

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

katedra telekomunikační techniky

**Problematika koexistence LPWAN/LPN technologií
v prostředí IoT**

The Issue of LPWAN Technology Coexistence in IoT Environment

květen 2016

Bakalant: Lukáš Krupka

Vedoucí práce: Ing. Lukáš Vojtěch, Ph.D.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem zadanou bakalářskou práci zpracoval sám s přispěním vedoucího práce a používal jsem pouze literaturu v práci uvedenou. Dále prohlašuji, že nemám námitek proti půjčování nebo zveřejňování mé bakalářské práce nebo její části se souhlasem katedry.

Datum: 27. 5. 2016

.....
Podpis bakalanta

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra telekomunikační techniky

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Lukáš Krupka**

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika
Obor: Síťové a informační technologie

Název tématu: **Problematika koexistence LPWAN/LPN technologií v prostředí IoT**

Pokyny pro vypracování:

Prostudujte problematiku realizace a provozu sítí LPWAN/LPN (Low-Power Wide-Area Network/Low-Power Network) i dostupných technologií se zaměřením na aplikace v internetu věcí (IoT). Analyzujte nejen možnost koexistence jednotlivých technologií (LoRa, SigFox, IQRF) při sdílení přenosového média, ale také ve vztahu k ostatním nejen IT technologiím. Určete maximální možnou teoretickou penetraci těchto síťových technologií v dané oblasti s ohledem na přenosové parametry i elektromagnetickou kompatibilitu systémů.

Seznam odborné literatury:

- [1] Morgan, D.: A Handbook for EMC Testing and Measurement. IET Electrical Measurement Series - Book 8 - Materials, Circuits and Devices Series. 304 pages. ISBN: 978-0-86341-756-6.
- [2] Materiály k problematice dostupné na <http://www.lora-alliance.org> [on-line].
- [3] Materiály k problematice dostupné na <http://www.sigfox.com> [on-line].
- [4] Materiály k problematice dostupné na <http://www.iqrf.org> [on-line].

Vedoucí: Ing. Lukáš Vojtěch, Ph.D.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2016/2017



prof. Ing. Boris Simák, CSc.
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 21. 12. 2015

Anotace:

Tato bakalářská práce pojednává o Low-Power Wide Area Network technologiích. Cílem je uvedení těchto technologií do vzájemného kontextu za účelem popsání jejich koexistence. V řešení byly rozebrány pojmy LPWAN/LPN a jeho zástupci LoRa, Sigfox a IQRF, u kterých byly prozkoumány jejich vlastnosti, topologie a některé významné techniky. Technologie byly porovnány společně ve frekvenčním spektru za účelem zjištění rizikových míst pro vznik kolizí. V tomto pásmu byly provedeny základní výpočty pravděpodobností kolizí při rostoucím počtu aktivních zařízení a bylo řečeno možné řešení maximální kapacity kanálu. Provedenou prací bylo zjištěno rizikové pásmo frekvencí kolem 868,2 MHz. Nebylo možné přesně stanovit přesnou maximální kapacitu kanálu, jež ale byla nastíněna pomocí parametru Dostupnosti služby. Hlavním přínosem této práce je souhrn vlastností, jež se projevují do výsledné koexistence.

Klíčová slova:

koexistence, LPWAN, LPN, Low Power Wide Area Network, LoRa, Sigfox, IQRF

Summary:

This bachelor thesis discusses Low Power Wide Area Network technologies. The purpose of this work is a presentation of these technologies in a mutual context in order to analyse their coexistence. In this work were described LPWAN/LPN terms and their representatives LoRa, Sigfox and IQRF, of which characteristics, topology and some significant technics were inspected. The technologies were also compared together in a frequency spectrum in order to detect risk bands causing collisions. In these bands basic calculations of a collision probability with an increasing number of active devices were performed and there a possible solution of the maximum capacity of a channel was provided. During this work a risk band among frequencies around 868.2 MHz was found. It wasn't possible to precisely set the maximum capacity of a channel however it was outlined by a parameter of the Availability Service. The main contribution of this thesis is a set of characteristics, which have an influence on the resulting coexistence.

Index Terms:

coexistence, LPWAN, LPN, Low Power Wide Area Network, LoRa, Sigfox, IQRF

Poděkování

Děkuji vedoucímu práce Ing. Lukáši Vojtěchovi, Ph.D. za velmi užitečnou metodickou pomoc a cenné rady při zpracování této bakalářské práce.

