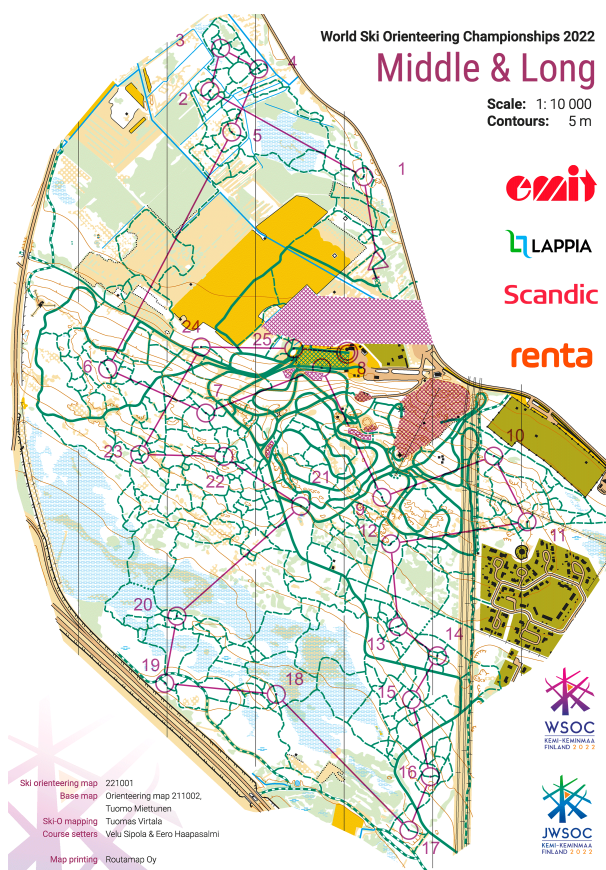
K ověření, že závodník kontrolou prošel, se v dnešní době využívají rádiové systémy založené zejména na technologii RFID nebo proprietární short-range radio (SRR) systémy ve volném (ISM) pásmu 2,4 GHz. Současné systémy pro záznam průchodu závodníka kontrolou se skládají ze dvou částí – jednotky nesené závodníkem (ve slangu orientačních běžců označováno jako „čip“) a stanic umístěných na kontrolách (označováno jako „krabička“). Při průběhu závodníka kolem kontroly proběhne mezi stanicí na kontrole a jednotkou nesenou závodníkem výměna požadovaných informací. Standardně ve směru *závodník* → *kontrola* je to ID závodníka a ve směru *kontrola* → *závodník* ID kontroly a aktuální čas. Po doběhu závodníka do cíle se z paměti závodníkovy jednotky vyčtou záznamy o kontrolách, jež závodník našel a jejichž data se zapsala do paměti jeho čipu. V případě, že ID jednotlivých kontrol nejsou ve správném pořadí, tedy závodník neabsolvoval kontroly na trati ve správném pořadí, nebo závodník kontrolu vynechal a ID v paměti chybí, je závodník diskvalifikován.

### 2.2 Stávající systémy pro záznam průchodu kontrolami

V současnosti existují na světě jednotky systémů pro záznam průchodu kontrolami. Nejvýznamnějšími jsou následující dva – od norské firmy Emit [2], využívaný ve Finsku a částečně v Norsku a od německé firmy SPORTident [3], používaný ve zbytku světa. Tyto dva systémy se používají na všech mezinárodních akcích (závody Světového poháru, Mistrovství Evropy a Mistrovství světa) a v celém – z pohledu orientačních sportů – rozvinutém světě. Ostatní systémy jsou používány pouze lokálně a pro tréninkové účely.

Výměna informací mezi závodníkem a kontrolou (běžně nazývané jako ražení kontroly) se dá rozdělit na dva způsoby – kontaktní a bezkontaktní. Kontaktní ražení znamená, že závodník se svou jednotkou musí dotknout kontroly na přesně určeném místě, neboť použitá technologie umožňuje komunikaci na vzdálenost maximálně několika centimetrů. V tomto případě se nejčastěji používá technologie RFID, kdy u systémů od firmy SPORTident tvoří kontrolu čtecí zařízení (na obrázku 2.2) a závodníkovu jednotku pasivní RFID čip. U systému od firmy Emit pak pasivní čip obsahuje kontrola





**Obrázek 2.1.** Mapa pro lyžařský orientační běh. Převzato z [1].

a čtecí zařízení závodnickova jednotka. Výhodou tohoto principu je nízká spotřeba kontroly, malé rozměry a nulová spotřeba závodnickovy jednotky (a tím i odpadá nutnost dobíjení či výměny baterie). Nevýhodou je pak nízký dosah komunikace a vysoká latence komunikace. Závodník se proto musí u kontroly zastavit a dotknout se jí (proto kontaktní), což například při sprintech (vysoká rychlost závodníka) a štafetách (velký počet závodníků) může ovlivnit rozhodnutí závodníka při volbě postupu, či dokonce snižovat regulérnost závodu. V LOB a MTBO kvůli často vysoké rychlosti závodníků mohou u kontrol vznikat velmi nebezpečné situace, kdy jeden závodník u kontroly stojí a razí a tím zablokuje cestu jinému závodníkovi, jenž se s ním může srazit.

Bezkontaktní způsob ražení znamená, že komunikace mezi kontrolou a jednotkou závodníka probíhá na vzdálenost několika centimetrů až metrů. Závodnickova jednotka i kontrola se skládají z transceiveru umožňujícího komunikaci pro danou vzdálenost. Oba nejvýznamnější výrobci používají proprietární SRR technologie v ISM pásmu 2,4 GHz. Velkou výhodou je, že komunikace probíhá na větší vzdálenost, což umožňuje kolem kontroly plynule proběhnout, či projet. Nevýhodou je ovšem násobně větší spotřeba energie, u závodnickovy jednotky pak přítomnost baterie a tím i větší velikost, hmotnost a nutnost ji každé přibližně 2 roky měnit.

Nejnovější systémy mají technologie pro bezkontaktní i kontaktní ražení integrované v rámci jednoho systému a umožňují tedy před závodem definovat, zda budou kontroly a závodnické jednotky umožňovat ražení bezkontaktní, či pouze kontaktní. Příklad závodnickovy jednotky pro kontaktní i bezkontaktní ražení od firmy SPORTident je uvedena na obrázku 2.3. Bezkontaktní ražení je v současnosti standardem na všech



**Obrázek 2.2.** Kontrola od firmy SPORTIdent. Převzato z [3].

závodech. Důležité je také předem určit, na jakou vzdálenost bude bráno, že závodník kontrolu orazil. V orientačním běhu je to standardně 30 centimetrů, v LOB 0,5–1 metr (max 1,5 m) a u MTBO 1–2 metry (max 3 metry). Kontaktní ražení se používalo především v minulosti (cca do let 2016–2018), poté bylo nahrazeno ražením bezkontaktním. Stále se ovšem používá na tréninkové úrovni, kde nejsou ve velké míře potřeba výhody bezkontaktních systémů a naopak je velkou výhodou energetická úspora baterie jak kontroly, tak zařízení závodníka.

Pro ztraktivnění „živých“ televizních přenosů i čistě jen možnosti sledovat závodníky v reálném čase je ovšem nutné odesílat z kontrol ID závodníků, kteří danou kontrolou prošli, do centra závodů (arény). To umožňuje v reálném čase ukazovat průběžné výsledky nejen v cíli, ale i v různých částech trati. Bohužel žádný ze systémů používaných v současnosti toto neumí.



**Obrázek 2.3.** Závodníková jednotka od společnosti SPORTIdent. Převzato z [3].

## 2.3 Požadavky na navrhovaný systém

Navrhovaný systém by měl pro možnost použití v orientačních sportech splňovat řadu parametrů a mít určité vlastnosti. Ty jsou dány zejména zkušenostmi s dosavadními systémy i obecnými předpoklady. Závodníková jednotka by měla mít výdrž baterie na jedno

nabití alespoň 3 hodiny. Standardní délka závodu je od 15 minut (sprint), až po 90 minut (klasická trať), nicméně časový limit pro absolvování závodu je dvojnásobný, proto je vyžadována výdrž minimálně 3 hodiny. Dále je požadována paměť pro uložení minimálně 50 záznamů o průchodu kontrolou (optimálně 120) – odpovídá běžnému počtu kontrol na trati, pro speciální příležitosti se hodí mít paměť větší. Jednotka musí umět opticky a akusticky závodníkovi signalizovat, že kontrolu orazil a mít případně (kapacitní) spínač pro zapnutí. Musí být voděodolná a fungovat v rozsahu teplot od  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  až po  $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Velikost jednotky musí odpovídat nutnosti nést ji po celý závod – ideálně nositelné na prstu, ale postačuje možnost nést jednotku na ruce (zápěstí) v podobě hodinek.

Výdrž	minimálně 3 hodiny
Paměť	minimálně 50, optimálně 120 záznamů o průchodu kontrolou
Velikost	nositelné na prstu, či zápěstí
I/O periferie	optická a akustická signalizace, spínač pro zapnutí
Ostatní	voděodolnost a provoz při teplotách $-30$ až $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$

**Tabulka 2.1.** Souhrn požadovaných parametrů závodníkovy jednotky.

Stanice na kontrole by měla mít výdrž minimálně 12 hodin – kontrola je do terénu běžně roznesena brzy ráno a sebrána večer. Dále by měla obsahovat paměť pro záznam až 2000 ID závodníků a opět musí umět opticky a akusticky závodníkovi signalizovat, že kontrolu orazil a opět mít případný spínač a indikaci pro zapnutí. Jako závodníková jednotka musí být voděodolná a fungovat v rozsahu teplot od  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  až po  $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Velikost by měla odpovídat nutnosti donést kontrolu „manuálně“ na dané místo v terénu, tedy do velikosti například papíru formátu A6.

Výdrž	minimálně 12 hodin
Paměť	optimálně 2000 ID závodníků
Velikost	cca formát papíru A6
I/O periferie	optická a akustická signalizace, spínač pro zapnutí
Ostatní	voděodolnost a provoz při teplotách $-30$ až $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$

**Tabulka 2.2.** Souhrn požadovaných parametrů stanice na kontrole.

Co se komunikace mezi závodníkem a kontrolou týká, měla by mít dosah řádově nižší desítky centimetrů až nižší jednotky metrů (odpovídá standardním vzdálenostem pro ražení kontrol v jednotlivých sportech, uvedeným v kapitole 2.2). Jednotky si musí vyměnit své ID, zaznamenat čas výměny s přesností na sekundy a musí si určit, jestli jsou ve vzdálenosti určené pro ražení. Doba komunikace by měla být co nejmenší – desítky milisekund, maximálně nižší stovky milisekund (určené zejména rychlostí a počtem závodníků).

Dosah	desítky centimetrů až jednotky metrů
Přenášené informace	ID, čas, informace o vzdálenosti pro ražení
Doba komunikace	desítky, maximálně nižší stovky milisekund

**Tabulka 2.3.** Souhrn požadovaných parametrů komunikace *kontrola ↔ závodník*.

Dosah	jednotky kilometrů (v drtivé většině do 6 kilometrů)
Přenášené informace	ID závodníka a čas ražení kontroly
Doba komunikace	jednotky sekund

**Tabulka 2.4.** Souhrn požadovaných parametrů komunikace *kontrola* → *centrum závodu*.

Odesílání dat do centra závodů by mělo umožňovat odeslat ID závodníka a čas průchodu kontrolou na vzdálenost 1–10 kilometrů (v drtivé většině však postačí vzdálenost do 6 kilometrů – pro závody ve sprintu cca 2 kilometry, pro závody na krátké trati cca 4 kilometry). Doba odeslání dat postačuje v řádech sekund.

## 2.4 Volba technologie pro komunikaci „kontrola ⇔ závodník“.

Z informací uvedených v předchozí kapitole tedy obecně plyne, že při výběru technologie pro komunikaci mezi kontrolou a závodníkem požadujeme malou vzdálenost, nízkou spotřebu, nízkou latenci a přenášíme velmi malý objem dat (řádově desítky bajtů). Pro tyto parametry můžeme buď vytvořit proprietární systém, nebo použít již vytvořené a definované systémy. Zde se nabízí zejména Bluetooth, Bluetooth low energy (BLE), Zigbee, Wi-Fi, či ultra wide band (UWB).

### 2.4.1 „Klasický“ Bluetooth

Bluetooth (IEEE 802.15.1) je technologie pracující v ISM pásmu 2,4 GHz a využívá rozsah frekvencí 2,402 až 2,480 GHz. Vysílaná data jsou modulována pomocí GFSK,  $\pi/4$ -QPSK nebo 8DPSK a používá 79 kanálů s rozestupem 1 MHz [4]. V současnosti patří mezi nejrozšířenější technologii pro bezdrátový přenos dat na nízkou vzdálenost (jednotky až nižší desítky metrů) v oblasti zejména spotřební elektroniky. Vysílací výkon může dosahovat až 100 mW (+20 dBm) s přenosovou rychlostí až 3 Mb/s. Pro tuto aplikaci je ovšem mnohem vhodnější technologie Bluetooth low energy. Zejména kvůli nižší spotřebě a mnohem větším možnostem z pohledu vývoje zařízení (například díky možnostem broadcastu oproti point-to-point spojení u klasického Bluetooth) [4].

### 2.4.2 Bluetooth low energy (BLE)

Bluetooth low energy využívá stejně jako jeho klasická varianta ISM pásmo 2,4 GHz a rozsah frekvencí 2,402 až 2,480 GHz. Vysílaná data jsou modulována pomocí GFSK, využívá technologii frekvenčního skákání (FHSS) se 40 kanály s rozestupem 2 MHz (standardně 3 kanály pro advertising a 37 pro přenos dat). Přenosová rychlost může být až 2 Mb/s a vysílací výkon opět 100 mW. Výhodou technologie může být advertising – periodické vysílání informace o přítomnosti zařízení – nebo received signal strength indicator (RSSI) – ukazatel výkonové úrovně přijatého signálu, umožňující například určení vzdálenosti vysílače a přijímače [4]. BLE má přesně definovanou strukturu nejen přenosu dat, ale také uchování a zobrazení dat. K tomu slouží řada různých protokolů a profilů. To umožňuje technologii použít pro řady různých zařízení a jakékoli přenášená data s velkou mírou optimalizace (například z hlediska potřebného výkonu pro přenos dat) pro danou aplikaci [5]. Výhodou je také přítomnost této technologie v dnešních počítačích a zejména mobilních telefonech. To v případě použití BLE pro komunikaci mezi závodníkem a kontrolou umožní použít právě mobilní telefon se specifickou aplikací pro komunikaci s oběma typy zařízení a například jejich správu (nastavení). To je

ovšem i velká nevýhoda technologie, neboť právě velké využívání BLE znamená i velké rušení v daných frekvenčních pásmech (obecně velké zarušení ISM pásma 2,4 GHz). V následujícím seznamu jsou vypsány nejdůležitější parametry BLE:

- Frekvenční pásmo 2,402 – 2,480 GHz (40 kanálů s rozestupem 2 MHz)
- Modulace GFSK ve spojení s FHSS
- Dosah jednotky až desítky metrů
- Přenosová rychlost až 2 Mb/s
- Vysílací výkon až 10 mW (+20 dBm)
- Rozšířeno do běžně používaných zařízení (telefony, počítače...)
- Rušení od velkého množství ostatních zařízení a celkově velké rušení v ISM pásmu 2,4 GHz

### ■ 2.4.3 Wi-Fi

Wi-Fi je protokol založený na standardu IEEE 802.11. Verze Wi-Fi jsou v podstatě vybrané části tohoto standardu. Nejnovější používaná verze protokolu (Wi-Fi 6, nebo také IEEE 802.11ax) využívá ISM pásma 2,4 a 5 GHz. Pro přenos dat používá 14 kanálů s šířkou celého pásma až 160 MHz. Využívá modulací BPSK až 1024-QAM ve spojení s OFDM, DSSS a MU-MIMO. Přenosová rychlost může dosahovat až 10 Gb/s a vysílací výkon až 30 dBm. Dosah může být až nižší stovky metrů [6–8]. Protokol se používá především pro místní připojení k síti a přístupu k internetu. Vzhledem k využívání stejného frekvenčního pásma jako Bluetooth a jeho masivnímu rozšíření je opět velkým problémem rušení. Oproti Bluetooth také neumožňuje takovou míru bezpečnosti přenosu dat [7] a má řádově větší spotřebu energie [8–9]. V následujícím seznamu jsou vypsány nejdůležitější parametry Wi-Fi:

- Frekvenční pásmo 2,4 a 5 GHz
- Modulace BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM, 1024-QAM ve spojení s OFDM, DSSS a MU-MIMO
- Dosah desítky až nižší stovky metrů
- Přenosová rychlost až 10 Gb/s (Wi-Fi 6)
- Vysílací výkon až +30 dBm
- Využíváno zejména pro místní připojení k internetu
- Rozšířeno do běžně používaných zařízení (telefony, počítače...)
- Rušení od velkého množství ostatních zařízení a celkově velké rušení v ISM pásmu 2,4 GHz

### ■ 2.4.4 Ultra wide band (UWB)

UWB (IEEE 802.15.3) využívá k přenosu velmi široké spektrum a v něm pulzně vysílá informace na krátkou vzdálenost. Pracuje ve frekvenčním rozsahu 3,1 až 10,6 GHz. Využívá 1 až 15 kanálů a šířka kanálu je 500 MHz až 7,5 GHz. Přenosová rychlost může dosahovat od 100 Mb/s až po 1,3 Gb/s pro dosah do 10 metrů, nebo může být do 1 Mb/s pro větší vzdálenosti – až do 100 m. Je využíváno modulací BPSK a QPSK při použití DS-UWB a MB-OFDM. Vysílací výkon je pak -41,3 dBm/MHz [9–11]. Velkou nevýhodou technologie je velká spotřeba oproti například BLE (srovnatelná s Wi-Fi) [9]. Oproti BLE a Wi-Fi také není tolik rozšířená, což ale (společně s využívaným rozsahem frekvencí) může být výhodou, neboť nehrozí tak velké rušení. V následujícím seznamu jsou vypsány nejdůležitější parametry UWB:



- Frekvenční pásmo 3,1 až 10,6 GHz
- Modulace BPSK, QPSK ve spojení s DS-UWB a MB-OFDM
- Dosah zpravidla do 10 metrů, lze přesně měřit vzdálenost s přesností přibližně 10 cm
- Přenosová rychlost minimálně 100 Mb/s až 1,3 Gb/s
- Vysílací výkon -41,3 dBm/MHz
- Není příliš rozšířeno do běžných zařízení
- Oproti Wi-Fi a BLE není tolik rušeno

### ■ 2.4.5 Zigbee

Zigbee je technologie založená na standardu IEEE 802.15.4, řadícího se podobně jako BLE mezi bezdrátové osobní sítě (WPAN). Pracuje v ISM pásmech 868 MHz (Evropa), 915 MHz (Amerika, Austrálie) a 2,4 GHz. Jako modulaci používá BPSK a O-QPSK s pomocí DSSS, s šířkou kanálu 2 MHz a počtem kanálů – 1 (868 MHz), 10 (915 MHz) a 16 (2,4 GHz). Přenosová rychlost může být až 250 kb/s pro vzdálenost až 100 metrů. Vysílací výkon maximálně 0 dBm. Oproti BLE má také trochu menší spotřebu při vysílání. Na rozdíl od BLE, jenž se využívá zejména ve spotřební elektronice, se Zigbee používá pro průmyslové aplikace a automatizaci (například chytré žárovky od společnosti IKEA). Má jednodušší implementaci než BLE, ovšem za cenu méně funkcionalit a není běžnou součástí telefonů a počítačů [7–9, 12]. V následujícím seznamu jsou vy-psány nejdůležitější parametry Zigbee:

- Frekvenční pásmo 868, 915 a 2400 MHz
- Modulace BPSK, O-QPSK ve spojení s DS-UWB a MB-OFDM
- Dosah až 100 metrů
- Přenosová rychlost do 250 kb/s
- Vysílací výkon do 0 dBm, velmi nízká spotřeba
- Zejména v průmyslových aplikacích a automatizaci
- Oproti Wi-Fi a BLE není součástí běžných telefonů a počítačů

### ■ 2.4.6 Proprietární systém v ISM pásmu

Proprietární systém vytvořený přímo na míru požadavků, využívající například jednoduchých modulací BPSK, či QPSK ve frekvenčních pásmech 433, 868 nebo 2400 MHz. Takový systém může být velmi robustní a jednoduchý (bez velkého množství nevyužitých a tedy zbytečných funkcionalit). Jeho největší nevýhodou bude ovšem nekompatibilita s jakýmkoli jiným zařízením, nepoužívajícím stejnou technologii a samotná náročnost vytvoření takového systému, kdy je nutné dodržet všechny normy pro vysílání v ISM pásmech.

### ■ 2.4.7 Výběr technologie

Z parametrů uvedených výše u jednotlivých technologií je zjevné, že požadované přenosové rychlosti a dosahu komunikace splňují bez problému všechny uvedené technologie. Ačkoli vzhledem k normalizované spotřebě energie na určitý vyslaný objem dat se zdá být Wi-Fi a UWB lepší než Bluetooth a Zigbee, v absolutní spotřebě (brané například na provoz modulu umožňující danou komunikaci) je řádově lepší právě Bluetooth nebo Zigbee [9]. Wi-Fi a UWB nabízejí až zbytečně vysokou přenosovou kapacitu, která by ve výsledku nebyla zdaleka využita. V porovnání Zigbee a Bluetooth je patrné, že zatímco první jmenovaný má výhodu zejména v jednoduchosti implementace technologie a trochu nižší spotřebě, druhý má výhodu v nabízených možnostech (například advertising) nebo v rozšíření technologie do telefonů, či počítačů. Za nejvhodnější

pro tuto aplikaci s ohledem na nabízené možnosti považují Bluetooth (respektive jeho nízkopříkonovou verzi BLE). Technologie umožňuje nejen propojení a realizaci komunikace *kontrola* ↔ *závodník*, ale i možnost připojit se ke kontrole nebo jednotce závodníka pomocí telefonu/počítače s příslušnou aplikací a měnit nastavení zařízení, či vyčítat informace ze zařízení. Jako druhou možnost, v případě že se ukáže, že Bluetooth není pro aplikaci vhodný, bych volil Zigbee.

## 2.5 Volba technologie pro komunikaci „kontrola ⇒ centrum závodu“

Pro výběr technologie pro odesílání dat z kontrol do centra závodů potřebujeme opět nízkou spotřebu, přenášíme malý objem dat, nicméně na velkou vzdálenost a také nepotřebujeme nízkou latenci. Zde máme opět možnost vytvoření vlastního proprietárního systému nebo se nabízí využít mobilních sítí, či v dnešní době rychle se rozrůstajících IoT sítí / LPWAN (zejména LoRa, Sigfox nebo NB-IoT).

