



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

BEZDRÁTOVÝ KOMUNIKAČNÍ MODUL V PÁSMU 868 MHZ S PODPOROU MESH SÍTĚ

WIRELESS COMMUNICATION MODULE IN 868 MHZ BAND WITH MESH NETWORK SUPPORT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Marcel Uhlíř

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Aleš Povalač, Ph.D.

BRNO 2022



Diplomová práce

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

Ústav radioelektroniky

Student: Bc. Marcel Uhlíř

ID: 186220

Ročník: 2

Akademický rok: 2021/22

NÁZEV TÉMATU:

Bezdrátový komunikační modul v pásmu 868 MHz s podporou MESH sítě

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte prototyp bezdrátového komunikačního modulu, který umožňuje komunikaci v bezlicenčním pásmu ISM na frekvenci 868 MHz. Tento modul bude jednoduše implementovatelný do embedded zařízení, bude se skládat z RF vysílače, rádiové antény, řídicího mikrokontroléru a bude využívat SPI rozhraní. Zvolte vhodnou modulaci a navrhněte rozložení kanálů s ohledem na využití v MESH sítích. S využitím prototypu demonstруйте bezdrátovou komunikaci.

Navrhněte funkční verzi bezdrátového komunikačního modulu. Vytvořte firmware knihovnu, pomocí které bude modul komunikovat v režimu peer-to-peer a v režimu MESH sítě. Pro režim MESH sítě navrhněte vhodnou strukturu komunikačního protokolu a tu implementujte do firmware knihovny. Součástí MESH sítě bude i návrh postupu stavby sítě a její správy. Realizujte demonstrátor MESH sítě a zhodnoťte dosažené komunikační parametry.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] SICHITIU, Mihail L. Wireless mesh networks: opportunities and challenges. In: Proceedings of World Wireless Congress. 2005. p. 21.
- [2] GORREPOTU, Ramesh, et al. Sub-1GHz miniature wireless sensor node for IoT applications. Internet of Things, 2018, 1: 27-39.

Termín zadání: 11.2.2022

Termín odevzdání: 25.5.2022

Vedoucí práce: Ing. Aleš Povalač, Ph.D.

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá návrhem bezdrátového komunikačního modulu, který umožňuje komunikaci v bezlicenčním pásmu na frekvenci 868 MHz. Navržený modul je jednoduše implementovatelný do různých typů embedded zařízení pomocí technologie SMT. Tento komunikační modul se skládá z nízkopříkonového radiofrekvenčního vysílače, symetrizačního obvodu, impedančního přizpůsobení, rádiové antény a elektromagnetického stínění. Komunikace mezi embedded zařízením a bezdrátovým komunikačním modulem probíhá pomocí rozhraní SPI a konfigurovatelných GPIO. Součástí této práce je i navržená firmware knihovna, která obsluhuje bezdrátový komunikační modul a umožňuje komunikaci v režimu peer-to-peer a v režimu MESH sítě. Pro režim MESH sítě je navržena vhodná struktura komunikačního protokolu včetně její implementace. Součástí MESH sítě je vytvořen postup pro její vytvoření a správu. Využití této práce je směřováno do oblasti řídicích a senzorických systémů s uplatněním v automatizaci.

KLÍČOVÁ SLOVA

Bezdrátová komunikace, ISM pásmo, zařízení krátkého dosahu, komunikační modul, RF vysílač, keramická anténa, MESH síť

ABSTRACT

This thesis deals with design of a wireless communication module that allows communication in the unlicensed band at the frequency of 868 MHz. The designed module can be easily implemented in various types of embedded devices using SMT technology. This communication module consists of a low-power radio frequency transmitted, balancing element, impedance matching, radio antenna and electromagnetic shielding. Communication between the embedded device and the wireless communication module is realized using the SPI interface and configurable GPIOs. Part of this work is the proposed firmware library, which operates the wireless communication module and allows communication in peer-to-peer mode and in MESH network mode. A procedure for its creation and management is created as part of the MESH network. The use of this work is directed to the field of control and sensor systems with application in automation.

KEYWORDS

Wireless communication, ISM band, short range device, communication module, RF transceiver, ceramic antenna, MESH network

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE:

UHLÍŘ, Marcel. *Bezdrátový komunikační modul v pásmu 868 MHz s podporou MESH sítě*. Brno, 2022. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/141561>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky. Vedoucí práce Aleš Povalač.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI DÍLA

Jméno a příjmení studenta: Marcel Uhlíř
VUT ID studenta: 186 220
Typ práce: Diplomová práce
Akademický rok: 2021/2022
Téma závěrečné práce: Bezdrátový komunikační modul v pásmu 868 MHz s podporou MESH síť

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 15. května 2022

.....
podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Aleši Povalačovi, Ph.D. za účinnou metodiku, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování závěrečné práce.

V Brně dne: 15. května 2022

.....

podpis autora

OBSAH

ÚVOD	10
1 RÁDIOVÁ PÁSMA.....	11
1.1 Bezlicenční rádiová ISM pásma.....	12
1.2 Zařízení krátkého dosahu (SRD).....	13
1.3 Frekvenční pásmo 868 MHz pro SRD	14
2 BEZDRÁTOVÉ KOMUNIKAČNÍ MODULY.....	15
2.1 Rozdělení bezdrátových komunikačních modulů	16
2.2 Porovnání dostupných bezdrátových komunikačních modulů.....	16
2.3 Integrované antény pro bezdrátové komunikační moduly	18
2.3.1 Planární invertovaná L anténa (ILA).....	18
2.3.2 Planární invertovaná F anténa (IFA)	19
2.3.3 Planární meanderová monopólová anténa	19
2.3.4 Čipová anténa	20
2.3.5 Porovnání integrovaných antén	20
3 KOMUNIKAČNÍ TECHNOLOGIE.....	21
3.1 Topologie síťových propojení	21
3.1.1 Point-to-point (bod-bod).....	21
3.1.2 Bus (sběrnice)	21
3.1.3 Star (hvězda).....	22
3.1.4 Ring (kruh)	22
3.1.5 Tree (strom)	22
3.1.6 MESH	23
3.2 Přístupové metody ke sdílenému komunikačnímu kanálu	25
3.2.1 FDMA.....	25
3.2.2 TDMA	25
3.2.3 CDMA	26
3.2.4 CSMA.....	26
4 NÁVRH HARDWARE KOMUNIKAČNÍHO MODULU	27
4.1 Blokové schéma	27
4.2 Integrovaný obvod SPIRIT1.....	28
4.3 Symetrizační obvod.....	29
4.4 Čipová anténa	29
4.4.1 Obvod pro impedanční přizpůsobení antény	30
4.5 Elektromagnetický stínící kryt	31
4.6 Schéma zapojení bezdrátového komunikačního modulu	32
4.7 Návrh desky plošného spoje.....	33
4.8 Impedanční přizpůsobení čipové antény	33
5 NÁVRH HARDWARE VÝVOJOVÉHO KITU	37

5.1	Blokové schéma	37
5.2	Schéma zapojení vývojového kitu.....	37
5.3	Návrh desky plošného spoje.....	39
6	NÁVRH KOMUNIKACE V REŽIMU PEER-TO-PEER.....	41
6.1	Rozložení komunikačních kanálů	41
6.2	Digitální modulace signálu.....	42
6.2.1	Požadavky na digitální modulaci.....	42
6.2.2	Modulace GMSK.....	42
6.2.3	Výkonová spektrální analýza komunikačních kanálů	44
6.3	Formát paketu.....	47
6.3.1	Struktura paketu.....	48
6.3.2	Ochrana dat proti chybám.....	49
6.3.3	Čas potřebný k odvysílání paketu.....	49
6.4	Zabezpečení komunikace	50
6.5	Popis interface firmware knihovny	51
6.6	Portování knihovny na konkrétní hardware	51
6.7	Ovládací funkce pro komunikaci v režimu peer-to-peer.....	52
7	NÁVRH KOMUNIKACE V REŽIMU MESH	53
7.1	Klíčové předpoklady pro zvolené řešení	53
7.2	Základní koncept navrhované MESH sítě.....	53
7.2.1	Prvky sítě	53
7.2.2	Využití komunikačních kanálů	54
7.2.3	Adresování v síti	54
7.2.4	Zabezpečení sítě	54
7.3	Princip komunikace	54
7.3.1	Délka časového slotu	55
7.3.2	Řazení časových slotů	55
7.3.3	Podmínky funkčnosti	57
7.3.4	Časová odezva sítě.....	57
7.3.5	Komunikační protokol.....	57
7.4	Návrh postupu stavby sítě a její správy	59
7.4.1	Registrace do sítě.....	59
7.4.2	Stavba sítě.....	59
7.5	Srovnání navržené MESH sítě s již existujícími standardy	60
7.6	Popis interface firmware knihovny	61
8	MĚŘENÍ DOSAŽENÝCH PARAMETRŮ.....	62
8.1	Měření komunikačního dosahu v režimu peer-to-peer.....	62
8.1.1	Model šíření rádiového signálu	62
8.1.2	Model ztrát šířením signálu ve volném prostoru	62
8.1.3	Model ztrát dvou paprskovým šířením signálu	63
8.1.4	Citlivost radiofrekvenčního přijímače	63

8.1.5	Teoretický komunikační dosah.....	65
8.1.6	Fresnelova zóna	66
8.1.7	Sumarizace vstupních parametrů a teoretických hodnot	66
8.1.8	Měřicí přípravky	67
8.1.9	Místo měření.....	68
8.1.10	Výsledky měření komunikačního dosahu.....	69
8.2	Měření funkčnosti MESH sítě	71
8.2.1	Místo měření.....	71
8.2.2	Kontrolní měření rádiové viditelnosti mezi gatewayí a nody.....	72
8.2.3	Výsledek měření funkčnosti MESH sítě	72
	ZÁVĚR.....	74
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	78
	SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK	81
	SEZNAM OBRÁZKŮ	84
	SEZNAM TABULEK.....	86

ÚVOD

Bezdrátová komunikační technologie je v dnešní době nesmírně důležitou součástí oboru elektrotechniky. Výměna informací mezi dvěma zařízeními pomocí metalického vedení je v určitých případech poměrně komplikovaná, a tak využití bezdrátové komunikační technologie přináší určitý komfort a také mnohdy úsporu nákladů při instalaci koncových zařízení.

Tato práce řeší problematiku rozšíření libovolně jednoduchého embedded zařízení o možnost bezdrátového přenosu určité informace. V případě jednoduchých embedded zařízení je implementace radiofrekvenčního vysílače včetně integrované rádiové antény přímo na desku plošného spoje časově zdlouhavá a mnohdy je také finančně neefektivní, pokud není zařízení následně vyráběno v desítkách tisíc kusů. Jedním z problémů je, že deska plošného spoje zmíněných embedded zařízení je většinou vyráběna ze substrátu FR4 s tloušťkou 1,6 mm. Tyto parametry desky plošného spoje výrazně komplikují implementaci radiofrekvenčního rozhraní. Rovněž návrh a následně impedanční přizpůsobení rádiové antény je poměrně komplikovaná činnost, která se navíc opakuje v případě, že konstruované zařízení projde nějakou úpravou. V takovém případě se impedanční přizpůsobení antény musí zkontrolovat, případně navrhnout znovu.

Hlavním cílem této práce je navrhnout proprietární bezdrátový komunikační modul, který umožňuje komunikaci v bezlicenčním pásmu na frekvenci 868 MHz. Radiofrekvenční vysílač je tedy společně s rádiovou anténou implementován na bezdrátovém komunikačním modulu. Do cílového embedded zařízení je následně implementován tento komunikační modul, přičemž jeho implementace je velice jednoduchá. V tomto případě pouze stačí, aby byl bezdrátový komunikační modul připájen na desku plošného spoje a připojen k libovolnému mikrokontroleru. Komunikace s tímto modulem následně probíhá pomocí rozhraní SPI a čtyř GPIO. Vzhledem k tomu, že komunikační rozhraní SPI a vstupy GPIO jsou k dispozici na téměř každém mikrokontroleru, je univerzalita tohoto modulu skutečně velká.

Dalším cílem této práce je navrhnout firmware knihovnu pro správné ovládaní tohoto modulu. Tato knihovna je schopna podporovat dva komunikační režimy. Prvním komunikačním režimem je komunikace typu peer-to-peer určená pro jednoduchou výměnu informací mezi dvěma zařízeními. Druhým komunikačním režimem je komunikace pomocí MESH sítě. V této síti se nachází jeden řídicí prvek označovaný jako gateway (česky „brána“) a několik koncových bodů označovaných jako node (česky „uzel“). Informace se pak šíří přes všechny nody této sítě, čímž dochází ke zvýšení její robustnosti.

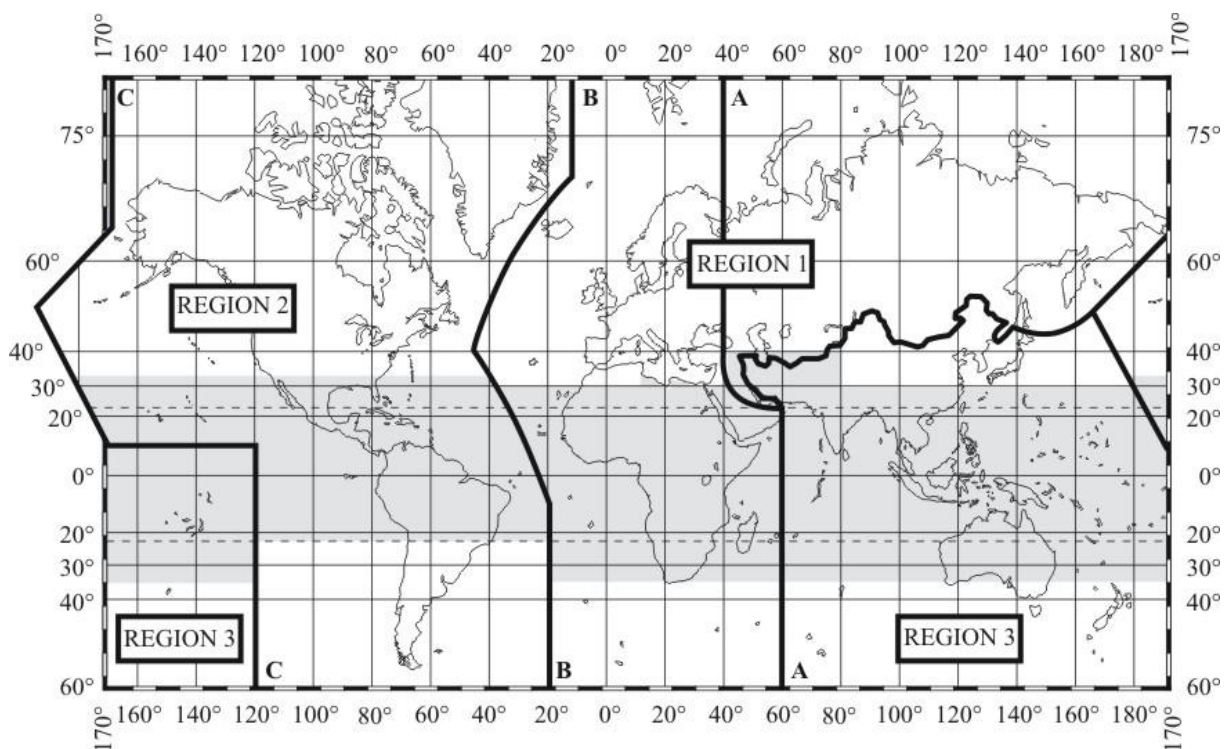
1 RÁDIOVÁ PÁSMA

Celosvětové využívání rádiového spektra pro komunikaci a jiné účely koordinuje Mezinárodní telekomunikační unie (zkratka ITU – International Telecommunication Unit). Jedná se o specializovanou agenturu spadající pod OSN, která se zabývá problematikou informačních a komunikačních technologií. Mezinárodní telekomunikační unie (ITU) vypracovává doporučení sloužící jako základ pro koordinovaný provoz celosvětových telekomunikačních sítí a služeb. [1]

Tato telekomunikační unie rozdělila svět na tři ITU regiony, kde každý region má svoji vlastní sestavu frekvenčních pásem, které může využívat pro konkrétní účely. Tyto regiony jsou definovány jako:

- Region 1 – tento region zahrnuje Evropu, Afriku, bývalý Sovětský svaz, Mongolsko a blízký východ na západ od Perského zálivu včetně Iráku,
- Region 2 – tento region zahrnuje Ameriku včetně Grónska a některé východní tichomořské ostrovy,
- Region 3 – tento region zahrnuje většinu Asie mimo FSU východně od Íránu včetně a většinu Oceánie.

Tyto regiony rozdělené Mezinárodní telekomunikační unií jsou graficky zobrazeny na následujícím obrázku.



Obr. 1.1: Rozdělení světových částí na regiony dle ITU [2]

Každé zařízení, které produkuje elektromagnetické záření v určitém rádiovém spektru, musí mít přidělenou odpovídající licenci. Přidělování těchto licencí má v každé zemi pod správou příslušná organizace. V případě České republiky je touto správou pověřen Český

telekomunikační úřad (zkratka ČTÚ), který rovněž upravuje podmínky využívání rádiového spektra s cílem účelného a flexibilního využití tohoto národního zdroje. [3]

1.1 Bezlicenční rádiová ISM pásma

Existují také definovaná frekvenční pásma, ve kterých není potřeba mít přidělenou licenci pro provoz zařízení, které v tomto frekvenčním pásmu produkuje elektromagnetické záření. Jedná se o bezlicenční rádiová ISM pásma, která doporučila k zavedení Mezinárodní telekomunikační unie (ITU). Rádiová ISM pásma (zkratka ISM – Industrial, Science and Medical) jsou primárně určena pro provoz zařízení v oblastech průmyslu, vědy a zdravotnictví. Jedná se o taková zařízení, která svou činností narušují rádiový provoz v konkrétním frekvenčním pásmu. Nejznámějším přístrojem pracujícím v rádiovém ISM pásmu je mikrovlnná trouba, která funguje na frekvenci 2,45 GHz.

V následující tabulce jsou uvedeny bezlicenční rádiová ISM pásma, která doporučuje Mezinárodní telekomunikační unie (ITU). V tabulce jsou uvedeny frekvenční rozsahy včetně střední frekvence. Současně je pro každé frekvenční pásmo uvedena maximální hodnota intenzity elektrického pole, kterou je možné naměřit ve vzdálenosti třicet metrů od hranice budovy, ve které je zařízení produkující elektromagnetické záření v daném rádiovém ISM pásmu.

Tabulka 1.1: Bezlicenční rádiová ISM pásma dle doporučení ITU [4]

Frekvenční pásmo	Střední frekvence	Maximální intenzita elektrického pole
6,765–6,795 MHz	6,78 MHz	80–100 dB μ V/m
13,553–13,567 MHz	13,567 MHz	80–120 dB μ V/m
26,957–27,283 MHz	27,12 MHz	70–120 dB μ V/m
40,66–40,70 MHz	40,68 MHz	60–120 dB μ V/m
433,05–434,79 MHz	433,92 MHz	60–120 dB μ V/m
902,0–928,0 MHz	915 MHz	60–120 dB μ V/m
2,4–2,5 GHz	2,45 GHz	30–120 dB μ V/m
5,725–5,825 GHz	5,8 GHz	neuveďeno
24,00–24,25GHz	24,125 GHz	neuveďeno
61,0–61,5 GHz	61,25 GHz	neuveďeno
122–123 GHz	122,5 GHz	neuveďeno
244–246 GHz	245 GHz	neuveďeno

V dnešní době se bezlicenční rádiová ISM pásma používají i pro komunikační účely. Nutnou podmínkou pro provoz takového komunikačního zařízení, je že musí být dostatečně odolné vůči okolnímu rušení v tomto frekvenčním pásmu. Mezi nejznámější komunikační technologie pracující v rádiovém ISM pásmu patří technologie Wi-Fi (standard IEEE 802.11) a technologie Bluetooth (standard IEEE 802.15.1).

1.2 Zařízení krátkého dosahu (SRD)

Kromě Mezinárodní telekomunikační unie (ITU) existuje pro Evropu podobná organizace, která se nazývá Konference evropských správ pošt a telekomunikací (zkratka CEPT – European Conference of Postal and Telecommunications Administrations). Tato Evropská organizace otevírá prostor pro celoevropskou diskusi ohledně vývoje telekomunikací a také prostřednictvím společné pozice dává členským státům možnost ovlivnit směřování Mezinárodní telekomunikační unie (ITU). Konference evropských správ pošt a telekomunikací (CEPT) také vydává skrze Evropský ústav pro telekomunikační standardy (zkratka ETSI – European Telecommunication Standards Institute) závazné normy.

Tato organizace také zavedla pojem zařízení krátkého dosahu (zkratka SRD – Short Range Device) a definuje je jako zařízení, které komunikují v bezlicenčních rádiových ISM pásmech s malým vyzářovacím výkonem, který je limitován typicky kolem hodnoty 25 až 100 mW e.r.p. Tímto způsobem je limitován dosah SRD na stovky metrů v otevřeném prostředí a na desítky metrů v zastavěném prostředí. Velkou výhodou těchto zařízení je s ohledem na limitovaný vyzářovací výkon jejich malá proudová spotřeba, čímž jsou tyto zařízení klasifikovány jako nízko příkonové.

V Evropě platí pro SRD norma EN 300 220. V České republice platí tato norma pod označením ČSN ETSI EN 300 220. Tato norma se zaměřuje na frekvenční pásmo od 25 MHz až 1 000 MHz, kde současně doplňuje bezlicenční rádiová ISM pásma doporučené Mezinárodní telekomunikační unií (ITU) o nové frekvenční rozsahy, které jsou určeny právě pro SRD. Jedním z těchto doplněných pásem je frekvenční pásmo od 863 MHz do 870 MHz.

Tabulka 1.2: Frekvenční pásma pro SRD uvedené ve všeobecném oprávnění ČTÚ [5]

Označení	Frekvenční pásmo	Vyzářený výkon	Klíčovací poměr
<i>a</i>	13,553–13,567 MHz	10 mW e.r.p.	≤ 100 %
<i>b</i>	26,957–27,283 MHz	10 mW e.r.p.	≤ 100 %
<i>c</i>	40,66–40,70 MHz	10 mW e.r.p.	≤ 100 %
<i>d</i>	138,20–138,45 MHz	10 mW e.r.p.	≤ 1 %
<i>e</i>	169,400–169,475 MHz	500 mW e.r.p.	≤ 1 %
<i>f</i>	433,05–434,79 MHz	10 mW e.r.p.	≤ 10 %
<i>g</i>	863–870 MHz	25 mW e.r.p.	≤ 0,1 %
<i>h1</i>	870,0–875,8 MHz	25 mW e.r.p.	≤ 1 %
<i>h2</i>	870–876 MHz	25 mW e.r.p.	≤ 0,1 %
<i>i1</i>	915–921 MHz	25 mW e.r.p.	≤ 0,1 %
<i>i2</i>	912,2–920,8 MHz	25 mW e.r.p.	≤ 1 %
<i>j</i>	2 400,0–2 483,5 MHz	25 mW e.i.r.p.	≤ 100 %
<i>k</i>	5 725–5 875 MHz	25 mW e.i.r.p.	≤ 100 %
<i>l</i>	24,00–24,25 GHz	100 mW e.i.r.p.	≤ 100 %
<i>m</i>	57–64 GHz	100 mW e.i.r.p.	≤ 100 %
<i>n</i>	122–123 GHz	100 mW e.i.r.p.	≤ 100 %
<i>o</i>	244–246 GHz	100 mW e.i.r.p.	≤ 100 %

Český telekomunikační úřad (ČTÚ) při vytváření plánu na využití rádiového spektra vychází z výše zmíněných norem pro SRD. V České republice je aktuálně platné všeobecné oprávnění č. VO-R/10/03.2021-4 k využívání rádiových kmitočtů a k provozování zařízení krátkého dosahu. [5]

Ve výše uvedené tabulce je uvedeno rozdělení frekvenčních pásem definovaných v tomto všeobecném oprávnění, které lze využít pro bezlicenční komunikaci SRD. Kromě označení frekvenčních pásem a jejich frekvenčních rozsahů jsou zde uvedeny i limitní vyzářené výkony. Dalším důležitým parametrem každého pásma je hodnota klíčovacího poměru, který udává kolik procent celkového času může dané SRD vysílat. Tento údaj se většinou vztahuje na měření v rámci jedné hodiny. Například klíčovací poměr 1 % znamená, že za časový úsek o délce jedné hodiny může dané SRD vysílat maximálně 36 sekund.

1.3 Frekvenční pásmo 868 MHz pro SRD

Frekvenční pásmo 868 MHz označované jako *g* dle všeobecného oprávnění Českého telekomunikačního úřadu (ČTÚ) se dále dělí na jednotlivá sub pásma. Přehled těchto sub pásem je uveden v následující tabulce.

Tabulka 1.3: Frekvenční pásmo *g* pro SRD uvedené ve všeobecném oprávnění ČTÚ [5]

Označení	Frekvenční pásmo	Vyzářený výkon	Rozteč kanálů	Klíčovací poměr	Další
<i>g</i>	863,0–870,0 MHz	25 mW e.r.p.	≤ 100 kHz	≤ 0,1 %	a
<i>g1</i>	862,0–863,0 MHz	25 mW e.r.p.	350 kHz	≤ 0,1 %	–
<i>g2</i>	863,0–870,0 MHz	25 mW e.r.p.	–	≤ 0,1 %	b, c
<i>g3</i>	863,0–870,0 MHz	25 mW e.r.p.	≤ 100 kHz	≤ 0,1 %	c
<i>g4</i>	863,0–870,0 MHz	25 mW e.r.p.	–	≤ 1 %	–
<i>g5</i>	868,0–868,6 MHz	25 mW e.r.p.	–	≤ 1 %	–
<i>g6</i>	868,7–869,2 MHz	25 mW e.r.p.	–	≤ 0,1 %	–
<i>g7</i>	868,4–868,65 MHz	500 mW e.r.p.	25 kHz	≤ 10 %	–
<i>g8</i>	869,7–870,0 MHz	5 mW e.r.p.	–	≤ 100 %	–
<i>g9</i>	869,7–870,0 MHz	25 mW e.r.p.	–	≤ 0,1 %	–

Ve frekvenčním pásmu *g* lze obecně komunikovat třemi způsoby:

- Zařízení s modulací FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum) a kanálovou roztečí ≤ 100 kHz,
- Zařízení s modulací DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) nebo jinou širokopásmovou modulací kromě FHSS bez omezení kanálové rozteče (u této varianty je pak omezena spektrální hustota výkonu dle všeobecného oprávnění),
- Úzkopásmové zařízení s kanálovou roztečí ≤ 100 kHz.

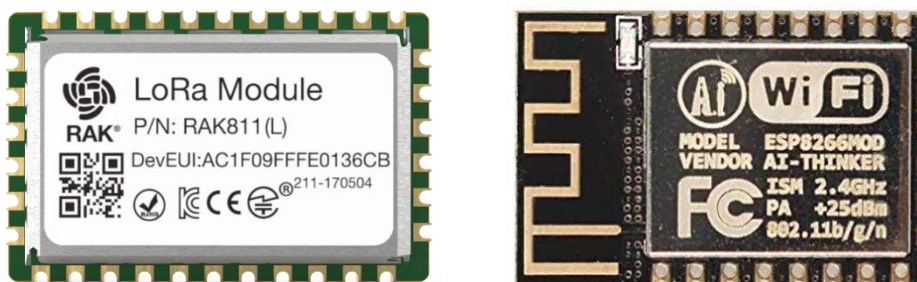
Tyto zmíněné komunikační způsoby jsou odkazují na výše uvedenou tabulku. Ve frekvenčních pásmech, kde je omezena kanálová rozteč, se doporučuje využívat kanálové rozteče 100 kHz, 50 kHz a 25 kHz. V celém frekvenčním pásmu *g*, tj *g1* až *g9*, s výjimkou pásma *g4* je možné zrušit omezení klíčovacího poměru za předpokladu, že zařízení vysílá pouze na vyžádání na základě příjmu. [5]

2 BEZDRÁTOVÉ KOMUNIKAČNÍ MODULY

V embedded zařízeních velice často vzniká potřeba přenášet určitou informaci bezdrátovým způsobem. Tato potřeba vzniká rovnou z několika hlavních důvodů. Jedním z těchto důvodů je určitý komfort, který bezdrátová komunikace přináší koncovému uživateli. Může se jednat například o dálkové ovladače pro ovládání centrálního zamykání auta nebo garážových vrat. Dalším důvodem využití bezdrátové komunikace v embedded zařízeních je úspora nákladů při jejich instalaci. V tomto případě se může jednat například o bezdrátové systémy průmyslové a domácí automatizace, kde přenos informací bezdrátovým způsobem mezi prvky je z instalačního hlediska daleko levnější než pomocí metalického propojení.

Implementace bezdrátové komunikace do embedded zařízení může obecně probíhat dvojím způsobem. Prvním způsobem je kompletní návrh bezdrátové komunikace přímo na desce plošného spoje. To ovšem znamená nemalé komplikace. Kvalitní návrh bezdrátové komunikace je v jednoduchém embedded zařízení poměrně složitý. Tyto zařízení jsou většinou navrhovány s využitím dvouvrstvé desky plošného spoje, což ve většině případů znemožňuje návrh bezdrátové komunikace na frekvencích rovných několika stovek megahertzů a frekvencích vyšších. Dalším problémem návrhu bezdrátové komunikace přímo na desce plošného spoje embedded zařízení je, že po každé jeho revizi musí být zkontrolováno, jestli nedošlo k nepříznivému ovlivnění radiofrekvenčního obvodu a impedančnímu přizpůsobení integrované antény, je-li instalována.

Druhým způsobem, jak do embedded zařízení implementovat bezdrátovou komunikaci, je využití bezdrátového komunikačního modulu. V takovémto případě se radiofrekvenční modul společně s dalšími potřebnými obvody nachází na předem navrženém a vyladěném modulu, který je následně jednoduchým způsobem implementován do embedded zařízení. Takové řešení s sebou přináší několik důležitých výhod. První výhodou je, že vývojový pracovník vytvářející embedded zařízení nemusí mít tak rozsáhlé znalosti ohledně radiofrekvenční techniky a současně čas potřebný na vývoj takového zařízení je výrazně kratší. S využitím bezdrátového komunikačního modulu může být toto zařízení navrženo i na dvouvrstvé desce plošného spoje. Další výhodou je, že případná revize navrženého zařízení následně nevyžaduje žádné úpravy na straně bezdrátového komunikačního modulu. Každé nově vyvinuté zařízení, které lze uvést na trh, vyžaduje testování shody a certifikaci určitou certifikační autoritou. Pokud embedded zařízení implementuje otestovaný a certifikovaný bezdrátový komunikační modul, certifikuje se pak pouze navržené embedded zařízení, což šetří čas a náklady spojené s certifikací.