V Praze dne 27. 5. 2016

.....
Podpis bakalanta

Obsah

Úvod	8
1. LPWAN	10
1.1. Popis.....	10
1.2. Klíčové techniky	10
1.2.1. Techniky na fyzické (PHY) vrstvě	10
1.2.2. Techniky na medium access control (MAC) vrstvě	12
1.3. Možné standardizace.....	13
1.4. Jednotlivé technologie	13
2. Specifikace	14
2.1. LoRa.....	14
2.2. Sigfox.....	15
2.3. IQRF	16
2.4. Porovnání jednotlivých technologií.....	18
3. Bezlicenční pásma ve vztahu k IoT.....	19
3.1. ISM pásma	19
3.2. Pásma 868 MHz.....	20
3.3. Limity využití bezlicenčních pásem	21
4. Technologie ve spektru.....	23
4.1. Kanálové spektrum LoRa	23
4.1.1. Detaily spojení	25
4.2. Kanálové spektrum Sigfox.....	25
4.2.1. Detaily přenosu.....	26
4.3. Kanálové spektrum IQRF	27
5. Překrytí LPWAN technologií ve frekvenčním spektru	29
6. Ostatní kolidující technologie ve frekvenčním spektru.....	32
7. Pravděpodobnost výskytu na kanále	34
8. Pravděpodobnost kolize na kanále	37
8.1. Výpočet pravděpodobnosti kolize	38
8.1.1. Pro jedno zařízení od každé technologie	38
8.1.2. Pro větší počet zařízení.....	39
8.2. Distribuční funkce počtu zařízení	40
9. Kapacita počtu zařízení na kanále	42
9.1. Kapacita podle <i>Dostupnosti služby</i>	43
10. Závěr.....	45
Seznam obrázků.....	47

Seznam tabulek	47
Reference	48

Úvod

Machine-to-machine (dále jen M2M) komunikace umožňuje přímé propojení mezi zařízeními, které mohou být organizovány jako síť za účelem výměny informací či provedení akcí bez lidského zásahu. Jedná se o součást Internet of Things (dále jen IoT), která může napomoci koncovým uživatelům v širokém rozsahu aplikací.

Lze nalézt určité významné požadavky či vlastnosti M2M sítí. Měly by být vytknuty především nízké energetické náklady, pokrytí oblastí velkého rozsahu, akceptovatelně malé zpoždění zpráv, relativně malá datová propustnost atd. Mezi těmito pojmy jsou nejvíce požadované vlastnosti nízká energetická spotřeba a velký rozsah pokrytí u M2M zařízeních rozmístěných v oblastech bez napájení, které jsou odkázány pouze na baterii. Kromě toho je mnoho M2M zařízeních rozmístěno v širokém rozsahu míst, která mohou být komplikovaně přístupná, protože jsou ovládána dálkově či jsou umístěna pod povrchem či hluboko uvnitř budov.

Nicméně tyto požadavky a vlastnosti nemohou být dobře podporovány existujícími bezdrátovými síťovými technologiemi, jako je například celulární (buňková) mobilní síť, jež je designována pro koncové uživatele. Jako výsledek byly konkrétně navrženy rozličné systémy pro M2M komunikaci jako Zigbee/IEEE 802.15.4 v bezdrátových senzorových sítích (WSNs), Bluetooth, radiofrekvenční identifikace (RFID) a jiné. Nicméně skoro všechny tyto technologie mají řešení konektivity pouze na krátkou vzdálenost, což komplikuje splnění požadavků na propojení pro M2M aplikace. O něco lépe je na tom slibný systém založen na IEEE 802.11ah, známý také jako Low-Power Wi-Fi, jež je vyvíjen speciálně podle požadavků M2M sítí. Přenosová vzdálenost u něj ve venkovních podmínkách činí nanejvýš 1 km, má malé přenosové rychlosti a nízkou spotřebu elektrické energie. Toto řešení ovšem stále není vhodné pro rozsáhlejší oblasti a místa pod zemí.

Kvůli limitům výše zmíněných systémů s krátkým dosahem, byly vyvinuty Low-Power Wide Area Network (dále jen LPWAN) technologie, navržené speciálně s cílem nízké spotřeby elektrické energie a velkého pokrytí. Zejména modulační schémata ultra-narrow band (UNB) a direct sequence spread spektrum (DSSS) byla navržena pro fyzickou vrstvu LPWAN M2M systémů kvůli jejich schopnosti velkého pokrytí. Mezitím by za účelem umožnění nižší energetické spotřeby mohly být topologie hvězdy a metody náhodného přístupu (random access) zabudovány do MAC vrstvy.