### 2.5.1 Mobilní (celulární) síť

Mobilní sítě jsou postavené na koncepci řady vysílačů, pokrývajících vysílaným signálem o různých frekvencích určitou oblast (buňky). Umožňují poskytovat připojení téměř kdekoli (z pohledu ČR). Parametry sítě odpovídají její generaci – novější mají větší přenosové kapacity, požívají pokročilejší modulace ovšem často nedosahují takového pokrytí, jako generace starší. Pro porovnání jsou uvedeny klíčové parametry vybraných generací a standardů (pouze digitální) [13–16]:

- 2G, GSM – frekvenční pásma 850, 900, 1800 a 1900 MHz, přenosová rychlost 9,6 kb/s
- 2,5G, GPRS – frekvenční pásma stejné jako GSM, přenosová rychlost 56–115 kb/s
- 2,75G, EDGE – frekvenční pásma stejné jako GSM, přenosová rychlost 384 kb/s
- 3G, UMTS – frekvenční pásma 850, 900, 1900, 2100, přenosová rychlost až 7,2 Mb/s
- 3,95G, LTE – frekvenční pásma 450 až 3700 MHz (dohromady 11 pásem) s přenosovou rychlostí až 300 Mb/s
- 4G, LTE Advance – frekvenční pásma stejná jako LTE, přenosová rychlost až 1 Gb/s
- 5G, NR – frekvenční pásma 410 až 7125 MHz a 24,25 až 71 GHz, přenosová rychlost až 20 Gb/s

Z uvedených informací je patrné, že pro tuto aplikaci by postačovaly přenosové kapacity sítí druhé generace. Výhodou těchto sítí je, že uživatel se nemusí vůbec starat o infrastrukturu sítě – stará se pouze o vlastní přijímač/vysílač. Další výhodou je velké pokrytí (v ČR patrně například ze simulace [17]), které dosahuje téměř celého území. Nevýhodou je ovšem skutečnost, že pokud při přípravě závodu pořadatel zjistí, že části prostoru závodu nejsou pokryty mobilním signálem, pak s tím prakticky nelze nic dělat a z kontrol v oblasti bez signálu nebudou přenášena požadovaná data. Jediným řešením je v tu chvíli pokrýt oblast signálem z mobilní BTS, což je ovšem reálné pouze při závodech nejvyšší úrovně (Mistrovství světa, Evropy, Světový pohár). Další nevýhodou je zpoplatnění poskytovaných služeb a nutná přítomnost SIM karty v každém zařízení. V následujícím seznamu jsou vypsány nejdůležitější parametry mobilních sítí:

- široký rozsah poskytovaných kapacit sítě – 9,6 kb/s až 20 Gb/s
- velké pokrytí (v ČR)
- použití licencovaných pásem – služba je placená a není možné (či spíše reálné) dodatečně pokrýt signálem nepokrytou oblast
- není nutné se starat o infrastrukturu, stačí mít pouze zařízení s přístupem do sítě

### 2.5.2 LoRa

LoRa (long range) je technologie, umožňující přenos velmi malého objemu dat na větší vzdálenosti za použití malého množství energie. Samotná LoRa se stará o fyzickou vrstvu přenosu, LoRaWAN se pak stará o protokol komunikace. K přenosu je používáno ISM pásmo 433 (Evropa), 868 (Evropa) a 915 MHz (Amerika) [18]. Dosah může být až 15 km, za použití technologie CSS, kdy faktor šíření (SF) je proměnný a umožňuje měnit přenosovou rychlost (980 b/s až 21,9 kb/s), šířku pásma (125 nebo 500 kHz) a maximální velikost přenesených dat v jednom paketu (11 až 242 B) [19]. Oproti mobilním sítím má mnohem menší spotřebu a použitím ISM pásma dává možnost levného provozu. Pro připojení zařízení lze využít různých komerčních služeb, či amatérských (a bezplatných), které často omezují počet připojených zařízení a přenesených zpráv za určitý časový úsek. Jedním z takových je například The Things Network [20]. V případě, že jsou závody pořádány v oblasti, která není pokryta signálem, lze v daném místě postavit malou a přenosnou gateway (bránu) pro přístup do sítě. Pokud je tato gateway vybavena připojením k internetu (například pomocí mobilní sítě), lze dodatečně a dočasně pokrýt požadovanou oblast [21–22]. V následujícím seznamu jsou vypsány nejdůležitější parametry LoRa [18–19, 21–24]:

- nízká spotřeba oproti mobilním sítím
- dosah až 15 km, přenosová rychlost až 21,9 kb/s, doba komunikace až desítky sekund – vše závislé na nastavení SF
- použití ISM pásma 433, 868 a 915 MHz – využití zdarma nebo v rámci různých komerčních služeb
- v případě chybějícího a nedostatečného pokrytí možné pokrýt dodatečně

### 2.5.3 Sigfox

Sigfox je technologie velmi podobná LoRa. Umožňuje přenášet velmi malý objem dat na velkou vzdálenost (až 50 km v otevřené krajině) při velmi malé spotřebě energie. Využívá ISM pásmo 868 MHz. Technologie je vlastněna stejnojmennou společností, která poskytuje všechny služby. Velkou nevýhodou je jednak více omezený počet přenesených dat a především – nízká plocha pokrytí a nemožnost oblast bez signálu pokrýt svépomocí [15, 25]. Například Skandinávie pomocí Sigfox není téměř pokryta a společnost poskytující Sigfox v ČR systém vypíná [26–27]. To dělá technologii pro tuto aplikaci v podstatě nepoužitelnou. V následujícím seznamu jsou vypsány nejdůležitější parametry Sigfox:

- nízká spotřeba, velký dosah (až 50 km), velmi malý objem přenášených dat (jednotky bajtů)
- použití ISM pásma 868 MHz
- veškerý přenos je placený
- v současnosti nízké pokrytí Skandinávie a vypínání v ČR – technologie je nepoužitelná

### 2.5.4 NB-IoT

Narrowband IoT je technologie, využívají k přenosu informací úzké pásmo (180 kHz) v pásmu 900 MHz. Je definována jako LPWAN využívají pásmo mobilních sítí. Může dosahovat přenosových rychlostí až stovek kb/s. Oproti LoRa má menší pokrytí, větší spotřebu a cenu provozu, ovšem naopak má nepatrně větší dosah, QoS, přenosovou rychlost a menší latenci [15, 24, 28]. V následujícím seznamu jsou vypsány nejdůležitější parametry NB-IoT:



- nízká spotřeba, velký dosah, velký objem přenášených dat
- použití pásma mobilních komunikací 900 MHz
- podobné parametry jako LoRa

### ■ 2.5.5 Proprietární systém v ISM pásmu

Proprietární systém v ISM pásmu může být opět velmi dobrý způsob k vytvoření systému na míru požadavkům. Velkou výhodou je možnost pokrytí celé požadované oblasti, nezávislost na externích sítích a jejich pokrytí a nulové provozní náklady (cena za přenesená data). Nevýhody jsou pak možné rušení využívaného pásma, nutnost tvorby normy pro přenášená data a dodržení pravidel pro vysílání v ISM pásmu. Největší nevýhodou je jednoznačně nutnost vždy celou síť na místě postavit (a ideálně předem rozvrhnout umístění nutných zesilovačů signálu).

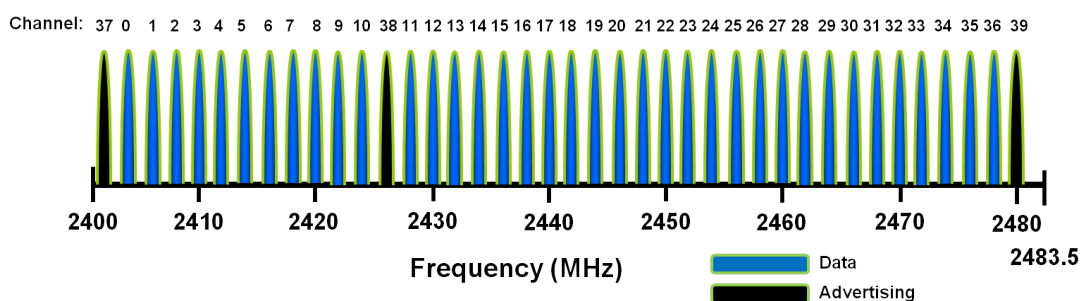
### ■ 2.5.6 Výběr technologie

Z uvedených parametrů je jasné, že technologie Sigfox je (minimálně v tuto chvíli) nepoužitelná. Naopak se vybízí použít síť LoRa, která dle přenosových kapacit přesně odpovídá požadavkům, má velké pokrytí a případnou možnost dodatečně pokrýt oblasti bez signálu pomocí vlastního zařízení (oproti NB-IoT). V případě, že by se neosvědčila (zejména z důvodu vysoké frekvence uplinku zpráv), bych použil buď mobilní síť, nebo proprietární systém v ISM pásmu – například na frekvenci 433 MHz.

# Kapitola 3

## BLE – detailní popis technologie

V celé této kapitole jsou použity informace z [5, 29–31]. Jak již bylo popsáno v úvodní kapitole 2.4.2, BLE využívá ISM pásmo 2,4 GHz a rozsah frekvencí 2,402 až 2,480 GHz. V tomto rozsahu používá 40 kanálů s rozestupem 2 MHz, viz. obrázek 3.1. Ve standardním režimu jsou kanály 0 až 36 využívány k přenosu dat a kanály 37, 38 a 39 k advertisingu (viz. kapitola 3.2.1). V případě tzv. extended advertisingu je možné pro advertising využít všechny kanály.



**Obrázek 3.1.** Alokace kanálů pro advertising (černě) a pro přenos dat (modře) u BLE. Převzato z [32].

Architektura BLE se skládá ze tří hlavních vrstev (detailněji na obrázku 3.2):

- Aplikační – vrstva samotné aplikace, definováno uživatelem
- Host – vrstva obsahující řadu protokolů a profilů zabezpečující komunikaci mezi zařízeními a strukturování, poskytování a šifrování dat
- Controller – fyzická a síťová vrstva zabezpečující samotné odeslání dat a hardware

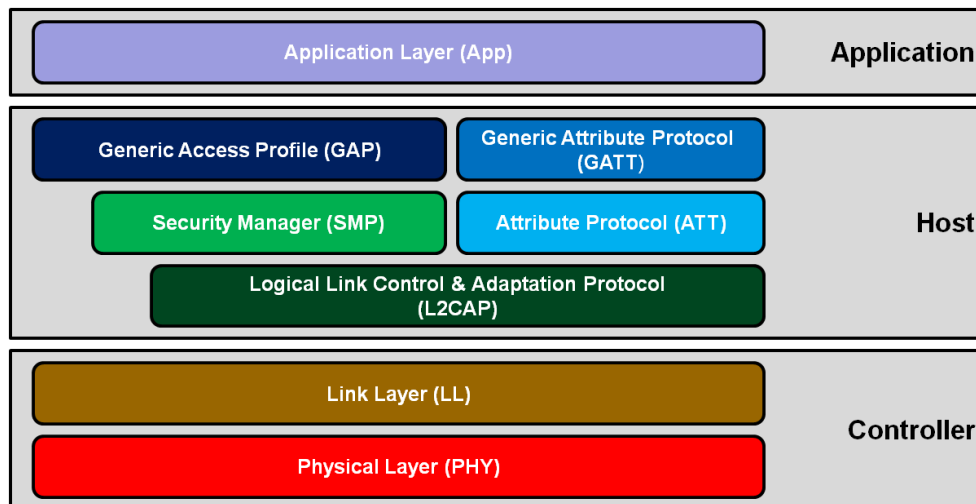
Propojení mezi vrstvou host a controller zabezpečuje Host Controller Interface (HCI).

### 3.1 Fyzická vrstva

Fyzická vrstva se stará o modulování signálu, vysílání dat na daných frekvencích a to co nejefektivněji – tedy například měří úroveň signálů v jednotlivých kanálech a podle toho data vysílá v těch nejméně zarušených.

### 3.2 Spojová vrstva

Spojová vrstva umožňuje zejména navázání spojení mezi zařízeními, přenos dat a strukturu dat v paketech.



**Obrázek 3.2.** Struktura Bluetooth low energy. Převzato z [29].

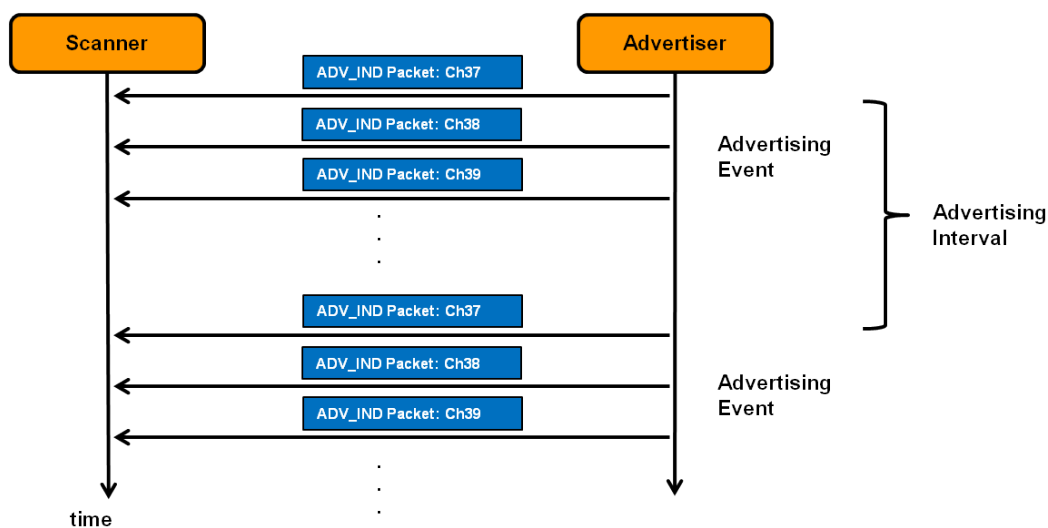
### 3.2.1 Advertising

Advertising je metoda, při níž zařízení dává ostatním zařízením na vědomí svou existenci. Standardně je to vysíláním specifického paketu dat v kanálech 37, 38, 39. Typický průběh advertisingu je na obrázku 3.3, kdy zařízení v periodických intervalech vysílá ve všech třech kanálech advertising pakety. Advertising paket může nabývat několika typů – to značí, zda-li zařízení provádějící advertising hledá jiné zařízení k propojení (párování), nebo naopak pouze oznamuje svoji přítomnost a s nikým se párovat nechce. Zároveň může paket nést určité množství uživatelem definovaných dat (až 37 bajtů – která ovšem musí být přesně strukturovaná). Ve výsledku tedy může být advertising využit jako způsob, při kterém zařízení (například sluchátka) vysílá do okolí informaci, že se může spárovat s jakýmkoli jiným zařízením a zároveň dává informaci o svém výrobci, názvu a typu dat, které poskytuje. Naproti tomu ale může být využit i k tomu, že je například senzor teploty a ten pomocí advertisingu vysílá pakety s údaji o svém názvu, poloze a teplotě. Zároveň dává informaci, že se k němu nelze připojit a ani nelze na paket odpovědět. V případě potřeby lze využít extended advertisingu, kdy zařízení provádí advertising napříč všemi 40 kanály.

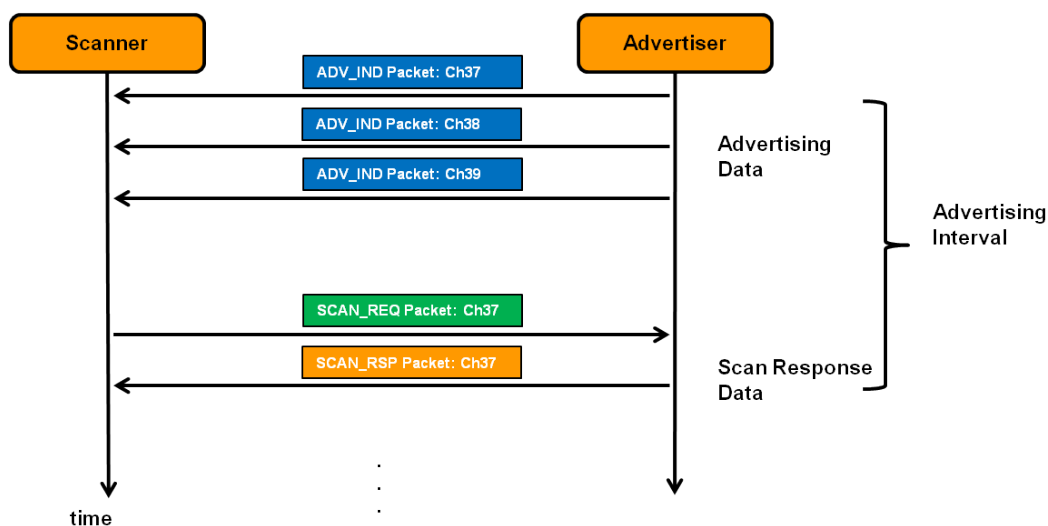
### 3.2.2 Scanning

Scanning/skenování je metoda, kdy zařízení „poslouchá“ své okolí na kanálech 37, 38 a 39 a případně odpovídá. V případě, že zařízení zachytí advertising paket, může si zobrazit jeho data (a tím například zjistit o jaké zařízení se jedná) a zároveň mu typ paketu přesně dává možnost, jak reagovat. V podstatě má tři možnosti:

- nereagovat – příklad případu v předchozí kapitole, kdy advertiser pouze vysílá data o teplotě – scanner získá informaci o teplotě v místě senzoru a nemusí tedy zpět reagovat
- vyslat CONNECT\_REQ paket – potvrzení žádosti o navázání spojení / párování
- vyslat SCAN\_REQ paket – žádost o poskytnutí dalších údajů o zařízení – na tuto žádost reaguje advertiser vysláním SCAN\_RSP paketu, jenž obsahuje další požadované informace (příklad takové komunikace je na obrázku 3.4 a nazývá se aktivní skenování)



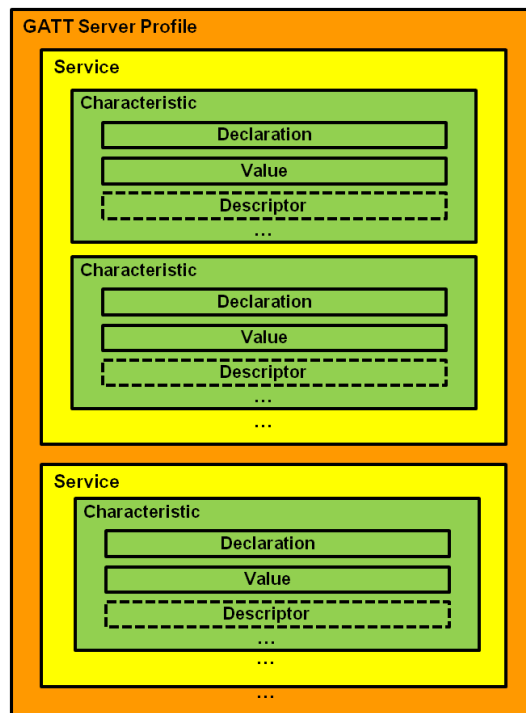
**Obrázek 3.3.** BLE Advertising. Převzato z [33].



**Obrázek 3.4.** BLE aktivní advertising. Převzato z [33].

### 3.3 Generic Attribute Profile (GATT)

GATT je jeden z hlavních profilů BLE a jeho hlavním úkolem je strukturovaně poskytovat data. Zařízení se může chovat buď jako GATT server – ten poskytuje data, nebo jako GATT klient – ten si o data žádá server na základě jejich UUID. Role zařízení se mohou v průběhu komunikace měnit a jedno zařízení může být v jeden okamžik klient i server. Ukázka strukturování dat je uvedena na obrázku 3.5. Jedno zařízení může poskytovat řadu servisů, jež může obsahovat řadu charakteristik. Například může být nositelný senzor, jež bude měřit tep a teplotu. Jeden servis bude tep, který bude obsahovat tři charakteristiky – jedna bude nést samotnou hodnotu tepu, druhá ponese informaci o poloze senzoru a třetí bude mít hodnotu stavu senzoru (přes něj se může senzor vypnout/zapnout). Druhý servis bude teplota a ta bude opět obsahovat tři charakteristiky s významy jako v předchozím případě.



**Obrázek 3.5.** BLE struktura GATT profilu. Převzato z [34].

### 3.3.1 Servis

Servis samotný má několik parametrů – „handle“, typ (UUID), hodnotu a povolení. UUID je univerzálně unikátní identifikátor, který přesně označuje typ servisu. Může být buď 16bitový nebo 128bitový. 16bitová UUID jsou přesně definovaná organizací Bluetooth SIG, jež nastavuje standard Bluetooth (jejich seznam: [35]) a 128bitová jsou privátní – uživatel si jej může zvolit sám a přiřadit jim vlastní význam. V případě servisu je přesně dané – 0x2800. Hodnota v případě servisu určuje co poskytuje – například 0x180D je UUID teplotního senzoru. Povolení pak udává, jestli je hodnotu možné číst, zapisovat, obojí nebo ani jedno.

### 3.3.2 Charakteristika

Charakteristika má 3 typy (a každý opět 4 parametry, jako v případě servisu) – deklaraci, hodnotu a popis. Deklarace má podobný význam jako u servisu – její UUID je pro všechny charakteristiky stejné (0x2803) a hodnota nese UUID značící význam charakteristiky (tedy například polohu senzoru, měření...). Hodnota nese samotnou přenášenou hodnotu – typ nese UUID o přenášené hodnotě, která je uchována v kolonce hodnota. Popis pak přináší další informace o charakteristice a nemusí být žádný, nebo jich naopak může být i několik.

Údaje o servisech a charakteristikách mohou být i součástí advertising paketu (zpravidla se omezuje pouze na UUID o servisech), takže skenující zařízení může okamžitě rozpoznat, co dané zařízení nabízí. Ovšem čtení jejich hodnot a rozklíčování přesné struktury, jak bylo popsáno výše, je možné pouze po propojení obou zařízení a ustanovení pevného spojení. Příklad jak může vypadat struktura reálného GATT profilu i s hodnotami je uveden na obrázku 3.6.

	Handle	Type (UUID)	Value	Permissions
<b>GATT Heart Rate Service</b>				
<b>Service</b>				
Declaration	0x8000	SERVICE (0x2800)	0x180D	READ
<b>Characteristic</b>				
"Heart Rate Measurement"				
Declaration	0x8001	CHAR (0x2803)	NOT(0x8002)HRM	READ
Value	0x8002	HRM (0x2A37)	bpm	NONE
Descriptor	0x8003	CCCD (0x2902)	0x0001	READ/WRITE
<b>Characteristic</b>				
"Body Sensor Location"				
Declaration	0x8004	CHAR (0x2803)	RD(0x8005)BSL	READ
Value	0x8005	BSL (0x2A38)	0x02 (Wrist)	READ
<b>Characteristic</b>				
"Heart Rate Control Point"				
Declaration	0x8006	CHAR (0x2803)	WR(0x8007)HRC	READ
Value	0x8007	HRC (0x2A39)	0xXX	WRITE

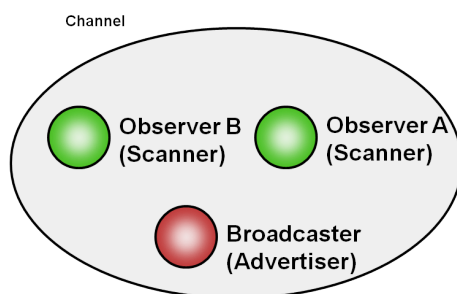
**Obrázek 3.6.** Příklad GATT profilu pro senzoru tepu. Převzato z [34].

### 3.4 Generic Access Profile (GAP)

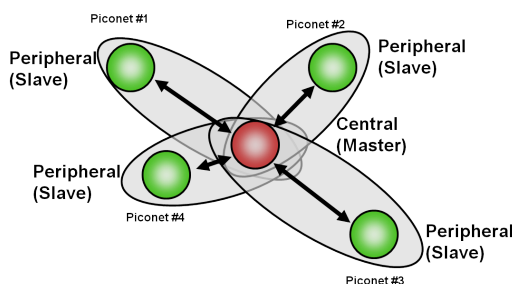
Základní systémový profil BLE. Zatímco GATT nemusí být využit, pokud bude zařízení fungovat pouze jako maják (broadcaster) a vysílat informace pouze v rámci advertising paketu – například teploměr, který periodicky vysílá aktuálně naměřenou teplotu, GAP definuje základní parametry a typ komunikace zařízení. Zejména definuje 4 režimy, ve kterých může zařízení fungovat:

- broadcaster (nebo maják) – zařízení, které pouze vysílá (například již zmiňovaný teploměr)
- observer – zařízení pouze monitorující okolí, přijímající advertising pakety – například displej zobrazující teploty z okolních teploměrů
- peripheral – zařízení, jež může jak vysílat, tak přijímat, ale neřídí komunikaci – obdoba zařízení typu „slave“.
- central – řídí komunikaci se zařízením typu „peripheral“ a může opět jak vysílat, tak přijímat data – obdoba zařízení typu „master“.

V podstatě komunikace probíhá buď v režimu broadcaster/observer (obrázek 3.7), nebo v režimu peripheral/central (obrázek 3.8). Zatímco v prvním případě se data přenáší pouze pomocí advertising paketů, ve druhém už musí pro zahájení komunikace dojít k propojení zařízení.



**Obrázek 3.7.** Princip komunikace typu broadcaster/observer. Převzato z [36].



**Obrázek 3.8.** Princip komunikace typu broadcaster/observer. Převzato z [36].

Dále GAP zavádí dva koncepty – módy a procedury. Módy jsou 4: broadcast, objevitelný, připojitelný a párovatelný. První se týká pouze zařízení typu broadcaster. Zbylé tři pak zařízení typu peripheral. Objevitelný mód určuje, je-li zařízení objevitelné, případně po jakou dobu (tedy po jakou dobu provádí advertising). V připojitelném módu zařízení určuje, zda-li je možnost se k němu připojit – je možnost určit pouze specifická zařízení, která mohou být připojena a ostatní nikoli. Poslední mód je schopnost párování. Zde zařízení určuje, jestli se centrálním zařízením spáruje a bude schopno se k němu automaticky připojit i po dočasném přerušení spojení. Různé typy objevitelného a připojitelného módu mohou probíhat ve stejný čas. Procedury jsou také 4 a týkají se pro změnu zařízení typu observer a central: pozorovatel, objevitel, připojení a párování.

Procedura pozorovatele se opět týká pouze zařízení typu observer a zbylá tři zařízení typu central. I význam těchto třech procedur je velmi podobný, jako v předchozím případě. Procedura objevitele určuje, jestli bude zařízení hledat v okolí jiná zařízení (skenovat), případně po jakou dobu. Procedura připojení určuje k jakým zařízením se bude možné připojit a procedura párování značí se kterými zařízením bude možné obnovit spojení i po výpadku.