Obr. 2.1: Bezdrátový komunikační modul bez antény (vlevo) a s anténou (vpravo) [6], [7]

Na výše uvedeném obrázku jsou zobrazeny dva bezdrátové komunikační moduly. Vlevo je zobrazen komunikační modul ve frekvenčním pásmu 868 MHz, který obsahuje pouze komunikační rozhraní, ale neobsahuje integrovanou anténu. Na obrázku vpravo je zobrazen bezdrátový komunikační modul pracující v pásmu 2,45 GHz, který už integrovanou anténu obsahuje.

2.1 Rozdělení bezdrátových komunikačních modulů

Bezdrátové komunikační moduly lze z pohledu využití obecně rozdělit do několika následujících kategorií: [8]

- Transmitter – jedná se o bezdrátový komunikační modul, který plní pouze úlohu vysílače rádiového signálu,
- Receiver – jedná se o bezdrátový komunikační modul, který plní pouze úlohu přijímače rádiového signálu,
- Transceiver – jedná se o bezdrátový komunikační modul, který dokáže rádiový signál vysílat a současně i přijímat,
- System on a Chip (SoC) – jedná se o bezdrátový komunikační modul jako je transceiver, oproti kterému obsahuje navíc zabudovaný mikrokontroler, který je využit pro zpracování přenášených datových paketů.

Důvodem využití transmitterů a receiverů je jejich nízká pořizovací cena. Tyto typy bezdrátových komunikačních modulů se často vyskytují ve velice jednoduchých embedded zařízeních, u kterých není zapotřebí využít přenos informace i opačným směrem. Může se jednat například o bezdrátové domácí meteorostanice a bezdrátové domovní zvonky.

Bezdrátové komunikační moduly typu transceiveru typicky umožňují poloduplexní komunikaci, přičemž existují i plně duplexní varianty, které jsou kvůli své složitosti také dražší. Moduly poskytující poloduplexní komunikaci v technické praxi plně dostačují i pro různé bezdrátové automatizační systémy.

Bezdrátové komunikační moduly typu System on a Chip (SoC) obsahují také kromě radiofrekvenčního rozhraní i integrovaný mikrokontroler, který se obvykle používá pro zpracování přenášených datových paketů a ke správě nižších vrstev komunikačního protokolu. Tento typ komunikačního modulu bývá využit v případě, že si vývojář embedded zařízení nepřeje začlenit kompletní komunikační protokol do svého mikrokontroleru. V takovém případě je zpracování komunikačního protokolu implementováno do mikrokontroleru bezdrátového komunikačního modulu a s nadřazeným mikrokontrolerem se komunikuje pomocí předem dohodnutých zpráv. V některých případech může být celá aplikace embedded zařízení naprogramována do integrovaného mikrokontroleru bezdrátového komunikačního modulu. [9]

2.2 Porovnání dostupných bezdrátových komunikačních modulů

V následujících tabulkách jsou uvedeny běžně dostupné bezdrátové komunikační moduly, které jsou využívány pro komunikaci ve frekvenčním pásmu 868 MHz. V první tabulce jsou uvedeny

komunikační moduly od výrobce HOPE MICROELECTRONICS, které se liší primárně vysílacím výkonem. Ve druhé tabulce jsou uvedeny komunikační moduly jiných výrobců.

Tabulka 2.1: Dostupné bezdrátové komunikační moduly pro 868 MHz, část 1 [10], [11], [12]

Modul	RFM12B-868S2P	RFM23B-868D	RFM95W-868-S2R
Výrobce	HOPE MICROELECTRONICS		
Typ	Transceiver	Transceiver	Transceiver
Napájecí napětí	2,2–3,8 V	1,8–3,6 V	1,8–3,7 V
Vysílací výkon	4 dBm	13 dBm	20 dBm
Citlivost přijímače	-105 dBm	-121 dBm	-123 dBm
Přenosová rychlost	≤ 115,2 kbps	≤ 256 kbps	≤ 300 kbps
Proudová spotřeba	23 mA	85 mA	120 mA
Spotřeba ve spánku	0,3 μA	1 μA	0,2 μA
Komunikační rozhraní	SPI	SPI	SPI
Integrovaná anténa	Ne	Ne	Ne
Osazovací technologie	SMT	THT	SMT
Rozměry	15,9 x 16,1 mm	16 x 16 mm	16 x 16 mm
Cena (100 ks)	69 Kč	72 Kč	124 Kč

Tabulka 2.2: Dostupné bezdrátové komunikační moduly pro 868 MHz, část 2 [13], [14], [15]

Modul	RC-CC1101-SPI-868	SPSGRF-868	TR-76DA
Výrobce	RADIOCONTROLLI	STMICROELECTRONICS	IQRF TECH
RF IC	CC101	SPIRIT1	SPIRIT1
Typ	Transceiver	Transceiver	System on a Chip
Napájecí napětí	1,8–3,6 V	1,8–3,6 V	3,0–3,4 V
Vysílací výkon	10 dBm	11,6 dBm	9 dBm
Citlivost přijímače	-110 dBm	-118 dBm	-104 dBm
Přenosová rychlost	≤ 500 kbps	≤ 500 kbps	19,8 kbps
Proudová spotřeba	29 mA	22 mA	21,5 mA
Spotřeba ve spánku	0,2 μA	0,1 μA	0,6 μA
Komunikační rozhraní	SPI	SPI	SPI / UART
Integrovaná anténa	Ne	Ano	Ano
Osazovací technologie	SMT	SMT	SMT
Rozměry	15 x 18 mm	13,5 x 11,5 mm	23,3 x 14,9 mm
Cena (100 ks)	214 Kč	388 Kč	346 Kč

V těchto tabulkách jsou uvedeny proudové spotřeby modulů, kde tento údaj znamená proudovou spotřebu ve vysílacím režimu. Nejčastějším komunikačním rozhraním pro komunikaci s bezdrátovým komunikačním modulem bývá použito rozhraní SPI. Výjimkou je zmíněný modul TR-76DA, který nabízí i rozhraní UART, protože se jedná o komunikační modul typu System on a Chip (SoC).

2.3 Integrované antény pro bezdrátové komunikační moduly

Rádiová anténa je velice důležitou součástí bezdrátově komunikujících systémů. Podle definice je rádiová anténa zařízení, které umožňuje převod vysokofrekvenčního signálu, který se pohybuje po elektrickém vodiči, na signál elektromagnetické vlny ve volném prostoru (režim vysílání) nebo naopak převod elektromagnetické vlny na elektrický signál (režim příjmu).

Bezdrátové komunikační moduly jsou z hlediska přítomnosti integrované antény děleny na dvě kategorie:

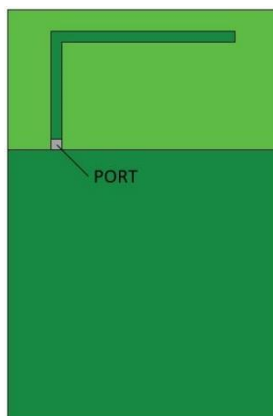
- S integrovanou anténou – bezdrátový komunikační modul obsahuje rádiovou anténu, která je impedančně přizpůsobena pro konkrétní vysílací frekvenci,
- Bez antény – bezdrátový komunikační modul obsahuje buď koaxiální konektor nebo vyvedený výstup pro připojení antény.

Bezdrátové komunikační moduly obsahující integrovanou anténu se většinou používají, pokud je embedded zařízení uloženo v plastovém boxu. Dosah takové antény pro SRD vysílající s výkonem 25 mW ve frekvenčním pásmu 868 MHz jsou stovky metrů v otevřeném prostředí a desítky metrů v zastavěném prostředí. V případě, že bezdrátové komunikační moduly integrovanou anténu nemají, tak mají vyvedený vyveden buď koaxiální konektor nebo pouze výstup pro připojení antény s hodnotou charakteristické impedance 50 Ω . Tento typ komunikačního modulu je vhodné použít, pokud embedded zařízení bude uzavřeno ve stíněné krabici nebo pokud je vyžadován vzdálenější dosah vysílaného a přijímaného signálu.

V následujících podkapitolách jsou uvedeny základní typy integrovaných antén, které se používají pro bezdrátové komunikační moduly. Kromě keramické antény jsou všechny antény uvedeny v jejich planární variantě.

2.3.1 Planární invertovaná L anténa (ILA)

Základem planární invertované L antény (ILA) je standardní monopólová anténa. V tomto případě je tato monopólová anténa vytvarována do písmene L, kde delší strana této monopólové antény běží paralelně se zemní plochou. Tento typ antény má oproti klasické monopólové anténě výhodu v tom, že je kratší a kompaktnější. Nevýhodou této antény je potřeba přizpůsobovacího obvodu pro lepší impedanční přizpůsobení. Planární invertovaná L anténa je zobrazena na následujícím obrázku. [16]

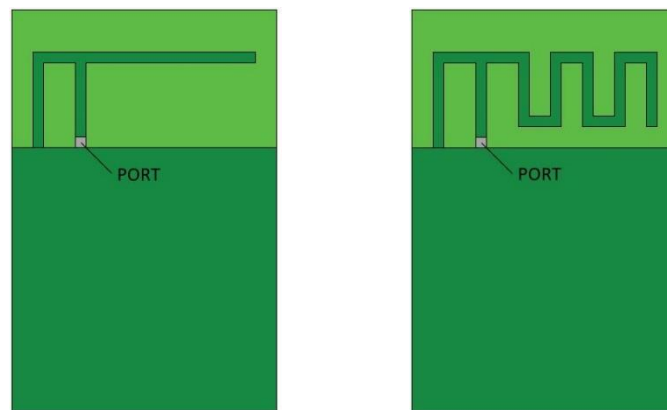


Obr. 2.2: Planární invertovaná L anténa (ILA)

2.3.2 Planární invertovaná F anténa (IFA)

U planární invertovaná F antény (IFA) je stejně nějakou u invertované L antény základem standardní monopólová anténa. V tomto případě je ale tato monopólová anténa vytvářena do písmene F. Grafické znázornění této antény je zobrazeno na následujícím obrázku (vlevo). Zkratovaná část této antény slouží jako paralelně přidaná indukčnost, která je využita pro lepší impedanční přizpůsobení antény. Velkou výhodou této invertované F antény je, že změnou vzdálenosti mezi zkratovanou indukčností a napájecím portem lze měnit impedanci antény tak, aby tato anténa byla vhodně impedančně přizpůsobena i bez použití přizpůsobovacího obvodu.

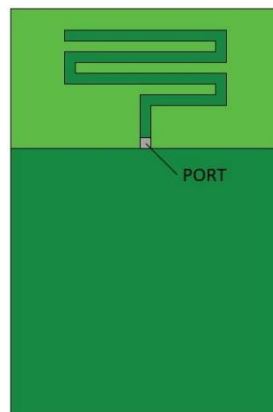
U této antény lze dosáhnout ještě menšího rozměru použitím technologie meanderů. Tento typ antény je pak označován jako meanderová invertovaná F anténa (MIFA). Tvar meanderové invertované F antény je zobrazen na následujícím obrázku (vpravo). Kvůli svým malým rozměrům a dobrému impedančnímu přizpůsobení je tento typ antény je velice často použit na bezdrátových komunikačních modulech pracujících ve frekvenčním pásmu 2,45 GHz. [16]



Obr. 2.3: Planární invertovaná F anténa (vlevo) a její meanderová úprava (vpravo)

2.3.3 Planární meanderová monopólová anténa

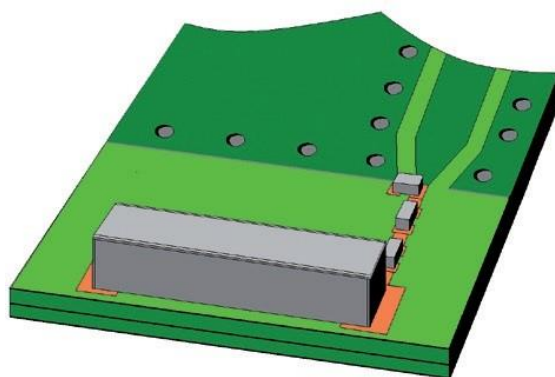
Planární meanderová anténa vychází ze standardní monopólové antény, na kterou je aplikována technologie meanderů, kvůli které dosahuje malých rozměrů. Vzhledem k tomu, že u této antény převládá její kapacitní charakter, musí být využit přizpůsobovací obvod pro dobré impedanční přizpůsobení. Planární meanderová anténa je zobrazena na následujícím obrázku.



Obr. 2.4: Planární meanderová monopólová anténa

2.3.4 Čipová anténa

Tento druh rádiové antény se skládá z dielektrického materiálu, který má velkou permitivitu a nízké dielektrické ztráty, na kterém jsou pomocí LTCC (low temperature co-fired ceramic) technologie natištěny elektricky vodivé cesty, případně se tyto cesty mohou nacházet i uvnitř dielektrického materiálu. Použitím dielektrického materiálu s velkou permitivitou je dosaženo poměrně velké redukce rozměrů antény. Současně je do tohoto nízkoztrátového dielektrického materiálu koncentrováno elektromagnetické pole, čímž je zajištěna dostatečná radiační účinnost i na vysoce ztrátových deskách plošného spoje, které jsou například vyrobeny z materiálu FR4. Parametry čipové antény rovněž nejsou příliš ovlivněny v případě umístění dielektrického materiálu do blízkého pole antény. Tyto čipové antény jsou osazovány pomocí technologie SMT a jsou k dostání v mnoha různých variantách provedení a v širokých škálách parametrů. Na následujícím obrázku je zobrazen model čipové antény, který je umístěn na desce plošného spoje společně s přizpůsobovacím obvodem.



Obr. 2.5: Model čipové antény společně s přizpůsobovacím obvodem [17]

2.3.5 Porovnání integrovaných antén

V následující tabulce jsou porovnány výše uvedené typy rádiových antén, které se běžně používají jako integrované antény v bezdrátových komunikačních modulech. Porovnání těchto integrovaných antén vychází právě z pohledu vhodnosti pro bezdrátový komunikační modul, u kterého se předpokládají jeho malé rozměry.

Tabulka 2.3: Porovnání integrovaných antén pro bezdrátové komunikační moduly

Typ antény	Výhody	Nevýhody
ILA	relativně jednoduchý návrh	vyžaduje přizpůsobovací obvod, malá redukce rozměrů
IFA	nepotřebuje přizpůsobovací obvod, je laditelná	malá redukce rozměrů
MIFA	nepotřebuje přizpůsobovací obvod, dostatečná redukce rozměrů	malá šířka pásma
Meanderová monopólová anténa	dostatečná redukce rozměrů	převládá kapacitní charakter, vyžaduje přizpůsobovací obvod
Čipová anténa	dostatečná radiační účinnost, velká redukce rozměrů	vyžaduje přizpůsobovací obvod, další náklady při výrobě

3 KOMUNIKAČNÍ TECHNOLOGIE

V rámci této kapitoly jsou uvedeny základní komunikační technologie, které jsou uplatněny při návrhu způsobu komunikace mezi jednotlivými bezdrátovými komunikačními moduly. Jsou zde naznačeny využívané síťové topologie a následně jsou uvedeny metody přístupu ke společnému komunikačnímu kanálu.

3.1 Topologie síťových propojení

Na problematiku topologie síťových propojení lze nahlížet pomocí dvou základních pohledů. Prvním pohledem je jejich fyzické uspořádání, které definuje, která zařízení jsou propojena pomocí drátového nebo bezdrátového propojení. Druhým pohledem je pak jejich logické uspořádání, které definuje, která zařízení si spolu vyměňují data nezávisle na jejich fyzickém uspořádání. Základní topologie sítí jsou následně krátce popsány.

3.1.1 Point-to-point (bod-bod)

Síťová topologie point-to-point je tou nejzákladnější topologií, při které jsou spolu propojeny právě dvě zařízení, které spolu komunikují. Z pohledu fyzického uspořádání přináší tento model značnou výhodu ve formě možnosti neustálé komunikace mezi těmito zařízeními, čímž může být přeneseno velké množství dat. Síťová topologie point-to-point je zobrazena na následujícím obrázku.

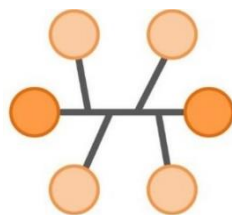


Obr. 3.1: Síťová topologie point-to-point (bod-bod) [18]

Současně je hodně využíván i pojem peer-to-peer, který rovněž označuje komunikaci mezi právě dvěma zařízeními. Rozdíl oproti point-to-point je v tom, že při komunikaci point-to-point spolu komunikují dvě zařízení, která mohou komunikovat pouze spolu, zatímco při komunikaci peer-to-peer dochází ke komunikaci dvou zařízení na společném komunikačním kanálu, na kterém se mohou vyskytovat i jiná zařízení, která se ovšem do komunikace nezapojují.

3.1.2 Bus (sběrnice)

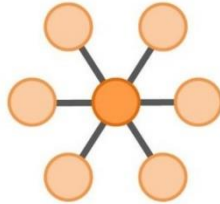
Jedná se o typ síťové topologie, při které je na fyzické úrovni připojeno více komunikačních zařízení. Tento typ síťové topologie je většinou uváděn v souvislosti s metalickým propojením více zařízení v jedné síti, kde disponuje výhodou jednoduché a finančně levné implementace. Síťová topologie typu sběrnice je zobrazená na následujícím obrázku.



Obr. 3.2: Síťová topologie bus (sběrnice) [18]

3.1.3 Star (hvězda)

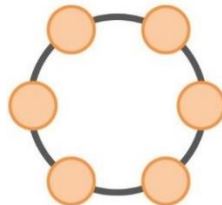
Tento typ síťové topologie je jeden z nejrozšířenějších vůbec. Základem této topologie je jeden centrální uzel (centrální komunikační zařízení), ke kterému jsou připojeny koncové prvky (koncová zařízení). Účelem centrálního uzlu je řízení komunikačního toku mezi koncovými uzly. Velkou výhodou této síťové topologie je jednoduché připojování koncových prvků do sítě a také odolnost této sítě při poruše koncových prvků. Nevýhodou je ovšem nefunkčnost celé sítě při poruše centrálního uzlu. Síťová topologie typu hvězda je zobrazena na následujícím obrázku.



Obr. 3.3: Síťová topologie star (hvězda) [18]

3.1.4 Ring (kruh)

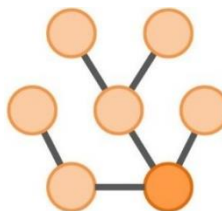
Síťová topologie typu ring je založena na propojení více komunikačních zařízení pomocí několika point-to-point spojení, které dohromady tvoří uzavřenou komunikační smyčku. Tento typ síťové topologie se využíval v minulosti za účelem úspory fyzických propojení. Současně tato topologie disponuje velkou náchylností k nefunkčnosti celé sítě v případě poruše libovolného prvku. Síťová topologie typu kruh je zobrazena na následujícím obrázku.



Obr. 3.4: Síťová topologie ring (kruh) [18]

3.1.5 Tree (strom)

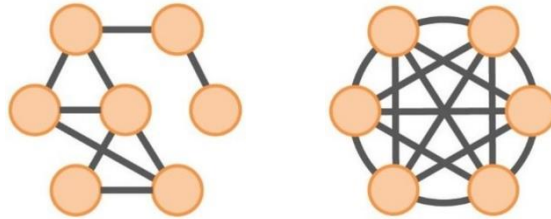
Jedná se o typ síťové topologie, která propojuje jednotlivé komunikační zařízení do útvaru připomínající strom. Tato síťová topologie vychází z propojení centrálních uzlů jednotlivých hvězdicových topologií. Jedná se o řešení, které se využívá v rozsáhlých počítačových sítích, kde se vyznačuje velkou výhodou, že v případě selhání jednoho centrálního síťového prvku mohou ostatní části sítě nadále komunikovat. Síťová topologie typu strom je zobrazena na následujícím obrázku.



Obr. 3.5: Síťová topologie tree (strom) [18]

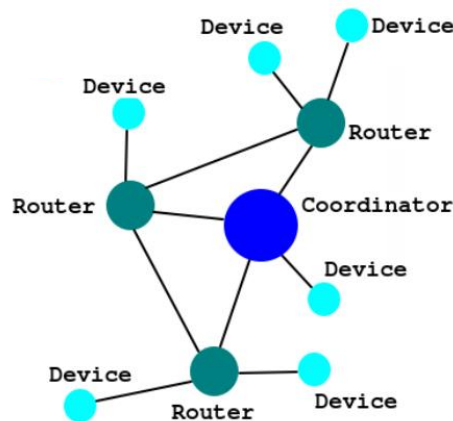
3.1.6 MESH

Síťová topologie typu MESH se vyznačuje propojením některých komunikačních zařízení se dvěma a více dalšími zařízeními v jedné síti. Významnou výhodou MESH sítě je to, že poskytuje redundanci propojení, díky čemuž je komunikace v síti možná i při výpadku některého ze zařízení. MESH síť se obecně dělí na dva typy. Prvním typem je částečně propojená MESH, při které jsou jednotlivé uzly sítě propojeny pomocí jednoho a více propojení. Druhým typem je plně propojená MESH, při které jsou všechny uzly sítě propojeny s ostatními. Síťová topologie typu MESH včetně jejich variant, je zobrazena na následujícím obrázku.



Obr. 3.6: Síťová topologie částečně propojená MESH (vlevo) a plně propojená MESH (vpravo) [18]

Síťová topologie typu MESH se začala hodně používat se rostoucím zájemem o sortiment IoT (zkratka – Internet of Things). Značnou výhodou je samotná robustnost sítě, která se díky redundantním propojením stává vhodnou pro nasazení v prostorech, kde se vyskytují rádiové překážky. Díky tomu je možné MESH síť spolehlivě využít například v obytných domech, firemních halách i venkovních prostorech. Na následujícím obrázku je zobrazen příklad architektury MESH sítě, který odpovídá topologii sítě ZigBee.



Obr. 3.7: Využití architektury MESH sítě v IoT aplikaci (topologie sítě ZigBee) [19]

Tento model obsahuje tři typy komunikačních zařízení v MESH síti:

- Coordinator – centrální komunikační prvek, který řídí celou síť a slouží jako rozhraní mezi MESH sítí a nadřazenou sítí (například Ethernet nebo Wi-Fi),
- Router – jedná se o zařízení, jehož účelem je směrování paketu mezi jednotlivými zařízeními v MESH síti,
- Device – jedná se o koncové zařízení (například akční nebo senzorické zařízení).

Pro výměnu datových zpráv mezi jednotlivými zařízeními v síťové topologii typu MESH jsou definovány dvě základní techniky:

- Routing (směrování),
- Flooding (zaplavování).

Technika **Routing** neboli technika směrování je založena na principu přenosu datové zprávy pomocí nejkratší cesty ke koncovému zařízení. Jedná se o nejpoužívanější techniku, při které se datová zpráva šíří po virtuální cestě pomocí přeskokování z jednoho zařízení na druhé tak dlouho, dokud nedosáhne cílového zařízení, kterému byla datová zpráva adresována. Aby bylo možné tuto virtuální cestu najít, musí MESH síť umožňovat nepřetržitá připojení se všemi zařízeními. V případě, že dojde k přerušení některé z cest nebo dojde k výpadku některého ze zařízení, musí mít MESH síť informaci, jakou náhradní a ideálně nejkratší cestou datový paket doručit do cíle. V praxi však existuje mnoho implementací algoritmu pro hledání nejkratší cesty, které mezi sebou nebývají kompatibilní. Většina implementací této techniky umožňují dynamickou reorganizaci koncových zařízení v rámci sítě, za účelem snížení režijních nákladů při jejím nasazení a za účelem zjednodušení jejího plánování. [20]

Druhou technikou je technika **Flooding** neboli technika zaplavování, která je založena na principu odeslání datové zprávy všem zařízením v síti, tedy i těm, kterým primárně není určena. Tato zmíněná technika tedy nevyžaduje algoritmus pro hledání nejkratší cesty k cíli. [20]

V rámci IoT sítí existuje spousta komunikačních protokolů na principu MESH. Mezi nejpoužívanější komunikační protokoly tohoto typu patří:

- Wirepas Mesh Networking,
- ZigBee Mesh Topology,
- Google Thread Mesh Network,
- Bluetooth Mesh. [20]

Prvním zmíněným komunikačním protokolem je **Wirepas Mesh Networking**, který byl primárně vyvinut pro IoT aplikace s nízkou proudovou spotřebou. Jedná se o plně decentralizovaný síťový model, ve kterém všechny připojené zařízení rozhodují o směrování datové zprávy lokálně na základě aktuálních rádiových podmínek. Značnou výhodou této sítě je teoreticky neomezený počet připojených zařízení.

Druhým komunikačním protokolem je **ZigBee Mesh Topology**, ve kterém se využívají tři typy komunikačních zařízení. Jedná se o zařízení typu Coordinator, Router a Device. Popis těchto komunikačních zařízení je uveden na předcházející stránce. Současně je tato topologie sítě zobrazena na Obr. 3.7. Komunikační protokol ZigBee je otevřený standard, díky čemuž je interoperabilní mezi dodavateli koncových prvků.

Komunikační protokol **Google Thread Mesh Network** byl navržen k propojení chytrých domácích zařízení. V této topologii sítě se k sobě jednotlivá zařízení s povoleným vláknem připojují bez jediného bodu selhání. Celá síť je schopna se automaticky překonfigurovat v případě, že se některé ze zařízení stane nedostupným.

Posledním zmíněným komunikačním protokolem je protokol **Bluetooth Mesh**, který k přenosu datových zpráv využívá techniku zaplavování. Dohromady pak vytváří jednoduchou a spolehlivou síť optimalizovanou pro bezdrátová zařízení s nízkou proudovou spotřebou, které vyžadují možnost přenosu velkého množství dat.

3.2 Přístupové metody ke sdílenému komunikačnímu kanálu

Bezdrátové komunikační technologie mají oproti drátovým technologiím nevýhodu v tom, že všechny komunikační kanály jsou sdílené. Může tedy nastat případ, že jsou v rádiovém dosahu dvě a více komunikační zařízení, které vysílají ve stejný čas a ve stejném frekvenčním pásmu. V takovou chvíli nastává datová kolize a ani jeden z přenášených paketů není doručen do cíle. Aby k těmto kolizím buď nedocházelo nebo se jim minimálně předcházelo, byly definovány základní přístupové metody ke sdílenému médium (v tomto případě ke komunikačnímu kanálu).

3.2.1 FDMA

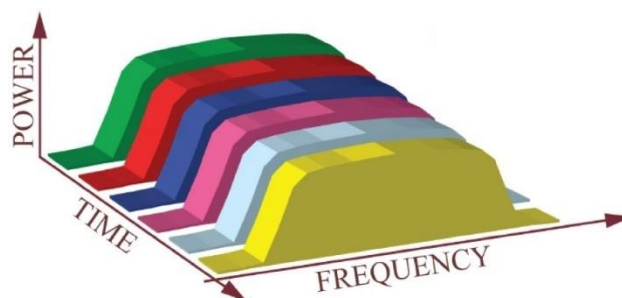
První uvedenou přístupovou metodou je metoda FDMA (zkratka – Frequency Division Multiple Access), která pracuje na principu přidělení jednoho nebo několika frekvenčních pásem mezi jednotlivé uživatele. Tato metoda je často využívána pro satelitní komunikace. Rovněž lze tuto metodu aplikovat například pro oddělení bezdrátových komunikačních sítí, kde každá z nich má přiděleno konkrétní frekvenční pásmo buď na určitou dobu nebo na neurčito. Tohoto může být využito právě u IoT sítí. Grafické znázornění této přístupové metody je zobrazeno na následujícím obrázku. [22]



Obr. 3.8: Přístupová metoda FDMA (Frequency Division Multiple Access) [21]

3.2.2 TDMA

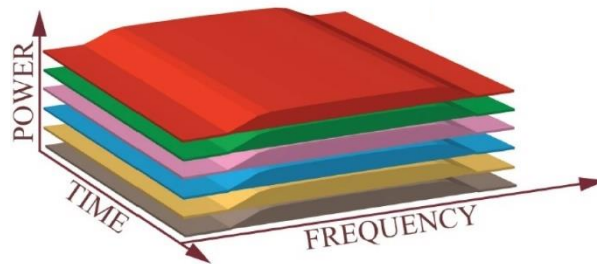
Druhou uvedenou přístupovou metodou je metoda TDMA (zkratka – Time Division Multiple Access), která využívá celé frekvenční pásmo, které rozdělí na časové intervaly nazývané jako časové sloty. Každý uživatel má tak přiřazen jeden nebo více časových slotů, ve kterých může vysílat data. Tato přístupová metoda je využívána v družicových komunikačních systémech, vojenských radiostanicích, a hlavně v mobilních sítích počínaje sítěmi 2G a novějšími. Grafické znázornění této přístupové metody je zobrazeno na následujícím obrázku. [23]



Obr. 3.9: Přístupová metoda TDMA (Time Division Multiple Access) [21]

3.2.3 CDMA

Další uvedenou přístupovou metodou je metoda CDMA (zkratka – Code Division Multiple Access), která využívá celé frekvenční pásmo v libovolný čas a využívá vhodně navržené kódování, které je odlišné pro každého připojeného uživatele. Každému uživateli je přiřazen speciální kód, kterým se kódují odesílaná data, a následně jsou tato data odeslána na sdílené frekvenční pásmo. Grafické znázornění této přístupové metody je zobrazeno na následujícím obrázku. [24]



Obr. 3.10: Přístupová metoda CDMA (Code Division Multiple Access) [21]

Principiálně využívá přístupová metoda CDMA dvě metody. První metodou je DSSS (zkratka – Direct-Sequence Spread Spectrum), při kterém je každý vysílaný symbol modulován pseudonáhodnou bitovou posloupností, která je přiřazena každému uživateli. S rostoucí délkou této bitové posloupnosti roste možnost připojení více uživatelů. Tato metoda má současně výhodu v odolnosti vůči okolnímu rušení. Druhou metodou je FHSS (zkratka – Frequency Hopping Spread Spectrum), při které dochází k přeskokování mezi několika frekvenčními pásmy při přenosu jednoho nebo více symbolů. V rámci této metody lze definovat rychlé a pomalé přeskokování. Rychlé přeskokování se vyznačuje frekvenčním skokem na jeden přenášený symbol, zatímco pomalé přeskokování se vyznačuje frekvenčním skokem na více přenášených symbolů.

3.2.4 CSMA

Poslední uvedenou přístupovou metodou je metoda CSMA (zkratka – Carrier Sense Multiple Access), která je řazena jako podtyp přístupové metody TDMA. Tato přístupová metoda je založena na kontrole přítomnosti již probíhajícího vysílání na sdíleném komunikačním kanálu ještě před zahájením samotného vysílání. To znamená, že ještě před samotným vysíláním se komunikační zařízení pokouší detekovat přítomnost signálu vysílaného z jiného zařízení. Pokud je nějaké vysílání detekováno, komunikační zařízení čeká na dokončení již probíhajícího přenosu a až následně začne vysílat. Pokud začnou vysílat dvě zařízení současně, kolize už není detekována a dochází tak k plýtvání komunikačního zdroje.