Klíčovým rysem těchto LPWAN technik je zajištění kompromisu mezi přenosovou rychlostí, životností baterie a pořizovacími náklady. Takovýto kompromis je akceptovatelný většinou M2M aplikací, které nutně nepotřebují vysokou přenosovou rychlost či nízké zpoždění zpráv. Toto je hlavní rozdíl mezi LPWAN M2M systémy a tradičními bezdrátovými komunikačními systémy. Předpokládá se, že LPWAN M2M sítě budou hrát hlavní roli v IoT technologiích, přičemž vypracováním standardů pro danou oblast se již zabývají příslušné subjekty. [1]

Pojmy LPWAN a Low Power Network (LPN) ze zadání bakalářské práce si jsou velice podobné. V dnešní době nejsou často tyto pojmy vůbec odlišovány a mohou být považovány za jeden. Vychází totiž ze stejných charakteristik, ale mohou se lišit síťovou topologií či rozdílným způsobem využití technologie. Tato bakalářská práce bude dále pojednávat zejména o termínu LPWAN, jež přesně vystihuje charakteristiku probíraných technologií i podle typu a topologie sítě.

Tato bakalářská práce nejprve popisuje základní charakteristické vlastnosti Low-Power Wide Area Network (LPWAN), vyjmenovává a krátce charakterizuje některé

významné techniky, které jsou v nich využívány. Obsahuje popis tří technologií, jež spadají do této problematiky a uvádí do rozsahu jejich vlastnosti a využití. Porovnáva technologie z pohledu jejich parametrů. Dále provádí tématem frekvenčního využití, zařazení a podmínkami stanovenými Všeobecným oprávněním (VO), které bylo vydáno Českým telekomunikačním úřadem (ČTÚ). Shrnuje a porovnáva jednotlivé technologie v jednom frekvenčním pásmu a uvádí jejich časování na kanále s následným výpočtem a rozbohem pravděpodobnosti kolize.

1. LPWAN

1.1. Popis

Low-Power Wide Area Network je obecný název pro bezdrátovou technologii v rozsáhlé síti WAN. Jednotlivé konkrétní technologie jsou záležitosti soukromých vývojářských skupin, jež budou rozebírány v dalších kapitolách. Tyto síťové technologie se zabývají propojením zařízení s malou šířkou pásma, přičemž se soustředí především na energetickou a přenosovou efektivitu. Low-Power WAN technologie jsou navrženy podle podmínek sítí využívajících M2M komunikaci. V současné době je viditelný hojný rozvoj odvětví těchto technologií a to především díky skutečnosti, že disponují menšími energetickými nároky, větší délkou dosahu a nižší cenou, než je tomu u stávajících mobilních sítí.

LPWAN technologie využívají velice malé přenosové rychlosti, z čehož také vychází nižší energetická spotřeba připojených zařízení. Takto je umožněno připojení zařízení s menší šířkou využívaného pásma, než je standardem u běžně využívaných zařízení například u mobilních sítí. LPWANs jsou navíc schopny pracovat s nižšími finančními náklady díky lepší energetické efektivitě. Síť také podporují větší počet připojených zařízení na určitou oblast a zlepšenou obousměrnou komunikaci (bi-directional) než přístupné mobilní technologie.

Bluetooth, ZigBee a Wi-Fi jsou technologie vhodné pro IoT využití u zařízení koncových uživatelů, zatímco technologie zastupující LPWAN je mnohem více potřeba u průmyslového, civilního a komerčního využití, kde je dáván větší důraz, aby komunikace probíhala co možná nejefektivněji a s nízkými energetickými náklady. [2]

Ke zmíněným nákladům se obecně započítávají i platby za licencovaná pásma, jež musí každý provozovatel sítě hradit. Mnohé z technologií zmíněných v následujících kapitolách ovšem používá nelicencovaná pásma, jež jsou zastupovány například ISM (industrial, scientific and medical) pásmy. Cena těchto pásem je mnohonásobně nižší než u licencovaných.