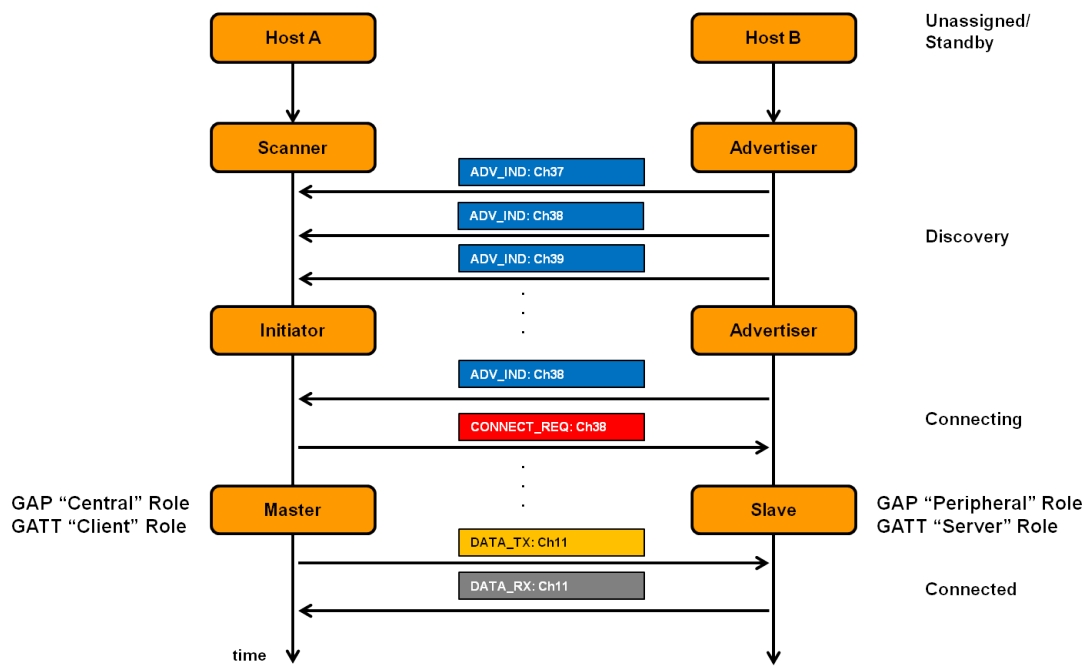
Typický průběh navázání spojení a ustanovení komunikace mezi dvěma zařízeními je na obrázku 3.9.

### 3.5 Security manager (SM)

Šifrování dat a zabezpečení přenosu obstarává specifický profil Security manager. Výměna dat ohledně šifrování a zabezpečení probíhá při párování, při kterém se také určí, jaká úroveň zabezpečení bude použita. BLE používá algoritmy CBC-MAC a 128bitový AES. Metody použité u BLE se snaží zabránit především útoky typu:

- Man-In-The-Middle (MITM), kdy je cizí zařízení schopno sledovat, upravovat a přidávat nové zprávy do komunikace mezi dvě původní zařízení. Typicky se zařízení připojí mezi ostatní, vydává se za jedno z nich a komunikuje s každým z nich
- Pasivnímu odposlouchávání komunikace ostatních zařízení

Dle možností obou zařízení se pak ustanoví zabezpečení odpovídající úrovně.



**Obrázek 3.9.** BLE průběh komunikace mezi zařízeními od advertisingu až po přenos dat. Převzato z [37].



# Kapitola 4

## Praktická realizace

### 4.1 Výrobci požadovaných technologií

Jak již bylo uvedeno v kapitolách 2.4.7 a 2.5.6, nejvhodnější pro tuto aplikaci se zdají být technologie Bluetooth low energy a LoRa, případně proprietární systém v sub-1 GHz ISM pásmu. Na světovém trhu je řada výrobců, kteří tyto technologie integrují do svých výrobků. V zásadě se lze setkat se dvěma základními přístupy. V prvním případě je technologie součástí mikrokontroléru (MCU) jako jedna z periférií. Například je v jednom pouzdře mikrokontrolér, jenž má standardní periferie typu GPIO, ADC, DAC, komunikační rozhraní například SPI, I<sup>2</sup>C, UART a k tomu navíc má bezdrátové rozhraní umožňující použít již uvedenou technologii – tedy „System on a chip“ (SoC). Periferie se běžně stará o veškerou tvorbu signálu, modulace a nastavení úrovně vysílacího výkonu a je řízena právě z mikrokontroléru. V případě realizace je pak k takovému obvodu nutné připojit pouze přizpůsobovací člen (z důvodu impedančního přizpůsobení „pinu“ mikrokontroléru a antény) a anténu, jež se standardně realizuje buď na plošném spoji poblíž pouzdra a přizpůsobovacího obvodu, nebo se připojí externí přes například SMA nebo U.FL konektor. Některé SoC mají v rámci integrovaného obvodu i samotnou anténu, nebo existují i takzvané „system in a package“ (SiP), které v jednom pouzdře mají kromě řídicího obvodu i anténu a impedanční přizpůsobení a výsledný obvod je schopen pracovat pouze sám o sobě s vnějším napájením. Celkově toto řešení často přináší velkou míru optimalizace systému, neboť řízení celého rádiového obvodu probíhá přímo v jednom čipu a často je možné provádět mnohem přesnější nastavení, než u druhého přístupu. Ovšem naopak je tento přístup velmi složitý na naprogramování a nastavení systému, neboť právě poskytuje obrovské množství možností.

V druhém případě je technologie integrována do samostatného obvodu/modulu, kdy řízení komunikace a rádiového obvodu je uskutečněno pomocí sběrnic typu UART, SPI, či I<sup>2</sup>C (a dalších). Takový modul sám o sobě nemůže fungovat. Musí být připojen právě přes zmíněné rozhraní k mikrokontroléru, počítači, či k mobilnímu telefonu a z nich je modul řízen. Modul ovšem běžně obsahuje již integrovanou anténu, či U.FL konektor a jejich impedanční přizpůsobení. Modul přináší možnost jednoduché integrace, často nižší cenu a jednodušší nastavení systému. Nevýhodou jsou pak mnohdy větší rozměry zařízení (je potřeba kromě modulu mít i obvod, jež bude komunikaci řídit), větší spotřeba a celkově horší optimalizace komunikace pro danou aplikaci, kdy je vývojář odkázán pouze na možnosti nastavení přes komunikační sběrnici.

V tabulkách 4.1, 4.2, 4.3 a 4.4 jsou uvedeni výrobci jednotlivých řad mikrokontrolérů a modulů. Jsou zde uvedeny jednotlivé řady u dané technologie (BLE, LoRa, sub-1 GHz) a odkazy na stránky výrobce. V tabulce 4.4 jsou pak uvedeny případy, kdy zařízení (mikrokontrolér) kombinuje více technologií. Firmy STMicroelectronics, Texas Instruments, Microchip, NXP, Nordic Semiconductor a U-blox patří mezi hlavní firmy vyvíjející a vyrábějící tyto technologie a řada jiných výrobců, například RadioControlli, HOPERF, či AUREL, má na jejich řadách postavené své výrobky. Za zmínku také stojí, že všechny uváděné mikrokontroléry jsou postavené na architektuře ARM,

zpravidla pak na jádrech Cortex-M0, Cortex-M0+, Cortex-M4 a Cortex-M33. Velkou předností firem STMicroelectronics, Texas Instruments a Microchip jsou rozsáhlé řady vývojových kitů, obsahujících jimi vyráběné mikrokontroléry a moduly.

výrobce	MCU	modul
STMicroelectronics [38]	STM32WBxx	STM32WBxM
Texas Instruments [39]	CC26xx, CC23xx, CC2564	
Microchip [40]	WBZ451xx	BMxx, RN4xxx, IS1678, IS18xx
NXP [41]	KW3x, QN908x	
Nordic Semicond. [42]	nRF5xxx	
Onsemi [43]	RSL1x	
Renesas [44]	DA14xx	RYZ012x1
RadioControlli [45]	RC-CC2640	
HOPERF [46]	CMT45xx	HM-BT4502, HM-BT220X
U-blox [47]	NORA, NINA, ANNA, BMD, LILY, MAYA, JODI	
Insight SiP [48]	ISP2053-AX	ISP1x07
Wireless-tag [49]		WT5x8xx

**Tabulka 4.1.** Výrobci a jednotlivé řady mikrokontrolérů a modulů obsahujících technologii Bluetooth low energy.

výrobce	MCU	modul
STMicroelectronics [50]	STM32WLxx	
Microchip [51]	ATSAMR3xJ1x	RN2483, RN2903, WLR089U0
RadioControlli [45]	RC-WLE5-868	RC-SM127x
HOPERF [46]		RFM6x, RFM9x
AUREL [52]		XTR-8LRxxx

**Tabulka 4.2.** Výrobci a jednotlivé řady mikrokontrolérů a modulů obsahujících technologii LoRa.

výrobce	MCU	modul
STMicroelectronics [53]	STM32WLxx	
Texas Instruments [54]	CC13xx, CC43xx	CC10xx, CC11xx, CC12xx
Microchip [55]	ATSAMR30x	AT86RF21xx, MRF89XAxxx
NXP [56]	OL2385	
Renesas [57]	R9A06G062GNP	RL78/G1H
RadioControlli [45]	RC-CC13xx	RC-S2LP, RC-TX/RX
HOPERF [46]		CMT2xxx, RF6x, RFMxxx
AUREL [52]		RTX-xxx

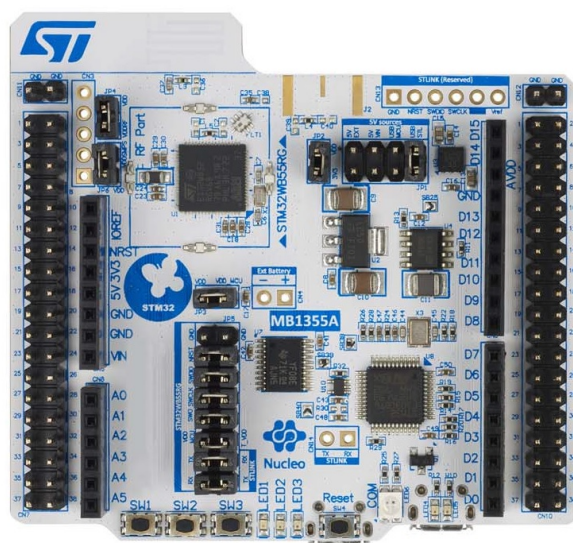
**Tabulka 4.3.** Výrobci a jednotlivé řady mikrokontrolérů a modulů obsahujících transceiver v sub-1 GHz pásmu.

výrobce	typ	řada
STMicroelectronics [50]	LoRa + sub-1 GHz MCU	STM32WLxx
Texas Instruments [54]	BLE + sub-1 GHz MCU	CC1352xx
RadioControlli [45]	BLE + sub-1 GHz MCU	RC-CC1352-xxx
RadioControlli [45]	LoRa + sub-1 GHz MCU	RC-WLE5-868
Insight SiP [58]	BLE + LoRa MCU	ISP4520-xx

**Tabulka 4.4.** Výrobci a jednotlivé řady mikrokontrolérů obsahujících kombinaci více technologií.

## 4.2 Volba MCU a testovacího kitu

Z pohledu testování dané technologie pro praktické provedení je tedy nejvýhodnější použít některou z řad výše zmíněných třech výrobců, respektive jejich vývojové kity obsahující dané řady. Nabízí se použít například řadu CC1352xx od výrobce Texas Instruments, jenž v jednom mikrokontroléru kombinuje použití BLE a sub-1 GHz technologie. Tato firma nicméně nevyrobí žádné výrobky obsahující komunikaci pomocí LoRa. Proto je mnohem lepší využít řady zbylých dvou firem – STMicroelectronics a Microchip. Oba výrobci vyrábí jak mikrokontroléry s BLE, tak s LoRa nebo sub-1 GHz. Použití všech vývojových kitů (MCU/modulů) od jednoho výrobce značně zjednoduší vývoj zařízení. První jmenovaný v rámci řady STM32WLxx vyrábí mikrokontroléry s možností komunikace jak přes LoRa, tak sub-1 GHz, což se jeví z pohledu testování jako nejvýhodnější. Proto byla pro tyto účely zvolena kombinace řad MCU STM32WBxx (viz. [38]) a STM32WLxx (viz. [50]) a jejich vývojové kity NUCLEO-WB55RG (viz. [59] a obrázek 4.1), respektive NUCLEO-WL55JC1 (viz. [60]).



**Obrázek 4.1.** Vývojový kit NUCLEO-WB55RG od firmy STMicroelectronics. Převzato z [59].

## 4.3 Parametry testovacích kitů

### 4.3.1 NUCLEO-WB55RG

Vývojový kit NUCLEO-WB55RG obsahuje kromě samotného mikrokontroléru STM32WB55RG řadu podpůrných systémů pro jeho ovládání. To je zejména řízení napájení, konektory pro připojení Arduino shieldy a ST morpho. Dále obsahuje několik LED a spínačů a stínění samotného mikrokontroléru. K němu je také připojena anténa na plošném spoji [61] a příprava na SMA konektor. Pro potřeby nahrání programu na mikrokontrolér nebo debugování je přítomen ST-LINK/V2-1 a micro-B USB konektor. STM32WB55RG je mikrokontrolér se dvěma jádry. Jádro ARM Cortex-M0+ obsluhuje běh a řízení Bluetooth a jádro ARM Cortex-M4 je plně programovatelné a stará se o samotnou aplikaci. Mikrokontrolér má 1 MB paměť typu FLASH a 256 kB paměť typu SRAM. Podporuje verzi Bluetooth 5.2 [59].

### 4.3.2 NUCLEO-WL55JC1

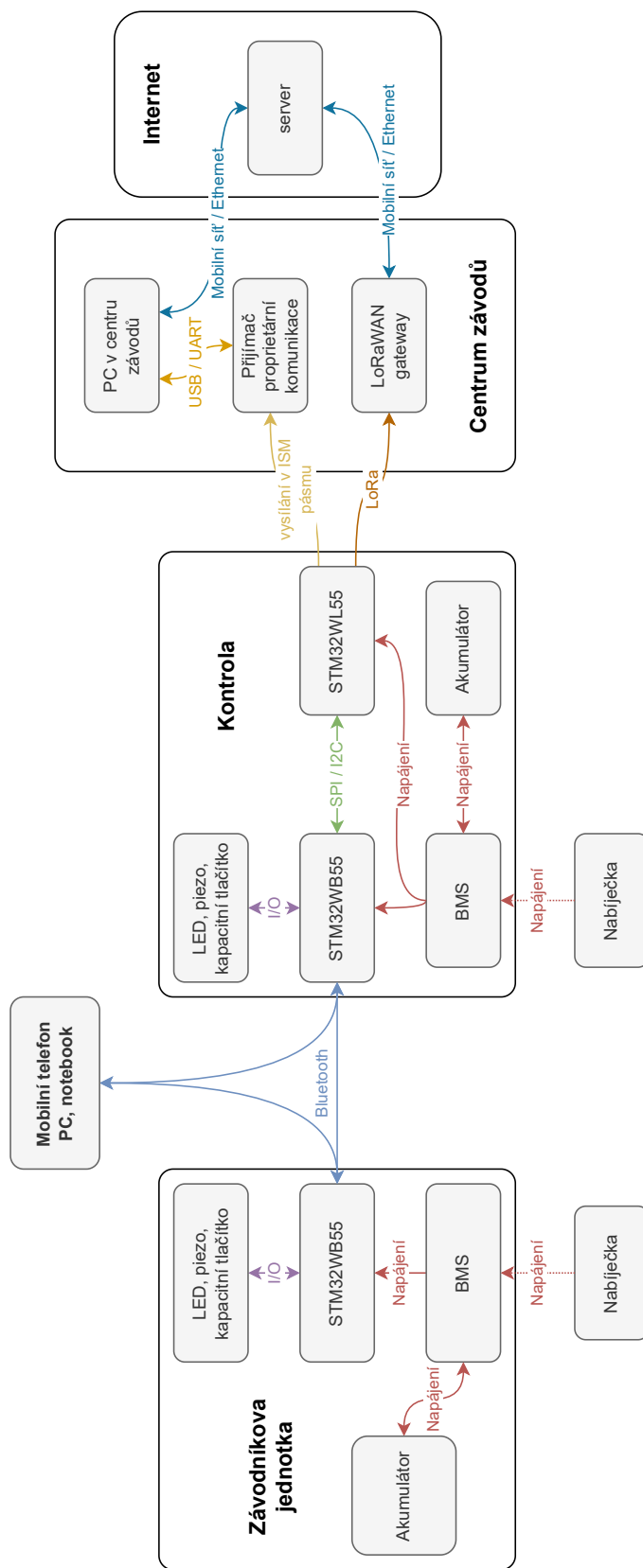
Vývojový kit NUCLEO-WL55JC1 obsahuje podobně jako Bluetooth varianta řízení napájení, konektory pro připojení Arduino shieldy a ST morpho, několik LED a spínačů a stínění samotného mikrokontroléru. Mikrokontrolér je připojen k anténě přes SMA konektor. Pro potřeby nahrání programu na mikrokontrolér nebo debugování je přítomen ST-LINK/V3 a micro-B USB konektor. STM32WL55JC1 je mikrokontrolér se dvěma jádry. Jádro ARM Cortex-M0+ obsluhuje běh a řízení rádiových obvodů a jádro ARM Cortex-M4 je plně programovatelné a stará se o samotnou aplikaci. Mikrokontrolér má 256 kB paměť typu FLASH a 64 kB paměť typu SRAM. RF transceiver umožňuje kromě LoRa vysílat na frekvencích 865 až 928 MHz při použití modulací (G)FSK, (G)MSK a BPSK [60].

## 4.4 Koncepte celého systému

Koncepte systému je uvedena na obrázku 4.2. Jádrem závodnickovy jednotky je již zmínovaný mikrokontrolér STM32WB55. K němu jsou připojeny příslušné periferie, jako LED a piezo pro indikaci ořazení kontroly, tlačítko pro nastartování mikrokontroléru z režimu spánku a battery management system pro řízení napájení a nabíjení/vybíjení akumulátoru. Dále se předpokládá, že u mikrokontroléru bude muset být krystalový oscilátor, modul RTC a samozřejmě anténa a její impedanční přizpůsobení.

Kontrola se skládá z podobných částí jako jednotka závodníka. Zde je navíc mikrokontrolér STM32WL55JC1, jenž se stará o komunikaci na dlouhou vzdálenost – přenos informací z kontroly do centra závodů. Mikrokontrolér umožňuje přenos dat buď přes LoRa nebo přes proprietární komunikaci. V prvním případě musí být kontrola připojena k LoRaWAN gateway, jež se musí nacházet někde v okolí, nebo musí být postavena dočasně v místě závodů. Data se pak dále přenáší pomocí mobilní sítě nebo technologií Ethernet na server. V druhém případě musí být v centru závodu postaven přijímač proprietární komunikace.

Zajímavým doplňkem může být využití Bluetooth k připojení se k jednotce závodníka a kontrole pomocí externího zařízení (telefonu, PC, notebooku...). To může značně usnadnit nastavování kontrol nebo umožnit vyčítání závodnickovy jednotky přímo do počítače pořadatele.



**Obrázek 4.2.** Blokové schéma kompletního systému obsahujícího kromě závodníkovy jednotky a kontroly i komunikaci s centrem závodů.

## 4.5 Vývoj programu pro závodníkovou jednotku a kontrolu

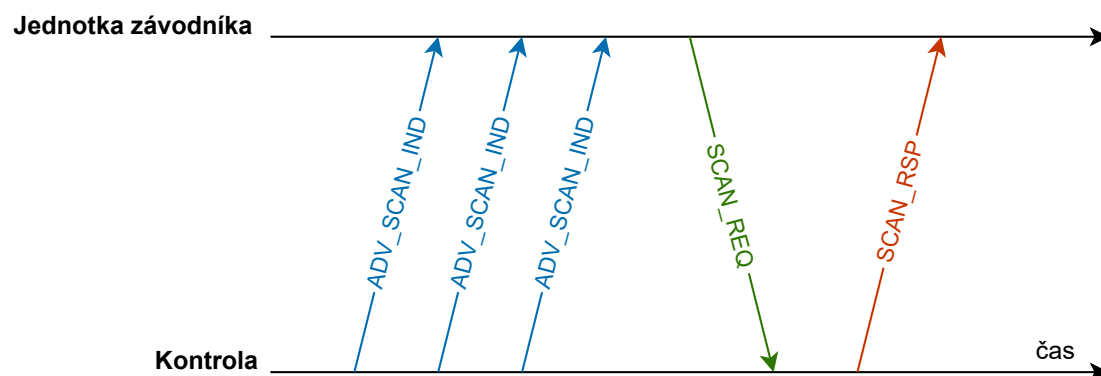
K napsání programu, nahrávání firmwaru do zmíněných zařízení a testování a měření byly využity zejména následující programy a dokumenty:

- STM32CubeMX – počáteční nastavení mikrokontroléru a periférií [62]
- STM32CubeIDE – naprogramování aplikace [63]
- STM32CubeProg – nahrání Bluetooth stack [64]
- Visual Studio Code – program pro vyčítání dat ze sériové linky při měření
- Matlab – zpracování a vizualizace změřených dat
- Dokumenty a knihy popisující nastavení a naprogramování zařízení s BLE [61, 29–31, 65–68]

## 4.6 Přenos a struktura dat komunikace „kontrola ⇔ závodník“

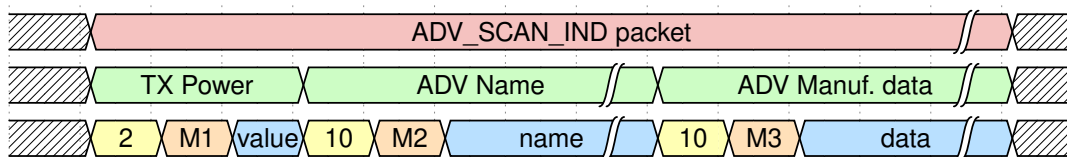
Jak již bylo uvedeno v kapitole 3, BLE umožňuje přenášet data dvěma způsoby – jednak malé množství dat pomocí advertisingu a nebo velké množství dobře strukturovaných dat po navázání spojení. Vzhledem k tomu, že potřebujeme přenést pouze ID kontroly / závodníkovy jednotky, čas a požadovanou vzdálenost ražení, nabízí se použít právě advertising. Zároveň díky možnosti tzv. aktivního skenování lze vyslat po přijetí advertising paketu (SCAN\_REQ) dotaz o více dat a vynutit od advertiseru další informace (SCAN\_RSP).

Na obrázku 4.3 je ilustrován způsob komunikace mezi zařízeními. Kontrola periodicky vysílá ADV\_SCAN\_IND pakety. Perioda vysílání je nastavitelná a může dosahovat až 20 ms [30]. Zároveň ADV\_SCAN\_IND paket umožňuje vyvolat odpověď pouze od SCAN\_REQ paketu a neumožňuje se k zařízení připojit (tedy kontrola nevyvolá a ani nepřijme CONNECT\_REQ paket). V případě, že tento paket zachytí závodníková jednotka, data zpracuje a automaticky vyšle SCAN\_REQ paket. U něj nelze nijak nastavit vysílaný obsah – je přesně daný a obsahuje adresu zařízení a typ paketu. Jakmile kontrola tento paket přijme, zpracuje jeho data a vyšle odpověď v podobě SCAN\_RSP paketu.



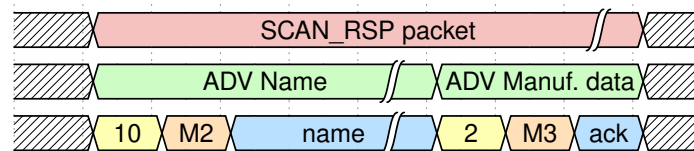
**Obrázek 4.3.** Komunikace a použité typy paketů mezi kontrolou a jednotkou závodníka.

Použitá struktura ADV\_SCAN\_IND paketu je uvedena na obrázku 4.4. Maximální velikost je přesně daná – 25 bajtů. Strukturování také – různé typy dat jsou rozřazeny do jednotlivých bloků (na obrázku zeleně). V rámci každého bloku je první bajt (žlutě) vyhrazen pro počet následujících bajtů v bloku a následující bajt je vyhrazen pro typ vysílaných dat (oranžově). Typy vysílaných dat a jejich označení jsou přesně stanoveny a jiné kódy nelze použít (viz. [35]). Třetí a další bajty (modře) jsou již využity k samotnému přenášení dat. V tomto případě jsou využity tři bloky – TX Power k přenesení hodnoty vysílacího výkonu kontroly (1 bajt), ADV Name k přenesení názvu kontroly (9 bajtů) a ADV Manufacturer data k přenesení času a požadované vzdálenosti/RSSI (9 bajtů).



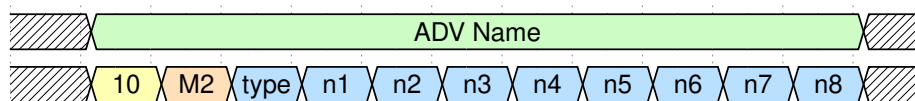
**Obrázek 4.4.** Strukturu ADV\_SCAN\_IND paketu, využívaného k odeslání informací o kontrole.