V rámci této přístupové metody existují i její modifikace, které dokážou detekovat a případně předejít kolizím. První modifikací je metoda CSMA/CD (zkratka – CSMA with Collision Detection), která dokáže detekovat probíhající kolizi a okamžitě zastavit aktuální vysílání. Následně je vyčkáno náhodný čas a pokus o vysílání je opakován. Druhou modifikací je metoda CSMA/CA (zkratka – CSMA with Collision Avoidance), při které se zařízení, které plánuje vysílat data, snaží informovat okolní zařízení o svém nadcházejícím vysílání. [25]

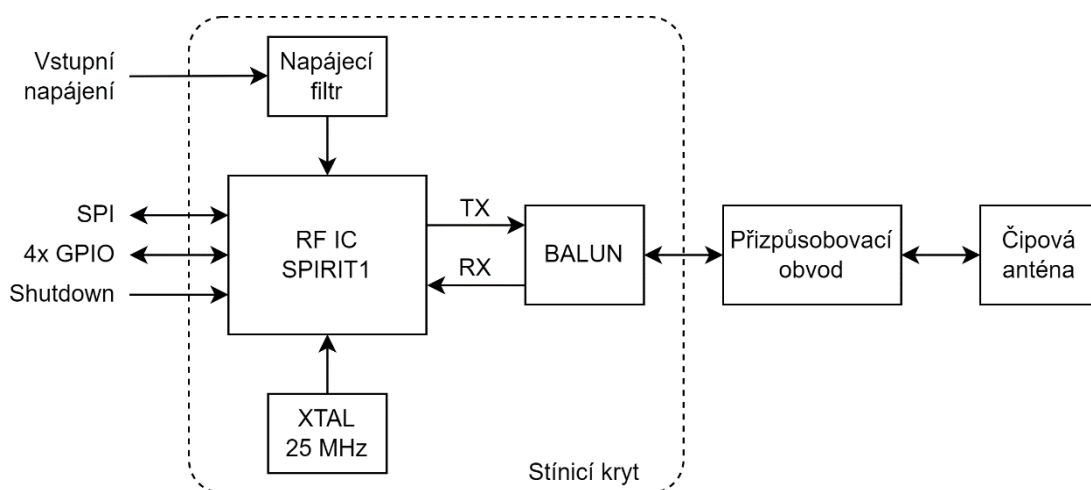
4 NÁVRH HARDWARE KOMUNIKAČNÍHO MODULU

Prvním cílem této práce byl z pohledu hardware návrh bezdrátového komunikačního modulu, který zajišťuje komunikaci v bezlicenčním pásmu na frekvenci 868 MHz. Tento bezdrátový komunikační modul je možné následně implementovat do různých typů embedded zařízení, přičemž implementace takového modulu s již navrženým a certifikovaným radiofrekvenčním rozhraním je z pohledu vývoje výraznou časovou a finanční úsporou. V případě, že nějaká firma plánuje propojit několik různých embedded zařízení pomocí bezdrátové technologie, je pro ni výrazně jednodušší využít již hotový bezdrátový komunikační modul. Případně si daná firma může takový modul navrhnout sama, následně jej nechat certifikovat, a následně jednoduše využívat v různých produktech. Tato práce se zabývá právě tímto pohledem návrhu.

Návrh vlastního bezdrátového komunikačního modulu má z firemního pohledu hned několik důležitých výhod. Vlastní komunikační modul bude ve velkých výrobních množstvích levnější než překupovaný komunikační modul. Další výhodou je, že při úpravě bezdrátového komunikačního modulu nedochází ke změnám v návrhu hardware embedded zařízení. Tímto způsobem může být aktualizována celá bezdrátová komunikační technologie, aniž by to mělo na hardware embedded zařízení nějaký dopad. Jedinou součástí cílového embedded zařízení, kterou by bylo nutné aktualizovat, je firmware obsluhující bezdrátový komunikační modul. Při návrhu bezdrátového komunikačního modulu bylo předpokládáno, že realizovaný modul bude využit v různých typech embedded zařízení, a proto je jeho návrh co možná nejvíce univerzální.

4.1 Blokové schéma

Navržený bezdrátový komunikační modul se skládá z několika dílčích částí, které jsou zobrazeny na následujícím obrázku.



Obr. 4.1: Blokové schéma bezdrátového komunikačního modulu

Základem celého komunikačního modulu je radiofrekvenční integrovaný obvod SPIRIT1 od výrobce STMicroelectronics. Tento integrovaný obvod je napájen pomocí odfiltrovaného napájecího napětí v rozsahu od 1,8 V do 3,6 V a disponuje také velice nízkým proudovým odběrem, což jej dělá vhodným pro nízkopříkonové a bateriové aplikace. Jako zdroj hodinového signálu je využit krystal s nominální oscilační frekvencí 25 MHz. Integrovaný obvod SPIRIT1

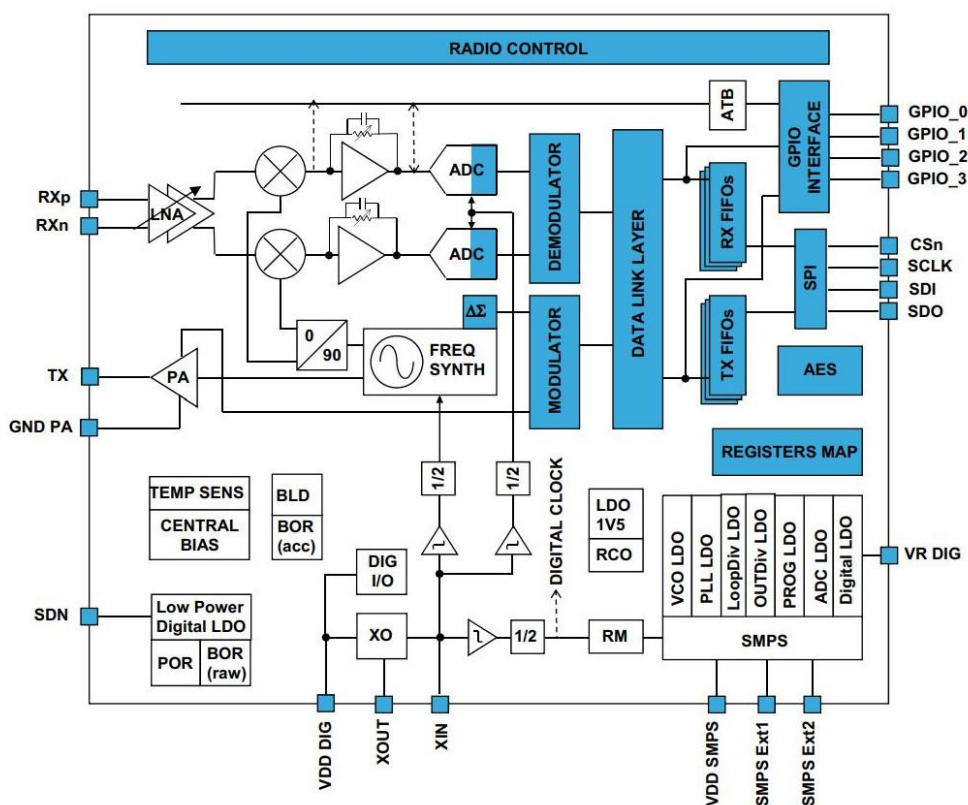
je konfigurován a ovládán pomocí rozhraní SPI, čtyřmi konfigurovatelnými vstupně výstupními signály a ovládacím signálem, kterým je možné celý obvod vypnout.

Vysílací a přijímací signály z radiofrekvenčního integrovaného obvodu SPIRIT1 jsou přivedeny do symetrizačního prvku, který je v blokovém schématu označen jako BALUN (Balanced – Unbalanced). Tento symetrizační prvek slouží ke sloučení vysílacího a přijímacího signálu z obvodu SPIRIT1 pro připojení antény s nominální hodnotou vlnové impedance 50 Ω. Další výhodou tohoto symetrizačního prvku je, že v sobě obsahuje vysokofrekvenční filtr pro odfiltrování vyšších harmonických složek produkovaných integrovaným obvodem SPIRIT1. Výstupní signál z tohoto symetrizačního prvku je přes přizpůsobovací obvod připojen na čipovou anténu. Celý tento navržený modul je kromě přizpůsobovacího obvodu a čipové antény odstíněn pomocí stínícího krytu.

4.2 Integrovaný obvod SPIRIT1

Integrovaný obvod SPIRIT1 plní funkci radiofrekvenčního transceiveru, který je určen pro bezdrátovou komunikaci na frekvenčních pásmech menších než 1 GHz. Tento integrovaný obvod je navržen pro provoz v bezlicenčních pásmech ISM a SRD na frekvencích 169 MHz, 315 MHz, 433 MHz, 868 MHz a 915 MHz. V případě potřeby je možné tento integrovaný obvod nakonfigurovat i na doplňkové frekvenční pásma. Přenosová rychlost tohoto integrovaného obvodu je nastavitelná v rozmezí od 1 kbps až do 500 kbps. Výhodou tohoto obvodu je, že jej lze nakonfigurovat na komunikaci s kanálovou roztečí 25 kHz a díky tomu vyhovuje evropské normě EN 300 220, která je zmíněná v první kapitole.

Blokové schéma integrovaného obvodu SPIRIT1 je zobrazeno na následujícím obrázku.



Obr. 4.2: Blokové schéma radiofrekvenčního integrovaného obvodu SPIRIT1 [26]

Tento integrovaný obvod podporuje základní modulační metody jako jsou OOK, ASK, FSK a MSK. Současně umožňuje využití frekvenčního filtru s Gaussovským průběhem pro modulační metody FSK a MSK, čemuž je výsledné frekvenční spektrum méně zatížené rušením. Jedná se tedy o modulační metody GFSK a GMSK. Co se týče přijímání signálu, integrovaný obvod SPIRIT1 má nastavitelný vstupní filtr se šířkou pásma od 1 kHz až do 800 kHz. Při nastaveném vstupním filtru se šířkou pásma 1 kHz má přijímač citlivost s hodnotou -118 dBm.

Data mohou být přenášena ve standardizovaném protokolovém formátu M-Bus, ale mohou být také přenášena pomocí plně proprietárního protokolového formátu vyvinutému firmám na míru, čímž je tento integrovaný obvod z hlediska přenášovaných dat plně univerzální. Tento integrovaný obvod současně dokáže plně automaticky provádět na datech cyklický kontrolní součet, čímž může nadřazenému mikrokontroleru ušetřit výpočetní čas. Kromě cyklického kontrolního součtu je umožňováno využít i samo opravné kódování, které zlepšuje rozlišovací schopnost přenášovaných symbolů na přijímací straně. Aby byl datový přenos co nejbezpečnější, disponuje integrovaný obvod SPIRIT1 také šifrovací jednotkou na bázi symetrické šifry AES, konkrétně AES-128.

Integrovaný obvod SPIRIT1 obsahuje také napájecí měnič SMPS (switched mode power supply), který funguje v rozsahu vstupního napětí od 1,8 V až do 3,6 V s efektivitou převodu nad 80 %. [26]

4.3 Symetrizační obvod

Z blokového schématu integrovaného obvodu SPIRIT1 zobrazeného na Obr. 4.2 je patrné, že vysílač a přijímač mají oddělené porty. Vysílací zesilovač dosahuje největší výkonové efektivity na frekvenci 868 MHz při výstupní komplexní impedanci $34-j7 \Omega$ a přijímací diferenciální zesilovač má na frekvenci 868 MHz vstupní komplexní impedanci $118-j87 \Omega$. Tyto vysílací a přijímací porty je nutné propojit s portem rádiové antény, a tyto porty vzájemně mezi sebou impedančně přizpůsobit.

Pro integrovaný obvod SPIRIT1 je speciálně navržen symetrizační obvod s označením BALF-SPI-01D3 od stejného výrobce, tedy od STMicroelectronics, který výše zmíněnou problematiku řeší. Port vysílacího zesilovače je s portem antény impedančně přizpůsoben s hodnotou vložného útlumu 1,4 dB. Obdobně je port rádiové antény s přijímacím diferenciálním zesilovačem impedančně přizpůsoben s hodnotou vložného útlumu 1,7 dB. Na portu antény je hodnota vlnové impedance 50Ω .

Tento symetrizační obvod také obsahuje vysílací filtr, který je navržen na potlačení vyšších harmonických složek vysílaného signálu. Na dvojnásobné vysílací frekvenci, tedy přibližně na frekvenci 1,74 GHz je hodnota vložného útlumu rovna 35 dB a na trojnásobné vysílací frekvenci, tedy přibližně na frekvenci 2,6 GHz je hodnota vložného útlumu rovna hodnotě 40 dB. [27]

4.4 Čipová anténa

Rádiovou anténou pro bezdrátový komunikační modul byla zvolena čipová anténa z několika důvodů. Hlavním důvodem pro výběr čipové antény bylo dosažení co největší miniaturizace. Druhým důvodem použití čipové antény je, že pokud je vložen dielektrický materiál do jejího

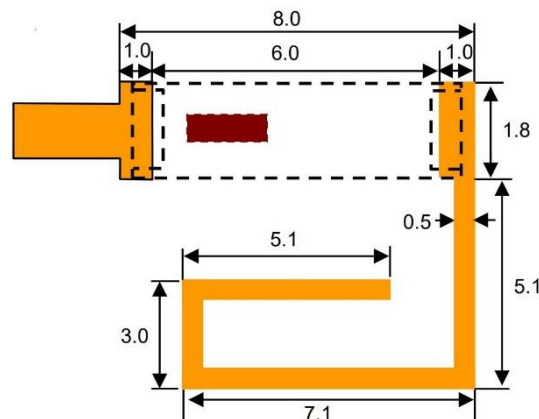
blízkého pole, nedochází k výraznému ovlivnění parametrů této antény. Bezdrátový komunikační modul s čipovou anténou může být následně umístěn téměř do libovolného druhu plastové krabičky, aniž by došlo k rozladění antény. Posledním, ale také důležitým důvodem pro volbu čipové antény, je jednoduchost návrhu. Čipová anténa je umístěná na desku plošného spoje do vhodného místa na základě konstrukčního doporučení výrobce, a následně po osazení prvotního kusu dochází k naladění antény pomocí impedančně přizpůsobovacího obvodu.

Použitá čipová anténa byla zvolena od výrobce Johanson Technology s typovým označením 0868AT43A0020E. Jedná se o čipovou anténu s rozměrem pouhých 7 x 2 x 0,8 mm. Tato čipová anténa je konstruována pro frekvenční rozsah od 858 MHz do 878 MHz, kde v tomto frekvenčním rozsahu má špičkový zisk -1 dBi a průměrný zisk -4 dBi. Zvolená čipová anténa je zobrazena na následujícím obrázku. [28]



Obr. 4.3: Čipová anténa 0868AT43A0020E [28]

Kromě samotné čipové antény musí být na desce plošného spoje nakreslena doplňující elektricky vodivá cesta, která přispívá ke zlepšení parametrů antény. Na následujícím obrázku je zobrazen návrh doplňující elektricky vodivé cesty dle doporučení výrobce.

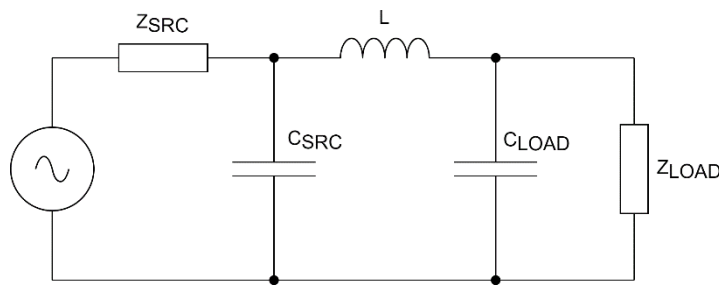


Obr. 4.4: Layout čipové antény 0868AT43A0020E dle doporučení výrobce [28]

4.4.1 Obvod pro impedanční přizpůsobení antény

Výše zmíněná čipová anténa vyžaduje impedančně přizpůsobovací obvod, aby bylo dosaženo vhodného impedančního přizpůsobení antény pro žádaný frekvenční rozsah. Dle doporučení výrobce je zde přidán obvod impedančního přizpůsobení typu π , který propouští stejnosměrný proud. Tento typ impedančního přizpůsobení se skládá ze sériové indukčnosti L umístěné mezi zdroj signálu a zátěž, kterou je v tomto případě čipová anténa. Dále tento obvod obsahuje dva kondenzátory, kdy první kondenzátor označen jako C_{SRC} je přidán paralelně ke zdroji signálu

a druhý kondenzátor označen jako C_{LOAD} je přidán paralelně k zátěži, v tomto případě k anténě. Schématické zobrazení tohoto obvodu je zobrazeno na následujícím obrázku.



Obr. 4.5: Obvod impedančního přizpůsobení typu π

Proces impedančního přizpůsobení rádiové antény ke zdroji probíhá na základě měření průběhu komplexní impedance v závislosti na frekvenci na zhotoveném kusu zařízení. Tomuto procesu je věnována samostatná podkapitola.

4.5 Elektromagnetický stínicí kryt

Elektromagnetický stínicí kryt je důležitou součástí radiofrekvenčního modulu. V tomto případě zde plní dvě důležité funkce. Jeho první funkcí je vytvoření zemní plochy pro čipovou anténu. Vzhledem k tomu, že čipová anténa funguje v režimu monopólové antény, musí být pro její správnou funkčnost vytvořena dostatečně velká zemní plocha. Tato zemní plocha je vytvořena použitím stínicího krytu, kterým jsou zakryty elektronické součástky. Druhou funkcí stínicího krytu je vytvoření Faradayovy klece mezi elektronickými součástkami a čipovou anténou. Bez použití elektromagnetického stínicího krytu je radiofrekvenční integrovaný obvod zajišťující bezdrátovou komunikaci vystaven elektromagnetickému poli koncentrovaného v blízkosti antény. Použitím stínicího krytu dochází ke zlepšení citlivosti přijímače.

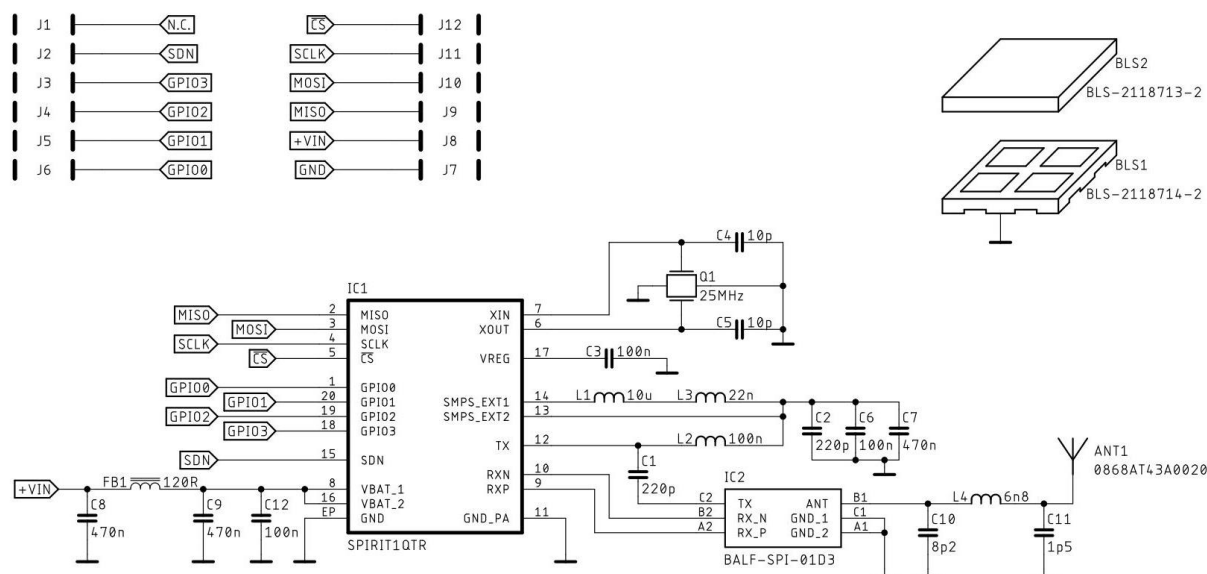
Na následujícím obrázku je zobrazen elektromagnetický stínicí kryt od výrobce TE Connectivity, který se skládá ze dvou dílů. Na desku plošného spoje je nejprve napájen spodní díl stínicího krytu (na obrázku vlevo) a následně je na něj nacvaknut horní díl stínicího krytu (na obrázku vpravo). Dvoudílná sestava přináší technologickou výhodu z hlediska procesu pájení přetavením v horkovzdušné peci. Na desku plošného spoje je společně se součástkami umístěn spodní díl elektromagnetického stínicího krytu, kde celá tato sestava se následně vloží do horkovzdušné pece. Vzhledem k tomu, že spodní díl stínicího krytu obsahuje na své horní straně velkou vyříznutou díru, horkovzdušné proudění se lépe dostane k součástkám. Tím se eliminuje možnost nedostatečného zahřátí elektronických součástek pod stínicím krytem během pájení. Následně je po osazení zařízení nacvaknut horní díl stínicího krytu.



Obr. 4.6: Elektromagnetický stínicí kryt – spodní díl (vlevo) a horní díl (vpravo)

4.6 Schéma zapojení bezdrátového komunikačního modulu

Pomocí informací uvedených v této kapitole bylo navrženo schéma zapojení bezdrátového komunikačního modulu. Uvedené schéma zapojení je zobrazeno na následujícím obrázku.



Obr. 4.7: Kompletní schéma zapojení bezdrátového komunikačního modulu

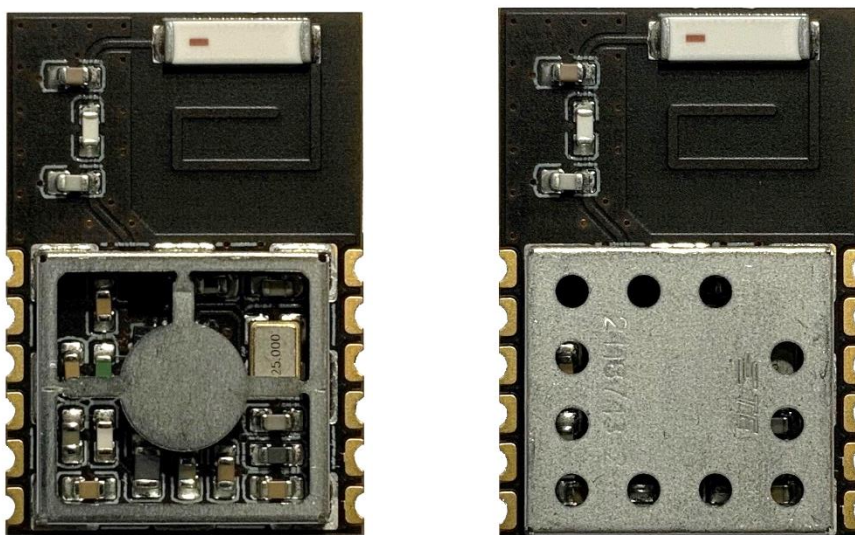
Pinout bezdrátového komunikačního modulu obsahuje dohromady dvanáct pinů, přičemž šest pinů je umístěno na jeho pravé straně a zbylých šest pinů je umístěno na jeho levé straně. Dva piny (pin 7 a 8) plní roli napájecího napětí bezdrátového komunikačního modulu, kde doporučené hodnoty napájecího napětí jsou v rozsahu od 1,8 V do 3,6 V. Čtyři piny (piny 9 až 12) slouží jako ovládání celého komunikačního modulu pomocí rozhraní SPI. Tímto SPI rozhraním je napřímo ovládán radiofrekvenční integrovaný obvod SPIRIT1. Další čtyři piny (piny 3 až 6) slouží jako individuálně konfigurovatelné vstupy nebo výstupy pro integrovaný obvod SPIRIT1. Na tyto konfigurovatelné piny může být namapována libovolná funkcionality nabízená integrovaným obvodem SPIRIT1. Mezi nejdůležitější funkcionality těchto konfigurovatelných pinů lze zařadit například žádost o přerušování, příznak nových přijatých dat a příznaky přetečení a vyprázdňování vysílacích a přijímacích bufferů. Dalším pinem bezdrátového komunikačního modulu je ovládací pin umožňující přepnutí integrovaného obvodu SPIRIT1 do spánku (pin 2). V případě, že je tento pin v úrovni logické nuly, integrovaný obvod SPIRIT1 je aktivní, a v případě, že je tento pin v úrovni logické jedničky, integrovaný obvod SPIRIT1 přechází do režimu spánku. Této funkcionality může být využito například v bateriových aplikacích ve chvíli, kdy bezdrátový komunikační modul nemusí být aktivní. Uspáním tohoto komunikačního modulu lze snížit proudový odběr celého zařízení a tím šetřit i kapacitu baterie. Poslední pin bezdrátového komunikačního modulu není nikam připojen (pin 1). Tento pin plní roli rezervního pinu v případě budoucího rozšíření tohoto komunikačního modulu.

4.7 Návrh desky plošného spoje

Vzhledem k tomu, že má být navrhovaný bezdrátový komunikační modul implementován do nejrůznějších typů embedded zařízení, tak by měl být navržen s co nejmenšími rozměry. Finální rozměry navrženého komunikačního modulu jsou 25 x 17 mm. Do cílového embedded zařízení je tento komunikační modul implementován pomocí technologie SMT, a proto byly na dvou hranách desky plošného spoje tohoto modulu vytvořeny pokovené půldíry. Využitím těchto pokovených půlděr je možné jednoduchým způsobem připájet celý navržený komunikační modul do cílového embedded zařízení.

Navržená deska plošného spoje je čtyřvrstvá se základním substrátem typu FR4, celkovou tloušťkou 1,2 mm a povrchovou úpravou typu ENIG (electroless nicked and immersion gold). Důvodem využití čtyřvrstvé desky plošného spoje jsou její lepší vlastnosti pro návrh vysokofrekvenčních obvodů oproti dvouvrstvé desce plošného spoje. S využitím čtyřvrstvého plošného spoje dochází ke zmenšení šířky napájecího vedení čipové antény.

Na následujícím obrázku je zobrazen osazený prototyp bezdrátového komunikačního modulu. Tento modul je zobrazen bez osazeného stínicího krytu (vlevo) a s osazeným stínicím krytem (vpravo).



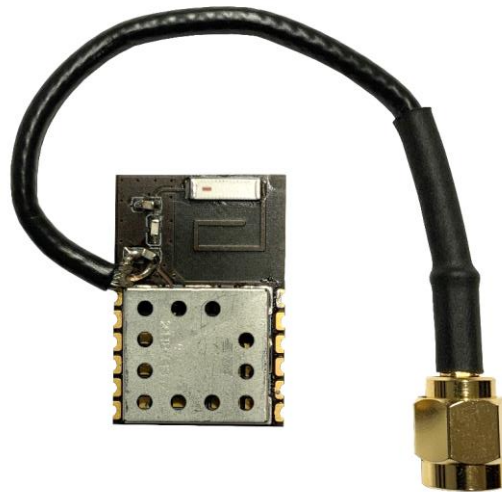
Obr. 4.8: Realizovaný bezdrátový komunikační modul bez stínicího krytu (vlevo) a se stínicím krytem (vpravo)

4.8 Impedanční přizpůsobení čipové antény

Čipová anténa použitá na bezdrátovém komunikačním modulu vyžaduje dle výrobce dodatečné impedanční přizpůsobení ke zdroji signálu. V tomto případě je zdrojem signálu symetrizační člen s hodnotou charakteristické impedance 50 Ω . Elektrické schéma tohoto impedančního připojení je zobrazeno na Obr. 4.5.

Proces impedančního přizpůsobení probíhá pomocí proměření činitele odrazu a impedance antény v závislosti na frekvenci. Impedance antény je komplexní veličina, a proto musí být pro měření využit vektorový síťový analyzátor (zkratka VNA), který tímto typem měření disponuje.

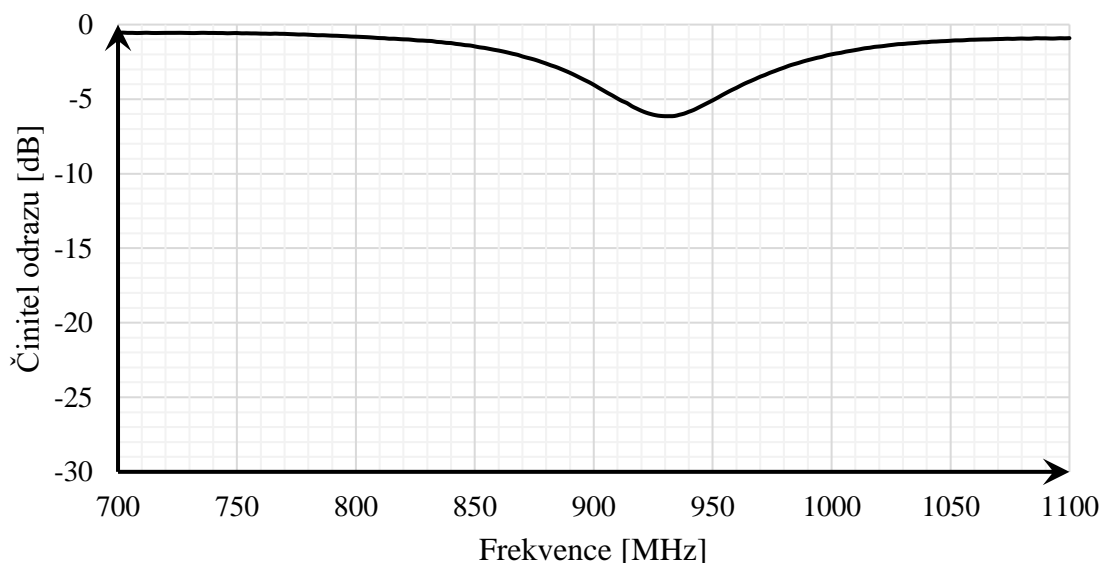
Pro proces impedančního přizpůsobení byl osazen jeden kus bezdrátového komunikačního modulu pouze s čipovou anténou a stínícím krytem. Ostatní elektronické součástky, které jsou umístěny pod stínícím krytem nejsou osazeny z důvodu nulového vlivu na naladění antény. Na pozici kondenzátoru C_{SRC} impedančně přizpůsobovacího obvodu byla připájena měřící sonda. U pozice této sondy bylo směrem k symetrizačnímu obvodu přerušeno napájecí vedení, aby negativně neovlivnilo průběh měření vlivem odrazů vysokofrekvenčního signálu. Na následujícím obrázku je zobrazen testovací kus bezdrátového komunikačního modulu upraveného pro impedanční přizpůsobení čipové antény.