1.2. Klíčové techniky

Jeden z nejdůležitějších požadavků LPWAN systému je zajistit všudypřítomnou komunikaci. Architektury podobné celulárním sítím, jež se již v praxi osvědčily, mohou být vhodným řešením. Nicméně jednotlivé komponenty dané sítě musí být značně zjednodušeny v porovnání s celulární sítí pro snazší sestavení a správu celého systému, jenž může být značně komplikovaný a zasahovat například i do podzemních oblastí. Za účelem dostat těchto požadavků pro LPWAN, byly určeny pokročilé techniky navrhované na fyzické (PHY) a linkové vrstvě (medium access control - MAC) těchto sítí.

1.2.1. Techniky na fyzické (PHY) vrstvě

Využitím různých technik k uzpůsobení fyzické vrstvy LPWANs se provádí za účelem umožnění většího dosahu. Klíčový požadavek je navržení transceiveru, jenž bude schopen přijímat signály na velmi nízké výkonové úrovni, což vyžaduje velmi dobrou

citlivost přístroje. Dva vhodné kandidáty na řešení se nazývají: UNB modulace nebo direct sequence spread spektrum (DSSS).

- UNB modulace

UNB modulace byla navržena jako slibná technika pro zlepšení efektivního využití spektra. Tato technika je používána zejména pro komunikaci na dlouhé vzdálenosti v LPWAN. Typická procedura UNB modulace se skládá z 2 důležitých částí: nesouvislé phase shift modulation (PSK) modulace a UNB filtrovacího stupně. Vstupní signál je nejdříve modulován pomocí PSK, a poté prochází filtrem.

U phase shift modulation (PSK) dochází k náhlé změně fáze nosného signálu, který představují nuly a jedničky v modulovaném signálu. Je známo vícero schémat PSK modulace, které mohou být vybrány pro UNB modulaci. Tyto zástupci jsou například very maximum sideband keying (VMSK) nebo pulse position phase shift keying (3PSK). Výsledný signál a jeho spektrální výkonová hustota se pohybují kolem jedné frekvence, k níž jsou přidruženy i vyšší harmonické a další frekvence, které jsou následně odfiltrovány pomocí UNB filtrů. Tyto filtry se tedy chovají jako pásmová propust pro jedno konkrétní pásmo. Díky těmto filtrům obsahuje výstupní UNB signál jen jedinou frekvenci s přenosovou šířkou pásma teoreticky jen 1 Hz, ale v praxi se jedná o několik jednotek až desítek Hz. Výsledkem je velká redukce výkonu šumu. Takto může být práh citlivosti přijímaného signálu extrémně nízký, čímž se rapidně zvedá velikost dosahu. Je zde však velký problém s implementací UNB modulace a filtrů. Jde o velké výzvy pro komerční UNB produkty. [1]

UNB technika byla použita již během 1. světové války pro komunikaci s ponorkami. [3]

- direct sequence spread spektrum (DSSS)

Technika direct sequence spread spektrum (DSSS) tedy technika rozprostřeného spektra je široce používána v komerčních bezdrátových komunikačních systémech, jako je například 3. generace mobilních sítí. V systémech DSSS je největší výhodou úspěšná detekce signálu na přijímači i při velmi malém odstupě signálu od šumu SNR, což je základním předpokladem pro implementaci v LPWANs. Na rozdíl od běžně používaných DSSS systému se u LPWANs využívá rozšířeného spektra výhradně na zvětšení dosahu komunikace.

Využívá při tom pseudonáhodnou posloupnost, jež násobí zdrojový signál. Tímto způsobem se jeho původní úzkopásmové spektrum rozprostře do šířky a někdy až pod úroveň šumu. Na přijímací straně dochází k opětovnému vynásobení stejnou posloupností, čímž je získán původní signál. Jelikož námi vysílaný signál může být až pod úroveň šumu, vysílaná data jsou nečitelná a do značné míry neodposlouchatelná pro někoho, kdo nezná námi použitý pseudonáhodný kód. Tento kód je důležitý i pro úroveň přijímaného signálu, jelikož při dvojnásobné pseudonáhodné posloupnosti je možné snížit citlivost přijímače o 3dB. Na druhou stranu prodlužování pseudonáhodné posloupnosti má za následek další problémy, jako je zvyšování složitosti výpočtu na přijímací straně, jenž se při prodlužování posloupnosti exponenciálně zvyšuje. Proto bude nutné, aby se více efektivní digitální signal processing stal součástí hardwarového návrhu. Stále ovšem zůstává DSSS jednou z nejvíce slibných technik pro LPWAN systémy. [1]

1.2.2. Techniky na medium access control (MAC) vrstvě

Výkonná MAC vrstva hraje hlavní roly ve zlepšování energetické efektivity v LPWANs. Je také zodpovědná za možnost mnoha potenciálních budoucích přístupů v dané síti. K dosažení těchto cílů je nutné vážně zvážit možnosti topologie a techniky channel access.