Struktura odpovědi SCAN\_RSP je znázorněna na obrázku 4.5. Blok ADV Name se shoduje s předchozím popisovaným paketem a blok ADV Manufacturer data nyní obsahuje pouze jeden bajt potvrzení pro závodníkovu jednotku.



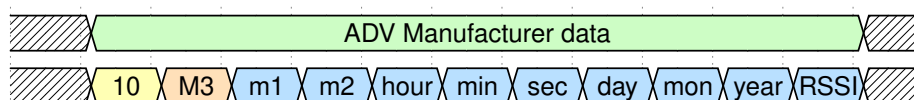
**Obrázek 4.5.** Strukturu SCAN\_RSP paketu, využívaného k odeslání potvrzení.

Přesná struktura dat v blocích ADV Name a ADV Manufacturer data je zobrazena na obrázcích 4.6 a 4.7. U názvu je první bajt vyhrazen pro typ kontroly a zbylých osm pro univerzální kód (nicméně v případě potřeby je možné jim uložit i jiný význam). V druhém bloku jsou data strukturována následně – první dva bajty jsou standardně vyhrazeny pro univerzální kód výrobce (v tomto případě 0x30 a 0x00 pro STMicroelectronics). Dalších šest bajtů je vyhrazeno pro hodinu, minutu, sekundu, den, měsíc a zjednodušený rok (místo 2023 bude vysláno pouze 23). Poslední bajt patří mezi vůbec nejdůležitější – je určen k přenosu požadovaného RSSI a na základě jeho hodnoty lze určit, zda-li je kontrola v dosahu a může razit nebo ne.



**Obrázek 4.6.** Detailní struktura názvu kontroly v ADV\_SCAN\_IND a SCAN\_RSP paketu.





**Obrázek 4.7.** Detailní struktura dat z kontroly v ADV\_SCAN\_IND paketu.

Ačkoli jsou data přenesena, je potřeba je na obou stranách zpracovat a vyhodnotit. Procesní diagramy tohoto zpracování jsou uvedeny v příloze D. Na straně závodníka je tento proces popsán na obrázku D.19 a detailněji pak část s vyhodnocením SCAN\_RSP paketu na obrázku D.20. Na obrázku D.21 je procesní diagram zpracování dat na straně kontroly. Na straně závodníka, kde dochází ke skenování, se musí nejprve ověřit, zda-li pochází přijatý paket z kontroly (což lze rozpoznat ze struktury přijatých dat), následně určit typ paketu, data zpracovat a především – určit vzdálenost zařízení. Jak již bylo popsáno v kapitole 2.2, ražení probíhá do určité vzdálenosti od kontroly a tuto vzdálenost je nutné co nejpřesněji změřit. Další důležitý úkon je provedení příslušného procesu dle typu kontroly (první bajt v bloku názvu kontroly). Ten určuje, zda-li daná kontrola má účel například vymazat paměť určenou pro zápis záznamů o ražení kontroly, ukončit zápis do paměti, nebo se chová jako „běžná“ kontrola. Tento proces je vykonán pouze po zpětném potvrzení od kontroly – jistota, že obě zařízení vyhodnotila, že jsou ve vhodné vzdálenosti. Důležité je také vypnutí skenování po dobu několika sekund od ražení kontroly, z důvodu nechtěného opakovaného ražení. Na straně kontroly pak probíhá pouze advertising, v případě přijetí SCAN\_REQ paketu se určí vzdálenost zařízení, nastaví odpovídající odpověď do SCAN\_RSP paketu a odešle. Zde může být prostor pro případné přeposlání dat do centra závodů.

## 4.7 Stanovení vzdálenosti zařízení při komunikaci „kontrola ↔ závodník“

Pro stanovení vzdálenosti zařízení mohou být použity dva způsoby – buď z doby přenosu paketu mezi vysílačem a přijímačem a nebo z útlumu signálu po přenesení dat [69]. Druhá možnost se u BLE velmi vybízí, neboť HCI poskytuje u každého přijatého paketu změření jeho RSSI, tedy indikátoru výkonové úrovně tohoto signálu. Přijímač BLE v modulu STM32WB55xx dle [59] má citlivost -96 dBm, přesnost odhadu přijatého výkonu je  $\pm 6$  dB. Vývojový kit má pak anténu na plošném spoji se ziskem 1,95 dBi [61]. Zároveň je známý vysílací výkon, neboť ten lze na vysílači (kontrola) nastavit v rozsahu od -40 dBm do +6 dBm. Přesné úrovně vysílacího výkonu jsou stanoveny v páté kapitole dokumentu popisujícího HCI [65]. Samotný útlum signálu šířícího se volným prostorem lze určit pomocí následujícího vztahu [70]:

$$FSL = \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2, \quad (1)$$

kde  $d$  je vzdálenost vysílače a přijímače,  $\lambda$  značí vlnovou délku vysílaného signálu a  $FSL$  je výsledná hodnota útlumu. Praktičtěji v decibelech lze tento vztah přepsat jako:

$$FSL^{[dB]} = 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right). \quad (2)$$

Výsledná hodnota ovšem k uspokojivému výsledku příliš nedostačuje, neboť udává pouze relativní útlum signálu, zatímco pro přesné stanovení hodnoty, jež bude možné



porovnat se změřenou hodnotou RSSI, je třeba znát absolutní hodnotu signálu. K tomu může být nápomocen Friisův vztah [70]:

$$P_R = P_T G_T G_R \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2, \quad (3)$$

kde  $P_R$  je absolutní úroveň výkonu přijatého signálu v přijímači,  $P_T$  reprezentuje úroveň výkonu, se kterým byl signál vyslán z vysílače,  $G_T$  a  $G_R$  jsou zisky antén na vysílací, respektive na přijímací straně. Zbylá část je pak již známá z rovnice (1). Převedením na decibely a dosazením vztahu pro vlnovou délku se získá následující vztah:

$$P_R^{[\text{dBm}]} = P_T^{[\text{dBm}]} + G_T^{[\text{dBi}]} + G_R^{[\text{dBi}]} + 20 \log_{10} \left( \frac{c}{4\pi d f} \right), \quad (4)$$

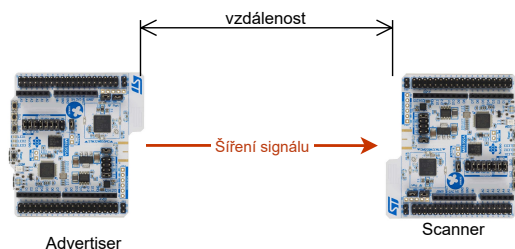
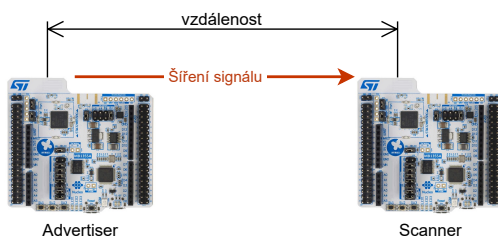
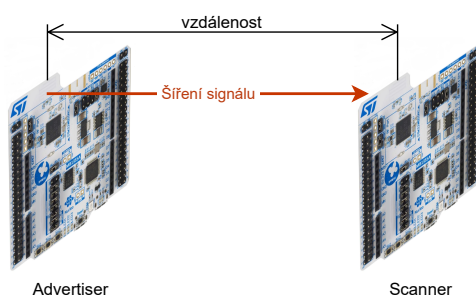
kde jsou navíc  $c$  – rychlost světla a  $f$  – frekvence vysílaného signálu. Tuto rovnici by již čistě teoreticky šlo využít, protože  $P_T^{[\text{dB}]}$  je vysílací výkon nastavovaný na kontrole,  $G_T^{[\text{dB}]}$  a  $G_R^{[\text{dB}]}$  má v případě použité antény hodnotu 1,95 dBi,  $c$  je konstantní,  $f$  odpovídá frekvenci na které vysílají kanály 37, 38 a 39 BLE advertisingu a  $d$  je vzdálenost. Ta se bude jako jediná neustále měnit a jí by měla odpovídat hodnota  $P_R^{[\text{dBm}]}$ . Tato hodnota by následně mohla sloužit jako „hranice“, kdy ozaření kontroly proběhne pouze v případě, že RSSI bude větší než ona.

Prakticky ovšem tuto hodnotu moc přesně využít nelze, neboť jsou sice známy parametry antény samotné, ovšem již nejsou známy parametry vysílací a přijímací části. Zejména tedy její impedanční přizpůsobení, ztráty na vedení na plošném spoji a ovlivnění zbylými obvody a samotným plošným spojem. Také je výpočet platný především ve vzdáleném poli, tedy pro hodnoty  $d \gg \lambda$  (nebo také  $d > \frac{2D^2}{\lambda}$ ), což v tomto případě platí pro většinu vzdáleností, ale v „dotykové“ vzdálenosti už tento vztah platit nebude. Proto bylo nutné změřit reálné hodnoty RSSI pro danou vzdálenost a vysílací výkon.

Pro měření byly zvoleny 3 různé vzájemné polohy vysílače (advertiseru a tedy kontroly) a přijímače (skeneru a tedy jednotky závodníka). Jsou vyobrazené na obrázku 4.8 a označené jako A, B a C. Zatímco polohy B a C jsou zvoleny tak, že antény vývojových kitů jsou vzájemně orientovány v maximech svých vyzařovacích diagramů a se stejnou polarizací, poloha A odpovídá orientaci minim vyzařovacích diagramů antén vůči sobě. Pro každou polohu byly změřeny hodnoty ve vzdálenostech od téměř 0 centimetrů, až po 10 metrů (8 metrů v případě polohy A). V každé této vzdálenosti bylo změřeno celkem 100 hodnot pro všechny vysílací výkony kromě dvou nejnižších a v případě vysílacího výkonu 0 dBm bylo změřeno hodnot 1000. Zvolení tohoto počtu měření je dobrým kompromisem mezi přesností statistického zpracování dat a celkovou dobou měření, která se pro jednu polohu pohybovala okolo 8 hodin.

Z naměřených dat vyplynuly nejlepší (nejnižší a rovnoměrné pro celý měřený rozsah vzdálenosti) hodnoty překvapivě pro polohu A. To může být dáno jednak již zmiňovanými důvody jako špatné impedanční přizpůsobení, ztrátami na vedení na plošném spoji, ovlivnění zbylými obvody a samotným plošným spojem, ale také okolním rušením, neboť měření probíhalo venku v otevřeném prostoru a nikoli v místnosti stíněné proti rušivému okolnímu elektromagnetickému záření. Ve zbytku práce jsou zobrazeny a zpracována data a grafy z měření právě v této poloze. Zbylá data jsou vizualizována v přílohách A, B a C.

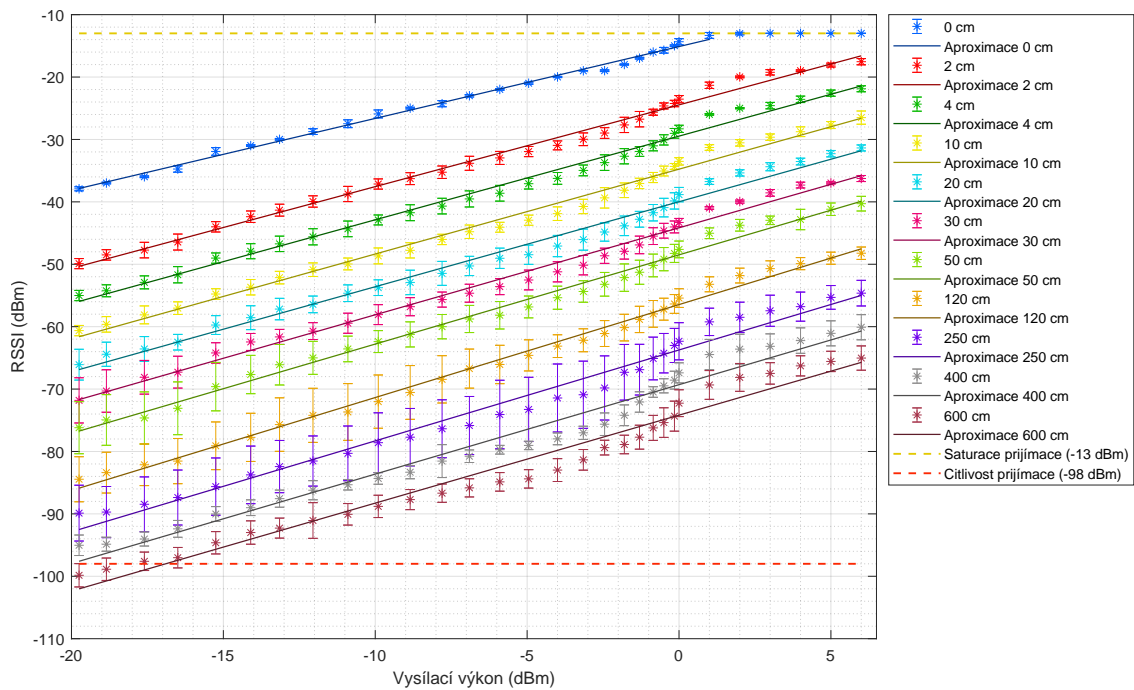
Na obrázku 4.9 je graf vybraných závislostí RSSI (z důvodu přehlednosti) na vysílacím výkonu pro jednotlivé vzdálenosti. Ze změřených dat byla vypočítána střední hodnota a směrodatná odchylka a vynesena do grafu. Následně jsou střední hodnoty pro jednotlivé vzdálenosti proloženy přímkou. Zároveň je zobrazena citlivost přijímače

**Měření v poloze A****Měření v poloze B****Měření v poloze C****Obrázek 4.8.** Polohy kontroly a jednotky závodníka při měření RSSI.

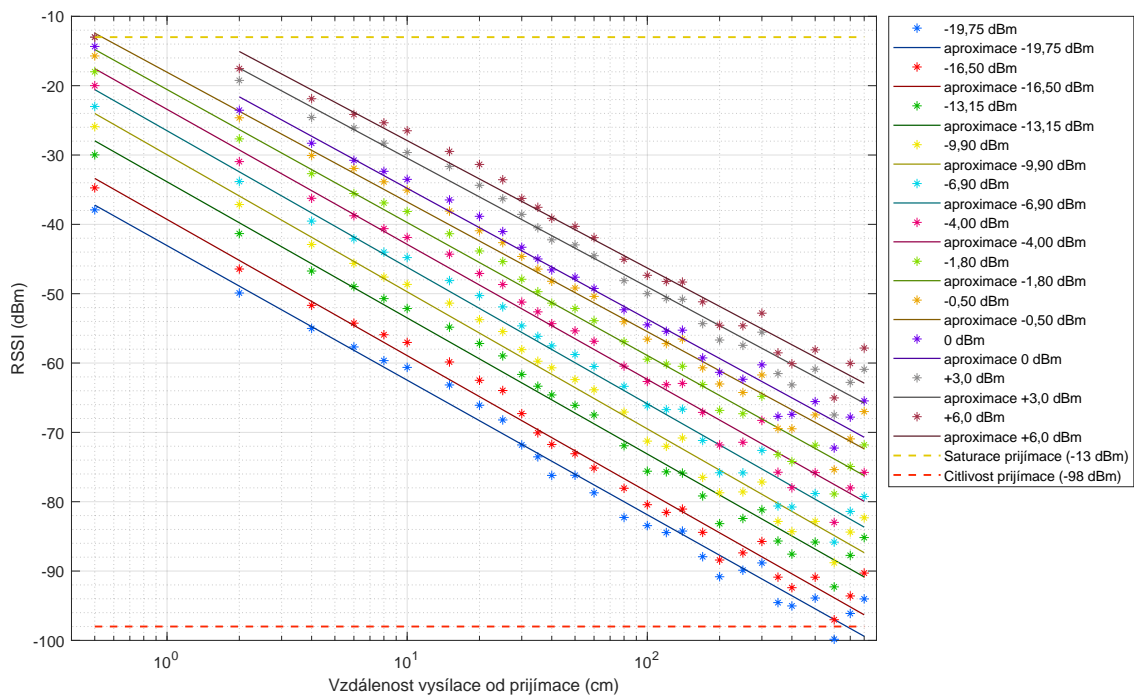
(citlivost přijímače mikrokontroléru + zisk antény) a saturace přijímače. Ta byla zjištěna jako  $-13$  dBm a nebylo možné dosáhnout vyšší hodnoty i přes zvyšování výkonu vysílače.

Závislost RSSI na vzdálenosti (v logaritmické ose) je pak vyobrazena na obrázku 4.10. Změřené hodnoty jsou opět proloženy přímkou. Z dat je patrné, že i pro největší zobrazenou vzdálenost a nejnižší vysílací výkon se hodnoty vždy vešly do rozsahu citlivosti přijímače. Závislost RSSI na obou proměnných je čistě informativně zobrazena na obrázku 4.11. Z něj je pak velmi jasně patrná logaritmická závislost RSSI na vzdálenosti, odpovídající vztahu (2) pro  $FSL^{[dB]}$ .

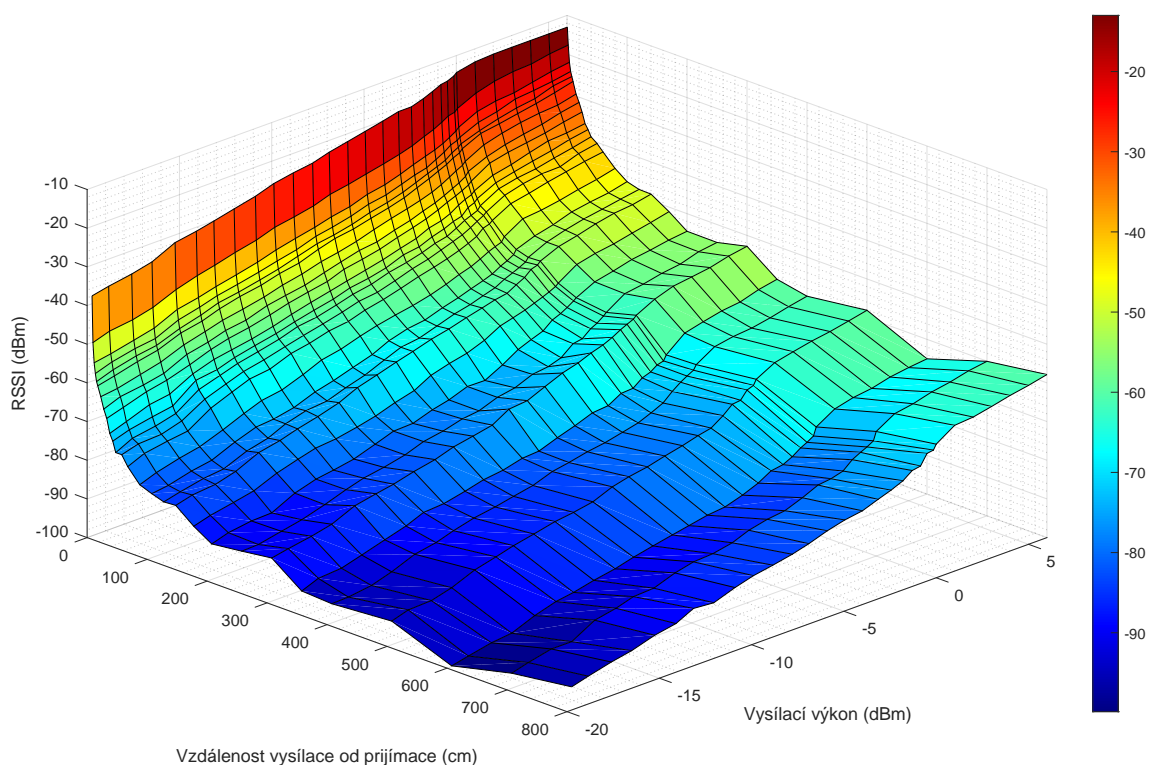
V předchozích grafech byla ilustrovány data, jež byla změřena v počtu 100 vzorků pro všechny vysílací výkony a vzdálenosti. Pro jeden vysílací výkon  $-0$  dBm, bylo pro přesnější zpracování změřeno vzorků 1000. Na obrázku 4.12 jsou vyobrazeny četnosti RSSI jednotlivých přijatých paketů pro dané vzdálenosti (zobrazené v logaritmické ose). Z dat je velmi dobře patrné, že do vzdálenosti přibližně 2 metry mají změřená data minimální rozptyl a rozdíl mezi nejvyšší a nejnižší naměřenou hodnotou RSSI je často pouze 1–2 dBm. Ve větších vzdálenostech rozptyl již značně narůstá. Pokud by z těchto dat měl být určeno přesné RSSI pro danou vzdálenost, nastává zde problém. Jak je totiž patrné, velká část změřených hodnot RSSI neodpovídá jedné hodnotě vzdálenosti, nýbrž dvěma i více.



**Obrázek 4.9.** Závislost RSSI (dBm) na vysílacím výkonu (dBm), vzhledem k vzdálenosti vysílače a přijímače (cm) v poloze A.



**Obrázek 4.10.** Závislost RSSI (dBm) na vzdálenosti vysílače a přijímače (cm), vzhledem k vysílacímu výkonu (dBm) v poloze A.

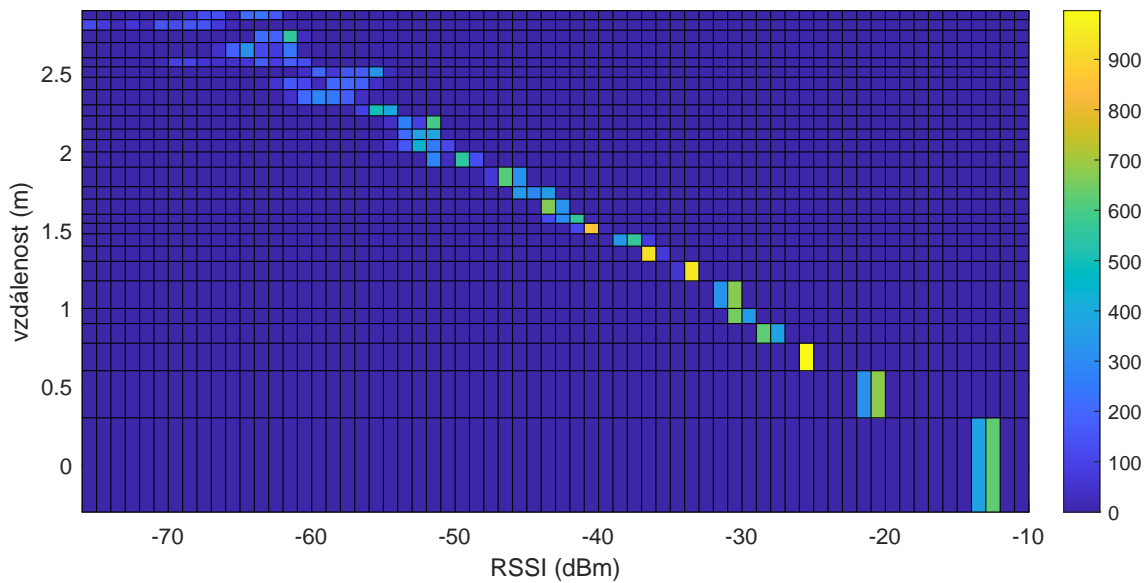


**Obrázek 4.11.** Závislost RSSI (dBm) na vzdálenosti vysílače a přijímače (cm) a vysílacím výkonu (dBm) v poloze A.

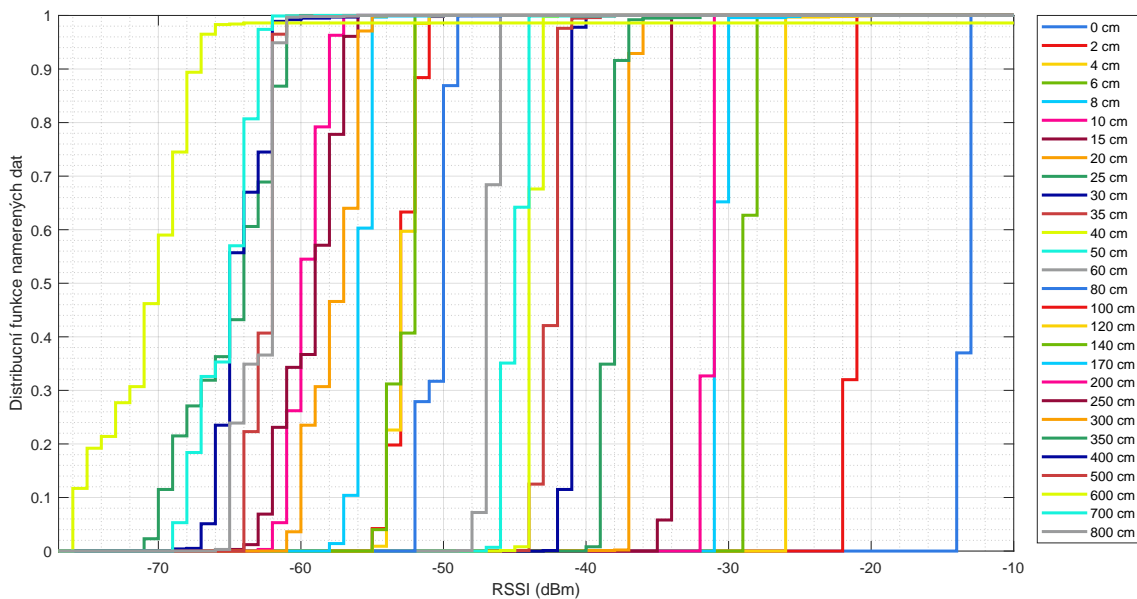
Obrázek 4.13 zobrazuje graf distribučních funkcí naměřených dat pro jednotlivé vzdálenosti. Graf zobrazuje závislost pravděpodobnosti jednotlivých vzdáleností a RSSI. Například při přijetí paketu s RSSI -20 dBm je v zásadě 100% pravděpodobnost, že je vzdálenost zařízení menší než 2 cm. Ovšem pokud bude RSSI -60 dBm, pak je pravděpodobnost, že jsou zařízení vzdálena 170 cm a méně – 100 %, 200 cm – 45 %, 250 cm – 64 %. 300 cm – 76 % a 350 cm a více – 0 %. Zde se právě projevuje velký rozptyl naměřených hodnot. Obecně lze pro tato data říci, že do 170 cm se dá vzdálenost z RSSI určit celkem přesně –  $\pm 20$  cm, do 80 cm s přesností až  $\pm 5$  cm.