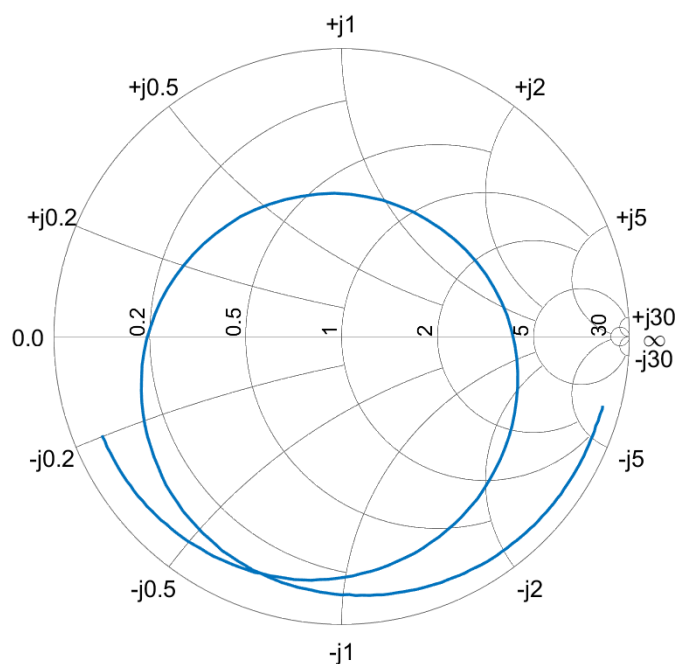
Obr. 4.9: Testovací kus komunikačního modulu upraveného pro impedanční přizpůsobení čipové antény

Prvním krokem procesu impedančního přizpůsobení čipové antény ke zdroji signálu byla kalibrace VNA ve frekvenčním rozsahu od 700 MHz do 1100 MHz. Ta se provádí pomocí kalibrace na otevřené vedení (nekonečná impedance), zkrat (nulová impedance) a referenční impedanci 50Ω . Druhým krokem bylo nastavení elektrického zpoždění signálu vlivem přidané délky koaxiální sondy. V tomto případě jsou odpájeny všechny komponenty obvodu pro impedanční přizpůsobení, testovací kus komunikačního modulu je připojen k VNA a pomocí Smithova diagramu je hledáno elektrické zpoždění takové, které odpovídá nekonečné impedanci v celém měřeném frekvenčním rozsahu. V tomto případě se jednalo o elektrické zpoždění délky 591 ps. Testovací kus komunikačního modulu byl po celou dobu měření umístěn ve vzduchu tak, aby v jeho blízkosti nebyl umístěn žádný předmět, který by ovlivnil vlastnosti měření. V tuto chvíli je testovací kus komunikačního modulu i samotný VNA připraven k měření.

Pro určení hodnot součástek L , C_{SRC} a C_{LOAD} byly proměřeny frekvenční závislosti činitele odrazu a impedance antény pro nepřizpůsobenou čipovou anténu. Pro toto měření byl na pozici L umístěn rezistor s hodnotou 0Ω . Na následujících dvou obrázcích je zobrazena frekvenční závislost činitele odrazu a impedance antény zobrazena ve Smithově diagramu. Zobrazení impedance antény ve Smithově diagramu je normováno k referenční hodnotě impedance 50Ω .



Obr. 4.10: Činitel odrazu čipové antény bez impedančního přizpůsobení

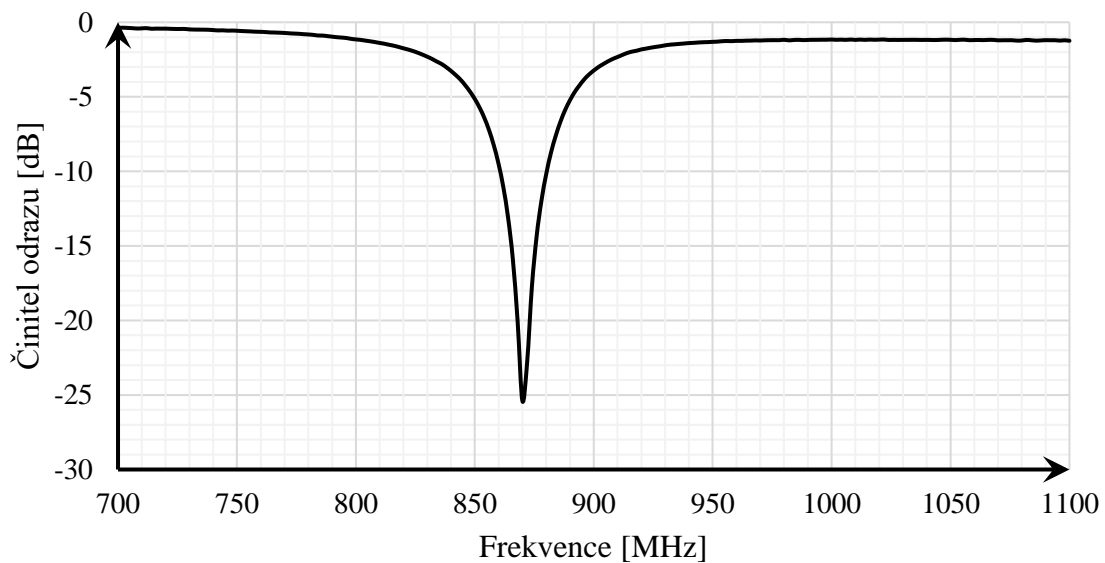


Obr. 4.11: Impedance čipové antény bez impedančního přizpůsobení (Smithův diagram)

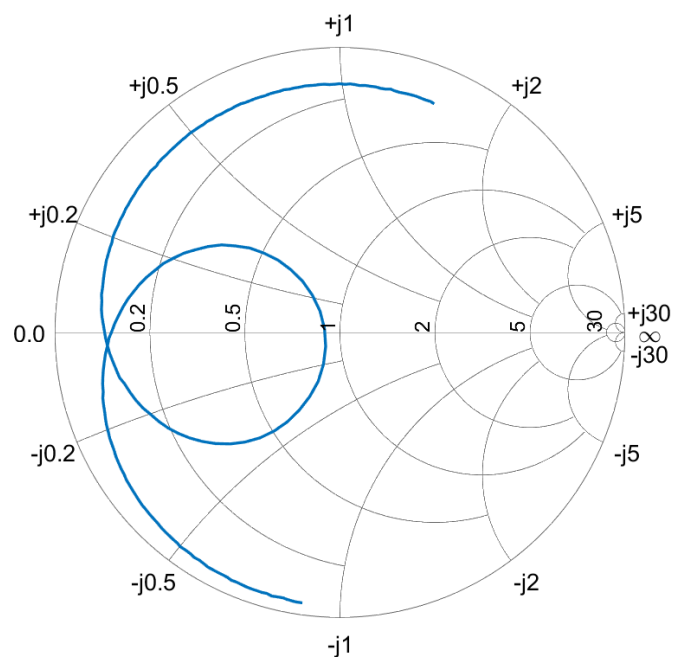
Z předcházejících obrázků lze odečíst, že čipová anténa není přizpůsobená. Minimální hodnota činitele odrazu je -6,14 dB a nachází se na frekvenci 930 MHz. Komplexní impedance čipové antény na frekvenci 868 MHz má hodnotu $6,5-j17 \Omega$.

Pomocí získaných hodnot byly navrženy hodnoty součástí obvodu impedančního přizpůsobení. Indukčnost L má hodnotu 6,8 nH, kondenzátor C_{SRC} má hodnotu 8,2 pF a kondenzátor C_{LOAD} má hodnotu 1,5 pF. Tyto hodnoty byly osazeny na testovací kus komunikačního modulu a následně byly proměřeny frekvenční závislosti činitele odrazu a impedance antény pro přizpůsobenou čipovou anténu. Na následujících dvou obrázcích je zobrazena frekvenční závislost činitele odrazu a impedance antény zobrazena ve Smithově

diagramu. Zobrazení impedance antény ve Smithově diagramu je normováno k referenční hodnotě impedance 50Ω .



Obr. 4.12: Činitel odrazu impedancečně přizpůsobené čipové antény



Obr. 4.13: Impedance impedancečně přizpůsobené čipové antény (Smithův diagram)

Po impedancečním přizpůsobení čipové antény dosahuje minimální hodnota činitele odrazu hodnoty $-25,4 \text{ dB}$ na frekvenci 870 MHz . Impedanceční šířka přizpůsobené čipové antény je 20 MHz , a to od 860 MHz do 880 MHz pro hodnotu činitele odrazu menší než -10 dB . Relativní impedanceční šířka pásma je $2,3 \%$. Komplexní impedance přizpůsobené čipové antény na frekvenci 868 MHz má hodnotu $43,3+j6,4 \Omega$. Čipová anténa umístěná na bezdrátovém komunikačním modulu je nyní považována za impedancečně přizpůsobenou.

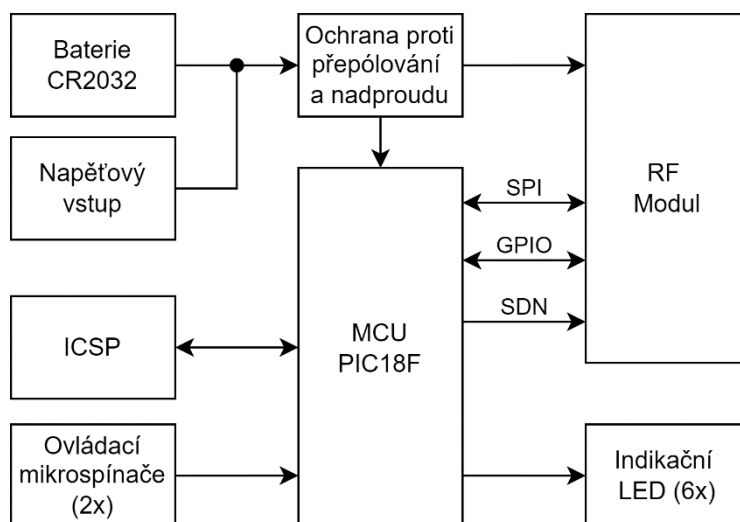
5 NÁVRH HARDWARE VÝVOJOVÉHO KITU

Navržený bezdrátový komunikační modul pro svou funkci potřebuje nadřazený mikrokontroler, pomocí kterého je tento komunikační modul konfigurován a pomocí kterého jsou skrze tento komunikační modul odesílány a přijímány datové informace. Z tohoto důvodu byl navržen vývojový kit, který obsahuje osazený bezdrátový komunikační modul včetně připojeného řídicího mikrokontroleru a dalších pomocných periférií.

Důvodem vytvoření vývojového kitu s osazeným bezdrátovým komunikačním modulem je mít k dispozici reálný hardware, na kterém probíhá kompletní návrh ovládací firmware knihovny pro tento komunikační modul. Současně je tento navržený vývojový kit dále použit pro testování komunikačních parametrů v různých typech prostředí jako jsou například vnitřní části obytných a průmyslových budov, venkovní prostředí včetně postavených budov nebo otevřené venkovní prostředí ve kterém dochází pouze k minimálním odrazům signálu. S využitím navrženého vývojového kitu je dále proměřen dosah signálu v těchto různých typech prostředí. Navržený vývojový kit dále slouží jako simulované embedded zařízení pro využití při návrhu a realizaci MESH sítě.

5.1 Blokové schéma

Na následujícím obrázku je zobrazeno blokové schéma vývojového kitu s osazeným bezdrátovým komunikačním modulem.



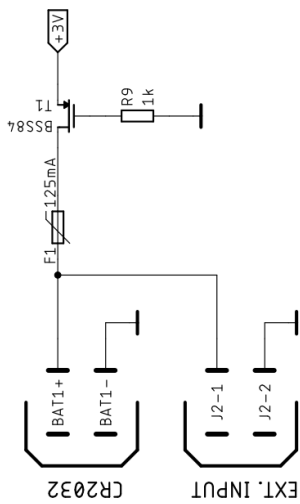
Obr. 5.1: Blokové schéma vývojového kitu

Vývojový kit disponuje dvěma způsoby napájení, lze jej napájet pomocí knoflíkové baterie typu CR2032 nebo pomocí externího napájecího vstupu. Oba tyto vstupy obsahují proudovou ochranu a také ochranu proti přepólování. Součástí vývojového kitu je 8bitový mikrokontroler s připojeným bezdrátovým komunikačním modulem. Pro vývojové a testovací účely jsou k dispozici vstupní mikropínače a výstupní LED pro indikační účely.

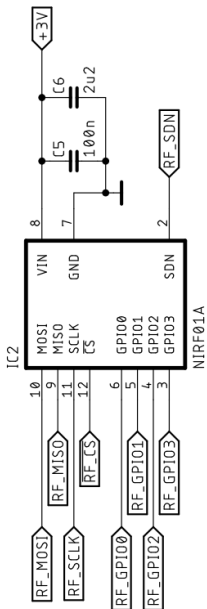
5.2 Schéma zapojení vývojového kitu

Na následujícím obrázku je zobrazeno schéma zapojení vývojového kitu.

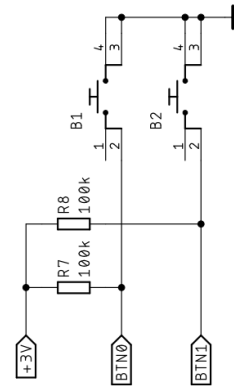
INPUT VOLTAGE



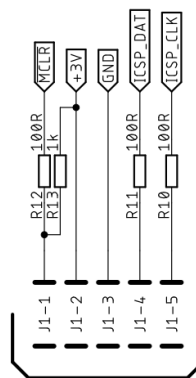
RF MODUL



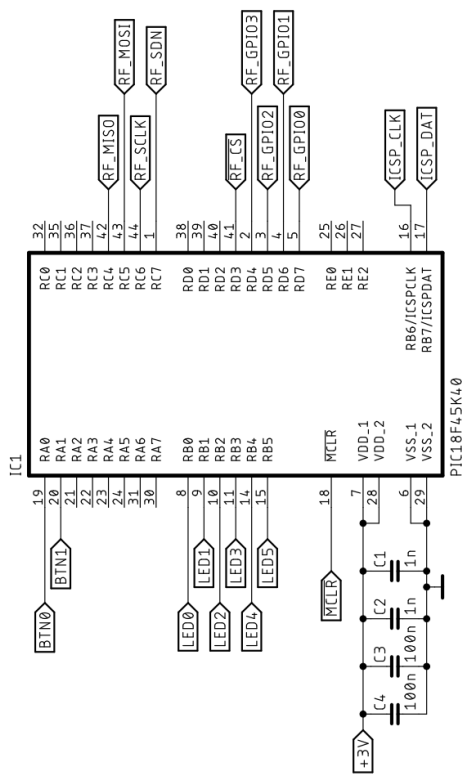
BUTTONS



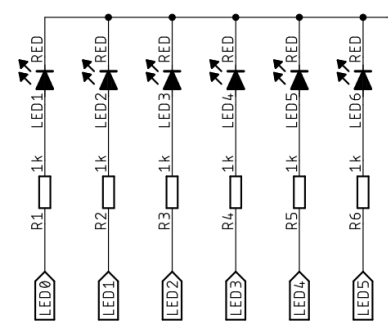
ICSP



MCU



LEDS



Obr. 5.2: Schéma zapojení vývojového kitu s bezdrátovým komunikačním modulem

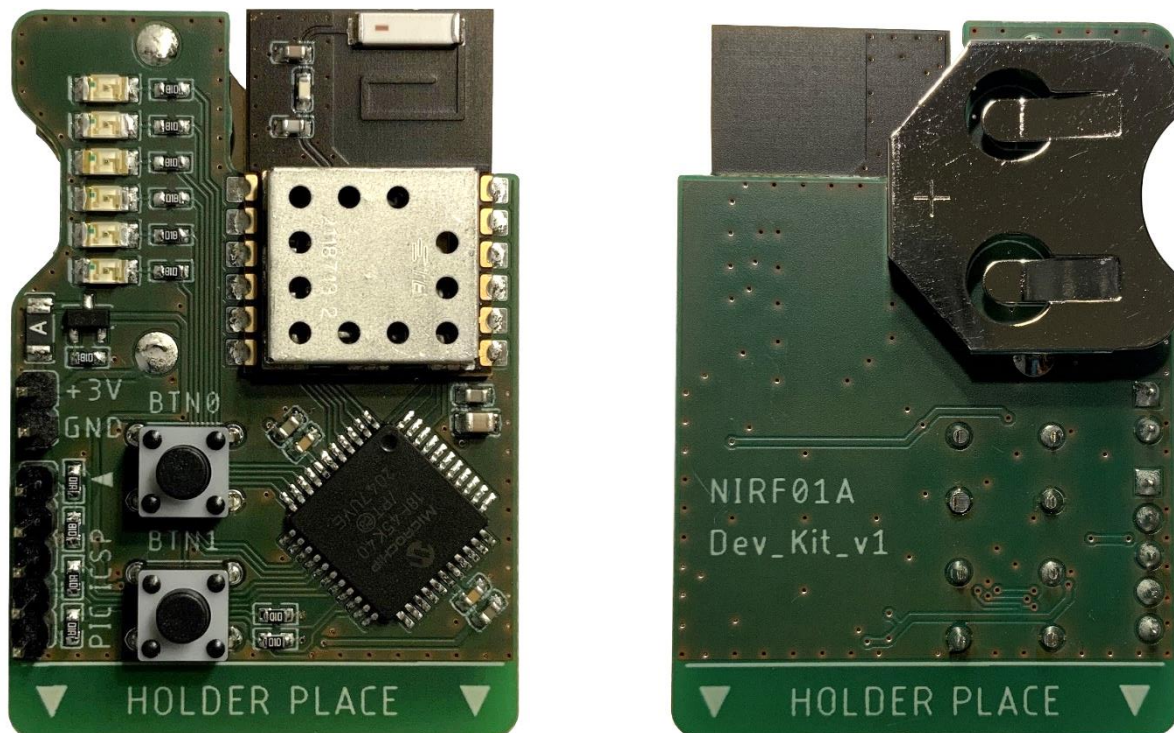
Jak již bylo zmíněno, vývojový kit lze napájet dvěma způsoby. Prvním způsobem je napájení pomocí knoflíkové baterie typu CR2032 s nominální hodnotou napětí 3 V. Tento způsob napájení byl do vývojového kitu zařazen pro usnadnění jeho používání například při měření dosahu komunikace, aby nemuselo být řešeno napájení tohoto kitu v místech, kde by to bylo poměrně problematické. Vzhledem k tomu, že knoflíková baterie CR2032 s napětím 3 V má standardně kapacitu 220 mAh, může být vývojový kit v provozu i několik hodin, a to i při kontinuální komunikaci. Druhým způsobem, jak vývojový kit napájet, je standardní drátové napájení v rozsahu napětí 1,8 V až 3,6 V.

Jako řídicí mikrokontroler byl zvolen 8bitový mikrokontroler PIC18F45K40, a to z důvodu, aby byla navrhovaná firmware knihovna navržena a odladěna na méně výkonném mikrokontroleru. V případě, že dojde k navržení a odladění firmware knihovny na 8bitovém mikrokontroleru a tento mikrokontroler bude dostatečně rychle zvládat komunikaci přes MESH síť, následná implementace této firmware knihovny na 32bitovém mikrokontroleru bude časově vyhovující. Mikrokontroler na vývojovém kitu je možné programovat pomocí standardního ISCP rozhraní, například pomocí programátoru PICKIT3.

Součástí vývojového kitu jsou také dva vstupní mikropínače, které mohou být využity například pro testovací komunikaci nebo pro příkazové operace v rámci návrhu a testování MESH sítě. Další součástí vývojového kitu je šest výstupních LED, které lze využít pro indikace systémových stavů nebo například pro zobrazení úrovně přijímaného signálu.

5.3 Návrh desky plošného spoje

Na následujícím obrázku je zobrazený realizovaný vývojový kit včetně osazeného bezdrátového komunikačního modulu z předního pohledu (vlevo) a zadního pohledu (vpravo).



Obr. 5.3: Realizovaný vývojový kit, přední strana (vlevo) a zadní strana (vpravo)

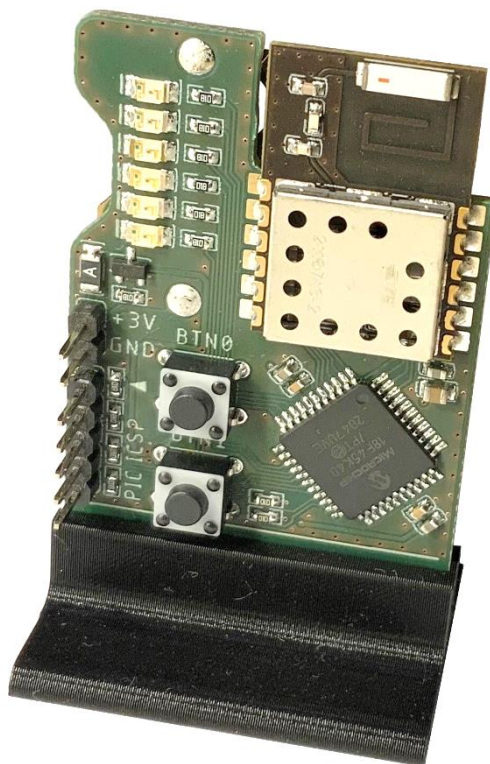
Deska plošného spoje vývojového kitu má dvě vrstvy a skládá se ze standardního substrátu typu FR4 tloušťky 1,6 mm s povrchovou úpravou bezolovnatého HAL (Hot Air Leveling). Na přední straně vývojového kitu jsou umístěny veškeré elektrosoučástky a na zadní straně je prostor pro baterii typu CR2032. Na spodní straně vývojového kitu se nachází volné místo o výšce 5 mm, které je vyhrazeno pro usazení tohoto kitu do mechanického držáku vytištěného na 3D tiskárně. Účel tohoto držáku je zjednodušení manipulace s vývojovým kitem během měření komunikačních parametrů bezdrátového komunikačního modulu.

Na následujícím obrázku je zobrazen vytištěný mechanický držák pro vývojový kit.



Obr. 5.4: Držák vývojového kitu vytištěný na 3D tiskárně

Na následujícím obrázku je zobrazen realizovaný vývojový kit umístěný ve vytištěném držáku na 3D tiskárně.



Obr. 5.5: Realizovaný vývojový kit umístěný ve vytištěném držáku na 3D tiskárně

6 NÁVRH KOMUNIKACE V REŽIMU PEER-TO-PEER

Tato kapitola se zabývá návrhem všech klíčových součástí využitých při realizaci bezdrátové komunikace mezi dvěma navrženými komunikačními moduly. V rámci této kapitoly jsou navrženy komunikační kanály a jejich parametry, dále je zvolena vhodná digitální modulace pro dosažení co možná nejefektivnějších komunikačních parametrů. Pro realizaci bezdrátové komunikace je definována struktura přenášeného paketu včetně ochranných mechanismů pro detekci a případnou opravu chyb.

6.1 Rozložení komunikačních kanálů

Na základě povolených podmínek uvedených v normě EN 300 220 a ve všeobecném oprávnění č. VO-R/10/03.2021-4 bylo vytvořeno rozložení komunikačních kanálů. Navržený bezdrátový komunikační modul je dle výše uvedeného veřejného oprávnění klasifikován jako úzkopásmové zařízení s kanálovou roztečí ≤ 100 kHz využívající pásmo označené jako g3.

Při definování komunikačních kanálů existují dvě vstupní kritéria. Jedná se o celkový počet komunikačních kanálů a přenosovou rychlost. Vzhledem k tomu, že vyvíjená technologie má sloužit pro komunikaci v MESH síti o desítkách připojených prvků, tak je definován požadavek dosáhnout co největší přenosové rychlosti, aby byla navržená MESH síť dostatečně rychlá. Tento požadavek je možné splnit právě tehdy, pokud je využita co největší dovolená šířka frekvenčního pásma, která je legislativou omezena na 100 kHz.

Tabulka 6.1: Vytvořené komunikační kanály a jejich středové frekvence

Kanál [-]	Frekvence [MHz]	Kanál [-]	Frekvence [MHz]	Kanál [-]	Frekvence [MHz]	Kanál [-]	Frekvence [MHz]
0	863,05	18	864,85	36	866,65	54	868,45
1	863,15	19	864,95	37	866,75	55	868,55
2	863,25	20	865,05	38	866,85	56	868,65
3	863,35	21	865,15	39	866,95	57	868,75
4	863,45	22	865,25	40	867,05	58	868,85
5	863,55	23	865,35	41	867,15	59	868,95
6	863,65	24	865,45	42	867,25	60	869,05
7	863,75	25	865,55	43	867,35	61	869,15
8	863,85	26	865,65	44	867,45	62	869,25
9	863,95	27	865,75	45	867,55	63	869,35
10	864,05	28	865,85	46	867,65	64	869,45
11	864,15	29	865,95	47	867,75	65	869,55
12	864,25	30	866,05	48	867,85	66	869,65
13	864,35	31	866,15	49	867,95	67	869,75
14	864,45	32	866,25	50	868,05	68	869,85
15	864,55	33	866,35	51	868,15	69	869,95
16	864,65	34	866,45	52	868,25		
17	864,75	35	866,55	53	868,35		

V předchozí tabulce jsou uvedeny vytvořené komunikační kanály včetně jejich středových frekvencí. Ve celém frekvenčním pásmu od 863 MHz do 870 MHz bylo vytvořeno celkem 70 komunikačních kanálů s kanálovou roztečí 100 kHz. V těchto kanálech je možné komunikovat s maximálním klíčovacím poměrem 0,1 % a s hodnotou vyzařovacího výkonu menší než 25 mW, což odpovídá hodnotě 14 dBm v logaritmické jednotce.

6.2 Digitální modulace signálu

Integrovaný radiofrekvenční obvod SPIRIT1 nabízí několik typů digitálních modulací, přičemž všechny jsou charakterizovány tím, že přenáší jeden bit datové informace na jeden přenášený symbol. Dostupné modulace jsou následující:

- OOK (On-Off Keying),
- ASK (Amplitude-Shift Keying),
- FSK (Frequency-Shift Keying),
- GFSK (Gaussian Frequency-Shift Keying),
- MSK (Minimum-Shift Keying),
- GMSK (Gaussian Minimum-Shift Keying).

6.2.1 Požadavky na digitální modulaci

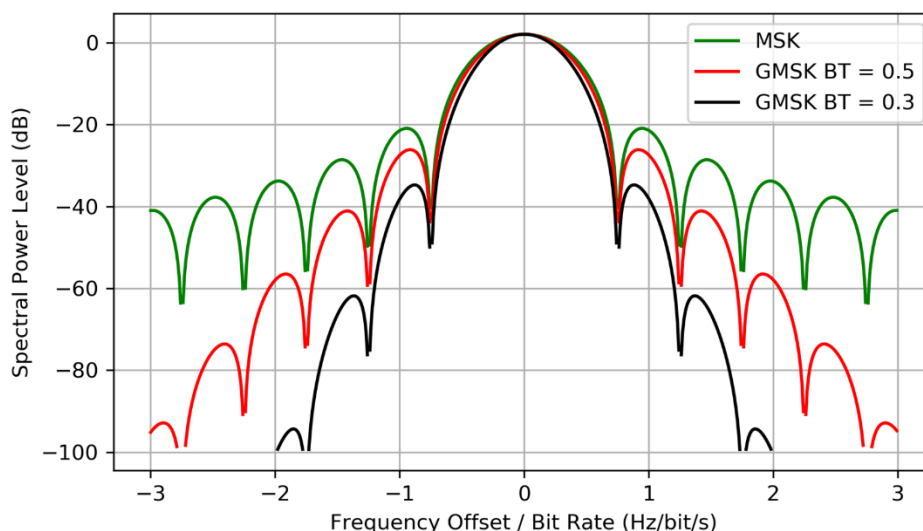
Pro volbu digitální modulace pro tuto aplikaci bylo definováno několik požadavků. Prvním požadavkem je maximalizace datového toku z důvodu dostatečné rychlosti komunikace i při nasazení v MESH síti. Druhým požadavkem je, aby zvolená modulace příliš neinterferovala do vedlejších kanálů a tím neovlivnila jejich kvalitu přenosu. Tento požadavek velmi dobrým způsobem řeší využití modulace využívající frekvenční filtr s Gaussovským průběhem. Posledním důležitým požadavkem je, aby zvolená modulace dokázala spolehlivě fungovat i v prostředí s vysokou hodnotou šumového prahu. K tomu je vhodné využít typ digitální modulace, která dosahuje nízké bitové chybovosti BER při co nejmenší hodnotě E_b/N_0 .

6.2.2 Modulace GMSK

Ze všech modulací nabízených radiofrekvenčním integrovaným obvodem SPIRIT1 byla zvolena modulace GMSK. Už samotnou výhodou modulace MSK oproti jiným základním modulacím bez frekvenčního filtru jsou nízké hodnoty výkonů bočních laloků. V případě modulace GMSK je využito frekvenčního filtru s Gaussovským průběhem, přičemž výkony bočních laloků jsou v tomto případě ještě menší.

Integrovaný obvod SPIRIT1 nabízí pro frekvenční filtr s Gaussovským průběhem možnost nastavení hodnoty faktoru BT. Hodnota faktoru BT se pohybuje v rozmezí hodnoty od nuly do jedné (kromě nuly). Hodnota faktoru BT má vliv na impulzní odezvu filtru a současně na výkon bočních laloků digitální modulace. Čím více se blíží hodnota faktoru BT k nule, tím více jsou výkony bočních laloků potlačeny. V případě této aplikace byla zvolena hodnota BT faktoru 0,5, a to z důvodu kompromisu mezi nízkou hodnotou výkonu bočních laloků a časovou odezvou použitého filtru.

Na následujícím obrázku je zobrazena normovaná výkonová spektrální hustota pro digitální modulaci MSK a GMSK s různou hodnotou faktoru BT.



Obr. 6.1: Porovnání digitální modulace MSK a GMSK s různou hodnotou faktoru BT [29]

Z výše zobrazené normované výkonové spektrální hustoty lze odečíst, že frekvenční šířka hlavního laloku na jednotku bitové rychlosti má hodnotu 1,5 Hz/bps. V případě, že by byla šířka hlavního laloku roztažena na celou frekvenční šířku komunikačního kanálu 100 kHz, šlo by dosáhnout maximální přenosové rychlosti 66,67 kbps. Tento model lze uplatnit pouze teoreticky, protože nepočítá s žádnou odchylkou. V běžném provozu by mohl nastat případ, kdy by se vlivem tolerance frekvenčních oscilátorů mohly hlavní laloky dvou sousedních kanálů mírně překrývat a tedy interferovat. Tento navržený bezdrátový komunikační modul využívá jako frekvenční základnu krystal s frekvencí 25 MHz a přesností 10 ppm. Jedná se tedy o dovolenou chybovost 10 Hz na každý 1 MHz. V případě, že na výstupu radiofrekvenčního syntetizátoru bude maximální frekvence 870 MHz, může se zde objevovat frekvenční chybovost až 8,7 kHz. Aby se tomuto jevu částečně předešlo, je výsledná přenosová rychlost snížena na hodnotu 61,035 kbps, čímž je získána frekvenční šířka hlavního výkonového laloku 91,553 kHz.

Frekvenční zdvih oproti středové frekvenci kanálu pro modulace typu MSK a GMSK je roven čtvrtině hodnoty přenosové rychlosti. V tomto případě se jedná o frekvenční zdvih 15,259 kHz. Například v případě využití kanálu číslo 0 se středovou frekvencí 863,05 MHz jsou využity dvě vysílací frekvence. Pro logickou jedničku je využita vysílací frekvence 863,0653 MHz a pro logickou nulu je využita vysílací frekvence 863,0347 MHz. Na následující tabulce jsou uvedeny parametry nastavení digitální modulace GMSK.