- Topologie hvězdy

V bezdrátových sítích má topologie hlavní vliv na výkonost a vlastnosti sítě jako jsou škálovatelnost, energetická efektivita, spolehlivost, zpoždění dat, rychlost procesů atd. Existuje několik topologií široce přijatých v tradičních WSN's (wireless sensor networks) jako je mesh, hrozen, strom. Tyto topologie sdílí obdobnou vlastnost a to takovou, že koncová zařízení (end devices) musí mít mimo jiné také funkci routeru sloužící k přepojování dat na další hop pro zvýšení komunikačního dosahu celé sítě. V tomto je největší rozdíl LPWAN od WSN, jelikož se u ní využívá zejména topologie hvězdy. Je to dáno faktem, že daná síť má díky technikám na fyzické vrstvě popsané výše dostatečnou kapacitu možného dosahu komunikace. Hlavním cílem této topologie jsou tedy zejména nízké náklady a spotřeba elektrické energie.



Obrázek 1-1 Topologie hvězdy [4]

Při porovnání dříve zmíněných topologií se kvůli menším energetickým i finančním nárokům stává topologie hvězdy jen s jedním hopem nejlepší variantou pro LPWAN. V této topologii totiž každé koncové zařízení (ED) v pokryté oblasti komunikuje přímo s centrálním access pointem (AP). V takto jednoduché topologii je řada výhod. Zejména v přímé komunikaci ED s AP umožňující minimalizovat přenosové zpoždění. Nejsou zde také nutné žádné multi-hop komunikace či pakety pro routing, což napomáhá nízké energetické spotřebě. Navíc je také značně zjednodušené nasazení takovéto topologie. V otázce spolehlivosti a odolnosti je na tom topologie hvězdy hůře než mesh topologie, ale lépe než topologie typu stromu (tree), kruhu nebo line. [1]

- Channel access

Z důvodů potřeby současné obsluhy velkého počtu zařízení v pokryté oblasti je channel access (kanálový přístup) pravděpodobně jednou z kritických otázek u LPWAN. Existují 2 hlavní kategorie metod pro sdílení přístupu k bezdrátovému mediu: reservation-based access a contention-based access.

Reservation-based access metody přidělují každému zařízení konkrétně pro něj rezervovaný kanálový zdroj. Metody také zajišťují rozdělení kanálů radiových zdrojů podle variant nabízených výhod do vícera sekcí. Jelikož jsou limitována kanálovými zdroji, nejsou schopny obsluhovat nesmírné množství zařízení v LPWAN.

Na rozdíl Contention-based access metody, také nazývané jako metody random access, jsou více vhodné pro LPWAN systémy. Jsou založeny na principu zápasu o přístup

na sdílené medium, což je relativně jednoduchý flexibilní proces. Výhodou je také šetření energie přechodem do režimu spánku při dlouhé nečinnosti. Zařízení v něm přetrvává do doby následné synchronizace signálu. I přes tyto výhody se musí tyto metody vypořádat s problémy typu idle listening (poslouchání při nečinnosti), kolize, overhead (režie) atd. [1]

1.3. Možné standardizace

Několik blížících se standardů pro M2M komunikaci bylo uvedeno standardizačními organizacemi jako ETSI technical committee, IEEE, 3GPP, IETF atd. Mezi nimi byly navrženy IEEE 802.15.4k a Weightless pro LPWAN aplikace.

IEEE 802.15.4k se zaměřuje na low energy critical infrastructure monitoring (LECIM) sítě k usnadnění point-to-multi-point komunikace pro monitoring a správu kritických aplikací v infrastruktuře. [1]

Dále je také v procesu studie v rámci termínu Low Throughput Network (LTNs), jež se velmi podobá termínu LPWAN. Pojednává o technologiích Sigfox a OnRamp Wireless, na nichž pro zatím staví svoji standardizaci ETSI či u druhé jmenovaného IEEE. [5]

1.4. Jednotlivé technologie

- Greenwaves
- Haystack
- LoRaWAN
- LTE-MTC
- RPMA
- Symphony Link
- WirelessHART
- ThingPark Wireless, vývojářská aktivita LoRaWAN.
- UNB od různých firem včetně Telensa, NWave a Sigfox.
- Weightless
- WAVIoT [2]

2. Specifikace

Dále budou podrobněji rozebrány 3 zástupci z LPWANs. Jedná se o dvě hlavní technologie, které jsou ovšem postaveny na rozdílných technikách. Jedná se o technologie LoRa a Sigfox. Bude popsána technologie IQRF, jež také hraje svoji roli v LPWAN.