Protože je známá střední hodnota a rozptyl (a tím i standardní odchylka), je možné data statisticky aproximovat pomocí normálního rozdělení. V tomto případě, vzhledem k logaritmickeému rozměru RSSI, přesněji logaritmickeo-normálního rozdělení. Graf distribuční funkce rozdělení je zobrazen na obrázku 4.14. Výsledná data tedy ukazují, že je-li požadovaná vzdálenost ražení například 60 cm, pak při zvolení hraničního RSSI -48 dBm je pravděpodobnost správného zachycení v této vzdálenosti 98 %, nezachycení 2 %, ale také 1% pravděpodobnost falešného zachycení paketu vyslaného ze vzdálenosti 80 cm. Při přijímání může v zásadě dojít je čtyřem scénářům – přijatý paket je správně přijat (SP), správně odmítnut (SO) paket je falešně přijat (FP) a paket je falešně odmítnut (FO). V tabulce 4.5 jsou vypočteny pravděpodobnosti těchto scénářů pro několik vzdáleností. V případě ostatních vzdáleností je pravděpodobnost správného přijetí (v případě menší vzdálenosti než je požadovaná) a pravděpodobnost správného odmítnutí (v případě větší vzdálenosti než je požadovaná) limitně jdoucí ke 100 %.

Z uvedených dat je patrné, že jde do jisté míry o kompromis, mezi zvolením zachycení téměř 100 % správných paketů a tedy ořazení všech co jsou do dané vzdálenosti od kontroly, ale i špatným vyhodnocením velkého množství paketů, jenž jsou z větší



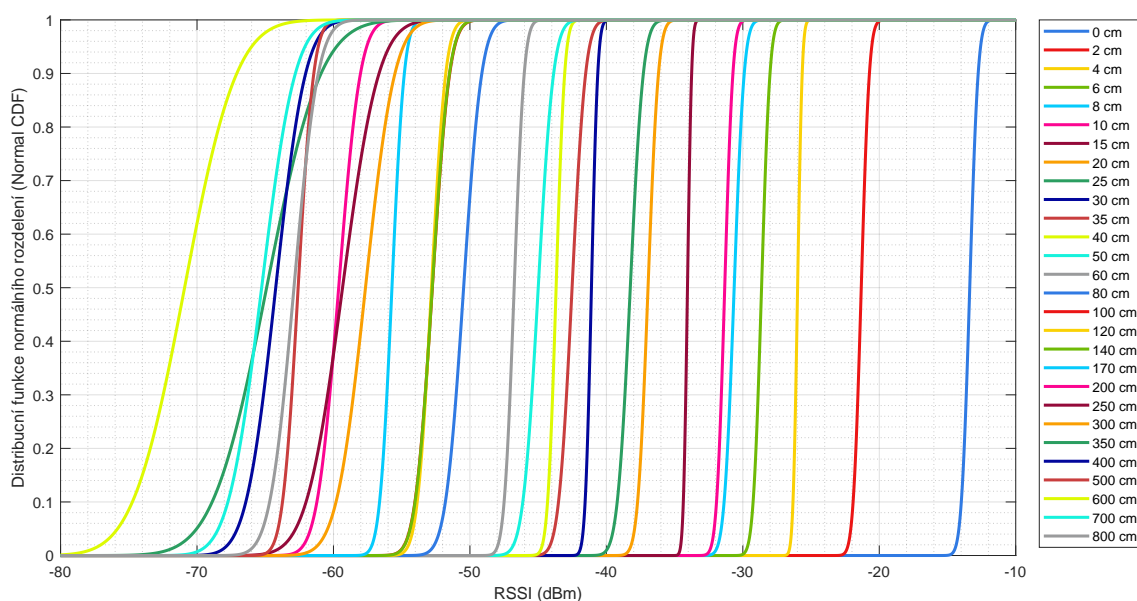
**Obrázek 4.12.** Počty vzorků pro dané RSSI (dBm) a vzdálenost (m) pro měření při konstantním vysílacím výkonu 0 dBm v poloze A. Pro každou vzdálenost bylo změřeno 1000 vzorků.



**Obrázek 4.13.** Distribuční funkce z naměřených dat (-) v závislosti na RSSI (dBm) pro jednotlivé vzdálenosti (cm) při konstantním vysílacím výkonu 0 dBm v poloze A.

vzdálenosti a měly by být odmítnuty. Druhou možností je snížení prahu pro oražení a tím snížení počtu nejen falešného přijetí, ale i zvýšení falešného odmítnutí.

Tento problém by se dal snadno vyřešit vyhodnocováním z většího počtu vzorků. Různé možnosti jsou uvedeny například v [71]. Problém ovšem je právě vyžadovaný větší počet vzorků. V přístupu prezentovaném výše se zpracovává pouze jeden paket s jedním RSSI. To umožňuje velmi rychlou komunikaci a vyhodnocení dat – při minimálním intervalu advertisingu může komunikace proběhnout už za 20 ms. To ovšem není často úplně vhodné, neboť čím více kontrola vysílá, tím větší bude spotřeba a tím kratší bude



**Obrázek 4.14.** Distribuční funkce normálního rozdělení (–) v závislosti na RSSI (dBm) pro jednotlivé vzdálenosti (cm) při konstantním vysílacím výkonu 0 dBm v poloze A.

RSSI	$d$ chtěné	SP	FO	$d$ nechtěné	SO	FP
-42 dBm	30 cm	99 %	1 %	35 cm	76 %	24 %
-55 dBm	100 cm	99 %	1 %	120 cm	0,5 %	99,5 %
				140 cm	1 %	99 %
				170 cm	86 %	14 %
				250 cm	98 %	2 %
				300 cm	95 %	5 %
-61 dBm	200 cm	86 %	14 %	250 cm	2 %	98 %
				300 cm	23 %	77 %
				350 cm	90 %	10 %
				400 cm	97 %	3 %
				500 cm	97 %	3 %
				700 cm	99 %	1 %
				800 cm	91 %	9 %

**Tabulka 4.5.** Pravděpodobnosti správnosti/nesprávnosti vyhodnocení přijatých dat pro dané vzdálenosti a jim zvolená RSSI, vyhodnocená z grafu 4.14.

doba provozu zařízení. V případě, že by se využívaly hodnoty z více paketů by se tento čas značně prodloužil a výsledná doba komunikace by nemusela splňovat požadavky určené v kapitole 2.3. Nicméně šlo by data vyhodnocovat přijetím několika paketů právě při minimálním intervalu advertisingu.

Pro určení hodnoty RSSI pro ražení kontroly v dané vzdálenosti je tedy nejvhodnější tuto hodnotu stanovit na základě změřených a výše popsanych dat. Je především nutné si stanovit, zda-li je cílem 100% jistota, že závodník v dané vzdálenosti kontrolu orazí, nebo minimalizace ražení kontroly ve vzdálenosti větší, než je požadována.



## 4.8 Další vývoj

V předchozích dvou kapitolách byla definována komunikace mezi kontrolou a závodníkem a určen způsob měření a vyhodnocení vzdálenosti mezi nimi. V rámci dalšího vývoje bude otestován způsob přenosu dat do centra závodů. V případě že se osvědčí funkčnost celého systému na úrovni vývojových kitů, bude vytvořen funkční prototyp podle schématu 4.2. Tedy systém s veškerými periferiemi a jejich ovládáním. Například se nabízí využít anténu použitou výrobcem vývojových kitů k vlastní konstrukci, ovšem pouze za podmínek, že bude dobře impedančně přizpůsobena a plošný spoj bude navržen tak, aby nedocházelo k rušení. Dále bude vytvořena mobilní aplikace nebo počítačový program pro ovládání a správu zařízení.

# Kapitola 5

## Závěr

V předchozích kapitolách byl uveden způsob realizace systému pro záznam času v orientačních sportech. Nejprve byl proveden rozbor použitelných technologií pro komunikace „kontrola ↔ závodník“ a „kontrola → centrum závodu“. Pro první zmíněný typ komunikace byly porovnávány technologie Bluetooth, respektive jeho varianta Bluetooth low energy, Wi-Fi, Ultra wide band, Zigbee a proprietární systém v ISM pásmu. Jako nejvhodnější byla zvolena technologie Bluetooth low energy, s níž bylo nadále pokračováno. U druhého typu komunikace pak byly porovnávány vlastnosti mobilních sítí, LoRa, Sigfox, NB-IoT a proprietárního systému v ISM pásmu. Zde jako nejvhodnější technologie vzhledem k požadavkům vyšla LoRa, případně proprietární systém v ISM pásmu a mobilní síť. Pro zvolené technologie byl proveden průzkum trhu a nabízených možností jejich realizace. Jako nejvhodnější se jeví využití řad mikrokontrolérů STM32WBxx, umožňující přenášet data pomocí BLE a STM32WLxx, umožňující přenášet data pomocí LoRa nebo proprietární komunikace v sub 1-GHz ISM pásmu. Obě řady mají zároveň vývojové kity s množstvím využitelných periférií – NUCLEO-WB55RG a NUCLEO-WL55JC1. Také byla stanovena koncepce celého systému.

Následující kapitoly se již věnovaly pouze komunikaci „kontrola ↔ závodník“. Po rozboru možností nabízených BLE byl vytvořen firmware pro obě zařízení, umožňující spolu komunikovat. Za nejvhodnější způsob přenosu dat byl zvolen tzv. advertising. V práci je detailně popsána jak struktura přenášených dat mezi zařízeními, tak jejich zpracování a vyhodnocení na obou stranách. Velký prostor byl následně věnován vyhodnocení vzdálenosti mezi zařízeními, jejíž znalost je důležitá z pohledu rozhodnutí, zda závodník kontrolu orazil nebo ne. Pro získání informace o vzdálenosti je použita znalost útlumu volného prostoru, jímž se data šíří. Zde se naráží na zásadní problém, kdy je ideální zjistit vzdálenost pouze z údajů z jednoho paketu dat. Zároveň jsou popsány výhody a problémy přinášející vyhodnocení z více přijatých paketů. Zatímco pro vzdálenosti do 80 cm byla zjištěna přesnost měření přibližně  $\pm 5$  cm a u vzdálenosti do 170 cm přibližně  $\pm 20$  cm. Při vyšších vzdálenostech začíná být rozptyl hodnot značný, dosahující řádově až metrů. Tato data byla zjištěna změřením hodnot RSSI. Ten byl měřen ve třech různých polohách (natočení) vysílače a přijímače, kdy pro každou polohu byl útlum měřen pro všechny nastavitelné vysílací výkony a vzdálenosti vysílače a přijímače od téměř 0 cm až po 10 metrů. Naměřená data byla zpracována i statisticky a ze zjištěných parametrů byly vytvořeny grafy logaritmicko-normálních distribučních funkcí a hustot pravděpodobnosti. Je-li zvolena hodnota útlumu, určující hranici ozaření, tak z těchto grafů lze vyčíst pravděpodobnost, zda o ozaření či neozaření bylo rozhodnuto správně nebo naopak falešně. Data z grafů lze tedy použít k ideálnímu nastavení této hranice. Také bylo zjištěno, že rádiové obvody vývojového kitu, zejména impedanční přizpůsobení antény a návrh plošného spoje, mají velmi špatné parametry z hlediska přenosu signálu a při použití například antény u reálného výrobku bude nutné těmto obvodům věnovat velkou pozornost, či zvolit prvky jiné. Na závěr byl stanoven další možný rozvoj systému.



---

V rámci práce byla ověřena a potvrzena možnost použití technologie Bluetooth low energy k realizaci komunikace „kontrola ↔ závodník“. Zároveň byly nalezeny její nedostatky i přednosti. V následující práci bude snaha systém rozšířit o již zmiňovaný přenos dat „kontrola → centrum závodu“ a celý systém realizovat včetně veškerých periférií.

## Literatura

- [1] *International Orienteering Federation* [online]. Karlstad, Sweden: IOF, 2022 [vid. 2022-12-08]. Dostupné na <https://orienteering.sport/event/world-ski-orienteering-championship/middle/>.
- [2] *Emit* [online]. Norway, 2022 [vid. 2022-12-07]. Dostupné na <https://emit.no/en/>.
- [3] *SPORTident* [online]. Arnstadt, Germany, 2022 [vid. 2022-12-07]. Dostupné na <https://www.sportident.com/>.
- [4] *Bluetooth technology overview* [online]. Kirkland, Washington: Bluetooth SIG, 2023 [vid. 2023-05-12]. Dostupné na <https://www.bluetooth.com/learn-about-bluetooth/tech-overview/>.
- [5] *Bluetooth Core Specification: 5.3* [online]. Kirkland, Washington: Bluetooth SIG, [vid. 2023-05-12]. Dostupné na <https://www.bluetooth.com/specifications/specs/core-specification-5-3/>.
- [6] IEEE Standard for Information technology—Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks—Specific requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. *IEEE Std 802.11-2016 (Revision of IEEE Std 802.11-2012)*. 2016, s. 1-3534. Dostupné na DOI 10.1109/IEEESTD.2016.7786995.
- [7] CAO, Shuai, Xiangning CHEN a BenChi YUAN. Overview of Short-range Wireless Communication Protocol. In: *2022 7th International Conference on Computer and Communication Systems (ICCCS)*. 2022. s. 519-523. Dostupné na DOI 10.1109/ICCCS55155.2022.9846125.
- [8] PROSKOCHYLO, Artem, Andrey VOROBYOV, Michail ZRIAKHOV, Alexandr KRAVCHUK, Artem AKULYNICHEV a Vladimir LUKIN. Overview of wireless technologies for organizing sensor networks. In: *2015 Second International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T)*. 2015. s. 39-41. Dostupné na DOI 10.1109/INFOCOMMST.2015.7357263.
- [9] LEE, Jin-Shyan, Yu-Wei SU a Chung-Chou SHEN. A Comparative Study of Wireless Protocols. *IECON 2007 - 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. IEEE, 2007, s. 46-51. Dostupné na DOI 10.1109/IECON.2007.4460126. Dostupné na <http://ieeexplore.ieee.org/document/4460126/>.
- [10] DI BENEDETTO, M.G. *UWB Communication Systems: A Comprehensive Overview*. Hindawi Publishing Corporation, 2006. EURASIP book series on Signal Processing and Communications: European Association for Speech, Signal and Image Processing. ISBN 9789775945105. Dostupné na <https://books.google.cz/books?id=3KVHnkXnMDEC>.
- [11] TSANG, T.K.K. a M.N. EL-GAMAL. Ultra-wideband (UWB) communications systems: an overview. In: *The 3rd International IEEE-NEWCAS Conference, 2005*. 2005. s. 381-386. Dostupné na DOI 10.1109/NEWCAS.2005.1496688.

- [12] GHAMARI, Mohammad, Harneet ARORA, R. Simon SHERRATT a William HARWIN. Comparison of low-power wireless communication technologies for wearable health-monitoring applications. In: *2015 International Conference on Computer, Communications, and Control Technology (I4CT)*. 2015. s. 1-6. Dostupné na DOI 10.1109/I4CT.2015.7219525.
- [13] BEČVÁŘ, Zdeněk, Pavel MACH a Ivan PRAVDA. *Mobilní sítě*. Praha: České vysoké učení technické, 2013. ISBN 978-80-01-05305-8.
- [14] ARSHAD, Qazi Kamal Ud Din, Ahsan Ullah KASHIF a Ijaz Mansoor QUERSHI. A Review on the Evolution of Cellular Technologies. *2019 16th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST)*. IEEE, s. 989-993. Dostupné na DOI 10.1109/IBCAST.2019.8667173. Dostupné na <https://ieeexplore.ieee.org/document/8667173/>.
- [15] LAURIDSEN, Mads, Huan NGUYEN, Benny VEJLGAARD, Istvan Z. KOVACS, Preben MOGENSEN a Mads SORENSEN. Coverage Comparison of GPRS, NB-IoT, LoRa, and SigFox in a 7800 km<sup>2</sup> Area. *2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*. IEEE, s. 1-5. Dostupné na DOI 10.1109/VTCSpring.2017.8108182. Dostupné na <http://ieeexplore.ieee.org/document/8108182/>.
- [16] PATIL, Chandrakant S., R.R.KARHE a M. A. AHER. Review on Generations in Mobile Cellular Technology. In: Jalgaon, Maharastra, India: International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, 2012. ISSN 2250-2459.
- [17] *VPortál* [online]. Praha: ČTÚ, 2023 [vid. 2023-05-14]. Dostupné na [https://vportal.ctu.cz/mobile/mapa?x=15.673859&y=49.7504162&z=8&o=2&t=2&f=0&m=st&r=ra&v=avg&e=c&a=z&c=pop&mp=0\\_100&ma=0\\_90&ea=0\\_80&ba=0\\_90&bp=0\\_100&ca=1\\_50&am=1\\_50&bt=0\\_80\\_d&bg=1\\_40\\_b&l=cs](https://vportal.ctu.cz/mobile/mapa?x=15.673859&y=49.7504162&z=8&o=2&t=2&f=0&m=st&r=ra&v=avg&e=c&a=z&c=pop&mp=0_100&ma=0_90&ea=0_80&ba=0_90&bp=0_100&ca=1_50&am=1_50&bt=0_80_d&bg=1_40_b&l=cs).
- [18] *LoRaWAN™ 1.1 Specification* [online]. Beaverton: LoRa Alliance, 2017 [vid. 2022-12-08]. Dostupné na [https://loro-alliance.org/resource\\_hub/lorawan-specification-v1-1/](https://loro-alliance.org/resource_hub/lorawan-specification-v1-1/).
- [19] LoRa® and LoRaWAN®: A Technical Overview. In: [online]. Semtech. [vid. 2022-12-08]. Dostupné na [https://loro-developers.semtech.com/uploads/documents/files/LoRa\\_and\\_LoRaWAN-A\\_Tech\\_Overview-Downloadable.pdf](https://loro-developers.semtech.com/uploads/documents/files/LoRa_and_LoRaWAN-A_Tech_Overview-Downloadable.pdf).
- [20] *The Things Network* [online]. 2022 [vid. 2022-12-08]. Dostupné na <https://www.thethingsnetwork.org/>.
- [21] WANG, Shie-Yuan, Yo-Ru CHEN, Tzu-Yang CHEN, Chia-Hung CHANG, Yu-Hsiang CHENG, Chun-Chia HSU a Yi-Bing LIN. Performance of LoRa-Based IoT Applications on Campus. In: *2017 IEEE 86th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*. 2017. s. 1-6. Dostupné na DOI 10.1109/VTCFall.2017.8288154.
- [22] ZHOU, Qihao, Kan ZHENG, Lu HOU, Jinyu XING a Rongtao XU. Design and Implementation of Open LoRa for IoT. *IEEE Access*. 2019, ročník 7, s. 100649-100657. Dostupné na DOI 10.1109/ACCESS.2019.2930243.
- [23] ZOURMAND, Alireza, Andrew Lai KUN HING, Chan WAI HUNG a Mohammad ABDULREHMAN. Internet of Things (IoT) using LoRa technology. In: *2019 IEEE International Conference on Automatic Control and Intelligent Systems (I2CACIS)*. 2019. s. 324-330. Dostupné na DOI 10.1109/I2CACIS.2019.8825008.
- [24] SINHA, Rashmi Sharan, Yiqiao WEI a Seung-Hoon HWANG. A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT. *ICT Express*. 2017, ročník 3, č. 1, s. 14-21. ISSN 2405-9595. Dostupné na DOI <https://doi.org/10.1016/j.ict.2017.03.004>. Do-

- stupné na <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405959517300061>.
- [25] *Sigfox about* [online]. Labège: Sigfox 0G, 2023 [vid. 2023-05-14]. Dostupné na <https://www.sigfox.com/what-is-sigfox/>.
- [26] *Sigfox coverage* [online]. Labège: Sigfox 0G, 2023 [vid. 2023-05-14]. Dostupné na <https://www.sigfox.com/coverage/>.
- [27] DRTINA, Martin. *Sigfox v Česku končí, T-Mobile vypíná vysílače* [online]. Internet Info, 2023 [vid. 2023-05-14]. Dostupné na <https://www.lupa.cz/aktuality/sigfox-se-v-cesku-odmlcel-zda-je-to-konec-teto-site-internetu-veci-jeji-provozovatele-nekomentuji/>.
- [28] ADHIKARY, Ansuman, Xingqin LIN a Y.-P. Eric WANG. Performance Evaluation of NB-IoT Coverage. *2016 IEEE 84th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*. IEEE, s. 1-5. Dostupné na DOI 10.1109/VTCFall.2016.7881160. Dostupné na <http://ieeexplore.ieee.org/document/7881160/>.
- [29] *Microchip Developer: Introduction to Bluetooth® Low Energy* [online]. Chandler, Arizona, USA: Microchip Technology, 2021 [vid. 2023-05-15]. Dostupné na <https://microchipdeveloper.com/wireless:ble-introduction>.
- [30] *Guidelines for Bluetooth® Low Energy stack programming on STM32WB/STM32WBA MCUs* [online]. Plan-les-Ouates, Switzerland: STMicroelectronics, 2023 [vid. 2023-05-12]. Dostupné na [https://www.st.com/resource/en/programming\\_manual/pm0271-guidelines-for-bluetooth-low-energy-stack-programming-on-stm32wb-stm32wba-mcus-stmicroelectronics.pdf](https://www.st.com/resource/en/programming_manual/pm0271-guidelines-for-bluetooth-low-energy-stack-programming-on-stm32wb-stm32wba-mcus-stmicroelectronics.pdf).
- [31] HEYDON, Robin. *Bluetooth low energy*. 1st vyd. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2013. ISBN 978-0-13-288836-3.
- [32] *Microchip Developer: Bluetooth® Low Energy (BLE) Physical Layer* [online]. Chandler, Arizona, USA: Microchip Technology, 2021 [vid. 2023-05-15]. Dostupné na <https://microchipdeveloper.com/wireless:ble-phy-layer>.
- [33] *Microchip Developer: Bluetooth® Low Energy Discovery Process* [online]. Chandler, Arizona, USA: Microchip Technology, 2021 [vid. 2023-05-15]. Dostupné na <https://microchipdeveloper.com/wireless:ble-link-layer-discovery>.
- [34] *Microchip Developer: Attribute and Data Hierarchy* [online]. Chandler, Arizona, USA: Microchip Technology, 2021 [vid. 2023-05-15]. Dostupné na <https://microchipdeveloper.com/wireless:ble-gatt-data-organization>.
- [35] *Bluetooth Specifications: Assigned Numbers* [online]. Kirkland (Washington): Bluetooth SIG, 2023 [vid. 2023-05-12]. Dostupné na [https://www.bluetooth.com/specifications/assigned-numbers/?\\_ga=1.172260773.727311638.1440115818](https://www.bluetooth.com/specifications/assigned-numbers/?_ga=1.172260773.727311638.1440115818).
- [36] *Bluetooth® Low Energy GAP Roles* [online]. Chandler, Arizona, USA: Microchip Technology, 2021 [vid. 2023-05-15]. Dostupné na <https://microchipdeveloper.com/wireless:ble-gap-roles#broadcaster>.
- [37] *Microchip Developer: BLE Link Layer Roles and States* [online]. Chandler, Arizona, USA: Microchip Technology, 2021 [vid. 2023-05-15]. Dostupné na <https://microchipdeveloper.com/wireless:ble-link-layer-roles-states>.
- [38] *STM32WB Series* [online]. Plan-les-Ouates, Switzerland: STMicroelectronics, 2023 [vid. 2023-05-16]. Dostupné na <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32wb-series.html>.