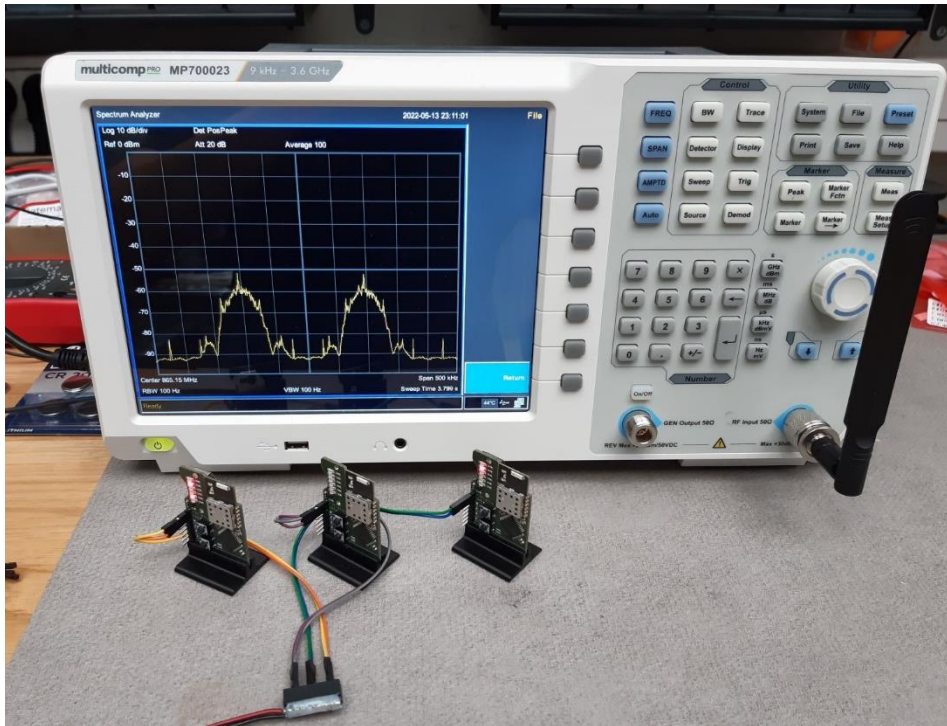
Tabulka 6.2: Sumarizace parametrů digitální modulace GMSK

Parametr	Popis	Hodnota
BT	Časově-frekvenční faktor	0,5
Δf_d	Frekvenční zdvih	15,259 kHz
f_{sym}	Frekvence symbolů	61,035 kHz
DR	Datová rychlost	61,035 kbps
BW_{FILT}	Frekvenční šířka kanálového filtru	108 kHz
BW_{nn}	Frekvenční šířka hlavního výkonového laloku	91,553 kHz

6.2.3 Výkonová spektrální analýza komunikačních kanálů

Po nastavení parametrů modulačního schéma do bezdrátového komunikačního modulu byla proměřena spektrální analýza zvolených komunikačních kanálů. Cílem tohoto měření bylo zjistit, jestli spektrální výkonová analýza odpovídá teoretickým předpokladům dle předchozího popisu včetně grafu výkonové spektrální hustoty zobrazené na Obr. 6.1. V případě korektního nastavení komunikačního modulu by měly naměřené výsledky odpovídat.

Na následujícím obrázku je zobrazeno měřicí pracoviště pro měření výkonové spektrální analýzy.

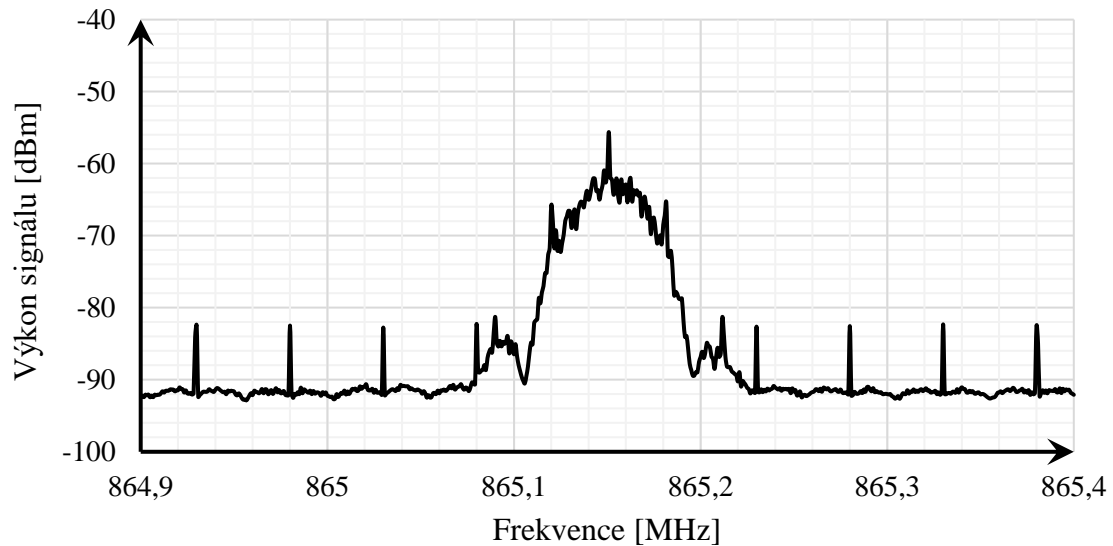


Obr. 6.2: Měřicí pracoviště pro měření výkonové spektrální analýzy komunikačních kanálů

Pro měření byly využity tři navržené bezdrátové komunikační moduly s tím, že každý z nich měl nakonfigurován jiný kanál, přičemž byly využity sousední kanály 20, 21 a 22. Měření výkonové spektrální analýzy probíhalo s využitím firemního spektrálního analyzátoru MP700023 od výrobce Multicom. Tento spektrální analyzátor byl nastaven na frekvenční rozsah od 864,9 MHz do 865,4 MHz. Samotné hlavní výkonové laloky měřených komunikačních kanálů by měly zabírat frekvenční rozsah přibližně od 865,0 MHz do 865,3 MHz, z každé strany tedy zbývá frekvenční pásmo 100 kHz. Hodnota RBW (zkratka – Resolution Bandwidth) byla nastavena na 100 Hz, z důvodu dostatečné kvality měřených výsledků. Výsledky měření byly spektrálním analyzátozem průměrovány ze stovky vstupních dílčích měření.

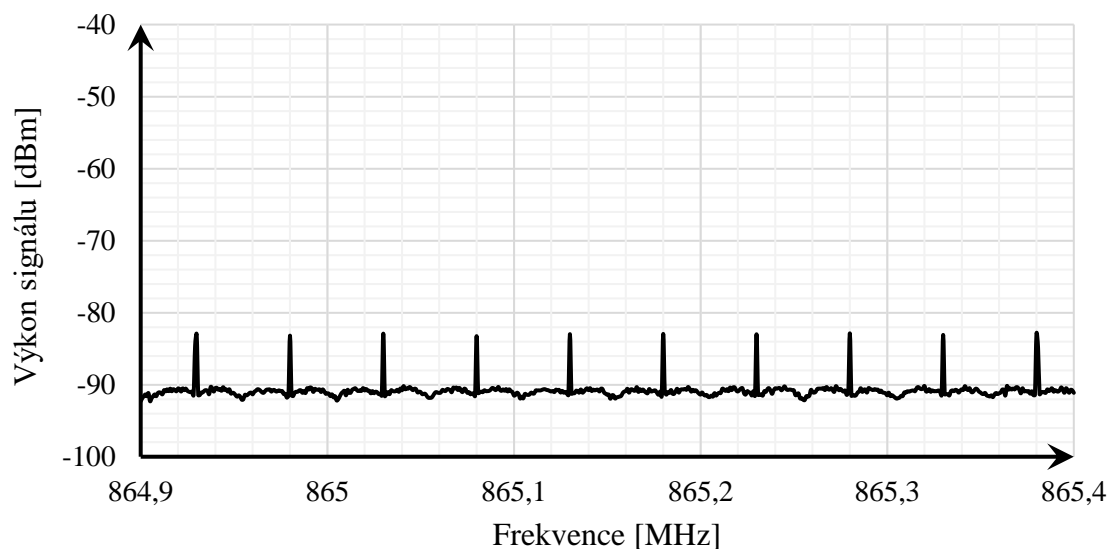
V první fázi byl přeměřen pouze aktivní komunikační kanál 21, jehož výkonové spektrum je zobrazen na následujícím obrázku. Z výstupu měření byla odečtena frekvenční šířka hlavního laloku s hodnotou 91,66 kHz, přičemž tato hodnota odpovídá teoretickým předpokladům uvedených v Tabulka 6.2. Výkonové maximum hlavního laloku dosahuje hodnoty -61 dBm (bez započtení špičkové hodnoty) a výkonové maximum prvního vedlejšího laloku dosahuje

hodnoty -84 dBm. Rozdíl mezi hlavním a vedlejším výkonovým maximem je rovno hodnotě 23 dB, což rovněž odpovídá teoretickému předpokladu zobrazeném na Obr. 6.1. Kromě prvního vedlejšího výkonového laloku už žádný další není viditelný, protože je níže než citlivost měřicího přístroje s aktuálním nastavením.



Obr. 6.3: Výkonová spektrální analýza kontinuálního vysílání na přenosovém kanálu 21

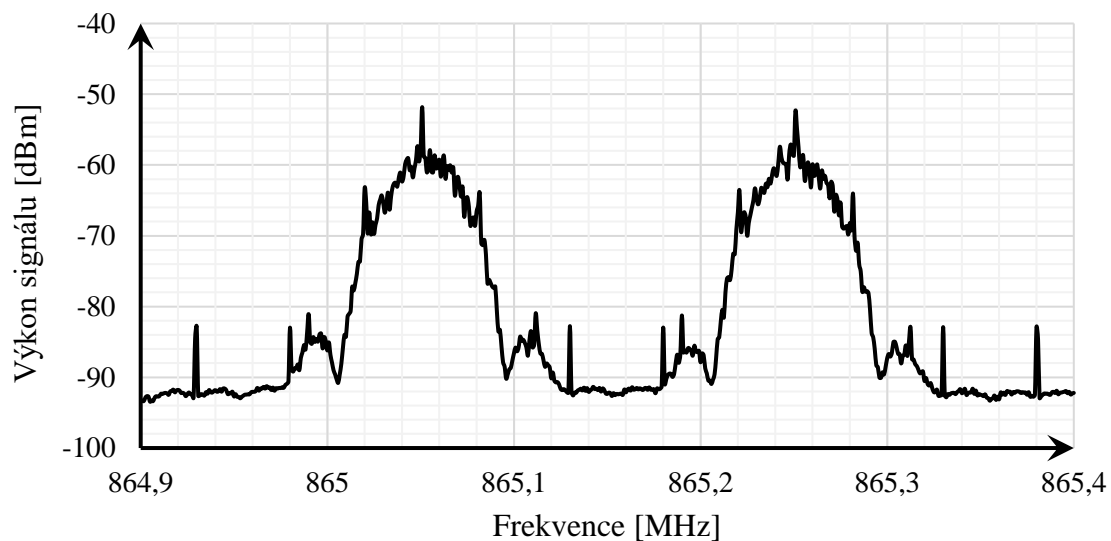
Na výše uvedené výkonové spektrální analýze jsou kromě měřeného kanálu a šumu viditelné dodatečné výkonové špičky, které mají oproti užitečnému signálu velikost 10 dB a opakují se pravidelně každých 25 kHz. Tyto výkonové špičky ovšem nejsou způsobeny vysíláním navrženého bezdrátového komunikačního modulu, ale také nejsou způsobeny vysíláním z jiného zdroje signálu. Uvedené výkonové špičky jsou způsobeny vlastním rušením samotného spektrálního analyzátoru v této cenové třídě. Na následujícím obrázku je zobrazeno měření výkonové spektrální hustoty s odpojenou anténou a zastíněným vstupním konektorem.



Obr. 6.4: Výkonová spektrální analýza bez aktivního vysílání (referenční měření)

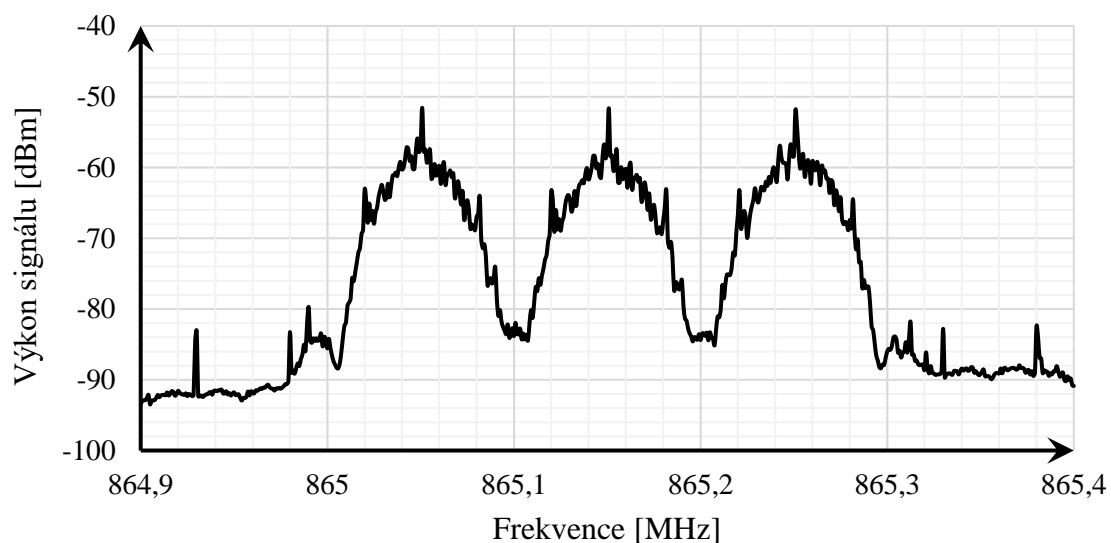
Zobrazené výkonové špičky se projevovaly více s postupným zjemňováním frekvenčního rozlišení RBW. Tyto výkonové špičky nebyly pozorovatelné v případě, že frekvenční rozlišení RBW bylo nastaveno na hodnotu 5 kHz a více, ovšem v tomto případě byly výsledky výkonové spektrální analýzy zdeformovány a značně utopeny v šumu, který dosahoval hodnoty nad - 80 dBm.

Na následujícím obrázku je zobrazena výkonová spektrální analýza při aktivním vysílání na komunikačním kanálu 20 a 22. Z výstupu měření je patrné, že nedochází k významným interferencím z aktivních komunikačních kanálů do neaktivního kanálu 21, až na výjimku prvních bočních laloků aktivních komunikačních kanálů.



Obr. 6.5: Výkonová spektrální analýza kontinuálního vysílání na přenosového kanálu 20 a 22

Na následujícím obrázku je zobrazena výkonová spektrální analýza při aktivním vysílání na komunikačních kanálech 20, 21 s 22.



Obr. 6.6: Výkonová spektrální analýza kontinuálního vysílání na přenosovém kanálu 20, 21 a 22

Vzhledem k tomu, že aktivní komunikační kanály významně neinterferují do sousedních komunikačních kanálů, je možné provozovat bezdrátovou komunikaci na komunikačních kanálech, které se nacházejí vedle sebe. Ve svém maximu lze tedy komunikovat na všech 70 vytvořených komunikačních kanálech současně, aniž by docházelo k interferencím mezi kanály. Musí být ovšem dodržena hodnota povoleného klíčovacího poměru dle platné legislativy.

6.3 Formát paketu

Ve chvíli, kdy je potřeba přenášet data bezdrátově, musí být kromě samotných užitečných dat přenášeny i řídicí data. Jedná se například o řídicí data, která slouží k detekci aktivního vysílání přijímačem, synchronizaci modulačního schéma, detekci a synchronizaci začátku vysílaných dat a případně kontrolní data detekující chybu vzniklou během přenosu rádiovým kanálem.

Integrovaný obvod SPIRIT1 umožňuje využít jeden ze tří formátů paketů, přičemž každý z nich je poměrně hodně konfigurovatelný, čímž výrobce integrovaného obvodu dává uživateli vysokou možnost customizace. Všechny formáty paketu obsahují preambuli a synchronizační slovo, přičemž délka jednotlivých polí je plně definovatelná. Délku preambule je možné nastavit v rozsahu od 1 B do 32 B a délku synchronizačního slova v rozsahu 1 B až 4 B. Všechny formáty paketu rovněž obsahují to nejdůležitější datové pole, které slouží pro užitečná data. Jejich délka lze nastavit v rozsahu od 0 B až do 65535 B. Formáty paketů podporované integrovaným obvodem SPIRIT1 jsou:

- STack,
- WM-Bus (Wireless M-Bus packet),
- Basic.

První formát STack je navržen přímo výrobcem a umožňuje využít celou řadu dodatečných řídicích datových polí, jako je zdrojová a cílová adresa, kontrolní datové pole, sekvenční číslo a bitový slot pro automatickou odpověď. Velkou výhodou těchto datových polí je, že je možné do integrovaného obvodu SPIRIT1 nastavit jejich očekávaný tvar a tím provádět filtraci přijatého paketu už na úrovni radiofrekvenčního rozhraní. Tím dochází ke snížení výpočetních nároků na řídicí mikrokontroler.

Druhým formátem paketu je WM-Bus, který slouží pro přenos dat s využitím protokolu M-Bus, který je definován pomocí normy EN 13757-4. Tento komunikační standard je využíván komunikačními systémy pro měřidla s dálkovým odečtem. Jedná se o různá bezdrátová měřidla komunikující v pásmu SRD.

Posledním formátem je formát Basic, který kromě preambule a synchronizačního slova obsahuje datové pole určující délku přenášených dat a volitelně je možné využít adresní a řídicí pole. Jedná se o obecný formát, který přesouvá následnou výpočetní náročnost z integrovaného obvodu na mikrokontroler. Výhodou tohoto formátu je ovšem skutečnost, že pokud bude v průběhu času v této technologii využito jiného radiofrekvenčního rozhraní, případně i od jiného výrobce, s největší pravděpodobností bude alespoň částečně implementován tento formát paketu. V případě nevyužití datového pole pro adresu a kontrolní data, bude zajištěna maximální kompatibilita.

6.3.1 Struktura paketu

Z důvodu vytvoření obecného řešení a zachování možnosti budoucí náhrady radiofrekvenčního rozhraní SPIRIT1 byl zvolen typ formátu paketu Basic. V tomto paketu je obsažena preambule, synchronizační slovo, délka užitečných dat, datové pole pro užitečná data a kontrola integrity přenášených dat. Formát posílaného paketu je znázorněn na následujícím obrázku. Datová pole označená modře jsou zpracovávána na úrovni radiofrekvenčního rozhraní a datová pole označená zeleně jsou přeposílány do řídicího mikrokontroleru.

PREAMBULE	SYNC	LENGTH	PAYLOAD	CRC
32 B	4 B	1 B	0-96 B	2 B

Obr. 6.7: Formát posílaného paketu včetně délky jednotlivých polí

Každý bajt **preambule** obsahuje binární sekvenci v tvaru 10101010_2 . Tato binární sekvence slouží k několika účelům. Prvním účelem této binární sekvence je detekce začátku vysílání nového paketu. Ve chvíli, kdy je přijímačem detekována tato binární sekvence, je umožněno využít algoritmus AFC (zkratka – Automatic Frequency Compensation), jehož účelem je kompenzace frekvenčního rozdílu mezi oscilátory vysílacího a přijímacího komunikačního modulu. Délka této preambule má také zásadní vliv na maximální komunikační dosah ve chvíli, kdy se výkon přijatého signálu blíží ke hranici citlivosti přijímače. Experimentálně bylo zjištěno, že při změně délky preambule ze 4 B na 16 B se komunikační dosah přibližně zdvojnásobil (měřeno v obytné oblasti). Z tohoto důvodu byla zvolena délka preambule na maximální hodnotu, kterou je 32 B.

Další částí vysílaného paketu je **synchronizační slovo** (označeno jako SYNC). Účelem synchronizačního slova je detekce začátku vysílané zprávy. Ve případě, že se výkon přijatého signálu blíží ke hranici citlivosti přijímače, detekce přijatého signálu nemusí nastat na začátku vysílání preambule, ale může nastat například v polovině nebo téměř na konci vysílání preambule. Z tohoto důvodu je nutné detekovat začátek zprávy. K tomu je využito synchronizační slovo, které v tomto případě bylo nastaveno na hodnotu čtyř bajtovou hodnotu $4E695246_{16}$. Pokud je detekován přijatý signál, provádí se korelace mezi bitovou posloupností přijatých dat a bitovou posloupností synchronizačního slova. Ve chvíli, kdy je korelace úspěšná, dochází k synchronizaci přijatého paketu.

Dalším datovým polem je **délka uživatelských dat** (označena jako LENGTH), která označuje, kolik bajtů bude přenášeno v následujícím datovém poli **uživatelských dat** (označeno jako PAYLOAD). Uživatelská data se ukládají integrovaného obvodu SPIRIT1 do bufferu FIFO o velikosti 96 B. Pokud by bylo zapotřebí posílat větší objem dat v jednom paketu, je to možné řešit průběžným doplňováním dat do bufferu FIFO během vysílání. Vzhledem k tomu, že v rámci MESH sítě bude potřeba odeslat a přeposlat spoustu paketů během krátkého času, musí být i délka dat relativně malá. V tomto případě byla délka dat omezena na maximální hodnotu 96 B, tedy na velikost bufferu FIFO. Datové pole délky uživatelských dat lze nastavit v rozsahu 0 b až 16 b, přičemž byla zvolena velikost 8 b z důvodu zachování možnosti budoucí náhrady radiofrekvenčního rozhraní. Lze předpokládat, že v případě, kdy náhrada radiofrekvenčního rozhraní nebude disponovat tak jemným nastavením

datového pole délky dat, bude disponovat nastavením tohoto pole alespoň po jednotlivých bajtech.

Posledním datovým polem je **cyklický redundantní součet** (označen jako CRC, zkratka – Cyclic Redundancy Check), který je počítán z datového pole délky užitečných dat a datového pole užitečných dat. Jedná se o kontrolní mechanismus integrity dat pomocí speciální hashovací funkce, která je poměrně jednoduchá a má dobré matematické vlastnosti. Před odesláním paketu je spočítán cyklický redundantní součet, jehož výsledkem je dvou bajtová hodnota, která je posílána jako součást paketu. Na straně přijímače je znova spočítán cyklický redundantní součet. Pokud se přijatá hodnota liší s hodnotou vypočtenou, je paket označen za nevalidní.

6.3.2 Ochrana dat proti chybám

Paket vysílaný mezi vysílacím modulem a přijímacím modulem prochází skrze rádiový kanál, jehož parametry se v čase mění. Současně je tento kanál zatížený určitou hodnotou šumu, který negativně ovlivňuje spolehlivost přenosu paketu v rádiovém kanálu. Může tak na straně přijímacího modulu snadno dojít ke špatnému vyhodnocení některých přijatých bitů. Pravděpodobnost špatně přijatého bitu je označována jako bitová chybovost *BER* (zkratka – Bit Error Rate“), která je závislá na přenosových vlastnostech kanálu a parametrech zvolené modulace. Pokud chceme přenést paket o bitové délce n pomocí přenosového kanálu jehož výstup je zatížen bitovou chybovostí *BER*, lze vypočíst pravděpodobnost špatně přijatého paketu označovanou jako *PER* (zkratka – Packet Error Rate) jako

$$PER = 1 - (1 - BER)^n. \quad (6.1)$$

Z výše uvedeného vzorce je zřejmé, že s rostoucím počtem bitové délky paketu dochází k významnému zvýšení paketové chybovosti *PER*. Vzhledem k tomu, že posílané pakety mají délku v řádu stovek bitů, mohl by jediný chybný bit znevalidnit celý paket.

Výše popsáný problém řeší metoda samo opravného kódu FEC (zkratka – Forward Error Correction), která umožňuje při dostatečně malém poškození zrekonstruovat původní data. Tato metoda využívá konvoluční kódování s poměrem $\frac{1}{2}$. To znamená, že na každý jeden vstupní datový bit jsou vysílány dva bity dat. Na straně přijímače dochází ke korekci chyb pomocí Viterbiho dekódování. Integrovaný obvod SPIRIT1 disponuje tímto modulem a samo opravný kód je aplikován na datové pole délky uživatelských dat, uživatelských dat a cyklického redundantního součtu. To má za následek, že pro tyto zmíněná datová pole je bitová délka dvojnásobná a tím pádem je čas vysílání paketu delší.

V případě, kdy paket bude obsahovat natolik velké množství špatných bitů, že nepomůže ani samo opravný kód, bude přijatý paket označen za nevalidní pomocí kontroly cyklického redundantního součtu.

6.3.3 Čas potřebný k odvysílání paketu

Důležitým parametrem při bezdrátovém přenosu dat je i čas potřebný k odvysílání paketu. Na stránce 42 byla definovaná datová rychlost 61,035 kbps. Touto datovou rychlostí je vysílán výše definovaný paket. Čas potřebný k odvysílání paketu lze matematicky vyjádřit jako podíl součtu všech bitových velikostí datových polí a datové rychlosti. Matematicky vyjádřeno jako

$$t_{tran} = \frac{\sum L}{DR} = \frac{L_{pream} + L_{sync} + 2(L_{length} + L_{payload} + L_{crc})}{DR}, \quad (6.2)$$

kde L_{pream} je délka preamble, L_{sync} je délka synchronizačního slova, L_{length} je délka pole určující délku užitečných dat, $L_{payload}$ je délka užitečných dat, L_{crc} je délka cyklického redundantního součtu a DR je datová rychlost. Všechny velikosti jsou definovány v bitech.

Všechny datová pole kromě preamble a synchronizačního slova využívají algoritmu FEC definovaný výše, a proto jsou jejich délky zdvojeny. Po vyjádření času vysílání v závislosti na délce užitečných dat je získáno

$$t_{tran} = \frac{16 \cdot 8 + 4 \cdot 8 + 2(1 \cdot 8 + L_{payload} + 2 \cdot 8)}{61\,035}, \quad (6.3)$$

$$t_{tran} = \frac{208 + 2 \cdot L_{payload}}{61\,035}. \quad (6.4)$$

Čas vysílání paketu v závislosti na délce užitečných dat lze vyjádřit také jako

$$t_{tran} = 3,408 \text{ ms} + 0,262 \text{ ms/B} \quad (6.5)$$

V následující tabulce jsou uvedeny časy vysílání paketů pro časté délky užitečných dat.

Tabulka 6.3: Délka paketu a čas jeho vysílání v závislosti na délce užitečných dat

Délka užitečných dat [B]	Délka paketu [b]	Čas vysílání paketu [ms]
0	208	3,408
16	464	7,602
32	720	11,80
64	1 232	20,19
92	1 680	27,53

6.4 Zabezpečení komunikace

Součástí integrovaného obvodu SPIRIT1 je šifrovací koprocessor pro symetrickou šifru AES (zkratka – Advanced Encryption Standard). Tento koprocessor využívá klíč o délce 128 bitů a umí zašifrovat nebo dešifrovat jeden blok dat o délce 16 bajtů v jeden moment.

Koprocessor je oddělený a nezávislý na radiofrekvenčním rozhraní a nelze jej namapovat přímo na buffer FIFO. Práce s tímto koprocessorem při šifrování je následující. Z mikrokontroleru je přesunut blok dat a šifrovací klíč do koprocessoru, následně je spuštěn proces šifrování a po jeho dokončení jsou šifrovaná data přesunuta zpět do mikrokontroleru. Teprve po tomto kroku lze data přesunout z mikrokontroleru do bufferu FIFO v integrovaném obvodu SPIRIT1. Proces dešifrování probíhá obdobně.

Díky tomu, že šifrovaná data vždy prochází skrze mikrokontroler, jsou v navržené knihovně implementovány tři provozní režimy blokové šifry. Implementované režimy jsou ECB (zkratka – Electronic Codebook), CBC (zkratka – Cipher Block Chaining) a CTR (zkratka – Counter Mode).

Toto šifrování je možné aplikovat na datové pole užitečných dat.

6.5 Popis interface firmware knihovny

V této kapitole je uveden popis jednotlivých funkcí, pomocí kterých lze navrženou firmware knihovnu ovládat. V první části jsou uvedeny názvy funkcí pro portování navržené knihovny na definovaný hardware a v druhé části jsou uvedeny funkce pro ovládání bezdrátového komunikačního modulu včetně ovládání komunikace v režimu peer-to-peer.

6.6 Portování knihovny na konkrétní hardware

V prvním kroku je nutné naportovat knihovnu na konkrétní hardware. Knihovna obsahuje deklarované prototypy funkcí, které musí být definovány pro daný hardware. Seznam těchto funkcí a jejich popisu je uveden v následující tabulce. Prefix „h“ označuje, že se jedná o funkci definovanou na vrstvě HAL (zkratka – „Hardware Abstract Layer“).

Tabulka 6.4: Seznam funkcí využitých pro portování knihovny na konkrétní hardware

Název funkce	Popis funkce
hSpirit1_Init	Inicializace periférií SPI a GPIO pro komunikaci s integrovaným obvodem SPIRIT1, který je současně aktivován pomocí signálu SDN.
hSpirit1_PowerDown	Deinicializace periférií určených pro komunikaci s integrovaným obvodem SPIRIT1, který je současně uveden do režimu s nejnižší spotřebou.
hSpirit1_Open	Aktivace rozhraní SPI pro následnou komunikaci (aktivace signálu Chip Select).
hSpirit1_Close	Deaktivace rozhraní SPI po proběhlé komunikaci (deaktivace signálu Chip Select).
hSpirit1_TimeSpace2us	Funkce vytvářející blokující zpoždění po dobu dvou mikrosekund.
hSpirit1_WriteRead	Funkce odesílá na sběrnici SPI řídicí data a současně čte přijatá data.
hSpirit1_Write	Funkce pouze odesílá na sběrnici SPI data, přičemž vstupní datový signál je ignorován.
hSpirit1_Read	Tato funkce pouze čte data ze sběrnice SPI, přičemž signál pro vysílaná data je roven logické nule.
hSpirit1_Timer_Init	Inicializace čítače a jeho propojení s výstupní bránou integrovaného obvodu SPIRIT1 obsahující hodinový signál.
hSpirit1_Timer_Start_UseCallback	Spuštění odpočtu času, po jehož uplynutí dojde k zavolání definované funkce.
hSpirit1_Timer_Stop	Zastavení odpočtu času.

Současně musí být definovány zpětní volání z vrstvy HAL do navržené knihovny. Tento proces probíhá pomocí funkcí uvedených v následující tabulce.

Tabulka 6.5: Seznam funkcí využitých pro informování knihovny o přerušeních v hardware

Název funkce	Popis funkce
Spirit1_ISR_Timer	Funkce informující knihovnu o přetečení čítače.
Spirit1_ISR_GpioIsr	Funkce informující knihovnu o nespecifikovaném přerušení vyvolaném integrovaným obvodem SPIRIT1.
Spirit1_ISR_GpioSync	Funkce informující knihovnu o přerušení upozorňující na detekci synchronizačního slova.