2.1. LoRa

Long Range WAN neboli LoRaWAN a nebo prostě LoRa je specifikace LPWANs popsaných výše. Byla vytvořena neziskovou asociací LoRa® Alliance, jež se zabývá problematikou LPWAN, M2M, IoT, smart cities a dalšími. Hlavním z výrobců zařízení pro síť LoRa jsou firmy Semtech a Microchip.

LoRa je bezdrátová síť, jež využívá na fyzické vrstvě techniky direct sequence spread spectrum (DSSS), které umožňují komunikovat na nižších úrovních výkonu signálu. Využívá modulaci frequency-shift keying (FSK), při níž se mění frekvence nosné vlny podle hodnot 0 či 1 z modulovaného signálu. Při kombinaci těchto technik s forward error correction (FEC) je možné demodulovat signály, jež jsou až 20dB pod úrovní šumu. To znamená, že LoRa je schopná značného zlepšení oproti tradičním FSK systémům. Tato zařízení mají také vysokou citlivost až k -148 dBm. [6]

Fakt, že mnohdy se přenáší malé objemy dat při malých přenosových rychlostech, znamená možnost použití malé šířky pásma. Existují varianty možných šířek pásma: 7,8 kHz; 10,4 kHz; 15,6 kHz; 20,8 kHz; 31,2 kHz; 41,7 kHz; 62,5 kHz; 125 kHz; 250 kHz; 500 kHz. To dává možnost volby velikosti šířky pásma podle požadavků daného přenosového spoje. Nejčastěji však jsou využívány šířky pásma 125 či 250 kHz. U systému LoRa je také možné nastavit mezi koncovým zařízením a gateway několik možných frekvenčních kanálů a použít rozdílných přenosových rychlostí (podle vzdálenosti a délky zprávy). Tyto kanály se při komunikaci souborem „virtuálních“ kanálů, jež navýší kapacitu gatewaye, a při využití volby komunikace při jiných přenosových rychlostech, navzájem neruší.

LoRa pracuje na celosvětově volných nelicencovaných frekvenčních pásmech, jež jsou hojně využívány. Jedná se o 868MHz pro Evropu, 902MHz pro Severní Ameriku a 433MHz pro Asii.

Uvádí se, že LoRa má dosah až 15-20 km a potenciální výdrž zařízení na baterky až 10 let. [7] Díky technice rozprostřeného spektra je vysoce odolná proti rušení a šumu. Zajišťuje jednosměrný i obousměrný provoz. LoRa má rychlost datového přenosu od 0,3kbit/s do 50kbit/s. Pro individuální přístup ke každému zařízení slouží adaptive data rate (ADR) schéma, jež upravuje datové toky podle potřeb a podmínek jednotlivých zařízení. Zlepšuje tím tak životnost baterie koncových zařízení a celkovou kapacitu sítě.

Klasifikace koncových zařízení:

- Class A: Obousměrná koncová zařízení

Umožňuje obousměrný provoz, kde je každý uplink koncového zařízení následován dvěma krátkými okny downlink. Přenos je řízen koncovým zařízením, které se řídí vlastními komunikačními potřebami. Malé změny parametrů přenosu jsou také založené na náhodném časovém základě podle konkrétního protokolu například *Aloha*. Operace této skupiny zařízení je nejvíce energeticky úsporná a slouží pro zařízení, která potřebují zajistit pouze

downlink krátce po zaslání požadavku. Každá další sekce downlink ze serveru bude muset čekat na naplánovaný uplink.