- [39] *Bluetooth products* [online]. Dallas, Texas, USA: Texas Instruments, 2023 [vid. 2023-05-16]. Dostupné na <https://www.ti.com/wireless-connectivity/bluetooth/overview.html>.
- [40] *Bluetooth® Low Energy Products* [online]. Chandler, Arizona, USA: Microchip Technology, 2023 [vid. 2023-05-16]. Dostupné na <https://www.microchip.com/en-us/products/wireless-connectivity/bluetooth-low-energy>.
- [41] *Bluetooth® Smart/Bluetooth Low Energy* [online]. Eindhoven, Netherlands: NXP Semiconductors, 2023 [vid. 2023-05-16]. Dostupné na <https://www.nxp.com/products/wireless/bluetooth-low-energy:BLUETOOTH-LOW-ENERGY-BLE>.
- [42] *Bluetooth Low Energy* [online]. Trondheim, Norway: Nordic Semiconductor, 2023 [vid. 2023-05-16]. Dostupné na <https://www.nordicsemi.com/Products/Bluetooth-Low-Energy?lang=en#infotabs>.
- [43] *Bluetooth Low Energy* [online]. Scottsdale, Arizona, USA: Onsemi, 2023 [vid. 2023-05-16]. Dostupné na <https://www.onsemi.com/products/wireless-connectivity/bluetooth-low-energy>.
- [44] *Bluetooth® Low Energy* [online]. Tokyo, Japan: Renesas Electronics, 2023 [vid. 2023-05-16]. Dostupné na [https://www.renesas.com/us/en/products/wireless-connectivity/bluetooth-low-energy#success\\_stories](https://www.renesas.com/us/en/products/wireless-connectivity/bluetooth-low-energy#success_stories).
- [45] *RadioControlli* [online]. Santa Maria, Italy: RadioControlli, 2021 [vid. 2022-12-08]. Dostupné na <https://www.radiocontrolli.com/>.
- [46] *HOPERF: Products* [online]. Shenzhen, China: Hope Microelectronics, 2018 [vid. 2022-12-08]. Dostupné na <https://www.hoperf.com/product/index.html>.
- [47] *Short range radio modules* [online]. Thalwil, Switzerland: U-blox, 2023 [vid. 2023-05-16]. Dostupné na <https://www.u-blox.com/en/short-range-radio-modules#Bluetooth>.
- [48] *Bluetooth Low Energy Modules for Short Range Networking* [online]. Sophia-Antipolis, France: Insight SiP, 2022 [vid. 2022-12-08]. Dostupné na <https://www.insightsip.com/products/short-range-modules>.
- [49] *Wireless-tag: BLE modules* [online]. Shenzhen, China: Shenzhen Qiming Cloud Technology, 2022 [vid. 2022-12-08]. Dostupné na <http://en.wireless-tag.com/product-200002.html>.
- [50] *STM32WL Series* [online]. Plan-les-Ouates, Switzerland: STMicroelectronics, 2023 [vid. 2023-05-16]. Dostupné na <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32wl-series.html>.
- [51] *LoRa® Solutions* [online]. Chandler, Arizona, USA: Microchip Technology, 2023 [vid. 2023-05-16]. Dostupné na <https://www.microchip.com/en-us/products/wireless-connectivity/sub-ghz/lora>.
- [52] *Wireless Systems* [online]. Modigliana, Italy: AUREL, 2023 [vid. 2023-05-16]. Dostupné na <https://www.aurelwireless.com/>.
- [53] *Proprietary Sub-1 GHz Products* [online]. Plan-les-Ouates, Switzerland: STMicroelectronics, 2023 [vid. 2023-05-16]. Dostupné na <https://www.st.com/en/wireless-connectivity/proprietary-sub-1-ghz-products.html>.
- [54] *Sub-1 GHz products* [online]. Dallas, Texas, USA: Texas Instruments, 2023 [vid. 2023-05-16]. Dostupné na <https://www.ti.com/wireless-connectivity/sub-1-ghz/overview.html>.

- [55] *Sub-GHz Solutions* [online]. Chandler, Arizona, USA: Microchip Technology, 2023 [vid. 2023-05-16]. Dostupné na <https://www.microchip.com/en-us/products/wireless-connectivity/sub-ghz>.
- [56] *Sub-1 GHz Wireless Solutions* [online]. Eindhoven, Netherlands: NXP Semiconductors, 2023 [vid. 2023-05-16]. Dostupné na <https://www.nxp.com/products/wireless/sub-1-ghz-wireless-solutions:SUB-1-GHZ-WIRELESS-SOLUTIONS>.
- [57] *Sub-GHz/Wi-SUN Transceivers* [online]. Tokyo, Japan: Renesas Electronics, 2023 [vid. 2023-05-16]. Dostupné na <https://www.renesas.com/us/en/products/wireless-connectivity/sub-ghz-wi-sun-transceivers>.
- [58] *LPWAN Low Power Wide Area Network Modules* [online]. Sophia-Antipolis, France: Insight SiP, 2022 [vid. 2022-12-08]. Dostupné na <https://www.insightsip.com/products/wide-area-network-modules>.
- [59] *STM32 Nucleo-64 development board with STM32WB55RG MCU, supports Arduino, ST Zio and morpho connectivity* [online]. Plan-les-Ouates, Switzerland: STMicroelectronics, 2023 [vid. 2023-05-16]. Dostupné na <https://www.st.com/en/evaluation-tools/nucleo-wb55rg.html>.
- [60] *STM32 Nucleo-64 development board with STM32WL55JC MCU, SMPS, supports Arduino and morpho connectivity* [online]. Plan-les-Ouates, Switzerland: STMicroelectronics, 2023 [vid. 2023-05-16]. Dostupné na <https://www.st.com/en/evaluation-tools/nucleo-wl55jc.html>.
- [61] *Low cost PCB antenna for 2.4 GHz radio: meander design for STM32WB Series* [online]. Plan-les-Ouates, Switzerland: STMicroelectronics, 2023 [vid. 2023-05-16]. Dostupné na [https://www.st.com/resource/en/application\\_note/an5129-low-cost-pcb-antenna-for-24ghz-radio-meander-design-for-stm32wb-series-stmicroelectronics.pdf](https://www.st.com/resource/en/application_note/an5129-low-cost-pcb-antenna-for-24ghz-radio-meander-design-for-stm32wb-series-stmicroelectronics.pdf).
- [62] *STM32Cube initialization code generator* [online]. Plan-les-Ouates, Switzerland: STMicroelectronics, 2023 [vid. 2023-05-16]. Dostupné na <https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubemx.html>.
- [63] *Integrated Development Environment for STM32* [online]. Plan-les-Ouates, Switzerland: STMicroelectronics, 2023 [vid. 2023-05-16]. Dostupné na <https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubeide.html>.
- [64] *STM32CubeProgrammer software for all STM32* [online]. Plan-les-Ouates, Switzerland: STMicroelectronics, 2023 [vid. 2023-05-16]. Dostupné na <https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubeprog.html>.
- [65] *STM32WB Bluetooth® Low Energy wireless interface* [online]. Plan-les-Ouates, Switzerland: STMicroelectronics, 2023 [vid. 2023-05-16]. Dostupné na [https://www.st.com/resource/en/application\\_note/an5270-stm32wb-bluetooth-low-energy-wireless-interface-stmicroelectronics.pdf](https://www.st.com/resource/en/application_note/an5270-stm32wb-bluetooth-low-energy-wireless-interface-stmicroelectronics.pdf).
- [66] *Building wireless applications with STM32WB Series microcontrollers* [online]. Plan-les-Ouates, Switzerland: STMicroelectronics, 2023 [vid. 2023-05-16]. Dostupné na [https://www.st.com/resource/en/application\\_note/an5289-building-wireless-applications-with-stm32wb-series-mcus-stmicroelectronics.pdf](https://www.st.com/resource/en/application_note/an5289-building-wireless-applications-with-stm32wb-series-mcus-stmicroelectronics.pdf).
- [67] *Description of STM32WB HAL and low-layer drivers* [online]. Plan-les-Ouates, Switzerland: STMicroelectronics, 2023 [vid. 2023-05-16]. Dostupné na [https://www.st.com/resource/en/user\\_manual/um2442-description-of-stm32wb-hal-and-lowlayer-drivers-stmicroelectronics.pdf](https://www.st.com/resource/en/user_manual/um2442-description-of-stm32wb-hal-and-lowlayer-drivers-stmicroelectronics.pdf).



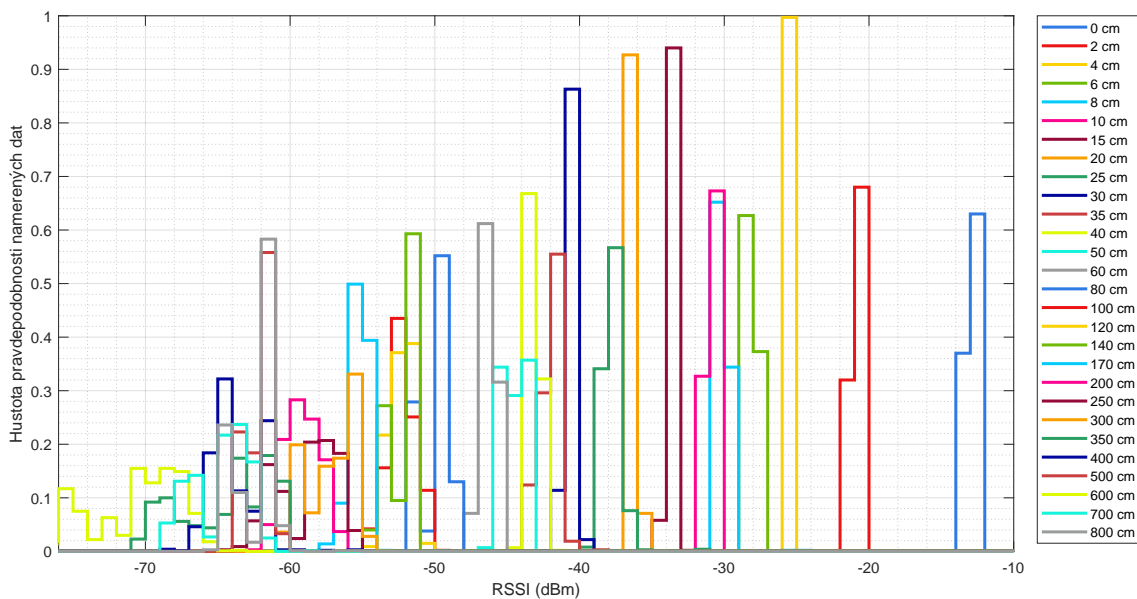
- 
- [68] *Bluetooth Core Specification: 5.2* [online]. Kirkland, Washington: Bluetooth SIG, [vid. 2022-12-07]. Dostupné na [https://www.bluetooth.org/docman/handlers/downloaddoc.ashx?doc\\_id=478726](https://www.bluetooth.org/docman/handlers/downloaddoc.ashx?doc_id=478726).
- [69] BENSKY, Alan. *Wireless positioning technologies and applications*. Second edition vyd. Boston: Artech House, [2016. ISBN 978-1-60807-951-3.
- [70] BISWAS, Arumita a Mainak CHOWDHURY. *Wireless communication*. Cambridge: Cambridge University Press, 2017. ISBN 978-1-316-62836-2.
- [71] *Social Distancing Detection using Bluetooth® Low Energy* [online]. Plan-les-Ouates, Switzerland: STMicroelectronics, 2023 [vid. 2023-05-16]. Dostupné na [https://www.st.com/resource/en/application\\_note/dm00712091-social-distancing-detection-using-bluetooth-low-energy-stmicroelectronics.pdf](https://www.st.com/resource/en/application_note/dm00712091-social-distancing-detection-using-bluetooth-low-energy-stmicroelectronics.pdf).
- [72] HEROUT, Pavel. *Učebnice jazyka C. 4.*, přeprac. vyd vyd. České Budějovice: Kopp, 2004. ISBN 80-723-2220-6.
- [73] HEROUT, Pavel. *Učebnice jazyka C. 4.* vyd vyd. České Budějovice: Kopp, 2008. ISBN ISNB978-80-7232-367-8.



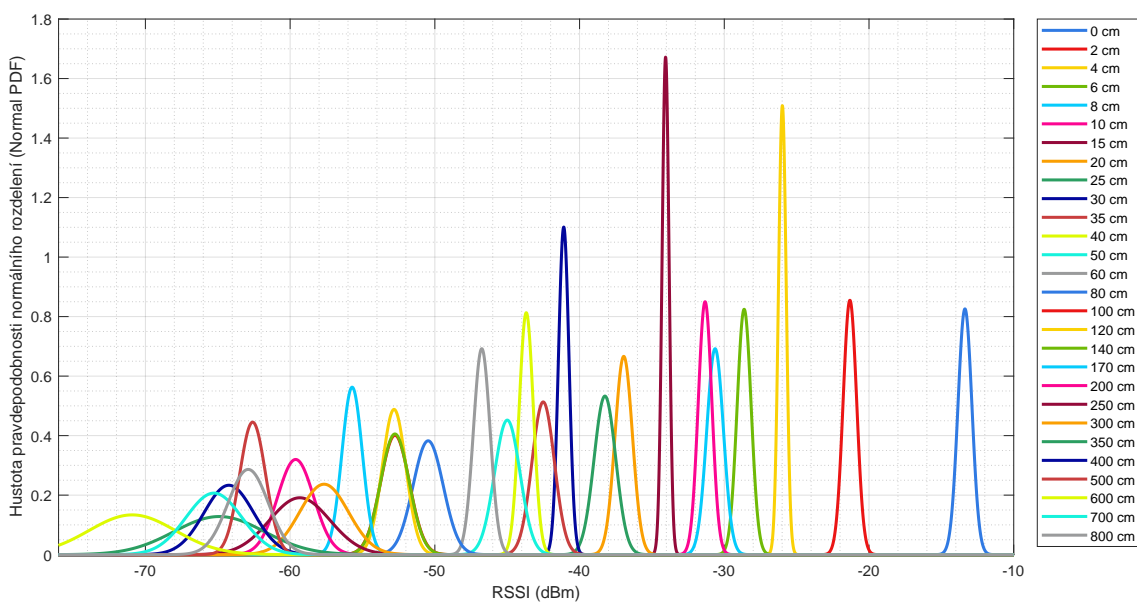


# Příloha A

## Měření a simulace RSSI v poloze A



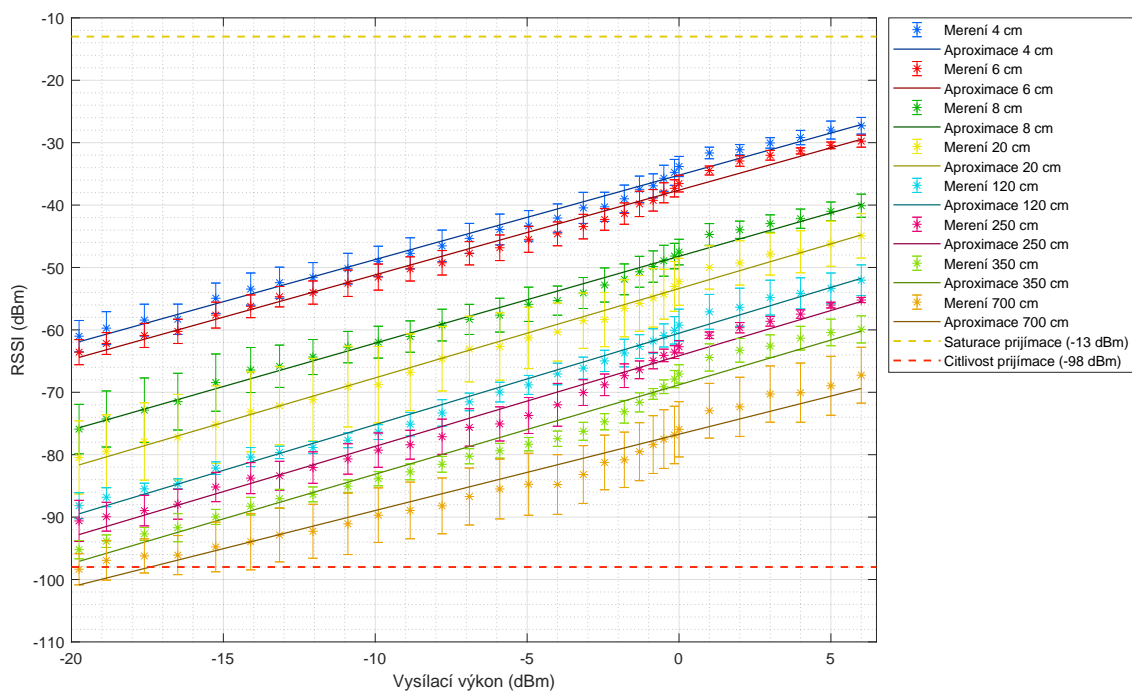
**Obrázek A.1.** Hustoty pravděpodobnosti z naměřených dat (-) v závislosti na RSSI (dBm) pro jednotlivé vzdálenosti (cm) při konstantním vysílacím výkonu 0 dBm v poloze A.



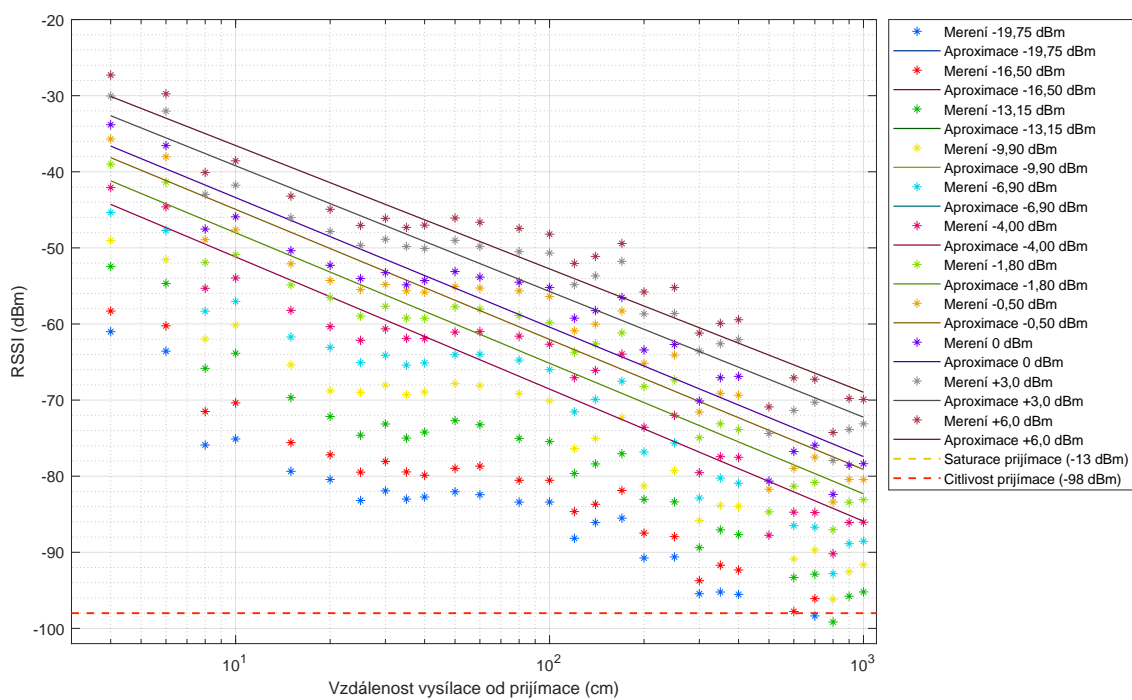
**Obrázek A.2.** Závislost hustoty pravděpodobnosti normálního rozdělení (-) na RSSI (dBm) pro jednotlivé vzdálenosti (cm) při konstantním vysílacím výkonu 0 dBm v poloze A.

# Příloha B

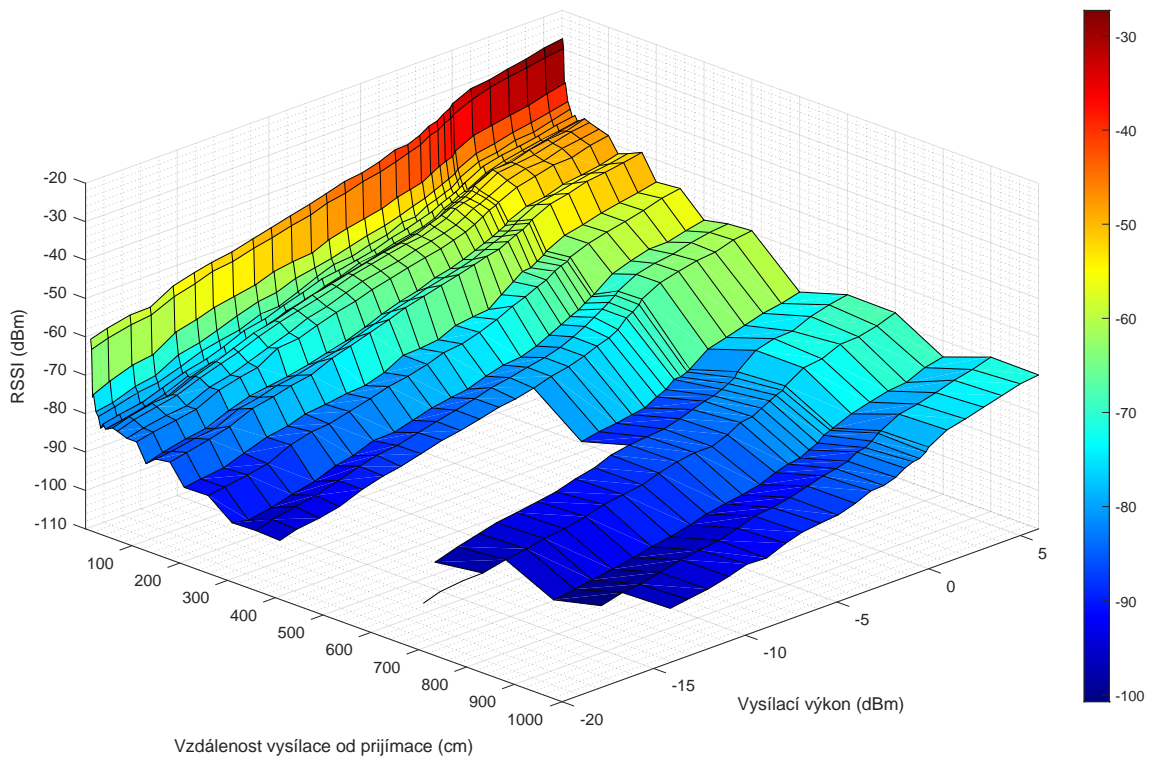
## Měření a simulace RSSI v poloze B



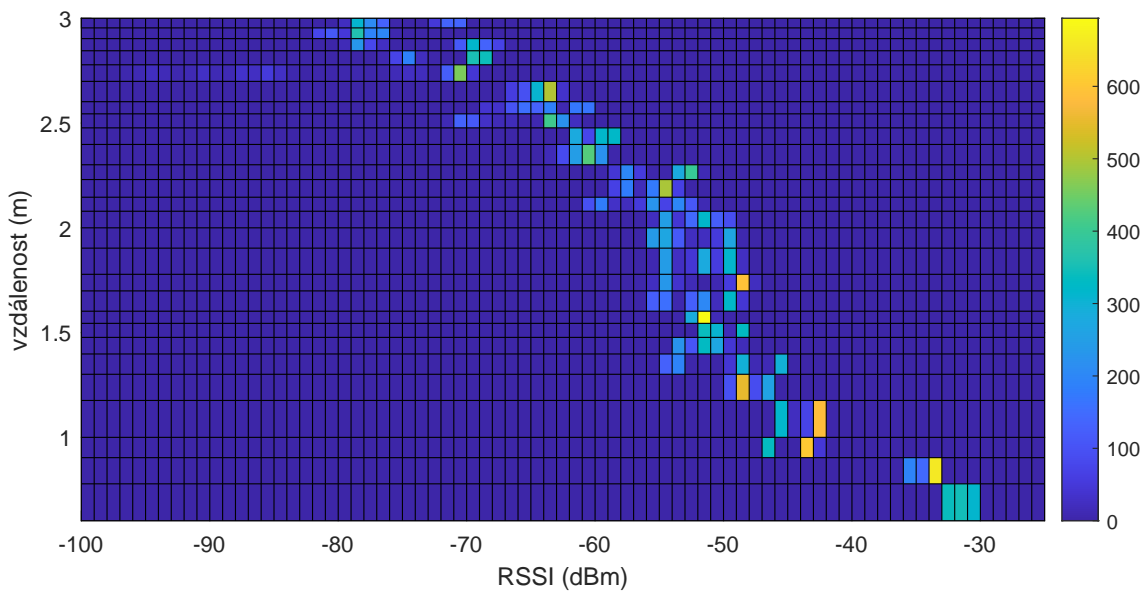
**Obrázek B.3.** Závislost RSSI (dBm) na vysílacím výkonu (dBm), vzhledem k vzdálenosti vysílače a přijímače (cm) v poloze B.