6.7 Ovládací funkce pro komunikaci v režimu peer-to-peer

Ovládání bezdrátového komunikačního modulu lze rozdělit na dvě funkční části. První funkční částí jsou obecné funkce pro ovládání modulu. Druhou částí jsou specifické funkce pro ovládání komunikačního režimu peer-to-peer. V následující tabulce je uveden seznam obecných funkcí pro ovládání bezdrátového komunikačního modulu.

Tabulka 6.6: Seznam obecných funkcí pro ovládání bezdrátového komunikačního modulu

Název funkce	Popis funkce
Nirf_InitInCwMode	Inicializace modulu v režimu spojitého vysílání středové frekvence zvoleného kanálu.
Nirf_PowerDownModule	Vypnutí modulu, který je současně uveden do režimu s nejnižší spotřebou.
Nirf_SetChannel	Nastavení komunikačního kanálu.
Nirf_SetTxPower	Nastavení vysílacího výkonu.
Nirf_GetRssiFromLastRx	Získání síly signálu z poslední přijaté zprávy.
Nirf_CalibrateRfSynthesizer	Kalibrace radiofrekvenčního syntetizátoru.
Nirf_ReadReceivedData	Vyčtení přijatých dat z komunikačního modulu
Nirf_EncryptByAes128Ecb	Šifrování datové zprávy pomocí provozního módu ECB.
Nirf_DecryptByAes128Ecb	Dešifrování datové zprávy pomocí provozního módu ECB.
Nirf_EncryptByAes128Cbc	Šifrování datové zprávy pomocí provozního módu CBC.
Nirf_DecryptByAes128Cbc	Dešifrování datové zprávy pomocí provozního módu CBC.
Nirf_XcryptByAes128Ctr	Šifrování/dešifrování datové zprávy pomocí provozního módu CTR (šifrovací a dešifrovací algoritmus je stejný).

V následující tabulce je uveden seznam funkcí, které slouží pro ovládání komunikačního režimu peer-to-peer.

Tabulka 6.7: Seznam funkcí využitých pro komunikaci v režimu peer-to-peer

Název funkce	Popis funkce
Nirf_Ptp_Init	Inicializace modulu v komunikačním režimu peer-to-peer.
Nirf_Ptp_StartTx_UseCallback	Zahájení odesílání dat s využitím zpětného volání po dokončení vysílání.
Nirf_Ptp_StartRx_UseCallback	Zahájení příjmu dat s využitím zpětného volání po přijetí datové zprávy.
Nirf_Ptp_StopTxRx	Vynucené ukončení vysílání nebo přijímání.

7 NÁVRH KOMUNIKACE V REŽIMU MESH

Tato kapitola se zabývá návrhem MESH sítě, která slouží pro komunikaci mezi jednotlivými navrženými komunikačními moduly. Je zde popsán návrh a zprovoznění sítě do funkčního stavu s ohledem na možnost budoucího rozšíření funkcionality celé sítě. Primárním účelem pro využití navržené MESH sítě je automatizace budov pomocí akčních a senzorických zařízení, které budou po většinu času ovládány současně.

7.1 Klíčové předpoklady pro zvolené řešení

Jak již bylo zmíněno, primární využití navrhované MESH sítě je směřováno do oblasti řízení, regulace a sběru dat. Připojené zařízení budou sloužit pro automatizaci určité úlohy, přičemž se bude jednat typově o následující zařízení:

- Elektronicky řízené spínače napájení,
- Ovládací kontroléry pro řízení intenzity osvětlení,
- Ovládací komponenty pro řízení teploty v budovách,
- Sensory teploty a vlhkosti,
- Sensory osvětlení.

Řídicí povely budou zasílány z nadřazeného ovládacího software, který bude vykonávat logiku automatizace. Aby mohl řídicí software komunikovat s MESH sítí, musí být vytvořen prvek typu komunikační brány, která bude plnit roli přeposílání datových zpráv mezi řídicím software a MESH sítí. Současně tato komunikační brána bude řídit provoz v celé síti.

Na základě tohoto plánovaného využití jsou stanoveny následující klíčové předpoklady:

- Řízení sítě centrálním prvkem,
- Ovládání několika prvků současně,
- Objem dat je řádově v jednotkách bajtů na jednotlivý prvek,
- Statické umístění prvků v síti,
- Každý prvek sítě přeposílá data za účelem dosažení maximální spolehlivosti,
- Libovolně rozšiřitelný model komunikace,
- Základní zabezpečení sítě.

7.2 Základní koncept navrhované MESH sítě

Na základě výše definovaných požadavků byl navržen model bezdrátové sítě využívající síťovou topologii MESH, která je přizpůsobená pro předpokládané využití, ale současně je připravena na možnost budoucího rozšíření této sítě.

7.2.1 Prvky sítě

Oproti obecné topologii obsahuje navrhovaná MESH síť centrální řídicí uzel označen jako **gateway** (v obdobných IoT technologiích označován jako coordinator) a připojené prvky, kde každý z nich je označen jako **node**. Prvek typu gateway plní funkci řízení komunikace v celé síti. V první verzi této sítě je každý node oprávněn směřovat pakety.

7.2.2 Využití komunikačních kanálů

V rámci frekvenčního pásma od 863 MHz do 870 MHz bylo definováno 70 komunikačních kanálů, které jsou uvedeny v Tabulka 6.1. Tyto kanály lze v rámci MESH sítě využít následujícím způsobem:

- **Kanál 0** – slouží pouze jako řídicí kanál pro registraci jednotlivých nodů do jednotlivých MESH sítí,
- **Kanál 1 až 69** – pro každou MESH síť je zvolen jeden komunikační kanál, na kterém je tato síť provozována.

Použitý vysílací výkon pro každou jednotlivou síť je volen v závislosti na omezeních dle platné legislativy uvedené v první kapitole této práce.

7.2.3 Adresování v síti

Hlavním prvkem v síti bude právě jedna gateway, která má za cíl řízení komunikačního toku v síti. K této gatewayi je možné připojit až stovku nodů, které lze adresovat buď jednotlivě nebo hromadně. V rámci komunikačního protokolu je vyhrazen jeden byte pro účel adresace. Využití těchto adres je definováno následovně:

- **Adresa 0** – tato adresa je rezervována pro gateway,
- **Adresa 1 až 100** – jedná se o adresy, které mohou být přiřazeny jednotlivým nodům,
- **Adresa 101 až 253** – tyto adresy jsou rezervovány pro možnost budoucího rozšíření bezdrátové technologie,
- **Adresa 254** – jedná se o adresu pomocí které jsou adresovány všechny nody v síti, a ty mohou na daný požadavek odesílat svou odpověď,
- **Adresa 255** – tato adresa je určena pouze pro účely vysílání informačních zpráv bez očekávání odpovědi.

7.2.4 Zabezpečení sítě

V rámci první verze této MESH sítě jsou všechny pakety šifrovány pomocí symetrické šifry AES s délkou klíče 128 bitů provozovanou v módu CBC. Tento mód byl zvolen proto, že výstup jednotlivých zašifrovaných bloků slouží jako součást vstupu šifrovacího algoritmu následujícího bloku dat. V případě, že vstupní bloky dat budou obsahovat stejné datové informace, po zašifrování budou obsahovat rozdílné hodnoty, na rozdíl od provozního módu blokové šifry ECB.

Šifrovací klíč je definován při vytváření sítě na gatewayi, a následně musí být každému nodu sdělen při registraci do sítě této sítě.

7.3 Princip komunikace

Na základě klíčových předpokladů, které popisují přímé uplatnění této navržené MESH sítě, bylo definováno, že se všechny nody budou aktivně podílet na směrování v síti. To znamená, že se všechny nody budou podílet na komunikaci. V tomto případě lze aplikovat přístupovou

metodu ke sdílenému komunikačnímu kanálu TDMA (viz 3.2.2), pomocí které jsou definovány časové sloty, ve kterých budou jednotlivé nody vysílat.

7.3.1 Délka časového slotu

V rámci této sítě je odesíláno maximálně 64 B užitečných dat v rámci jednoho paketu. Čas vysílání paketu pro tuto délku užitečných dat odpovídá dle rovnice (6.5) hodnotě 20,19 ms. Současně bylo experimentálně zjištěno, že mezi vysláním příkazu o startu vysílání do integrovaného obvodu SPIRIT1 a samotným zahájením tohoto vysílání, vzniká časová prodleva přibližně 690 μ s. Jedná se o prodlevu, která vzniká při inicializaci frekvenčního syntetizátoru a počítání kontrolního součtu užitečných dat. Další časová prodleva vzniká mezi fyzickým dokončením příjmu a přerušением informující mikrokontroler o přijatých datech. Tato časová prodleva byla odměřena s délkou 1360 μ s. Reálný čas strávený mezi zahájením vysílání vysílacího modulu až po informování mikrokontroleru přijímacího komunikačního modulu o přijatých datech je roven časové prodlevě 22,24 ms.

Délka časového slotu musí být nastavena tak, aby se během tohoto času podařilo odeslat a přijmout datový paket, následně ho dešifrovat, připravit nový datový paket k vysílání, zašifrovat jej a odeslat do integrovaného obvodu SPIRIT1. Současně je vhodné zachovat určitou časovou rezervu v časovém slotu, aby nedošlo k nedodržení jeho délky vlivem zpoždění při vykonávání jiných operací mikrokontrolerem.

Všechny zmíněné zpoždění byly odměřeny a jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 7.1: Dílčí zpoždění během jedné délky časového slotu

Typ zpoždění	Délka zpoždění [ms]
Příprava vysílání integrovaným obvodem SPIRIT1	0,69
Vysílání paketu	20,19
Kontrola přijatého paketu integrovaným obvodem SPIRIT1	1,36
Přesun paketu do mikrokontroleru	0,14
Dešifrování paketu	1,85
Příprava nového paketu	0,1
Šifrování paketu	1,85
Odeslání paketu do integrovaného obvodu SPIRIT1	0,14
Časová rezerva	5,68

Po vyčíslení všech dílčích časových zpoždění byla délka časového slotu nastavena na hodnotu 32 ms, z toho jsou všechny zpoždění dlouhé 26,32 ms a časová rezerva je 5,68 ms. Časová rezerva tedy zabírá 17,8 % délky časového slotu.

7.3.2 Řazení časových slotů

Za předpokladu, že gateway má kompletní dohled a řízení nad celou MESH sítí, může také určovat, který node má, v jaký časový moment vysílat data. Pokud neprobíhá komunikace a gateway chce do sítě vyslat dotaz, začne vysílat data. Tímto definuje zahájení vysílání, které spadá do časového slotu číslo 0. Následující časové sloty jsou přiřazeny dle adres jednotlivých

nodů od nejnižší po nejvyšší. Součástí paketu je také informace o počtu registrovaných zařízení, takže každý node má informaci, kdy tyto časové sloty skončí.

Každý node, který přijme nějaký paket, zjistí, kým byl tento paket vyslán a dopočítá si, za jaký čas začne jeho časový slot. Připraví si nový paket, který je přeměřován a uloží ho do bufferu FIFO integrovaného obvodu SPIRIT1. Ve chvíli, kdy začne jeho daný slot, začne tento paket vysílat. V případě, že daný node zjistí, že jeho slot už nastal a paket nemohl odeslat, připraví si pouze odpověď.

Po vyčerpání všech časových slotů nastává reverzní proces, ve kterém jsou časové sloty přiděleny od nejvyšší adresy po nejnižší. V těchto časových slotech je odesílaná odpověď na jednotlivé dotazy. Poslední paket, který je přijat gatewayí v timeoutu, který je roven celkovému počtu slotů pro daný počet registrovaných zařízení, je ten validní.

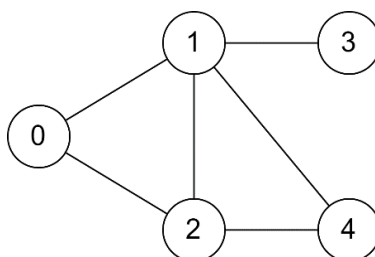
Grafické znázornění přiřazení časových slotů pro N registrovaných nodů je zobrazeno na následujícím obrázku.

0	1	2	n	N	N+1	N+2	N+n	2·N
Req.	Req.	Req.	Req.	Req.	Resp.	Resp.	Resp.	Resp.
Gateway	Node 1	Node 2	Node n	Node N	Node N	Node N-1	Node N-n+1	Node 1

Obr. 7.1: Grafické znázornění přiřazení časových slotů pro N registrovaných nodů

Časový slot 0 (zabarvený červeně) označuje dotaz vysílaný gatewayí. Následují časové sloty dotazu jednotlivých nodů seřazeny od nejnižší po nejvyšší adresu (zabarveno modře). Nakonec jsou zobrazeny časové sloty pro odpověď (zabarvené zeleně), které jsou přiřazeny nodům od nejvyšší po nejnižší adresu.

Na následujícím obrázku je zobrazena modelová síť využívající čtyři nody s adresami 1 až 4. Čísla označená v jednotlivých bodech označují adresu nodu. Výjimkou je gateway s adresou nula.



Obr. 7.2: Modelová síť využívající čtyři nody

0	1	2	3	4	5	6	7	8
Req.	Req.	Req.	Req.	Req.	Resp.	Resp.	Resp.	Resp.
Gateway	Node 1	Node 2	Node 3	Node 4	Node 4	Node 3	Node 2	Node 1

Obr. 7.3: Grafické znázornění přiřazení časových slotů pro čtyři nody

Na předcházejícím obrázku je zobrazeno grafické znázornění časových slotů pro modelovou síť zobrazenou na Obr. 7.2.

7.3.3 Podmínky funkčnosti

Takto postavená síť má značnou výhodu ve své robustnosti. Pokud bude v síti například registrovaných 50 nodů a každý z nodů uvidí minimálně dva další nody, celá síť bude nadále spolehlivá i při výpadku některých z rádiových cest.

Funkčnost sítě má ale své podmínky, které jsou:

- Adresy nodů musí být obsazovány od nejnižší po nejvyšší,
- Adresy nodů musí být v závislosti na rádiové viditelnosti seřazeny od gatewaye směrem dále.

Tyto problémy jednoduchým způsobem řeší dynamická stavba MESH sítě, jejíž postup bude popsán.

7.3.4 Časová odezva sítě

Na základě počtu registrovaných nodů v síti lze definovat časové zpoždění mezi zahájením vysílání gatewaye a získáním validní odpovědi z MESH sítě. Tento vztah lze po dodržení výše uvedených podmínek definovat jako

$$t_{response} = (2N + 1) \cdot t_{slot}, \quad (7.1)$$

kde $t_{response}$ je čas odezvy MESH sítě, N označuje počet registrovaných zařízení a t_{slot} označuje délku časového slotu, která má v tomto případě hodnotu 32 ms. V následující tabulce je zobrazena odezva sítě pro vybrané počty registrovaných nodů.

Tabulka 7.2: Čas odezvy navržené MESH sítě v závislosti na počtu registrovaných nodů

Počet registrovaných nodů	Čas odezvy [s]
1	0,096
5	0,352
10	0,672
20	1,312
50	3,232
100	6,432

V případě maximálního množství registrovaných nodů k síti, tedy 100 nodů, je odezva do 6,5 vteřin. V případě, že jsou na jednu gatewaye připojeny stejné koncové prvky a všechny jsou nezávisle na sobě ovládány pomocí jednoho paketu, jedná se o poměrně efektivní a spolehlivou bezdrátovou síť.

7.3.5 Komunikační protokol

Pro komunikaci v navržené MESH síti byl vytvořen komunikační protokol, který byl navrhován s ohledem na reálné budoucí využití. Počet bajtů využitých v komunikačním protokolu se pohybuje v rozmezí od 14 B do 64 B. Jednotlivá pole komunikačního protokolu a jejich význam jsou uvedena v následující tabulce.

Tabulka 7.3: Popis komunikačního protokolu využitého pro navrženou MESH síť

Pozice	Název pole	Popis pole
0	Type Of Message	Definuje typ zprávy (hodnota 0x01 označuje MESH síť)
1	Control Bits	Řídící bity, které definují vysílací výkon, dotaz nebo odpověď, současné zpracování
2-3	Site ID	Unikátní identifikátor sítě vystavený gatewayí
4-7	Random Number	Náhodné číslo pro zvýšení kvality šifrování
8	Dest Address	Cílová adresa
9	Src Address	Zdrojová adresa
10	Nodes Count	Celkový počet nodů v síti
11-12	Object ID	Definice příkazu (až 65536)
13	Data Len	Délka následujícího pole
14-63	Payload	Datové pole s délkou až 50 bajtů

Primárním cílem bylo navrhnout komunikační protokol, který bude v budoucnu jednoduše rozšířitelný i o jiný síťový model nebo jinou funkcionalitu. Tento požadavek byl naplněn pomocí pole, které definuje typ zprávy. Aktuálně se jedná o typ zprávy označující MESH síť. Při nové přidané funkcionalitě se využije jiná hodnota typu zprávy a na základě toho je možné změnit i rozložení následující části protokolu a tím úplně změnit funkcionalitu systému.

Následuje pole definující řídicí bity, pomocí kterých lze definovat vysílací výkon celé sítě v rozsahu od -9 dBm až do +12 dBm. Dále je v tomto bajtu zahrnuta informace o aktuálním stavu sítě, tedy jestli je vysílán dotaz nebo odpověď. V případě, že nadřazený příkaz ovládá více koncových nodů, je připraven bitový příznak, který definuje, jestli se mají příkazy zpracovat ihned po přijetí paketu nebo až současně v jeden okamžik.

Další datové pole označuje unikátní identifikátor sítě, který jsem definován gatewayí při její vytváření. V případě, že by na jednom komunikačním kanálu pracovalo více MESH sítí, slouží tato hodnota jako identifikátor sítě.

Následují čtyři bajty náhodného čísla, které se generují při každém přeměrování paketu. Jejich účel je zvýšení účinnosti zabezpečení. V případě, že by se v čase vysílal stejný paket, díky této náhodné hodnotě budou zašifrovaná data vypadat pokaždé jinak.

Další tři bajtová pole definují cílovou a zdrojovou adresu, a také celkový počet registrovaných nodů v síti.

Následující částí je dvoubajtové pole definující typ příkazu posílaný v MESH síti. Mezi tyto příkazy se budou řadit příkazy pro ovládání jednotlivých nodů.

Dále se nachází definice délky datového pole, které může obsahovat v rozmezí od 0 B až do 50 B. Datové pole je dimenzováno právě na velikost 50 B z důvodu, že pokud na síti bude registrován maximální počet nodů a všechny budou ovládány stejným příkazem, na každý prvek je tak vyhrazena čtyřbitová informace. V případě, že koncové prvky budou například digitální ovladače říditelného osvětlení, je možné toto osvětlení regulovat v kroku po 6,25 %, což je ve většině případů naprosto dostačující.

Celý komunikační protokol je šifrován pomocí dříve definované symetrické šifry AES s délkou klíče 128 bitů.

7.4 Návrh postupu stavby sítě a její správy

V rámci zadání diplomové práce je i návrh postupu stavby sítě a také její správy. Tyto metody budou do navržené technologie následně implementovány.

7.4.1 Registrace do sítě

V aktuální verzi této práce mají jednotlivé nody pevně přiřazenou adresu, síťový identifikátor a symetrický šifrovací klíč. V rámci budoucího využívání této technologie je ale zapotřebí registraci do sítě uživatelsky zpříjemnit.

Princip registrace je založen na aktivaci registrační rutiny na straně gatewaye a současně na straně nodu. V prvním kroku se aktivuje registrační rutina na straně gatewaye, která celou gateway na definovaný čas přepne na komunikační kanál 0, kde bude očekávat příjem paketu s žádostí o registraci. V druhém kroku se aktivuje registrační rutina na straně nodu, která zmíněný paket odešle. Po přijetí této žádosti se naváže dočasné spojení pomocí asymetrické šifry. Následně se node od gatewaye dozví přiřazenou adresu, síťový identifikátor a šifrovací klíč. Následně se toto dočasné spojení rozpadne a komunikace bude nadále probíhat standardním způsobem.

Akce registrace může být na straně nodu vyvolávaná například mikrosplínačem.

7.4.2 Stavba sítě

Na straně 57 jsou definovány podmínky funkčnosti navržené MESH sítě. Tyto podmínky je možné splnit v rámci malé sítě, ale ve větší nebo časově měnící se síti budou nastávat problémy. Jedním z problémů může být to, že se do sítě přidávají nová zařízení, která nebudou vyhovovat podmínce, že node s menší adresou má být blíže gatewayi. V rámci tohoto problému bude vytvořena automatická stavba MESH sítě.

Tato stavba sítě je navržena jako proces, při kterém se každému nodu přiřadí nová virtuální adresa, která bude řazena podle rádiového dosahu od gatewaye. Princip přiřazování těchto virtuálních adres je následující. V prvním kroku se vyšle příkaz do MESH sítě s nižším vysílacím výkonem, který zjistí, jaké nody tuto zprávu dostaly. Tyto nody postupně prostřednictvím MESH sítě odpoví a následně jim pomocí komunikace peer-to-peer bude přiřazena nová virtuální adresa. Následně bude každý node, který již obsahuje virtuální adresu vyzván, aby dočasně převzal roli gatewaye a stejným procesem zjistil, které z okolních nodů jsou v rádiovém dosahu. Tentokrát ovšem odpoví pouze ty nody, které ještě nezískaly virtuální adresu. Seznam těchto nově přiřazených adres bude prostřednictvím komunikace peer-to-peer doručen zpět do gatewaye a ta vyzve další node dle virtuální adresy, aby dočasně převzala funkci gatewaye a objevila své okolí.

Výše uvedený proces bude ukončen ve chvíli, kdy budou všechny nody v síti obsahovat novou virtuální adresu, nebo všechny nody ukončí dočasnou roli gatewaye. Pokud se některý z nodů nebude hlásit, nebude s ním probíhat komunikace a proces stavby sítě musí proběhnout znovu.

Ovládání jednotlivých nodů bude nadále stále probíhat podle jejich hlavní přiřazené adresy. Virtuální adresa bude sloužit pouze pro účely vysílání v časových slotech.

7.5 Srovnání navržené MESH sítě s již existujícími standardy

V teoretické části této práce byly uvedeny techniky pro přeposílání datových paketů mezi jednotlivými zařízeními v MESH síti a současně byly uvedeny čtyři nejpoužívanější protokoly využívané v MESH sítích. V rámci této podkapitoly je uvedeno srovnání oproti parametrům uvedených, v již existujících standardech.

První významnou výhodou navržené MESH sítě je možnost ovládání všech zařízení v síti současně pomocí jednoho paketu. Nejvyšší efektivita je dosaženo v případě, že jsou na jedné gatewayi připojeny zařízení stejného typu. V případě například akčních prvků lze pomocí navržené sítě ovládat najednou až 100 prvků a současně z nich získat až čtyřbitovou odpověď během jednoho paketu, který při tomto množství připojených zařízení trvá až 6,5 sekund. V případě nasazení této sítě v rámci automatizačních systémů je dosaženo vysoké efektivity. Naopak pokud bude v síti ovládáno každé koncové zařízení samostatně, bude tak vznikat dlouhá latence při komunikaci z důvodu absence algoritmu pro hledání nejkratší cesty mezi gatewayí a koncovým zařízením. Toto je ovšem vlastnost techniky zaplavování.

Výhodou využití techniky zaplavování je vysoká robustnost sítě i bez použití algoritmu pro hledání nejkratší virtuální cesty ke koncovému zařízení. Aby bylo této robustnosti dosaženo, musí být jednotlivé nody adresně seřazeny od nejnižší po nejvyšší v závislosti na rádiové poloze od gatewaye, nebo musí být při každé změně pozice nebo po přidání nového koncového zařízení znova vystavěna síť. Pokud je opět řešení cíleno do automatizace budov, kde jsou jednotlivé koncové zařízení umístěné na fixních pozicích, pak není problém znova vystavět síť.

Významnou nevýhodou navržené sítě je, že není vhodná pro bateriové aplikace. To je dáno využitím techniky zaplavování, kdy každé koncové zařízení musí přeposílat celý datový paket, a tím pádem je spotřebována energie i ve chvílích, kdy datová zpráva není adresována tomuto zařízení.

Poslední uvedenou výhodou tohoto řešení je možnost jednoduchého budoucího rozšíření komunikační topologie. V rámci komunikačního protokolu byla definována jednobajtová hodnota, která slouží k výběru komunikační topologie. V případě, že bude potřeba navrženou technologii libovolně rozšířit, stačí definovat novou hodnotu a implementovat nové algoritmy.

V následující tabulce jsou uvedeny výše zmíněné výhody a nevýhody navrženého řešení oproti parametrům již existujících MESH standardům.

Tabulka 7.4: Srovnání výhod a nevýhod navržené sítě oproti již existujícím standardům

Výhody	Nevýhody
Vysoká časová efektivita při hromadném ovládání koncových prvků	Dlouhá latence v případě komunikace s jedním koncovým prvkem
Rostoucí robustnost s větším množstvím prvků (každý prvek přeposílá datovou zprávu)	Při změně pozice nebo po přidání nového prvku musí být znova vystavěna síť
Jednoduchá možnost změny komunikační topologie (úpravy koncovému prvku na míru)	Řešení není cíleno na nízko příkonové zařízení (všechny nody přeposílají datové pakety)

7.6 Popis interface firmware knihovny

V této kapitole je uveden popis jednotlivých funkcí, které jsou využity pro ovládání navržené firmware knihovny v komunikačním režimu MESH síť. Tyto funkce lze rozdělit na dva druhy podle typu využití. Prvním typem jsou funkce určené pro práci s gatewayí a druhým typem jsou funkce určené pro práci s nody.

V následující tabulce je uveden seznam funkcí využitých pro práci s gatewayí v režimu MESH síť.

Tabulka 7.5: Seznam funkcí využitých pro práci s gatewayí v režimu MESH síť

Název funkce	Popis funkce
Nirf_MeshGw_Init	Inicializace komunikačního modulu v režimu MESH síť v roli gatewaye.
Nirf_MeshGw_SendData_UseCallback	Odeslání datového paketu do MESH síť. Po posledním přijatém platném datovém paketu nebo po vypršení timeoutu je vyvolán callback pro obsluhu odpovědi.
Nirf_MeshGw_NewTickFromISR	Tato funkce musí být volána s periodou jedné milisekundy. Jedná se o vnitřní časování knihovny.
Nirf_MeshGw_GetReceivedData	Vyčtení posledního validního paketu, který byl přijat.

V následující tabulce je uveden seznam funkcí využitých pro práci s nody v režimu MESH síť.

Tabulka 7.6: Seznam funkcí využitých pro práci s nody v režimu MESH síť

Název funkce	Popis funkce
Nirf_MeshNode_Init	Inicializace komunikačního modulu v režimu MESH síť v roli nodu.
Nirf_MeshNode_RxCallback	Tato funkce musí být definována v uživatelském kódu. Jedná se o callback, který je vyvolán v případě přijatých dat.
Nirf_MeshNode_NewTickFromISR	Tato funkce musí být volána s periodou jedné milisekundy. Jedná se o vnitřní časování knihovny.

8 MĚŘENÍ DOSAŽENÝCH PARAMETRŮ

Poslední částí této diplomové práce bylo proměřit a zhodnotit dosažené komunikační parametry navrženého bezdrátového komunikačního modulu. Měření a hodnocení bylo realizováno pomocí dvou metod. První metoda měření se zaměřuje na proměření maximální komunikační vzdálenosti dvou bezdrátových komunikačních modulů pracujících v režimu peer-to-peer. Dosažená komunikační vzdálenost je následně srovnána s teoretickým předpokladem. Druhá metoda měření se zaměřuje na ověření funkčnosti komunikačních modulů v režimu MESH síť. V tomto měření jsou jednotlivé nody rozmístěny do takových pozic, aby mezi některými byla přímá viditelnost, a tedy probíhala komunikace napřímo. Mezi ostatními nody byla přímá viditelnost eliminována vloženou překážkou ve formě budovy a tím byl simulován výpadek komunikační cesty.

8.1 Měření komunikačního dosahu v režimu peer-to-peer

Jak již bylo zmíněno, první metodou měření dosažených parametrů bylo měření realizovaného komunikačního dosahu. První částí tohoto měření je stanovení teoretického komunikačního dosahu s využitím dvou modelů, které definují ztráty šířením.

8.1.1 Model šíření rádiového signálu

Obecně je výkon signálu přijatého na straně přijímacího komunikačního modulu určen následujícím způsobem. Prvně je definován vysílací výkon komunikačního modulu označený jako P_{TX} , který je vysílán pomocí radiové antény se ziskem G_{TX} . Vysílaný signál se šíří prostorem se ztrátou L až do místa radiové antény přijímacího komunikačního modulu se ziskem G_{RX} . Na výstupu radiové antény je přijímaný signál s výkonem P_{RX} . Tento přijímací výkon je matematicky definován jako

$$P_{RX} = P_{TX} \cdot G_{TX} \cdot \frac{1}{L} \cdot G_{RX}. \quad (8.1)$$

V tomto modelu nejsou zahrnuty ztráty způsobené například nedokonalým impedančním přizpůsobením radiové antény k radiofrekvenčnímu integrovanému obvodu, ztráty způsobené nevhodnou vzájemnou polarizací rádiových antén atd. Za předpokladu, že jsou tyto zmíněné ztráty minimalizovány, tak nemají při výpočtech významný vliv.

Vzhledem k tomu, že jsou parametry výše uvedené rovnice definovány v hodně rozdílných řádech, jsou pro lepší představu a zjednodušení výpočtu převáděny do logaritmického měřítka. V následujících výpočtech budou využity logaritmické hodnoty a pro hodnotu výkonu je využita referenční hodnota 1 mW, v logaritmické hodnotě tedy 0 dBm. Pokud předcházející rovnice zlogaritmujeme, získáme nový vztah

$$P_{RX} = P_{TX} + G_{TX} - L + G_{RX}, \quad [dBm; dBm; dBi; dB; dBi]. \quad (8.2)$$

8.1.2 Model ztrát šířením signálu ve volném prostoru

Základním modelem pro určení ztrát šíření signálu v závislosti na vzdálenosti a frekvenci signálu je model ztrát šířením signálu ve volném prostoru. Jedná se o model jednocestného

šíření signálu, který ve svém směru šíření neobsahuje žádnou překážku, žádnou možnost odrazové plochy, a tedy žádnou možnost útlumu přenosového kanálu. Tento model ztrát vychází z úpravy Friisovy přenosové rovnice a je označován zkratkou FSPL (zkratka – Free-Space Propagation Loss). Model ztrát šířením signálu ve volném prostoru je definován jako

$$L_{FSP} = 10 \cdot \log\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2 = 20 \cdot \log\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right), \quad (8.3)$$

kde L_{FSP} jsou ztráty šířením signálu ve volném prostoru, d je vzdálenost vysílací a přijímací antény a λ je vlnová délka, která je definována jako

$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad (8.4)$$

kde c je rychlost světla a f je frekvence vysílaného signálu.