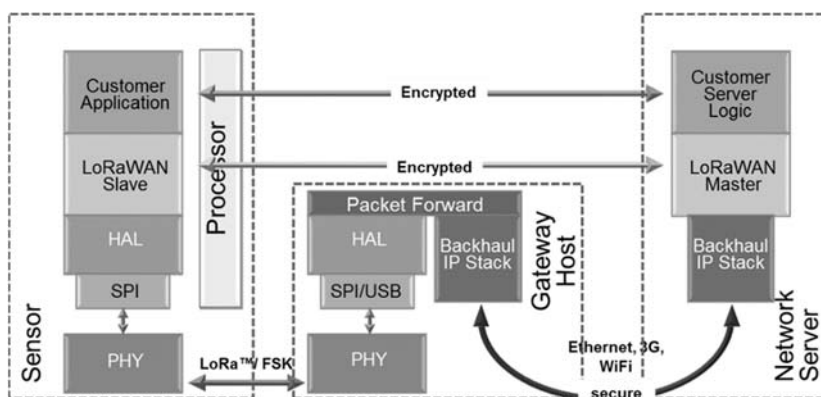
Tato třída zařízení bude v tomto dokumentu uvažována, proto veškerá zařízení technologie LoRa budou míněna právě ze třídy A.

- Class B: Obousměrná koncová zařízení s plánovaným přijímáním

Tato třída otevírá navíc přijímací okno ve stanovený čas při porovnání se třídou A. Aby ED otevřel ve stanovenou dobu okno, musí přijmout v naplánovaný čas synchronizační Beacon od gateway. Toto umožní severu zjistit, kdy dané zařízení poslouchá.

- Class C: Obousměrná koncová zařízení s maximalizovaným přijímáním

Třída C má skoro neustále otevřené přijímací okno kromě okamžiku odesílání. [8]



Obrázek 2-1 Schéma provozu LoRa zařízení, Gateway a serveru [8]

2.2. Sigfox

Sigfox je název síťové technologie, jež vyvinul tým ze stejnojmenné firmy sídlící ve Francii. Jedná se o soukromou technologii postavenou na definici LPWAN popsané výše. Zastupuje další z variant sítí, jež umožňují stát se součástí Internet of Things.

Sigfox používá pro umožnění velkého dosahu sítě na fyzické vrstvě (PHY) techniku ultra narrow band (UNB), čímž se významně odlišuje od systému LoRa, který je postaven na direct DSSS systému (sequence spread spektrum). Důležitá výhoda při používání UNB je velká flexibilita z nabídek designů antén, jež lze dimenzovat přímo na míru pro danou situaci. Síť je sestavena do topologie hvězdy, čímž velmi snižuje své náklady na stavbu i energetickou spotřebu celé sítě.

Síť pracuje v celosvětově volných bezlicenčních pásmech. Jedná se o velmi populární pásma 868 MHz v Evropě a 902 MHz v USA, jež jsou dále závislé také na konkrétních regionálních regulacích. Na těchto kanálech běží souběžně také s dalšími síťovými systémy. Sami na svých webových stránkách uvádějí, že koexistence Sigfoxu s dalšími systémy je bez rizika kolizí či kapacitních problémů. Sigfox využívá nelicencovaná frekvenční pásma, jež mají řadu nevýhod, ale jedná se opět o krok kvůli ceně k co největší efektivitě provozu dané sítě.

Síť je dimenzována pro komunikaci malými zprávami o velikosti datového obsahu (payload) maximálně 12 B. Takovýchto zpráv je možné posílat z jednoho zařízení maximálně 140 za den a 6 za hodinu. K tomu je uzpůsobena také propustnost do 100 bit/s.

Ve zpětném směru je propustností 500 bit/s a limit 4 zprávy za den. [9] Sigfox komunikace je zabezpečena mnoha způsoby včetně anti-replay, message scrambling, sequencing atd. Sigfox nezná přenášená data, je pouze komunikační technologie.

Jedna základnová stanice Sigfoxu má dosah kolem 30-50 km mimo město a ve městech kvůli přítomnému vyššímu šumu a velkému množství překážek 3-10 km. Vzdálenost může být ještě větší až 1000 km u venkovního access pointu v ideálním případě. Z toho se následně odvíjí hustota rozmístění základnových stanic. [10] Celková hvězdicovitá topologie sítě je navržena pro velkou proměnlivost, kapacitu sítě a nízkou energetickou spotřebu.