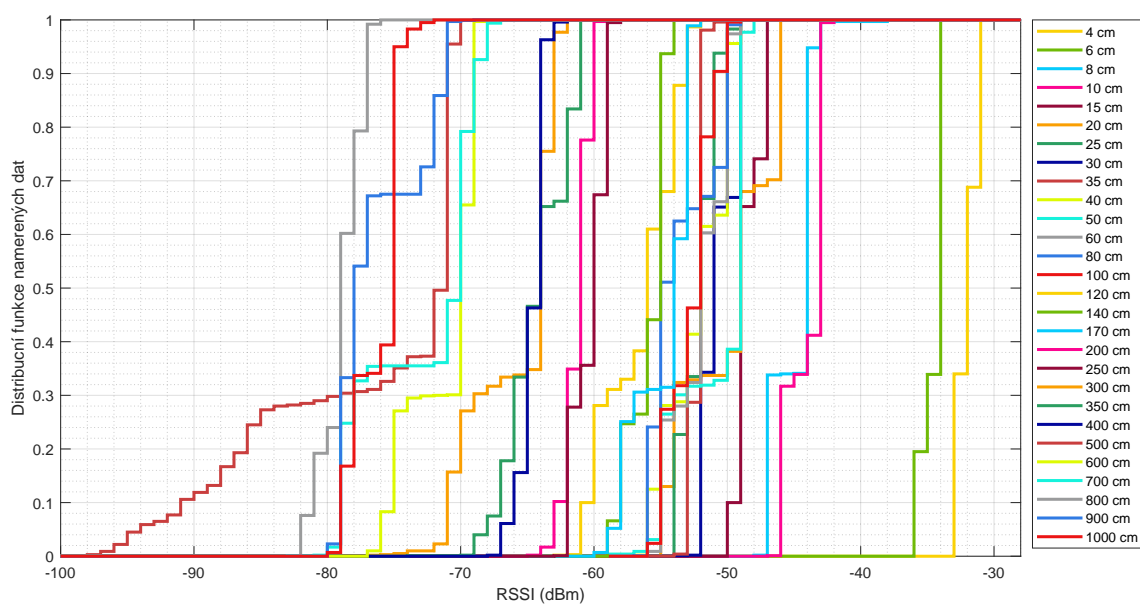
**Obrázek B.4.** Závislost RSSI (dBm) na vzdálenosti vysílače a přijímače (cm), vzhledem k vysílacímu výkonu (dBm) v poloze B. Chybějící proložení je způsobeno chybějícími daty při měření daného vysílacího výkonu, neboť jejich výkon byl nižší než citlivost přijímače a nemohly být tedy přijaty a zaznamenány.



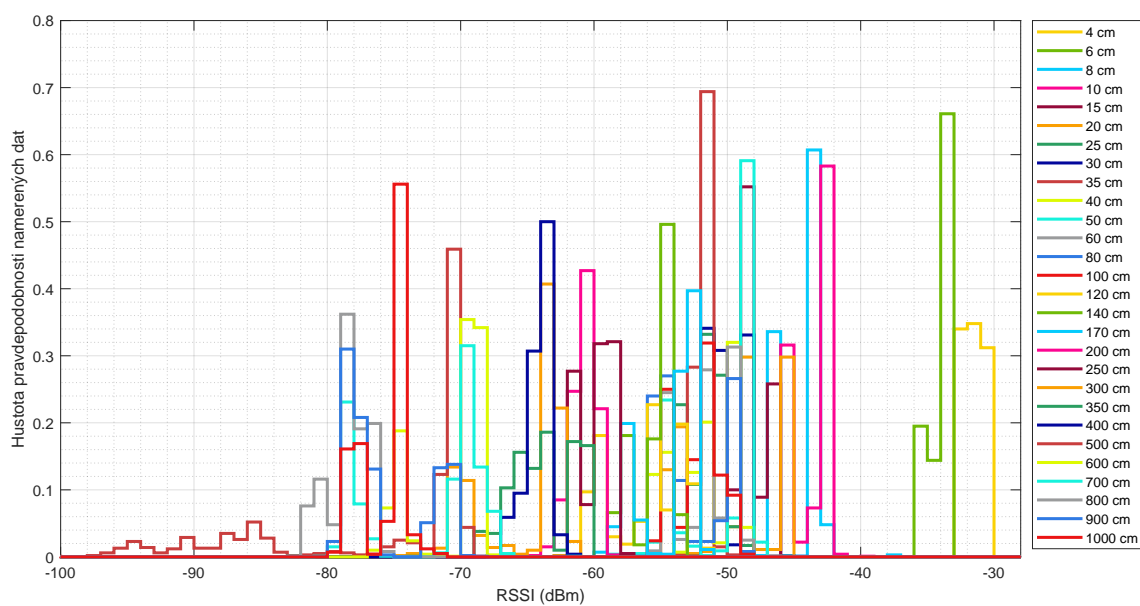
**Obrázek B.5.** Závislost RSSI (dBm) na vzdálenosti vysílače a přijímače (cm) a vysílacím výkonu (dBm) v poloze B. V části grafu chybí data, neboť jejich výkon byl nižší než citlivost přijímače a nemohly být tedy přijaty a zaznamenány.



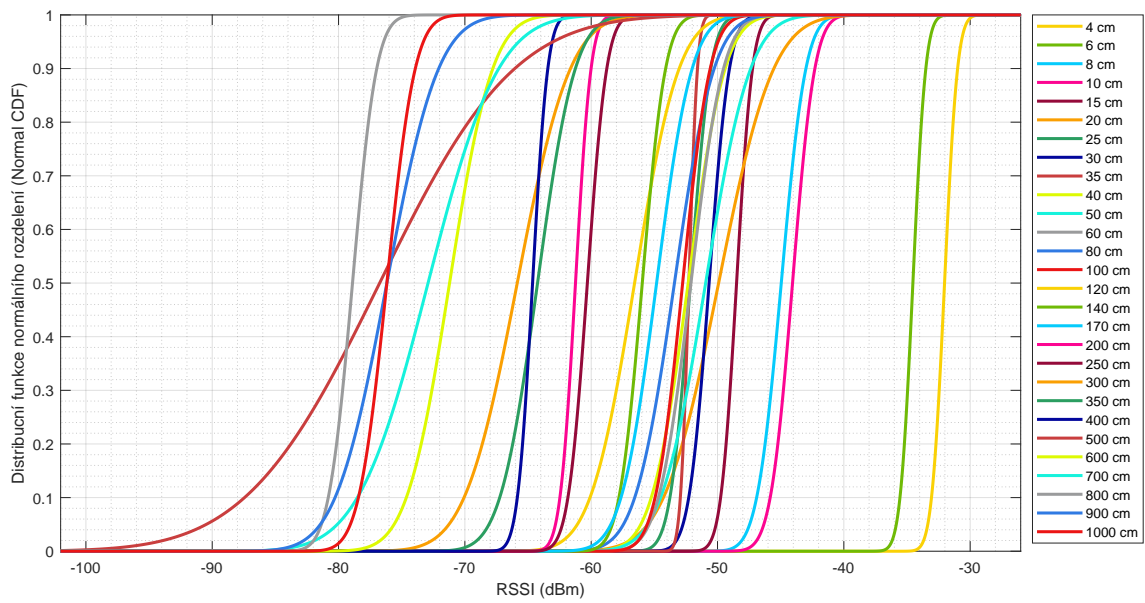
**Obrázek B.6.** Počty vzorků pro dané RSSI (dBm) a vzdálenost (m) pro měření při konstantním vysílacím výkonu 0 dBm v poloze B. Pro každou vzdálenost bylo změřeno 1000 vzorků.



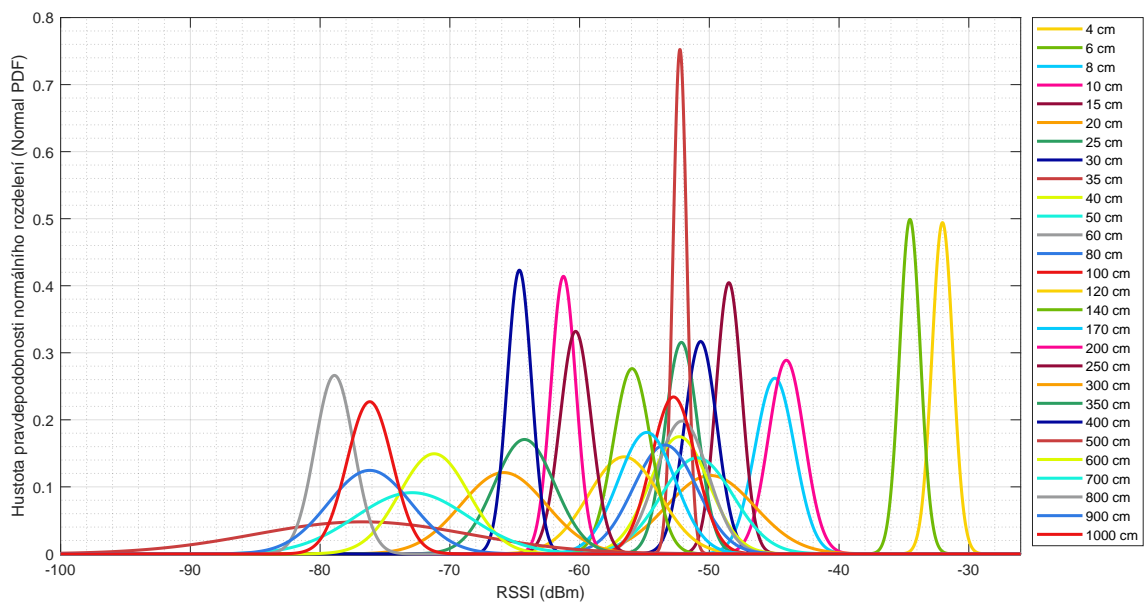
**Obrázek B.7.** Distribuční funkce z naměřených dat (-) v závislosti na RSSI (dBm) pro jednotlivé vzdálenosti (cm) při konstantním vysílacím výkonu 0 dBm v poloze B.



**Obrázek B.8.** Hustoty pravděpodobnosti z naměřených dat (-) v závislosti na RSSI (dBm) pro jednotlivé vzdálenosti (cm) při konstantním vysílacím výkonu 0 dBm v poloze B.



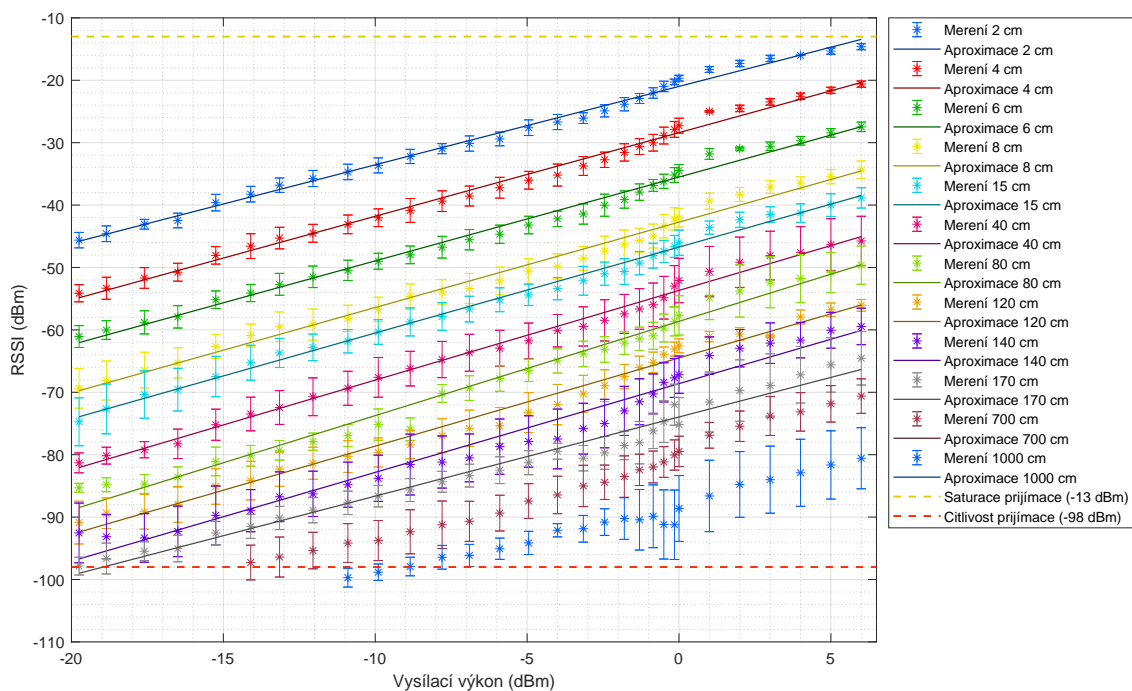
**Obrázek B.9.** Distribuční funkce normálního rozdělení (-) v závislosti na RSSI (dBm) pro jednotlivé vzdálenosti (cm) při konstantním vysílacím výkonu 0 dBm v poloze B.



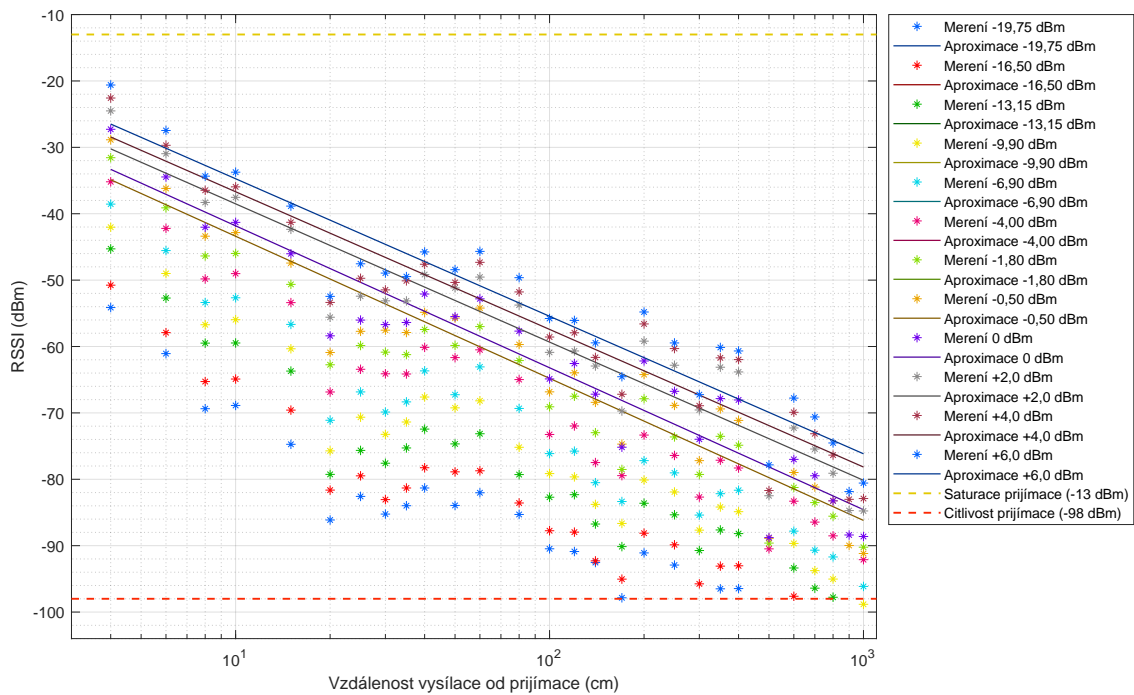
**Obrázek B.10.** Závislost hustoty pravděpodobnosti normálního rozdělení (-) na RSSI (dBm) pro jednotlivé vzdálenosti (cm) při konstantním vysílacím výkonu 0 dBm v poloze B.

## Příloha C

### Měření a simulace RSSI v poloze C

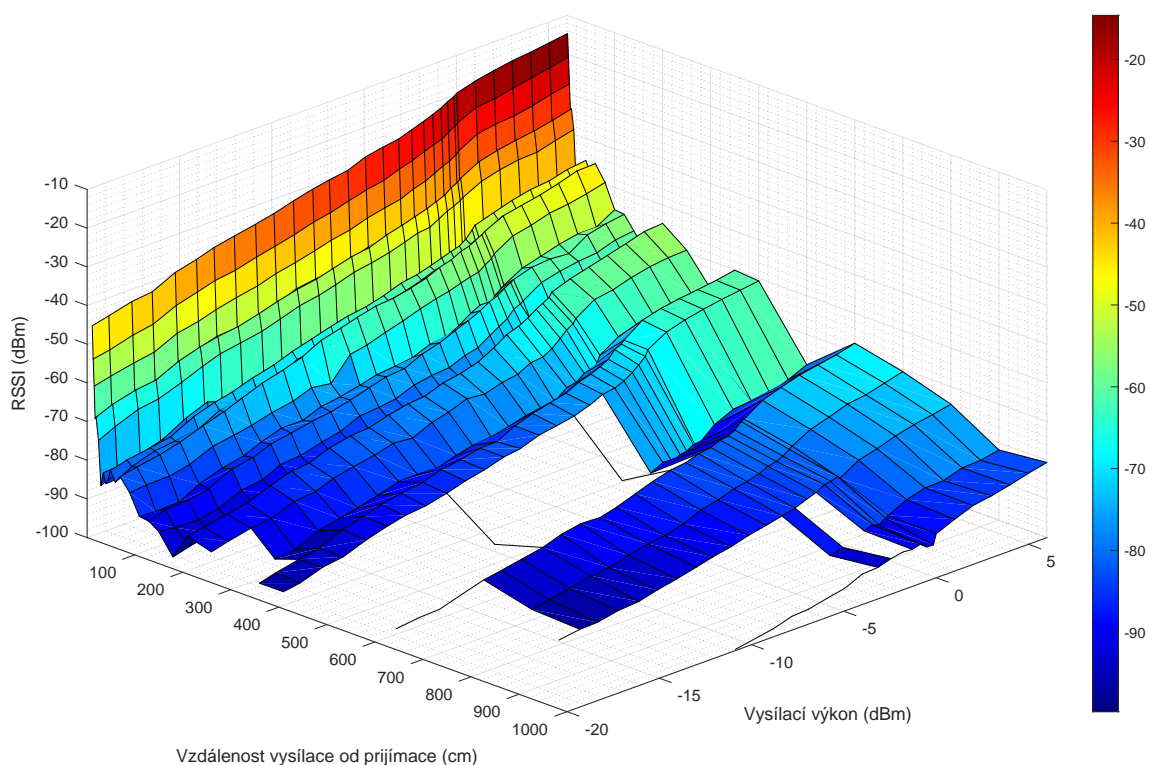


**Obrázek C.11.** Závislost RSSI (dBm) na vysílacím výkonu (dBm), vzhledem k vzdálenosti vysílače a přijímače (cm) v poloze C. Chybějící proložení je způsobeno chybějícími daty při měření na dané vzdálenosti, neboť jejich výkon byl nižší než citlivost přijímače a nemohly být tedy přijaty a zaznamenány.

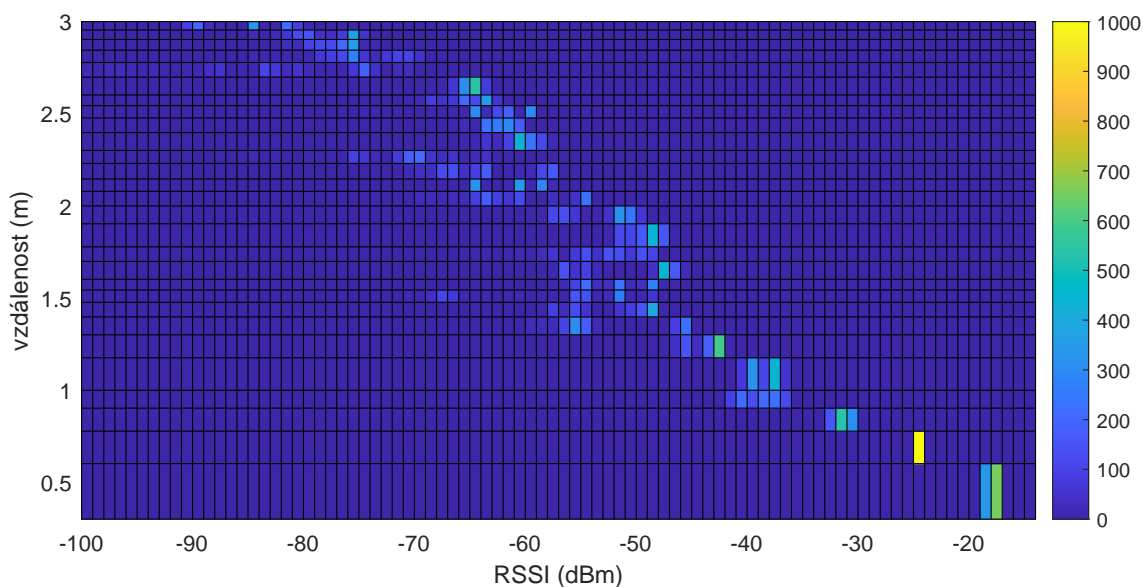


**Obrázek C.12.** Závislost RSSI (dBm) na vzdálenosti vysílače a přijímače (cm), vzhledem k vysílacímu výkonu (dBm) v poloze C. Chybějící proložení je způsobeno chybějícími daty při měření daného vysílacího výkonu, neboť jejich výkon byl nižší než citlivost přijímače a nemohly být tedy přijaty a zaznamenány.

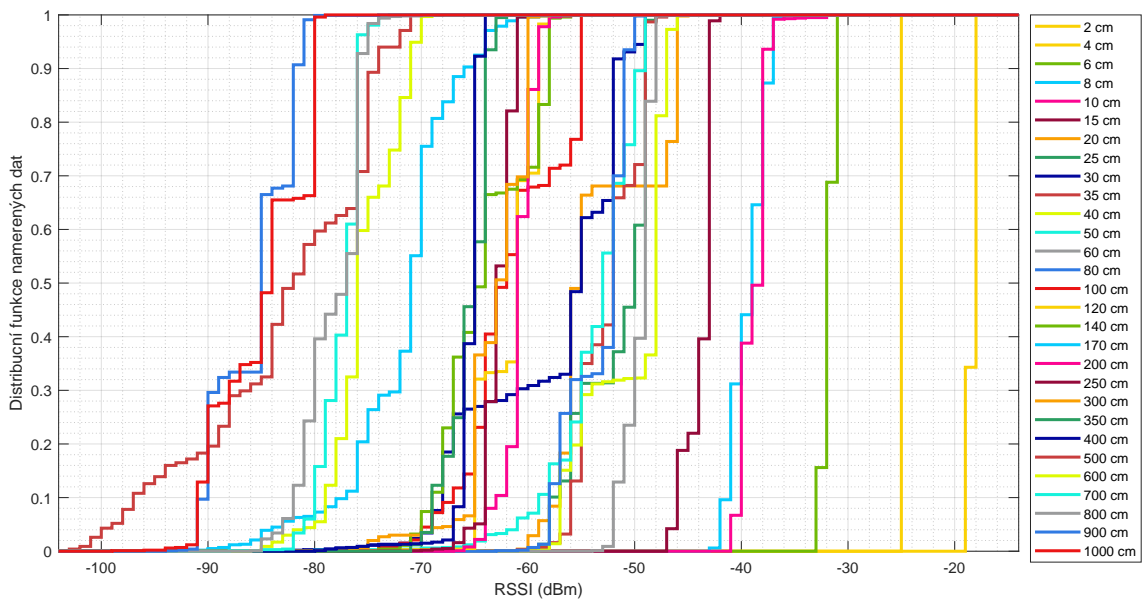




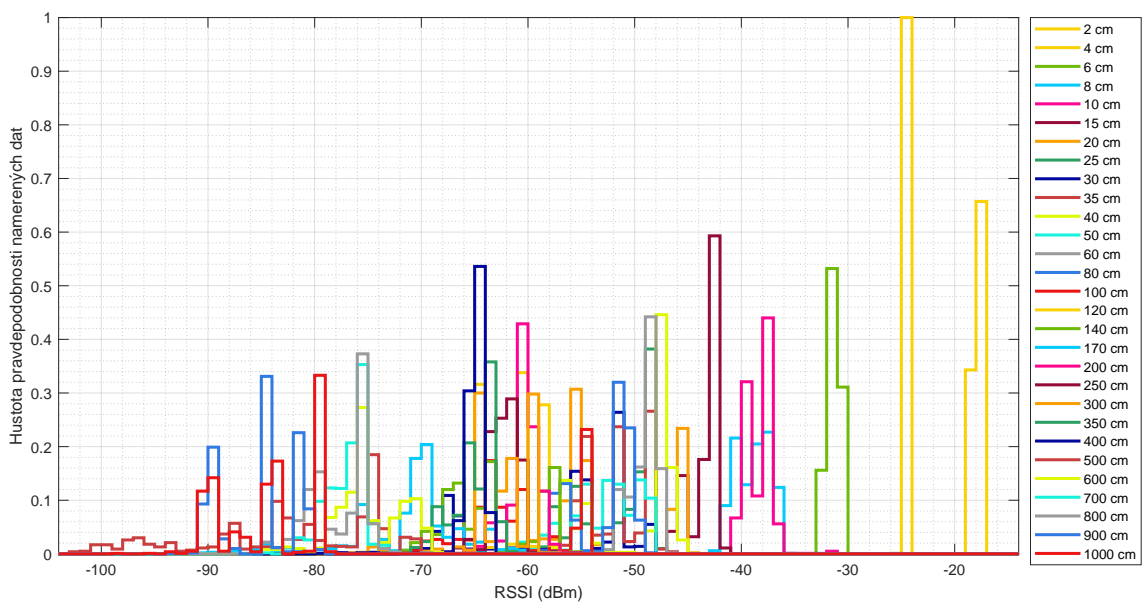
**Obrázek C.13.** Závislost RSSI (dBm) na vzdálenosti vysílače a přijímače (cm) a vysílacím výkonu (dBm) v poloze C. V části grafu chybí data, neboť jejich výkon byl nižší než citlivost přijímače a nemohly být tedy přijaty a zaznamenány.