Sloučením předcházejících dvou rovnic a jejich doplněním do rovnice (8.2) dostaneme rovnici pro hodnotu přijímaného výkonu v závislosti na vzdálenosti vysílací a přijímací antény s využitím modelu ztrát šířením signálu ve volném prostoru. [30]

$$P_{RX} = P_{TX} + G_{TX} - 20 \cdot \log\left(\frac{4\pi df}{c}\right) + G_{RX}. \quad (8.5)$$

8.1.3 Model ztrát dvou paprskovým šířením signálu

Druhým používaným modelem pro určení ztrát šířením signálu v závislosti na vzdálenosti je dvou paprskový model a je označován zkratkou TRGM (zkratka – Two-Ray Ground-Reflection Model). Jedná se o model ztrát, který předpokládá vysílací a přijímací anténu umístěnou v definované výšce nad nekonečně rozlehlou rovinnou zemní plochou. Současně tento model předpokládá dvoucestné šíření signálu, kde první signál je šířen napřímo mezi vysílací a přijímací anténou, a druhý signál, který je šířen odrazem skrze rovinnou zemní plochu směrem k přijímací anténě. Velikost ztrát dvou paprskového modelu je definována jako

$$L_{TRG} = 10 \cdot \log\left(\frac{d^4}{h_T^2 \cdot h_R^2}\right) = 20 \cdot \log\left(\frac{d^2}{h_T \cdot h_R}\right), \quad (8.6)$$

kde L_{TRG} jsou ztráty šířením signálu pomocí dvou paprskového modelu, d je vzdálenost vysílací a přijímací antény, h_T je výška vysílací antény umístěné nad rozlehlou zemí a h_R je výška přijímací antény umístěné nad zemí. Ze vzorce je patrné, že tento model nepočítá s útlumem šířeného signálu v závislosti na jeho frekvenci.

Dosažením tohoto modelu ztrát do rovnice (8.2) dostaneme obdobnou rovnici pro hodnotu přijímaného výkonu v závislosti na vzdálenosti vysílací a přijímací antény s využitím dvou paprskového modelu ztrát. [31]

$$P_{RX} = P_{TX} + G_{TX} - 20 \cdot \log\left(\frac{d^2}{h_T \cdot h_R}\right) + G_{RX}. \quad (8.7)$$

8.1.4 Citlivost radiofrekvenčního přijímače

Pro určení teoretické hodnoty maximálního komunikačního dosahu je nutné nejdříve definovat minimální hodnotu výkonu přijatého signálu a to tak, aby byla zajištěna minimální požadovaná

kvalita přenášeného signálu. Takto je definována citlivost přijímače. Minimální požadovaná kvalita signálu je obvykle měřena pomocí bitové chybovosti *BER* (zkratka – Bit Error Rate) nebo pomocí paketové chybovosti *PER* (zkratka – Packet Error Rate). Mezi bitovou chybovostí a paketovou chybovostí platí pravděpodobnostní vztah

$$PER = 1 - (1 - BER)^n, \quad (8.8)$$

kde *n* udává počet bitů obsažených v celém paketu.

Obecně je více vypovídající chybovost *PER*, protože v sobě navíc obsahuje kromě délky paketu i chybovost interních funkcí radiofrekvenčního obvodu, jako je chybovost automatické frekvenční korekce přijímače, chybovost detekce preambule a synchronizačního slova.

Citlivost přijímače je obecně definována jako součet výkonu tepelného šumu *N* při definované šířce pásma přijímacího filtru *B_{RX}*, šumového čísla přijímače *NF* a odstupem mezi nosnou frekvencí a šumem *C/N* pro dosažení požadované kvality přenosu signálu. Definice citlivosti přijímače je uvedena na jako

$$S_{RX} = N + NF + \frac{C}{N}. \quad (8.9)$$

Výkon tepelného šumu je definován vztahem

$$N = N_0 + 10 \cdot \log B_{RX} = kT + 10 \cdot \log B_{RX}, \quad (8.10)$$

kde *N₀* je výkon šumu při šířce pásma 1 Hz, *B_{RX}* je šířka pásma přijímacího filtru, *k* je Boltzmannova konstanta a *T* je termodynamická teplota.

Za předpokladu, že spojíme předcházející rovnice a jedinou proměnnou hodnotou bude šířka pásma přijímacího filtru *B_{RX}*, dostaneme novou rovnici

$$S_{RX} = S_{RX0} + 10 \cdot \log B_{RX}. \quad (8.11)$$

kde *S_{RX}* je citlivost přijímače, *S_{RX0}* je teoretická hodnota citlivosti přijímače na šířku pásma 1 Hz a *B_{RX}* je šířka pásma přijímacího filtru.

Výrobce radiofrekvenčního integrovaného obvodu SPIRIT1 provedl měření citlivosti přijímače pro různé typy modulací s různými hodnotami šířek pásma přijímacího filtru, čímž lze jednodušším způsobem určit citlivost přijímače pro navržený bezdrátový komunikační modul. Z datasheetu byla odečtena měřená hodnota citlivosti přijímače -93 dBm pro zvolenou modulaci s nastaveným kanálovým filtrem 540 kHz. Tyto hodnoty jsou výrobcem uvedeny pro hodnotu *PER* 1 % s paketem délky 20 B. Pomocí úpravy předchozí rovnice lze vypočítat teoretickou hodnotu citlivosti přijímače jako

$$S_{RX0} = S_{RX} - 10 \cdot \log B_{RX}, \quad (8.12)$$

$$S_{RX0} = -93 - 10 \cdot \log(540 \cdot 10^3) = -150,3 \text{ dBm/Hz}. \quad (8.13)$$

Nyní lze vypočítat hodnotu citlivosti přijímače navrženého bezdrátového komunikačního modulu. Jak již bylo uvedeno v předcházejících kapitolách, navržený komunikační modul využívá šířku pásma přijímacího filtru 108 kHz. Hodnota citlivosti přijímače navrženého modulu je

$$S_{RX} = -150,3 + 10 \cdot \log(108 \cdot 10^3) = -100 \text{ dBm}. \quad (8.14)$$

Tato hodnota citlivosti přijímače je tedy hodnotou minimálního výkonu signálu, který musí být přijat, aby docházelo k minimální požadované kvalitě přenášeného signálu.

$$P_{RX,min} = S_{RX} = -100 \text{ dBm}. \quad (8.15)$$

8.1.5 Teoretický komunikační dosah

Teoretickou hodnotu komunikačního dosahu lze nyní odvodit z definování maximálních přípustných ztrát šířením signálu označených jako L_{max} . Úpravou rovnice (8.2) je získán následující vztah pro výpočet těchto ztrát

$$L_{max} = P_{TX} + G_{TX} + G_{RX} - P_{RX,min}. \quad (8.16)$$

Vysílací výkon P_{TX} pro měření je stanoven na hodnotu 12 dBm, zisk vysílací a přijímací antény G_{TX} a G_{RX} v konkrétním směru použitým pro měření je stejný s hodnotou -8 dBi. Po dosažení do předchozí rovnice jsou získány maximální přípustné ztráty jako

$$L_{max} = 12 + (-8) + (-8) - 100 = 96 \text{ dB}. \quad (8.17)$$

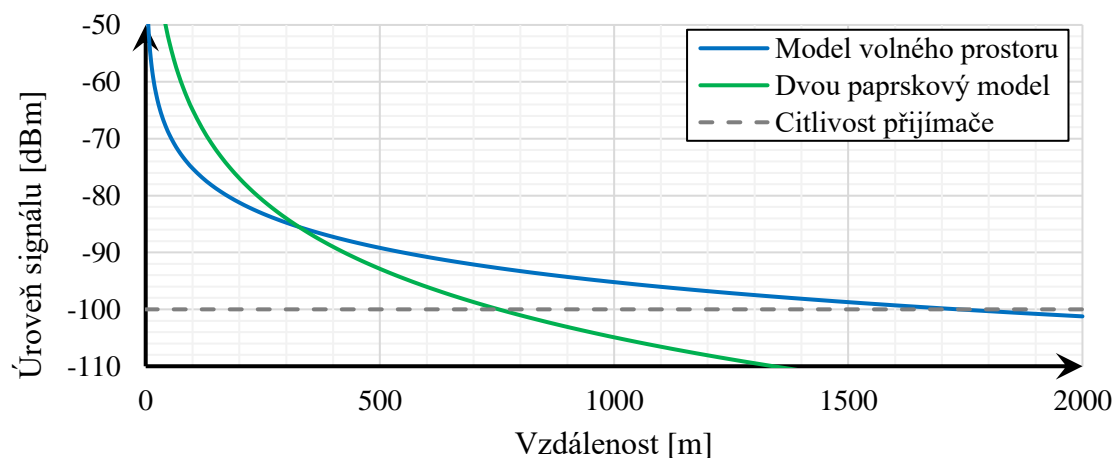
Úpravou rovnice (8.3) lze vypočíst hodnotu teoretického dosahu při použití modelu ztrát šířením signálu ve volném prostoru. Testovací měření bude probíhat na kanálu číslo 20, který odpovídá frekvenci 865,05 MHz.

$$d_{FSP} = \frac{c \cdot 10^{\left(\frac{L_{max}}{20}\right)}}{f \cdot 4\pi} = \frac{300 \cdot 10^6 \cdot 10^{\left(\frac{96}{20}\right)}}{865,05 \cdot 10^6 \cdot 4\pi} = 1741 \text{ m}. \quad (8.18)$$

Úpravou rovnice (8.6) lze obdobně vypočíst teoretickou hodnotu dosahu při použití dvou paprskového modelu ztrát šířením signálu. Výška vysílacího i přijímacího komunikačního modulu bude během měření 3 metry nad povrchem země.

$$d_{TRG} = \sqrt{h_T \cdot h_R \cdot 10^{\left(\frac{L_{max}}{20}\right)}} = \sqrt{3 \cdot 3 \cdot 10^{\left(\frac{96}{20}\right)}} = 753 \text{ m}. \quad (8.19)$$

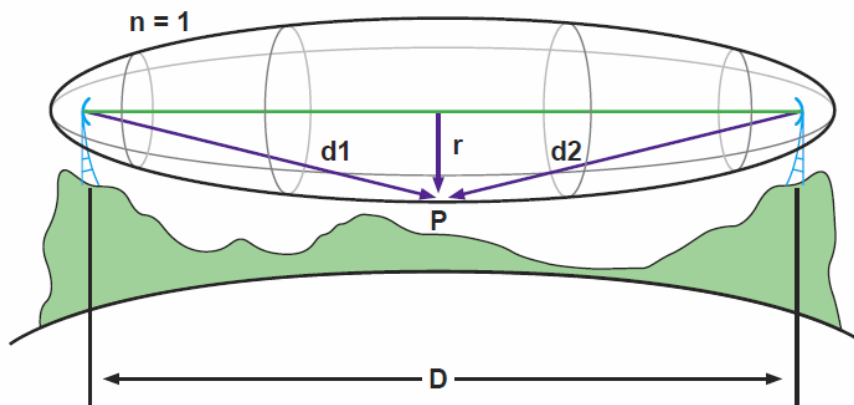
Na následujícím obrázku je zobrazena teoretická závislost výkonu přijatého signálu na vzdálenosti mezi vysílací a přijímací anténou pro oba výše uvedené přenosové modely. Zobrazená závislost je zobrazena s využitím rovnic (8.5) a (8.7), přičemž vstupní parametry odpovídají parametrům bezdrátového komunikačního modulu během měření.



Obr. 8.1: Teoretická závislost výkonu přijatého signálu na vzdálenosti mezi anténami

8.1.6 Fresnelova zóna

Posledním důležitým faktorem, který je nutné při měření zohlednit, je podmínka Fresnelovy zóny. Jedná se o podmínku, která definuje, že kromě přímé viditelnosti mezi vysílací a přijímací anténou musí být vymezen dostatečný minimální prostor ve formě elipsoidu, který se mezi těmito anténami nachází. Grafické znázornění tohoto elipsoidu je zobrazeno na následujícím obrázku.



Obr. 8.2: Znázornění minimálního prostoru definovaného Fresnelovou zónou [32]

Poloměr Fresnelovy zóny s indexem n lze ve vzdálenosti d_1 od vysílací antény a d_2 od přijímací antény určit jako

$$r_{Fn} = \sqrt{n\lambda \frac{d_1 \cdot d_2}{d_1 + d_2}}. \quad (8.20)$$

Obecně lze říct, že pokud je 60 – 80 % první Fresnelovy zóny bez fyzických překážek, dochází ke spolehlivému přenosu signálu. Úpravou výše uvedeného vzorce lze vyjádřit maximální hodnotu poloměru první Fresnelovy zóny, která se nachází přesně uprostřed mezi vysílací a přijímací anténou. Upravená rovnice má tvar

$$r_{F1,max} = \sqrt{\frac{cd}{4f}}, \quad (8.21)$$

kde $r_{F1,max}$ je maximální velikost poloměru první Fresnelovy zóny, d je celková vzdálenost mezi vysílací a přijímací anténou a f je frekvence přenášeného signálu.

Následné měření je prováděno na maximální vzdálenost jednoho kilometru, z toho vyplývá maximální možný poloměr první Fresnelovy zóny jako

$$r_{F1,max} = \sqrt{\frac{cd}{4f}} = \sqrt{\frac{300 \cdot 10^6 \cdot 1000}{4 \cdot 865,05 \cdot 10^6}} = 9,3 \text{ m}. \quad (8.22)$$

8.1.7 Sumarizace vstupních parametrů a teoretických hodnot

V následující tabulce jsou uvedeny vstupní parametry použité při měření, jako je vysílací frekvence, vysílací výkon komunikačního modulu a zisk jeho rádiové antény a výškové

umístění vysílače a přijímače komunikačního modulu. Současně jsou v tabulce uvedeny i teoretické hodnoty citlivosti přijímače a komunikačního dosahu.

Tabulka 8.1: Sumarizace vstupních parametrů pro měření a vypočtených teoretických hodnot

Parametr	Popis	Hodnota
f	Komunikační frekvence	865,05 MHz
P_{TX}	Vysílací výkon	12 dBm
G_{TX}	Zisk vysílací antény	-8 dBi
G_{RX}	Zisk přijímací antény	-8 dBi
h_T	Výška vysílače komunikačního modulu nad zemí	3 m
h_R	Výška přijímače komunikačního modulu nad zemí	3 m
S_{RX0}	Teoretická hodnota citlivost přijímače při 1 Hz	-150,3 dBm/Hz
S_{RX}	Citlivost přijímače při 108 kHz	-100 dBm
d_{FSP}	Teoretický komunikační dosah modelu ztrát ve volném prostoru	1 741 m
d_{TRG}	Teoretický komunikační dosah dvou paprskového modelu	753 km
$r_{F1,max}$	Maximální velikost poloměru první Fresnelovy zóny	9,3 m

8.1.8 Měřicí přípravky

Aby bylo možné zrealizovat měření maximálního komunikačního dosahu, byly vytvořeny dva testovací přípravky. Testovací přípravek se skládal z třímetrové dřevěné latě, na které byl z její horní části zafixován navrhovaný bezdrátový komunikační modul v definovaném směru. Jeden přípravek plnil roli vysílače a druhý roli přijímače. Přípravky byly napájeny z dvanácti voltového akumulátoru skrze spínaný zdroj na provozní napětí komunikačního modulu. Zhotovené měřicí přípravky jsou zobrazeny na následujícím obrázku.



Obr. 8.3: Vysílací (vlevo) a přijímací (vpravo) přípravek pro měření komunikačního dosahu

Vysílací přípravek vysílal paket s délkou užitečné informace 32 bajtů. Vysílání tohoto paketu se opakovalo každých 400 ms. Příjemací přípravek tento paket přijímal a v případě, že byl paket doručen v pořádku, byla vyčtena síla přijatého signálu. Tato hodnota byla následně odeslaná na rozhraní UART a pomocí převodníku UART na USB byla síla přijatého signálu zobrazena v počítači.

Z přijímacího přípravku šlo kromě síly přijatého signálu měřit i paketovou chybovost *PER*. Vzhledem k tomu, že hodnota síly přijatého signálu byla reportována pouze v případě, kdy byl přijat validní paket, bylo možné spočítat počet validně přijatých paketů za definovanou jednotku času. V tomto případě byl počítán počet validně přijatých paketů během časového úseku dvaceti sekund. Vzhledem k tomu, že pakety byly vysílány každých 400 ms, bylo možné přijmout až 50 paketů během dvaceti sekund, což odpovídá paketové chybovosti 0 %.

8.1.9 Místo měření

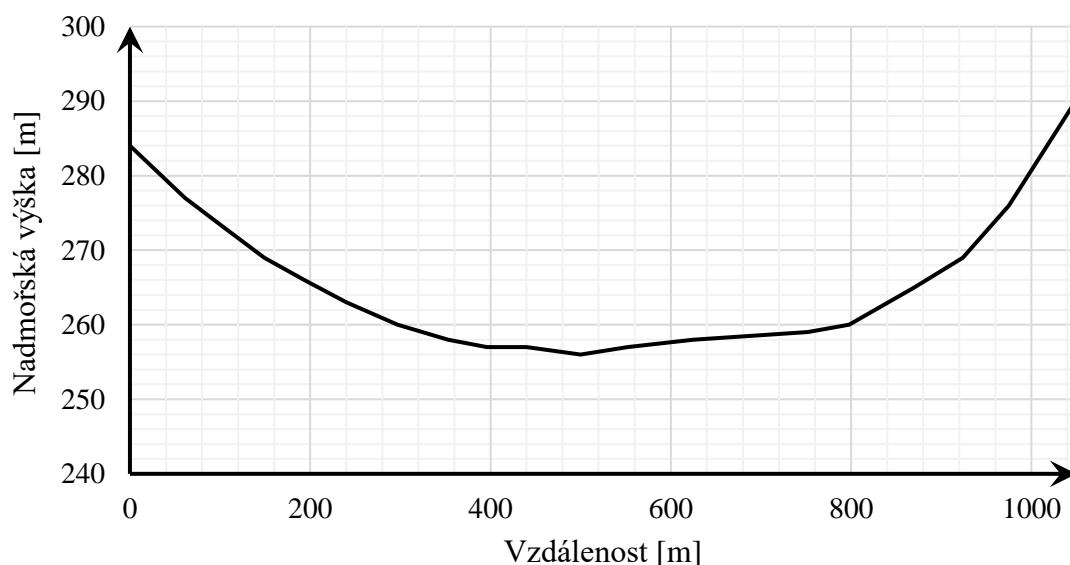
Celé měření proběhlo v Brně v městské části Medlánky v blízkosti Medláneckého letiště. Toto místo bylo zvoleno z důvodu vhodného terénu, ve kterém se nacházela přímá viditelnost mezi dvěma místy až na vzdálenost jednoho kilometru. Současně výškový profil tohoto místa vytvářel mírné údolí, díky čemu bylo možné zajistit, že se v první Fresnelově zóně nebudou nacházet fyzické překážky. Celkově bylo proměřeno 18 vzdáleností s přibližně pravidelnými rozestupy. Na následujícím obrázku jsou zobrazeny měřicí pozice.



Obr. 8.4: Umístění měřících pozic při měření maximálního komunikačního dosahu

V bodě číslo jedna byl umístěn vysílací přípravek. V ostatních bodech proběhlo umístění přijímacího přípravku a následně byly odečteny měřené parametry.

Na následujícím obrázku je zobrazen výškový profil v závislosti na vzdálenosti od vysílacího přípravku. Tento výškový profil je zobrazen z dat uvedených v Tabulka 8.2.



Obr. 8.5: Výškový profil terénu využitého při měření maximálního komunikačního dosahu

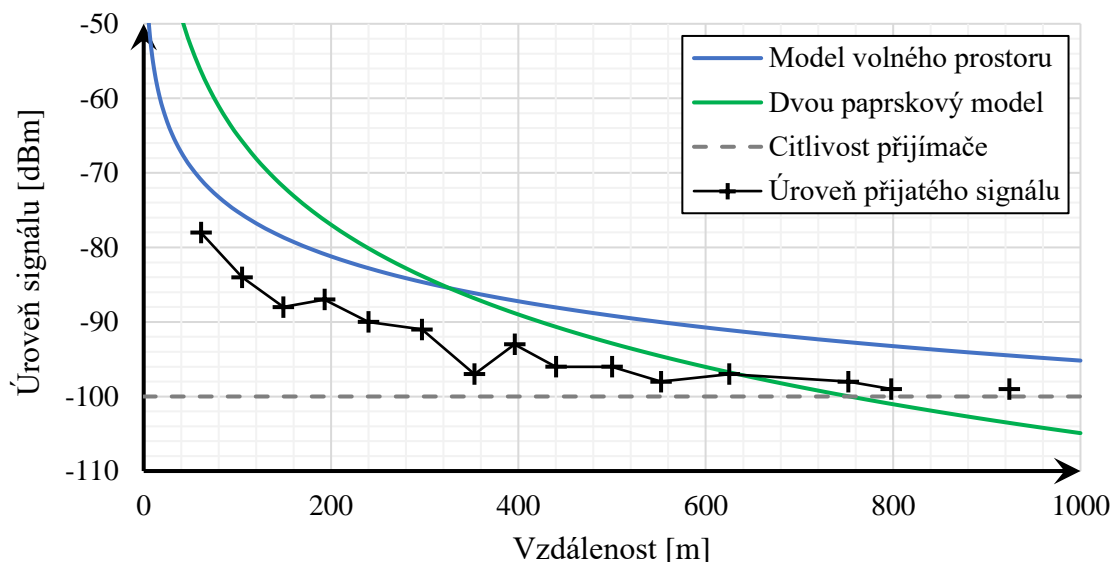
8.1.10 Výsledky měření komunikačního dosahu

Z jednotlivých měřících bodů byla odečtena průměrná hodnota síly přijatého signálu a také byla změřena hodnota paketové chybovosti PER. Tyto měření jsou zobrazeny v následující tabulce.

Tabulka 8.2: Měření přijaté síly signálu a PER v závislosti na vzdálenosti od vysílače

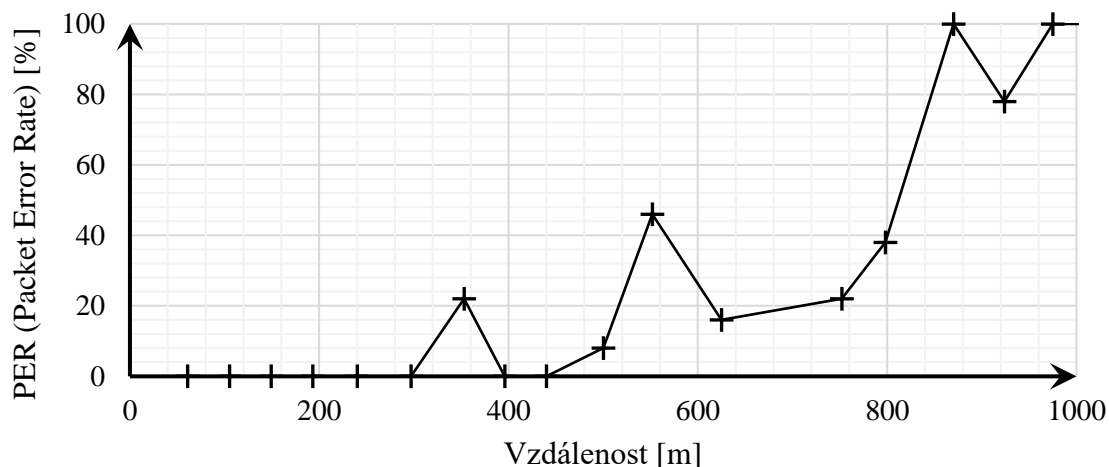
Měřící bod [-]	Zeměpisná šířka [-]	Zeměpisná délka [-]	Nadmořská výška [m]	Vzdálenost [m]	Úroveň signálu [dBm]	PER [%]
1	49,237679 N	16,565136 E	284	0	-	-
2	49,237422 N	16,564393 E	277	61	-78	0
3	49,237232 N	16,563865 E	273	105	-84	0
4	49,237082 N	16,563296 E	269	149	-88	0
5	49,236879 N	16,562781 E	266	193	-87	0
6	49,236679 N	16,562213 E	263	240	-90	0
7	49,236438 N	16,561515 E	260	297	-91	0
8	49,236192 N	16,560834 E	258	353	-97	22
9	49,236031 N	16,560308 E	257	396	-93	0
10	49,235895 N	16,559724 E	257	440	-96	0
11	49,235632 N	16,559005 E	256	500	-96	8
12	49,235397 N	16,558377 E	257	552	-98	46
13	49,235124 N	16,557476 E	258	625	-97	16
14	49,234395 N	16,556076 E	259	752	-98	22
15	49,234354 N	16,555389 E	260	798	-99	38
16	49,234136 N	16,554445 E	265	870	-	100
17	49,233919 N	16,55378 E	269	924	-99	78
18	49,233779 N	16,553115 E	276	975	-	100
19	49,233402 N	16,552254 E	290	1 049	-	100

Na následujícím obrázku je zobrazena úroveň signálu v závislosti na vzdálenosti od vysílače. Současně jsou zde pro srovnání zobrazeny i teoretické modely vycházející z rovnic (8.5) a (8.7). Zobrazené hodnoty úrovně přijatého signálu jsou počítány pouze z hodnot, které byly získány při úspěšném příjmu paketu. Lze tedy předpokládat, že u hodnot úrovně přijatého signálu, kde je paketová chybovost větší než 0 %, bude tato hodnota reálně nižší.



Obr. 8.6: Měřená úroveň signálu v závislosti na vzdálenosti od vysílače

Na následujícím obrázku je zobrazena paketová chybovost PER v závislosti na vzdálenosti od vysílacího přípravku.



Obr. 8.7: Paketová chybovost PER v závislosti na vzdálenosti od vysílače

Na základě změřených hodnot lze předpokládat, že ve volném prostoru lze komunikovat na vzdálenost 500 metrů s paketovou chybovostí do 25 % a na vzdálenost 800 metrů s paketovou chybovostí do 50 %. Dosažená komunikační vzdálenost se pohybuje v rozmezí teoretických hodnot, přičemž závislost úrovně přijatého signálu na vzdálenosti od vysílače se blíží svým průběhem modelu ztrát šířením signálu ve volném prostoru s přidáním ztrátami.

8.2 Měření funkčnosti MESH sítě

Kromě dosaženého komunikačního dosahu bylo nutné proměřit i funkčnost a spolehlivost bezdrátových komunikačních modulů v režimu MESH sítě. Pro toto měření byly využity navržené vývojové moduly, které byly napájené pomocí baterie CR2032.

8.2.1 Místo měření

Měření probíhalo v Brněnském areálu CTP Ponávka. V rámci tohoto měření bylo využito deset vývojových modulů. Jeden modul pracoval v roli gateway a zbylých devět plnilo funkci nodu. Všechny moduly byly rozmístěny v areálu takovým způsobem, že každý node měl přímou viditelnost jen na pár okolních nodů a mezi ostatními měl vloženou překážku ve formě budovy. Gateway a nody byly umístěny přibližně v metrové výšce nad zemí, přičemž se nacházely například na vozidle, na odpadkovém koši nebo na haldě hlíny. Vzdálenost mezi jednotlivými moduly byla řádově 25 až 100 metrů. Umístění jednotlivých vývojových modulů je zobrazeno na následujícím obrázku.



Obr. 8.8: Pozice umístění vývojových modulů v rámci testování MESH sítě

V následující tabulce jsou uvedeny GPS souřadnice jednotlivých prvků včetně jejich adres v MESH síti. Současně je zde uveden i počet ostatních nodů, na které má aktuální prvek přímou viditelnost.

Tabulka 8.3: Seznam umístění a parametrů testovaných nodů v MESH síti

ID	Role	Adresa	Zeměpisná šířka	Zeměpisná délka	Přímá viditelnost ostatních nodů
1	Gateway	0	49,185222 N	16,624321 E	1
2	Node	1	49,185230 N	16,624946 E	3
3	Node	2	49,184984 N	16,625128 E	3
4	Node	3	49,184691 N	16,624950 E	4
5	Node	4	49,184605 N	16,624264 E	1
6	Node	5	49,184078 N	16,625184 E	6
7	Node	6	49,183820 N	16,625726 E	3
8	Node	7	49,183915 N	16,624618 E	3
9	Node	8	49,183242 N	16,24517 E	4
10	Node	9	49,182975 N	16,623858 E	1

8.2.2 Kontrolní měření rádiové viditelnosti mezi gatewayí a nody

Ještě před samotným měřením MESH sítě byla z kontrolních důvodů proměřena rádiová viditelnost mezi gatewayí a nody. K tomu byly využity vyrobené testovací přípravky použité při měření maximálního komunikačního dosahu mezi moduly v režimu peer-to-peer. Cílem tohoto měření bylo potvrdit, že gateway nebude mít rádiové spojení se všemi nody. Výsledek tohoto měření ukázal, že gateway má rádiovou viditelnost s nody 2, 3, 4 a částečně 5 a 6. U nodů, které nemají s gatewayí přímou viditelnost je rádiový signál zajištěn pomocí odrazu signálu od stěn budov v areálu. Zbývající nody s gatewayí nekomunikují, tím pádem k nim musí být pakety doručeny prostřednictvím MESH sítě.

8.2.3 Výsledek měření funkčnosti MESH sítě

Během měření byl opakovaně vysílán příkaz ping na všechny nody v síti. Vzhledem k tomu, že v MESH síti je implementována možnost vysílání všech nodů s definovaným výkonem, byla tato funkcionalita využita při tomto měření. V následující tabulce jsou uvedeny odpovědi příkazu ping pro jednotlivé vysílací výkony.

Tabulka 8.4: Stabilita sítě pro vysílací výkony v rozsahu od -9 do +12 dBm

Vysílací výkon [dBm]	Četnost odpovědi na příkaz ping pro node s ID [%]								
	2	3	4	5	6	7	8	9	10
12	100	100	100	100	100	100	100	100	100
9	100	100	100	100	100	100	100	100	100
6	100	100	100	100	100	100	100	100	100
3	100	100	100	100	100	100	100	90	90
0	100	100	100	100	100	100	100	100	100
-3	100	100	100	100	100	100	100	70	70
-6	100	100	100	100	100	100	100	60	60
-9	100	100	100	100	80	80	80	30	30

Jednotlivá měření byla opakována desetkrát pro každou úroveň vysílacího výkonu. Měření proběhlo o víkendu tak, aby se v areálu nacházelo minimum jedoucích aut, které by mohly ovlivnit výsledky měření.

Na základě zjištěných výsledku lze konstatovat, že pro rozmístění definovaném v Tabulka 8.3 je síť stabilní pro vysílací výkony od 0 do 12 dBm. Pouze jeden krát došlo k výpadku nodů s označením 9 a 10 při vysílacím výkonu 3 dBm. To bylo způsobeno nevhodným umístěním nodu s označením 9. Tento nod byl umístěn na kovovém odpadkovém koši v blízkosti kovového totemu s označením názvů firem. Po dokončení měření byl node s označením 9 přesunut o několik metrů směrem od budovy a stabilita sítě se zlepšila.

Stabilita sítě byla zhoršená pro vysílací výkony od -9 do -3 dBm. V tomto případě docházelo k čtenějším výpadkům. Nejhuř na tom byl případ s vysílacím výkonem -9 dBm, při kterém se kromě výpadku u nodů s označením 9 a 10 také u nodů s označením 6, 7 a 8.

Výsledek měření funkčnosti MESH sítě lze hodnotit pozitivně, protože při správně zvoleném vysílacím výkonu lze dosáhnout spolehlivé komunikace mezi jednotlivými prvky MESH sítě.

ZÁVĚR

Primárním cílem této práce bylo navrhnout a vyrobit bezdrátový komunikační modul, pomocí kterého je možné rozšířit libovolně jednoduché embedded zařízení o možnost bezdrátového přenosu datové informace v bezlicenčním pásmu na frekvenci 868 MHz. Jedinou podmínkou pro toto rozšíření je, že embedded zařízení musí obsahovat řídicí mikrokontroler. Hlavní myšlenkou pro návrh bezdrátového komunikačního modulu bylo vytvořit takový modul, který lze následně jednoduše implementovat do několika různých typů embedded zařízení a šetřit tak čas a náklady vývojového týmu. S využitím bezdrátového komunikačního modulu se předchází opakovanému návrhu a ladění radiofrekvenčních obvodů na jednotlivých produktech.

Sekundárním cílem této práce bylo navrhnout a naprogramovat firmware knihovnu pro ovládání tohoto navrženého komunikačního modulu. Naprogramovaná knihovna umožňuje bezdrátovou komunikaci v režimu peer-to-peer a v režimu MESH síť. Komunikace v režimu peer-to-peer je určena pro jednoduchou výměnu datové informace mezi dvěma zařízeními. Komunikace v režimu MESH síť je více sofistikovaná a určena například pro provoz v oblasti automatizace a řízení. Součástí této práce bylo otestovat dosažené komunikační výsledky jak v režimu peer-to-peer, tak v režimu MESH síť.

První část této práce se věnuje teoretickému úvodu, ve kterém jsem se zaměřil na popis rádiových pásem, které lze použít pro bezdrátovou komunikaci bez licence. Současně jsem uvedl informace týkající se frekvenčního ISM pásma a frekvenčního pásma určeného pro SRD neboli zařízení krátkého dosahu. U těchto frekvenčních pásem jsem současně uvedl povolovací podmínky, které musí být splněny pro provoz bezdrátové komunikace bez licence. Další část teoretického úvodu jsem věnoval popisu bezdrátových komunikačních modulů, jejich využití a základního rozdělení dle funkčnosti. Současně byly uvedeny a porovnány některé komerčně dostupné bezdrátové komunikační moduly. Následně byl uveden přehled integrovaných antén, které lze využít pro konstrukci bezdrátových komunikačních modulů včetně jejich porovnání. Poslední částí teoretického úvodu jsem věnoval komunikačním technologiím, ve kterých jsem uvedl standardní topologie síťových propojení od nejjednodušší typu point-to-point až po síť typu MESH. V případě MESH sítí jsem uvedl několik nejpoužívanějších standardů. V rámci komunikačních technologií jsem zmínil přístupové metody ke sdílenému komunikačnímu kanálu.

Druhá část této práce se věnuje popisu návrhu bezdrátového komunikačního modulu, který začíná se skládá z výběru radiofrekvenčního integrovaného obvodu SPIRIT1, symetrizačního členu, čipové antény a elektromagnetického stínícího krytu. Následně jsem navrhl elektrické schéma zapojení bezdrátového komunikačního modulu. Desku plošného spoje jsem navrhl jako čtyřvrstvý plošný spoj, abych docílil jeho správných vysokofrekvenčních parametrů. Na bočních stranách desky plošného spoje jsem vytvořil prokovené půl díry, které slouží k připájení celého modulu do cílového embedded zařízení. Jakmile jsem navržený komunikační modul osadil a provedl základní měření elektrických parametrů, tak jsem provedl řádné impedanční přizpůsobení čipové antény k radiofrekvenčnímu obvodu SPIRIT1 pomocí vektorového síťového analyzátoru. V následující části jsem pro tento vyrobený bezdrátový komunikační modul navrhl vývojový kit, pomocí kterého jsem mohl naprogramovat ovládací

knihovnu. Tento vývojový kit se skládá z osmibitového mikrokontroleru PIC18F45K40, ke jsou připojeny dva mikrosplínače a šest indikačních LED. Celý vývojový kit lze napájet jednak pomocí napájecího napětí, tak pomocí knoflíkové baterie typu CR2032. Napájení pomocí knoflíkové baterie jsem zvolil z důvodu jednoduššího testování MESH sítě ve venkovních prostorech. Celý vývojový kit je možné zasunout do plastového držáku, který jsem navrhl v programu SOLIDWORKS a vytiskl na 3D tiskárně.

Navazující část této práce je zaměřena na návrh komunikace v režimu peer-to-peer. V první chvíli jsem začal s návrhem rozložení komunikačních kanálů tak, aby výsledné komunikační kanály byly v souladu s povoloovacími podmínkami. Dohromady bylo vytvořeno sedmdesát komunikačních kanálů, jejichž kanálová rozteč je přesně 100 kHz. Na základě znalosti kanálové rozteče jsem navrhl parametry digitální modulace. V rámci této práce jsem využil modulaci GMSK, která disponuje velkou výhodou v oblasti nízkého výkonu bočních laloků. To je velice důležité zejména v případě, že jednotlivé komunikační kanály jsou umístěny v těsné blízkosti. Parametry modulace jsem navrhl s ohledem na kanálovou rozteč a s ohledem na toleranci frekvenčního oscilátoru, přičemž výsledná datová rychlost je 61,035 kbps. Abych si ověřil nastavené parametry, provedl jsem výkonovou spektrální analýzu vysílaných dat na jednom z komunikačních kanálů. Odečtené parametry a vlastnosti s velkou přesností odpovídaly teorii. Současně jsem proměřil výkonovou spektrální analýzu vysílaných dat na dvou komunikačních kanálech, které mezi sebou měli jeden neaktivní kanál, a následně jsem proměřil výkonovou spektrální analýzu vysílaných dat na třech sousedních kanálech. Výsledky měření v celém rozsahu odpovídají teorii. Po úspěšném nastavení modulačního schématu jsem nakonfiguroval formát paketu, který se skládá z třiceti dvou bajtové preambule, čtyř bajtového synchronizačního slova, datového pole pro užitečná data a cyklického redundantního součtu určeného pro detekci poškozených dat. Aby se předcházelo poškození dat vlivem změn parametrů přenosového kanálu, využil jsem funkci samo opravného kódu. Integrovaný obvod SPIRIT1 obsahuje šifrovací koprocesor pro symetrickou šifru AES s délkou klíče 128 bitů, ke kterému jsem doprogramoval tři provozní módy blokové šifry. Jedná se o provozní módy ECB, CBC a CTR. Tuto část jsem uzavřel definováním knihovního interface, ve kterém jsou uvedeny funkce, které musí být vytvořeny při portování knihovny na jiný hardware, a také funkce, které slouží k přímému ovládní komunikace v režimu peer-to-peer.

Další část této práce se věnuje samotnému návrhu komunikace v režimu MESH sítě. V první části jsem definoval klíčové předpoklady na základě toho, jak plánuji navrženou technologii využívat. Na základě těchto klíčových předpokladů jsem vytvořil základní koncept celé sítě včetně definice prvků sítě, následně jsem definoval využití komunikačních kanálů pro potřeby MESH sítě a vhodně jsem zvolil adresování v této síti. Celá komunikace v MESH síti je šifrovaná pomocí symetrické šifry AES. V další části jsem popsal princip komunikace založený na přístupové metodě ke sdílenému komunikačnímu kanálu TDMA a MESH technice zaplavování. Definoval jsem délku a řazení časových slotů a navrhl jsem vhodný komunikační protokol, který jsem navrhl s ohledem na možnost budoucího rozšíření. V rámci navržené MESH sítě jsem uvedl podmínky pro její správnou funkčnost a definoval její omezení. Současně jsem navrhl postupy, které budou následně implementovány, týkající se registrace jednotlivých zařízení do sítě a postup stavby celé sítě tak, aby byla vždy zaručena správná

funkčnost celé MESH sítě. Celý zmíněný návrh MESH sítě jsem následně porovnal s již existujícími MESH standardy. Tuto část práce jsem zakončil definováním knihovního interface pro správné ovládání MESH sítě ze strany gatewaye a ze strany nodu.

Poslední část této práce jsem věnoval měření dosažených parametrů. Prvně jsem uvedl, jak vypočítat teoretický komunikační dosah pomocí modelu šíření signálu ve volném prostoru a pomocí dvou paprskového modelu. Následně jsem s kolegy z práce proměřil reálný dosažený komunikační dosah, který se v rámci spolehlivosti pohybuje kolem 500 m ve volném prostoru v případě, že jsou vysílací a přijímací moduly ve výšce alespoň tři metry nad zemí. Maximální komunikační vzdálenost byla 924 metrů s paketovou chybovostí 78 %. Druhým měřením bylo proměření funkčnosti MESH sítě. Toto měření jsem provedl v průmyslovém areálu tak, že jsem jednotlivé vývojové moduly rozestavěl tak, aby na sebe rádiově viděly pouze některé. Současně jsem provedl kontrolní měření, abych si ověřil, že na sebe rádiově vidí opravdu pouze některé vývojové moduly. Následně jsem provedl proměření spolehlivosti MESH sítě pro různé úrovně vysílacích výkonů, přičemž se navržená MESH síť ukázala jako stabilní.

Z mého pohledu byly úspěšně splněny všechny body zadání. Tato práce mi přinesla mnoho nových znalostí v oblasti návrhu hardware bezdrátových komunikačních modulů. Jako velký přínos hodnotím, že navržený komunikační modul je připraven na využití v mých navazujících projektech. Současně jsem se v rámci této práce naučil, jak funguje přenos datové informace pomocí bezdrátové komunikace na úrovni radiofrekvenčního rozhraní a na základě toho jsem navrhl komunikaci v režimu peer-to-peer a v režimu MESH sítě tak, aby to bylo efektivní při použití v nadcházejících projektech.

Tuto práci budu dále rozšiřovat o několik funkcionalit. Prvním krokem je implementace navržené metody pro registrování nodů do sítě a také implementace stavby celé sítě tak, aby byly vždy zaručeny všechny podmínky funkčnosti navržené MESH sítě. Jakmile bude tato implementace hotova, dojde k návrhu komunikačního zařízení, které bude plnit roli rozhraní mezi ethernetovým rozhraním a navrženou MESH sítí. Tímto bude docíleno, že připojená zařízení v MESH síti budou ovladatelná pomocí aplikačního software.

Výhodou navrženého řešení je jeho obecné pojetí v několika ohledech. Navržená firmware knihovna v sobě obsahuje přípravu na možnost komunikace ve frekvenčním pásmu 915 MHz. V rámci hardware bezdrátového komunikačního modulu bude potřeba buď vyměnit čipovou anténu za jinou, nebo přeladit stávající čipovou anténu na vhodné frekvenční pásmo. V případě, že v budoucnu bude ukončena výroba integrovaného obvodu SPIRIT1, lze tento integrovaný obvod nahradit jiným při zachování stejného rozmístění pájitelných plošek bezdrátového komunikačního modulu, a díky tomu nemusí být proveden žádný zásah do hardware v cílových zařízeních. V takovém případě bude pouze doplněna firmware knihovna o jiné radiofrekvenční rozhraní a přehrán firmware v cílových zařízeních. Dalším plánovaným rozšířením této práce je úprava hardware bezdrátového komunikačního modulu tak, aby byl vyveden port pro připojení externí antény. Toho bude využito například při návrhu koncových zařízení, která mezi sebou budou mít větší vzdálenost. Další velkou výhodou je možnost libovolného rozšíření komunikačního protokolu na základě budoucích potřeb. Změnou hodnoty prvního bajtu v navrženém komunikačním protokolu dojde ke změně celého komunikačního protokolu a tím i funkcionality. Celá navržená technologie tedy může komunikovat i na jiných komunikačních

principech. Tohoto plánuji využít při vytváření detekčních zařízení, která se budou v případě určité detekce samy aktivně hlásit tak, aby byla zachována topologie MESH sítě a současně se nemusely jednotlivé zařízení kontinuálně obvolávat.

Navržený bezdrátový komunikační modul včetně komunikace v režimu peer-to-peer a v režimu MESH sítě bude v nadcházející době implementován do jednotlivých zařízení, na kterých pracujeme ve firmě.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ITU: Committed to connecting the world. *Document Moved* [online]. Copyright © ITU [cit. 01.01.2022]. Dostupné z: <https://www.itu.int/en/Pages/default.aspx>
- [2] Regionally harmonized bands. *Document Moved* [online]. Copyright © ITU [cit. 01.01.2022]. Dostupné z: <https://www.itu.int/en/ITU-R/information/Pages/emergency-bands.aspx>
- [3] Český telekomunikační úřad. *Český telekomunikační úřad* [online]. Copyright © 2018 [cit. 01.01.2022]. Dostupné z: <https://www.ctu.cz/>
- [4] Document Moved [online]. Copyright © [cit. 01.01.2022]. Dostupné z: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/sm/R-REC-SM.1056-1-200704-I!!PDF-E.pdf
- [5] *Český telekomunikační úřad* [online]. Copyright ©Q [cit. 01.01.2022]. Dostupné z: <https://www.ctu.cz/sites/default/files/obsah/vo-r10-032021-4.pdf>
- [6] *Top store ~ www.criticalthinking.cz* [online]. Copyright ©S [cit. 01.01.2022]. Dostupné z: https://www.criticalthinking.cz/88134/pic_Rak811-%7C-rakwireless-wisduo-lora-modul-%7C-semtech-sx1276-storage/1.jpeg
- [7] [online]. Dostupné z: <https://content.instructables.com/ORIG/FCV/1VCX/IYV9IS3G/FCV1VCXIYV9IS3G.jpg?auto=webp&frame=1&crop=3:2&width=320&md=ac0c8b0760d282e1647e3a2b8b64b073>
- [8] F. Egan, William (2003). *Practical RF System Design*. Wiley-IEEE Press. ISBN 978-0-471-20023-9
- [9] Fairall, John (2002). *An Introduction to low power radio*. RF Solutions Ltd. ISBN 978-0-9537231-0-2.
- [10] RFM12BW RF Sub-GHz Transceiver Module -Hoperf. *Professional RF IC&modules and Digital Sensor designer and manufacturer Shenzhen Hope Microelectronics Co., Ltd* [online]. Copyright ©2018 HOPE Microelectronics CO., Ltd. All rights reserved. [cit. 01.01.2022]. Dostupné z: https://www.hoperf.com/modules/rf_transceiver/RFM12BW.html
- [11] RFM23BW -121dBm 433/868/915Mhz Transceiver Module-Hoperf. *Professional RF IC&modules and Digital Sensor designer and manufacturer Shenzhen Hope Microelectronics Co., Ltd* [online]. Copyright ©2018 HOPE Microelectronics CO., Ltd. All rights reserved. [cit. 01.01.2022]. Dostupné z: https://www.hoperf.com/modules/rf_transceiver/RFM23BW.html
- [12] RFM95W feature the LoRaTM long range model| Hoperf. *Professional RF IC&modules and Digital Sensor designer and manufacturer Shenzhen Hope Microelectronics Co., Ltd* [online]. Copyright ©2018 HOPE Microelectronics CO.,

- Ltd. All rights reserved. [cit. 01.01.2022]. Dostupné z:
<https://www.hoperf.com/modules/lora/RFM95.html>
- [13] RC-CC1101-SPI-SMT-868. *RadioControlli – Radio Modules and Wireless Sensor Network Applications* [online]. Copyright © 2017 Radio Controlli. P.IVA IT [cit. 01.01.2022]. Dostupné z: <https://www.radiomodules.eu/it/componente/72/rc-cc1101-spi-smt-868>
- [14] SPSGRF – Sub-GHz (868 or 915 MHz) low power programmable RF transceiver modules – STMicroelectronics . *301 Moved Permanently* [online]. Copyright © 2021 STMicroelectronics [cit. 01.01.2022]. Dostupné z: <https://www.st.com/en/wireless-connectivity/spsgrf.html>
- [15] IQRF – Technology for wireless. *IQRF – Technology for wireless* [online]. Dostupné z: <https://www.iqrf.org/product-detail/tr-76d>
- [16] Inverted-F antenna – Wikipedia. [online]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Inverted-F_antenna
- [17] Aktuálně na DPS [online]. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/getFile/id:6394/>
- [18] Cloudflare. ResearchGate | *Find and share research* [online]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/An-overview-of-basic-types-of-network-topologies-including-the-A-chain-or-line-B_fig1_312367772
- [19] ZigBee Mesh Network ver.3.0 (introduction) | EMCU-HomeAutomation.org . *EMCU-HomeAutomation.org / Home Automation & C (by: E.Marinoni)* [online]. Dostupné z: <https://www.emcu-homeautomation.org/zigbee-mesh-network-ver-3-introduction/>
- [20] Top four mesh networks | Haltian. *Connected solutions for successful businesses / Haltian* [online]. Copyright © Haltian [cit. 24.05.2022]. Dostupné z: <https://haltian.com/resource/top-four-mesh-networks/>
- [21] [online]. Dostupné z: https://www.media.springernature.com/full/springer-static/image/art%3A10.1038%2Fsrep02211/MediaObjects/41598_2013_Article_BFsrep02211_Fig1_HTML.jpg?as=webp
- [22] FDMA – Wikipedie. [online]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/FDMA>
- [23] TDMA – Wikipedie. [online]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/TDMA>
- [24] Kódový multiplex – Wikipedie. [online]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/K%C3%B3dov%C3%BD_multiplex
- [25] CSMA – Wikipedie. [online]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/CSMA>
- [26] SPIRIT1 – Low data rate, low power Sub 1GHz transceiver – STMicroelectronics . *301 Moved Permanently* [online]. Copyright © 2021 STMicroelectronics [cit. 01.01.2022]. Dostupné z: <https://www.st.com/en/wireless-connectivity/spirit1.html>
- [27] BALF-SPI-01D3 – 50Ω nominal input / conjugate match balun to SPIRIT1, with integrated harmonic filter – STMicroelectronics . *301 Moved Permanently* [online].

- Copyright © 2021 STMicroelectronics [cit. 01.01.2022]. Dostupné z:
<https://www.st.com/en/wireless-connectivity/balf-spi-01d3.html>
- [28] *High Freq Multi-Layer High-Q Capacitors / Johanson Technology* [online]. Copyright © [cit. 01.01.2022]. Dostupné z:
<https://www.johansontechnology.com/datasheets/0868AT43A0020/0868AT43A0020.pdf>
- [29] Minimum-shift keying – Wikipedia. [online]. Dostupné z:
https://en.wikipedia.org/wiki/Minimum-shift_keying#/media/File:GMSK_PSD.png
- [30] Free Space Path Loss Calculator (FSPL) - everything RF. everything RF - *The leading website for the RF & Microwave Industry* [online]. Copyright © everything RF All Rights Reserved [cit. 24.05.2022]. Dostupné z: <https://www.everythingrf.com/rf-calculators/free-space-path-loss-calculator>
- [31] Two-ray ground-reflection model - Wikipedia. [online]. Dostupné z:
https://en.wikipedia.org/wiki/Two-ray_ground-reflection_model
- [32] Pohled na výpočet přenosových ztrát modulů využívajících pásmo 2,4 GHz. *Aktuálně na DPS* [online]. Copyright © 2022 DPS Elektronika od A do Z. [cit. 24.05.2022]. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/soucastky/id:8262/pohled-na-vypocet-prenosovych-ztrat-modulu-vyuzivajicich-pasmo-2-4-ghz>

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

Symbol	Jednotka	Veličina
BER	[-]	Bitová chybovost
B_{RX}	[Hz]	Frekvenční šířka filtru přijímače
BT	[-]	Časově-frekvenční faktor
BW_{m}	[Hz]	Frekvenční šířka hlavního výkonového laloku
c	[m/s]	Rychlost světla
C/N	[dB]	Odstup signálu a šumu
d	[m]	Vzdálenost mezi vysílací a přijímací anténou
DR	[bps], [b/s]	Datová rychlost
f	[Hz]	Frekvence signálu
f_{sym}	[Hz]	Frekvence symbolů
G_{RX}	[dBi]	Zisk přijímací antény
G_{TX}	[dBi]	Zisk vysílací antény
h_R	[m]	Výška přijímací antény nad zemí
h_T	[m]	Výška vysílací antény nad zemí
k	[J·K ⁻¹]	Boltzmanova konstanta
L	[dB]	Ztráty šířením rádiového signálu
L_{crc}	[b]	Délka cyklického redundantního součtu
L_{FSP}	[dB]	Ztráty šířením signálu ve volném prostoru
L_{length}	[b]	Délka pole určující délku užitečných dat
L_{max}	[dB]	Maximální přípustné ztráty šíření signálu
$L_{payload}$	[b]	Délka užitečných dat
L_{pream}	[b]	Délka preamble
L_{sync}	[b]	Délka synchronizačního slova
L_{TRG}	[dB]	Ztráty šířením signálu pomocí dvou paprskového modelu
N	[dBm]	Výkon tepelného šumu
N_0	[dBm/Hz]	Výkon tepelného šumu pro šířku pásma 1 Hz
NF	[dB]	Šumové číslo
PER	[-]	Paketová chybovost
P_{RX}	[dBm]	Přijímací výkon
P_{TX}	[dBm]	Vysílací výkon
r_{Fn}	[m]	Poloměr n-té Fresnelovy zóny
S_{RX}	[dBm]	Citlivost přijímače
S_{RX0}	[dBm/Hz]	Citlivost přijímače pro šířce přijímacího filtru 1 Hz
T	[K]	Termodynamická teplota
t_{tran}	[s]	Čas vysílání paketu
Δf	[Hz]	Frekvenční zdvih
λ	[m]	Vlnová délka

Zkratka	Význam
AES	Advanced Encryption Standard
ASK	Amplitude-Shift Keying
AFC	Automatic Frequency Compensation
BALUN	Balanced-Unbalanced
BER	Bit Error Rate
CSMA	Carrier Sense Multiple Access
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
CSMA/CD	Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection
CBC	Cipher Block Chaining
CDMA	Code Division Multiple Access
CTR	Counter Mode
CRC	Cyclic Redundancy Check
ČTÚ	Český telekomunikační úřad
DSSS	Direct-Sequence Spread Spectrum
ENIG	Electroless Nicked and Immersion Gold
ECB	Electronic Codebook
CEPT	European Conference of Postal and Telecommunications Administrations
ETSI	European Telecommunication Standards Institute
FIFO	First In First Out
FEC	Forward Error Correction
FSPL	Free-Space Propagation Loss
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum
FSK	Frequency-Shift Keying
GFSK	Gaussian Frequency-Shift Keying
GMSK	Gaussian Minimum-Shift Keying
GPIO	General-Purpose Input/Output
GPS	Global Positioning System
HAL	Hardware Abstract Layer
HAL	Hot Air Leveling
ISM	Industrial, Scientific, and Medical
ITU	International Telecommunication Unit
IoT	Internet of Things
IFA	Inverted F antenna
ILA	Inverted L antenna
LTCC	Low Temperature Co-Fired Ceramic
MIFA	Meandered Inverted F antenna
MSK	Minimum-Shift Keying
OOK	On-Off Keying
PER	Packet Error Rate

RF	Radio Frequency
RBW	Resolution Bandwidth
SPI	Serial Peripheral Interface
SRD	Short Range Device
SMT	Surface Mount Technology
SMPS	Switched-Mode Power Supply
SoC	System on a Chip
TDMA	Time Division Multiple Access
TRGM	Two-Ray Ground-Reflection Model
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
USB	Universal Serial Bus

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1: Rozdělení světových částí na regiony dle ITU [2].....	11
Obr. 2.1: Bezdrátový komunikační modul bez antény (vlevo) a s anténou (vpravo) [6], [7] ..	15
Obr. 2.2: Planární invertovaná L anténa (ILA)	18
Obr. 2.3: Planární invertovaná F anténa (vlevo) a její meanderová úprava (vpravo)	19
Obr. 2.4: Planární meanderová monopólová anténa	19
Obr. 2.5: Model čipové antény společně s přizpůsobovacím obvodem [17]	20
Obr. 3.1: Síťová topologie point-to-point (bod-bod) [18].....	21
Obr. 3.2: Síťová topologie bus (sběrnice) [18]	21
Obr. 3.3: Síťová topologie star (hvězda) [18]	22
Obr. 3.4: Síťová topologie ring (kruh) [18].....	22
Obr. 3.5: Síťová topologie tree (strom) [18]	22
Obr. 3.6: Síťová topologie částečně propojená MESH (vlevo) a plně propojená MESH (vpravo) [18]	23
Obr. 3.7: Využití architektury MESH sítě v IoT aplikaci (topologie sítě ZigBee) [19]	23
Obr. 3.8: Přístupová metoda FDMA (Frequency Division Multiple Access) [21]	25
Obr. 3.9: Přístupová metoda TDMA (Time Division Multiple Access) [21]	25
Obr. 3.10: Přístupová metoda CDMA (Code Division Multiple Access) [21]	26
Obr. 4.1: Blokové schéma bezdrátového komunikačního modulu	27
Obr. 4.2: Blokové schéma radiofrekvenčního integrovaného obvodu SPIRIT1 [26].....	28
Obr. 4.3: Čipová anténa 0868AT43A0020E [28]	30
Obr. 4.4: Layout čipové antény 0868AT43A0020E dle doporučení výrobce [28].....	30
Obr. 4.5: Obvod impedančního přizpůsobení typu π	31
Obr. 4.6: Elektromagnetický stínící kryt – spodní díl (vlevo) a horní díl (vpravo)	31
Obr. 4.7: Kompletní schéma zapojení bezdrátového komunikačního modulu	32
Obr. 4.8: Realizovaný bezdrátový komunikační modul bez stínícího krytu (vlevo) a se stínícím krytem (vpravo).....	33
Obr. 4.9: Testovací kus komunikačního modulu upraveného pro impedanční přizpůsobení čipové antény.....	34
Obr. 4.10: Činitel odrazu čipové antény bez impedančního přizpůsobení.....	35
Obr. 4.11: Impedance čipové antény bez impedančního přizpůsobení (Smithův diagram)	35
Obr. 4.12: Činitel odrazu impedančně přizpůsobené čipové antény	36
Obr. 4.13: Impedance impedančně přizpůsobené čipové antény (Smithův diagram).....	36
Obr. 5.1: Blokové schéma vývojového kitu	37
Obr. 5.2: Schéma zapojení vývojového kitu s bezdrátovým komunikačním modulem.....	38
Obr. 5.3: Realizovaný vývojový kit, přední strana (vlevo) a zadní strana (vpravo)	39
Obr. 5.4: Držák vývojového kitu vytištěný na 3D tiskárně.....	40
Obr. 5.5: Realizovaný vývojový kit umístěný ve vytištěném držáku na 3D tiskárně	40
Obr. 6.1: Porovnání digitální modulace MSK a GMSK s různou hodnotou faktoru BT [29].	43
Obr. 6.2: Měřící pracoviště pro měření výkonové spektrální analýzy komunikačních kanálů	44
Obr. 6.3: Výkonová spektrální analýza kontinuálního vysílání na přenosovém kanálu 21	45

Obr. 6.4: Výkonová spektrální analýza bez aktivního vysílání (referenční měření).....	45
Obr. 6.5: Výkonová spektrální analýza kontinuálního vysílání na přenosového kanálu 20 a 22	46
Obr. 6.6: Výkonová spektrální analýza kontinuálního vysílání na přenosovém kanálu 20, 21 a 22	46
Obr. 6.7: Formát posílaného paketu včetně délky jednotlivých polí	48
Obr. 7.1: Grafické znázornění přiřazení časových slotů pro N registrovaných nodů	56
Obr. 7.2: Modelová síť využívající čtyři nody	56
Obr. 7.3: Grafické znázornění přiřazení časových slotů pro čtyři nody.....	56
Obr. 8.1: Teoretická závislost výkonu přijatého signálu na vzdálenosti mezi anténami	65
Obr. 8.2: Znázornění minimálního prostoru definovaného Fresnelovou zónou [32].....	66
Obr. 8.3: Vysílací (vlevo) a přijímací (vpravo) přípravek pro měření komunikačního dosahu.....	67
Obr. 8.4: Umístění měřících pozic při měření maximálního komunikačního dosahu	68
Obr. 8.5: Výškový profil terénu využitého při měření maximálního komunikačního dosahu.....	69
Obr. 8.6: Měřená úroveň signálu v závislosti na vzdálenosti od vysílače.....	70
Obr. 8.7: Paketová chybovost PER v závislosti na vzdálenosti od vysílače	70
Obr. 8.8: Pozice umístění vývojových modulů v rámci testování MESH sítě.....	71

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1.1: Bezlicenční rádiová ISM pásma dle doporučení ITU [4]	12
Tabulka 1.2: Frekvenční pásma pro SRD uvedené ve všeobecném oprávnění ČTÚ [5].....	13
Tabulka 1.3: Frekvenční pásmo g pro SRD uvedené ve všeobecném oprávnění ČTÚ [5].....	14
Tabulka 2.1: Dostupné bezdrátové komunikační moduly pro 868 MHz, část 1 [10], [11], [12]	17
Tabulka 2.2: Dostupné bezdrátové komunikační moduly pro 868 MHz, část 2 [13], [14], [15]	17
Tabulka 2.3: Porovnání integrovaných antén pro bezdrátové komunikační moduly.....	20
Tabulka 6.1: Vytvořené komunikační kanály a jejich středové frekvence	41
Tabulka 6.2: Sumarizace parametrů digitální modulace GMSK	43
Tabulka 6.3: Délka paketu a čas jeho vysílání v závislosti na délce užitečných dat	50
Tabulka 6.4: Seznam funkcí využitých pro portování knihovny na konkrétní hardware	51
Tabulka 6.5: Seznam funkcí využitých pro informování knihovny o přerušeních v hardware	52
Tabulka 6.6: Seznam obecných funkcí pro ovládání bezdrátového komunikačního modulu..	52
Tabulka 6.7: Seznam funkcí využitých pro komunikaci v režimu peer-to-peer	52
Tabulka 7.1: Dílčí zpoždění během jedné délky časového slotu	55
Tabulka 7.2: Čas odezvy navržené MESH sítě v závislosti na počtu registrovaných nodů.....	57
Tabulka 7.3: Popis komunikačního protokolu využitého pro navrženou MESH síť	58
Tabulka 7.4: Srovnání výhod a nevýhod navržené sítě oproti již existujícím standardům.....	60
Tabulka 7.5: Seznam funkcí využitých pro práci s gatewayi v režimu MESH sítě.....	61
Tabulka 7.6: Seznam funkcí využitých pro práci s nody v režimu MESH sítě	61
Tabulka 8.1: Sumarizace vstupních parametrů pro měření a vypočtených teoretických hodnot	67
Tabulka 8.2: Měření přijaté síly signálu a PER v závislosti na vzdálenosti od vysílače	69
Tabulka 8.3: Seznam umístění a parametrů testovaných nodů v MESH síti	72
Tabulka 8.4: Stabilita sítě pro vysílací výkony v rozsahu od -9 do +12 dBm	72