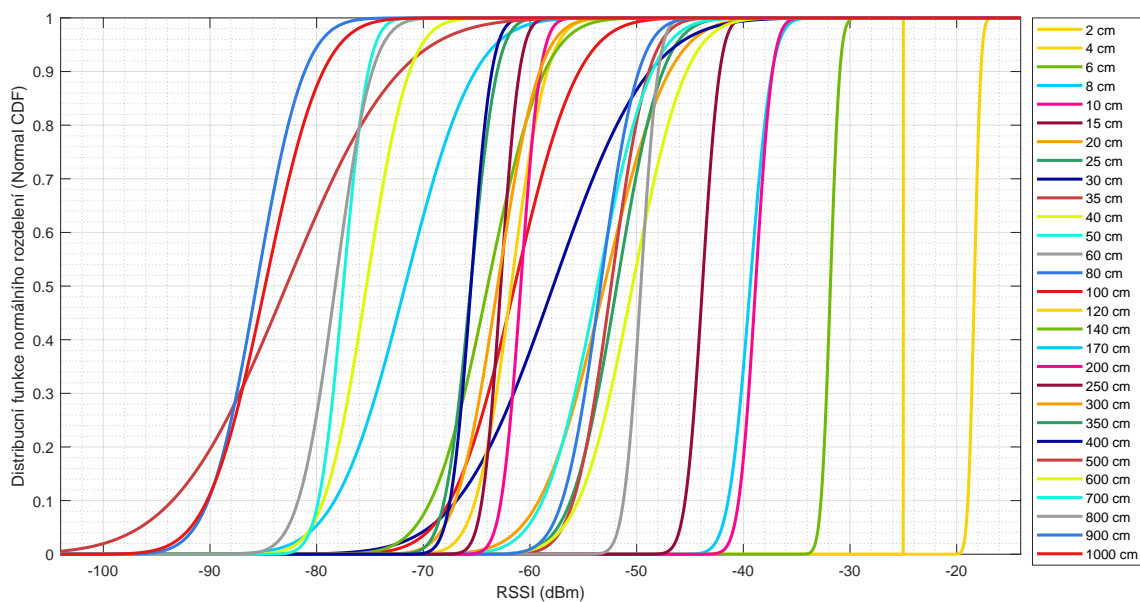
**Obrázek C.14.** Počty vzorků pro dané RSSI (dBm) a vzdálenost (m) pro měření při konstantním vysílacím výkonu 0 dBm v poloze C. Pro každou vzdálenost bylo změřeno 1000 vzorků.



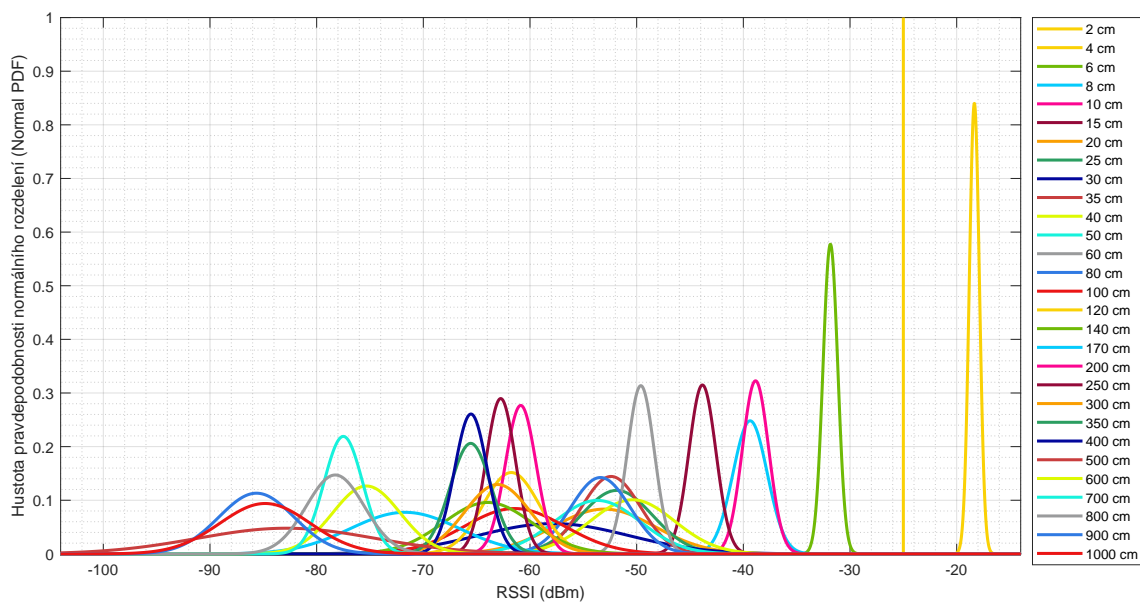
**Obrázek C.15.** Distribuční funkce z naměřených dat (-) v závislosti na RSSI (dBm) pro jednotlivé vzdálenosti (cm) při konstantním vysílacím výkonu 0 dBm v poloze C.



**Obrázek C.16.** Hustoty pravděpodobnosti z naměřených dat (-) v závislosti na RSSI (dBm) pro jednotlivé vzdálenosti (cm) při konstantním vysílacím výkonu 0 dBm v poloze C.



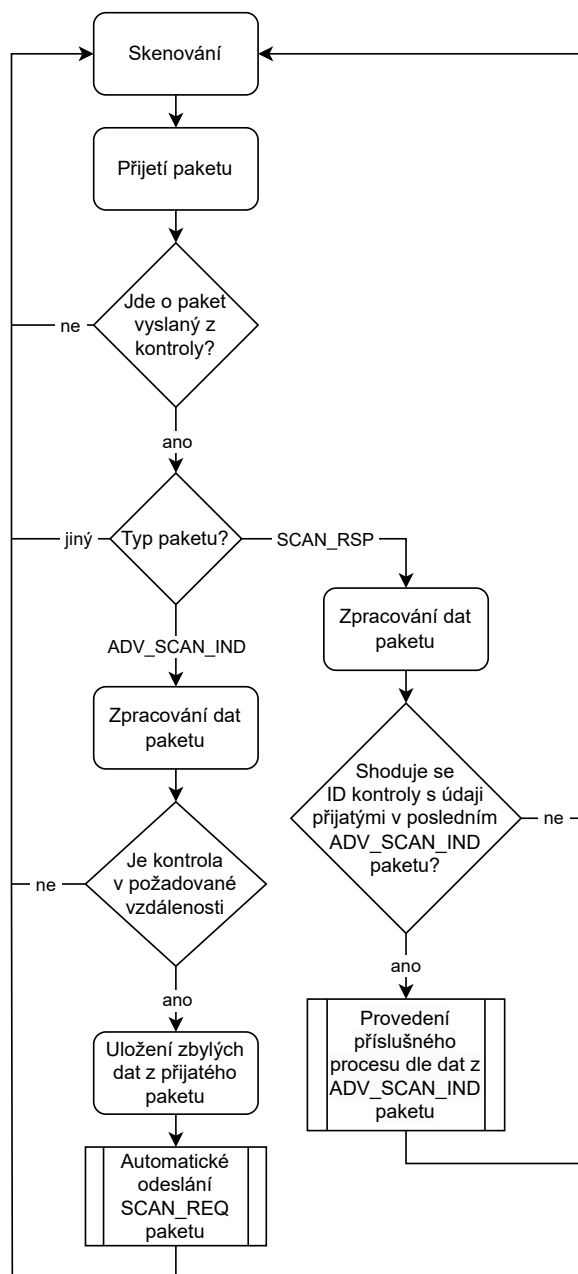
**Obrázek C.17.** Distribuční funkce normálního rozdělení (–) v závislosti na RSSI (dBm) pro jednotlivé vzdálenosti (cm) při konstantním vysílacím výkonu 0 dBm v poloze C.



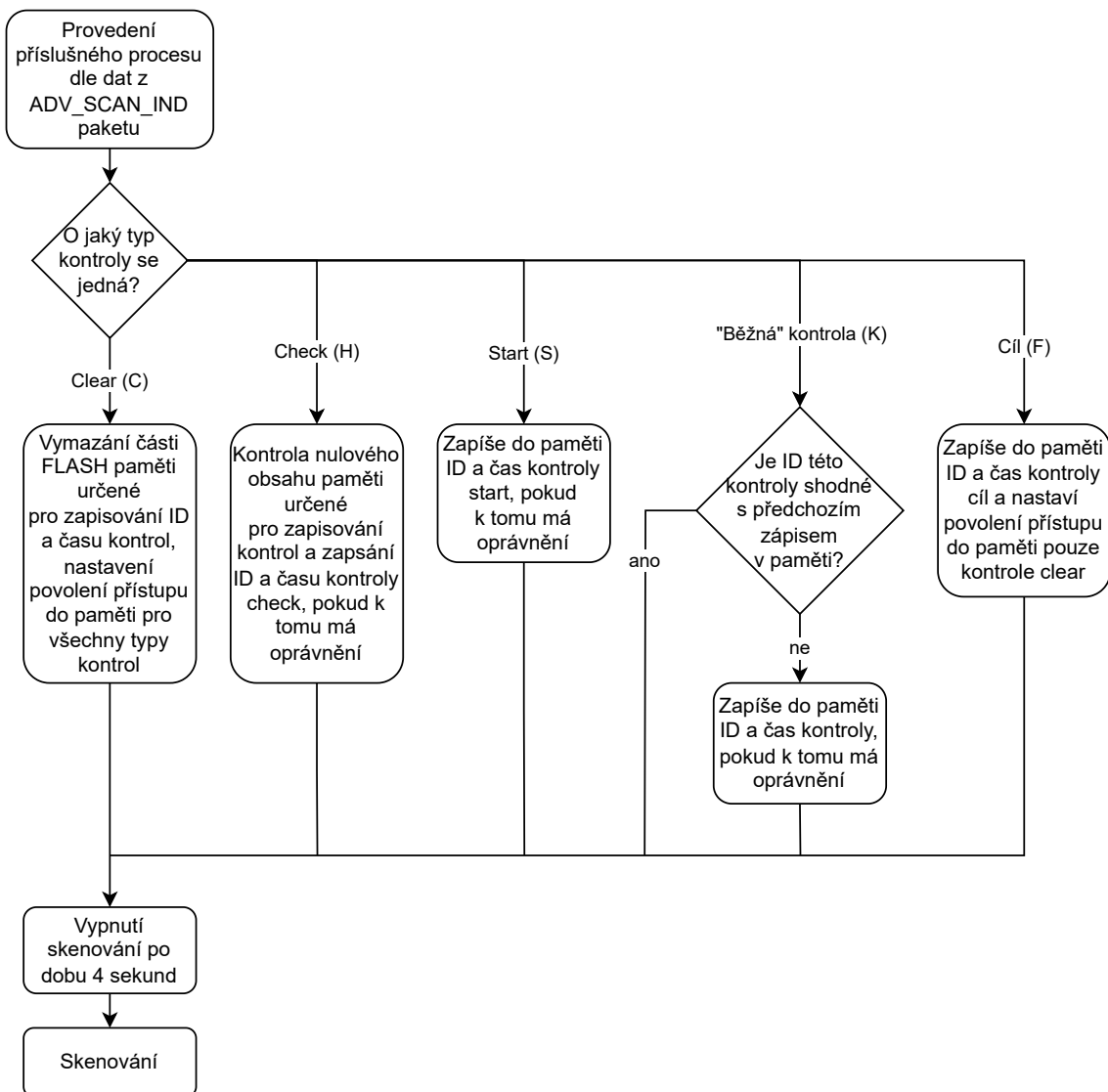
**Obrázek C.18.** Závislost hustoty pravděpodobnosti normálního rozdělení (–) na RSSI (dBm) pro jednotlivé vzdálenosti (cm) při konstantním vysílacím výkonu 0 dBm v poloze C.

## Příloha D

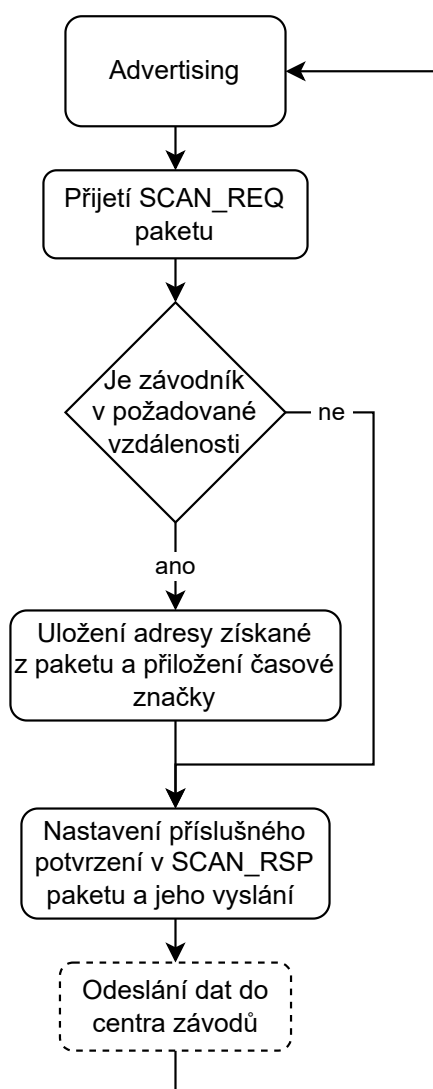
### Zpracování dat v kontrole a jednotce závodníka



Obrázek D.19. Procesní diagram fungování jednotky závodníka.



**Obrázek D.20.** Procesní diagram zpracování typu přijaté kontroly jednotkou závodníka.



**Obrázek D.21.** Procesní diagram fungování kontroly.

## Příloha E

### Struktura zdrojových kódů

V příložené komprimované složce BP\_Josef-Nagy\_prilohy.zip je uveden firmware pro kontrolu (složka Advertiser) a jednotku závodníka (složka Scanner) a zdrojové kódy pro zpracování a měření RSSI a samotná data (složka Měření RSSI).

#### E.1 Firmware kontroly

Firmware kontroly a závodníkovy jednotky byl napsán v programovacím jazyce C, s podporou [72] a [73]. Zde je vyobrazena zjednodušená struktura uspořádání zdrojových kódů:

```
Advertiser
+-- Includes - vložené externí knihovny
+-- Core
|   +-- Inc - hlavičkové soubory jádra programu
|   +-- Src - jádro programu
+-- Middlewares - HAL a knihovny usnadňující programování
|       mikrokontroléru
+-- STM32_WPAN
|   +-- App - složka obsahující veškerou uživatelem definovanou
|       obsluhu Bluetooth komunikace
+-- Utilities
|   +-- sequencer - řídí běh všech procesů v mikrokontroléru
+-- Debug - ladění programu
```

Většina uživatelské implementace se nachází ve složkách Src – například soubory main.c, app\_entry.c a App – například app\_ble.c, custom\_app.c.

#### E.2 Firmware závodníkovy jednotky

Firmware závodníkovy jednotky je podobně jako firmware kontroly napsán v jazyce C. I struktura je téměř totožná a liší se zejména v implementaci BLE.

#### E.3 Programy pro měření a zpracování RSSI

Pro měření RSSI slouží programy uartReader.py, uartReader2.py a convertor.py a jsou napsány v jazyce Python. Měření probíhalo následovně – advertiser vyslal paket o určitém výkonu na určitou vzdálenost. Ten zachytil scanner, změřil jeho RSSI a data odeslal po sériové lince do počítače. Zde výše zmiňované programy data zpracovávají a uloží do souborů ve formátu xlsx. Data uložená v těchto souborech byla následně zpracována a zobrazena ve formě grafů za použití Matlabu. Data samotná i skripty (meas\_X\_all.m a meas\_X\_OdBm.m) pro zpracování jsou také přílohy.

## Příloha F

### Seznam zkratek

$\pi/4$ -DQPSK	■ $\pi/4$ Differential quadrature phase shift keying – kombinace dvou konstelačních diagramů kvadraturního klíčování fázovým posuvem tak, že při přechodu z kterékoli pozice prvního diagramu do kterékoli pozice druhého diagramu nedochází k průchodu nulou
ADC	■ Analog-to-digital converter – analogově-digitální převodník, převádí spojitý signál na diskrétní
AES	■ Advanced encryption standard – symetrická bloková šifra s pevnou velikostí bloků, typy AES-128, či AES-256
ARM	■ Advanced RISC Machines – architektura procesorů, na nichž je založena většina mikrokontrolérů
BLE	■ Bluetooth low energy – technologie (verze) Bluetooth s nízkou spotřebou
BMS	■ Battery management system
BPSK	■ Binary phase shift keying – dvoustavové klíčování fázovým posuvem
BTS	■ Base transceiver station – základnová stanice
CBC-MAC	■ Cipher block chaining message authentication code – Způsob vytvoření autentizačního kódu zprávy (MAC) pomocí blokové šifry (CBC)
CSS	■ Chirp spread spectrum – technologie šíření signálu pomocí rozprostřeného spektra
DAC	■ Digital-to-analog converter – digitálně-analogový převodník, převádí diskrétní signál na spojitý
DS-UWB	■ Direct sequence ultra wide band – přímý způsob rozdělení spektra při UWB komunikaci
DSSS	■ Direct-sequence spread spectrum – metoda přímého rozprostřeného spektra
EDGE	■ Enhanced data rates for GSM evolution – standard 2,75. generace mobilních sítí
FHSS	■ Frequency-hopping spread spectrum – metoda přenosu v rozprostřeném spektru
FLASH	■ typ nevolatilní elektricky zapisovatelné paměti
FO	■ Falešné odmítnutí paketu na základě jeho RSSI (viz. 4.7)
FP	■ Falešné přijetí paketu na základě jeho RSSI (viz. 4.7)
FSK	■ Frequency shift keying – klíčování frekvenčním posuvem
FSL	■ Free space loss – útlum volného prostoru
GAP	■ Generic access profile – základní profil BLE, definující komunikaci mezi zařízeními a jejich role
GATT	■ Generic attribute profile – profil BLE obstarávající strukturování a poskytování dat pomocí tzv. servisů a charakteristik



GFSK	■ Gaussian frequency shift keying – klíčování frekvenčním posuvem s Gaussovým filtrem
GMSK	■ Gaussian minimum shift keying – MSK modulující signál filtrovaný Gaussovým filtrem
GPIO	■ General-purpose input/output – univerzální vstupní/výstupní pin, hardwarové rozhraní mikrokontroléru, umožňující připojení různých periférií
GPRS	■ General packet radio service – standard 2,5. generace mobilních sítí
GSM	■ Groupe spécial mobile – standard 2. generace mobilních sítí
HAL	■ Hardware abstraction layer – vysokoúrovňová vrstva umožňující jednodušší programování systému, poskytující standardizovaný soubor funkcí pro použití napříč produkty, nicméně s celkovou nízkou optimalizací systému
HCI	■ Host controller interface – standardizovaný způsob komunikace mezi protokoly a profily (viz. GAP, GATT, L2CAP...) a spojovou (viz. LL) a fyzickou vrstvou
IoT	■ Internet of things – internet věcí, systém propojení zařízení (senzorů, spotřebičů...) v jednu síť umožňující vzájemnou komunikaci
ISM pásmo	■ Industrial, scientific and medical – bezlicenční pásmo, lze jej využít bezplatně za předpokladu dodržení norem
I <sup>2</sup> C	■ Inter-integrated circuit – nízkorychlostní sériová sběrnice sloužící především k přenosu dat mezi mikrokontroléry a perifériemi
LL	■ Link layer – spojová vrstva, zajišťuje nastavení rádiové komunikace dvou zařízení, nejnižší možná programovatelná vrstva BLE s největší možností optimalizace
LOB	■ Lyžařský orientační běh – zimní varianta orientačního běhu
LoRa	■ Long range – IoT síť, technologie
LoRaWAN	■ LoRa wide area network – protokol využívající technologii LoRa
LoRaWAN gateway	■ přístupový bod do sítě LoRa – standardně je na jedné straně připojen s přístupem do internetu (například pomocí mobilní sítě) a na druhé straně má přístup do rádiové sítě LoRa
LPWAN	■ low power wide area network – rozlehlá síť s nízkou spotřebou
LTE	■ Long term evolution – standard 3,95. generace mobilních sítí
LTE Advance	■ Long term evolution advance – standard 4,5. generace mobilních sítí
L2CAP	■ Logical link control and adaptation protocol – vysokoúrovňový protokol poskytující segmentaci a opětovné sestavení paketů a informaci o QoS u BLE
MB-OFDM	■ Multi-band orthogonal frequency division multiplexing – rozdělení dat při použití OFDM do více frekvenčních pásem
MCU	■ Microcontroller unit – mikrokontrolér
MITM	■ Man in the middle – „člověk uprostřed“, způsob odposlouchávání a případně i pozměnění komunikace mezi dvěma body
MSK	■ Minimum shift keying – typ FSK modulace se spojitou změnou fáze

MTBO	■ Mountain bike orienteering – varianta orientačního běhu na horských kolech
MU-MIMO	■ Multiple user multiple input multiple output – způsob komunikace umožňující vysílat a přijímat data z více zařízení najednou
NB-IoT	■ Narrow band IoT – úzkopásmová IoT síť
O-QPSK	■ offset quadrature phase shift keying – varianta kvadraturního klíčování fázovým posuvem, při kterém je změna fáze omezena na $\pm 90^\circ$ a tím nedochází k průchodu nulou
OB	■ Orientační běh
OFDM	■ Orthogonal frequency division multiplexing – ortogonální multiplex s frekvenčním dělením
QAM	■ Quadrature amplitude modulation – kvadraturní amplitudová modulace, standardně psáno společně s číslem udávajícím počet stavů: 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM, 1024-QAM
QoS	■ Quality of service – systém řízení sítě pro dosažení nejlepších parametrů přenosu
QPSK	■ Quadrature phase shift keying – kvadraturní klíčování fázovým posuvem
RF	■ Radio frequency – rádiová frekvence
RFID	■ Radio-frequency identification
RSSI	■ Received signal strength indicator – ukazatel výkonové úrovně přijatého signálu
RTC	■ Real time clock – hodiny reálného času
SF	■ Spreading factor – faktor šíření signálu
SIM	■ Subscriber identity module – účastnická identifikační karta pro přístup do mobilních sítí
SiP	■ System in a package – systém v pouzdře, pouzdro (často i jeden malý plošný spoj) obsahující řadu různých obvodů – podobně jako SoC, ale s menší mírou integrace a možností použití i diskrétních součástek
SM	■ Security manager – obstarává zabezpečení komunikace u L2CAP
SMA	■ SubMiniature version A – typ koaxiálního RF konektoru
SO	■ Správné odmítnutí paketu na základě jeho RSSI (viz. 4.7)
SoC	■ System on a chip – systém na čipu, integrovaný obvod zahrnující řadu různých elektronických obvodů, například mikrokontrolér, komunikační sběrnice, ADC a DAC, rádiové obvody...
SP	■ Správné přijetí paketu na základě jeho RSSI (viz. 4.7)
SPI	■ Serial peripheral interface – sériová sběrnice sloužící především k přenosu dat mezi mikrokontroléry a periferiemi
SRAM	■ Static random access memory – volatilní paměť typu RAM bez nutnosti periodického obnovení uložených dat
SRR	■ Short range radio
Sub-1 GHz	■ pásmo frekvencí do 1 GHz
UART	■ Universal asynchronous receiver-transmitter – sběrnice sloužící k asynchronnímu sériovému přenosu dat
U.FL	■ Hirose U.FL – typ miniaturního RF konektoru pro použití zejména na deskách plošných spojů

---

UMTS	■ Universal mobile telecommunications system – standard 3. generace mobilních sítí
UUID	■ Universally unique identifier – univerzálně unikátní identifikátor, používá se v GATT k přesné identifikaci servisů a charakteristik a může být vlastní (128 bitů), nebo přesně stanovený (viz. [35])
UWB	■ Ultra wide band – komunikační technologie využívající široké frekvenční spektrum
WPAN	■ wireless personal area network – bezdrátová osobní síť
5G NR	■ New radio – standard 5. generace mobilních sítí
8DPSK	■ 8-phase differential phase shift keying – osmistavové diferenciální klíčování fázovým posuvem, fázový posun je takový, aby opět nedocházelo k průchodu nulou