Systém Sigfox ve spojení s místními soukromými subjekty si již dokázal vydobýt své místo na světovém trhu. Svou technologií již pokrývá celé státy, jako jsou Francie (1200 základnových věží), Španělsko (1300 základnových věží), Nizozemí a Velká Británie včetně 10 velkých britských měst jako Londýn, Manchester a Edinburgh, dále také i z amerických San Francisco a mnoho dalších. [11] V rámci České republiky spolupracuje se Sigfoxem společnosti T-mobile a SimpleCell Networks. Bylo oznámeno, že se předpokládá k celoplošnému pokrytí republiky minimálně 350 základnových stanic a měly by být připravené k provozu do prosince roku 2016. [12] [13]

2.3. IQRF

Jedná se o další z řady bezdrátových komunikačních technologií. U této technologie spadá většina parametrů do LPWANs, ovšem některými se výrazně odlišuje. I přes tyto rozdílnosti má tato technologie stejný účel jako sítě LoRa či Sigfox. Byla vyvinuta skupinou IQRF Alliance sídlící v Písku.

Platforma IQRF je stejně jako všechny LPWAN určena k bezdrátové komunikaci při nízké energetické spotřebě, nízké přenosové rychlosti a malému objemu dat. Technologie IQRF pracuje s radiofrekvenčními transceivery (TR) s mikrokontrolérem (MCU), jenž má zabudovaný vlastní OS. Integrovaný operační systém implementuje bezdrátovou komunikaci, mesh síťování a mnoho dalších funkcí. Velká výhoda této technologie je v extrémně jednoduché implementaci ke konkrétní funkci. Jedná se totiž o zařízení, které je schopno do sebe nahrát bez nutného programování konkrétní Hardware profile (HWP), jenž obsahuje požadovanou funkcionalitu, a které k tomuto procesu potřebuje pouze volitelnou softwarovou vrstvu DPA (Direct Peripheral Access). Veškeré další funkcionality se dají jednoduše dopsat pomocí jazyka C.

Tato technologie je primárně určena na sítě s topologií mesh, čímž se výrazně odlišuje od standardních LPWAN, jež využívají topologii hvězdy, ale je možné ji nasadit také při peer-to-peer komunikaci. Jedná se o paketově orientované řešení a díky na míru napsanému protokolu IQMESH je možnost plně využít výhod mesh topologie, jakými jsou například větší robustnost, dosah, reakce na změny a inteligentní routing, než u topologie do hvězdy. Jsou zde možnosti provozovat routing buď jako primární funkci přímo dedikovanými routery, anebo na pozadí jako dodatkovou funkci v rámci jednoho Transceiveru (TR). Tyto samotné Transceivery (TR) jsou také vybaveny vícero jednoduchými vstupy pro připojení komplexních standardů jako je USB či jiné technologie typu GSM, Ethernet nebo WiFi.



Obrázek 2-2 Mesh topologie sítě [4]

U této technologie není nutná žádná velká infrastruktura. IQRF využívá celosvětově volně dostupná bezlicenční pásma, jež jsou velmi populární pro toto odvětví. Jsou jimi pásma 868 MHz v Evropě a 902 MHz v USA, jež jsou dále závislé také na konkrétních regionálních regulacích. Tyto pásma jsou nelicencovaná, jež oprostí provozovatele od velkých licenčních poplatků a poplatků za frekvenční pásmo. Tyto kanály a další služby, které na nich fungují, budou zmíněny v dalších kapitolách.

U IQRF se udává velikost až 128 B na paket a přenosová rychlost kolem 20 kbit/s, přičemž celkový rozsah rychlostí je mnohem větší až ke 115 kbit/s [14]. Dosah této technologie s malými anténami bývá typicky několik stovek metrů na hop v otevřeném prostoru a desítky metrů uvnitř budov, přičemž může počet hopů dosáhnout až 240 na paket. Pyšní se také velmi nízkou spotřebou, jež by měla s flexibilní strukturou sítě zaručit práci zařízení na baterii po mnoho let. Každé zařízení přepíná mezi několika módy fungování. Hodnoty spotřeby se udávají pro 3 přijímací módy a 1 mód spánku: Standard Rx: 12,3 mA; Low power Rx: 170 μ A; Extra low power Rx: 25 μ A a Sleep: 2 μ A. Mód spánku je z pohledu činnosti zařízení jednoznačně nejčastějším prvkem a stavy vyjadřující příjem (Rx) jsou druhým nejčastějším. U stavu vysílání (Tx) se hodnoty spotřeby neudávají, i přestože vysílaný výkon je až 12,5 mW (11 dBm) volitelných v 8 krocích. Je to z důvodu, že doba vysílání je v porovnání s celkovým časem provozu velmi minoritní částí.

IQRF technologie implementuje dále 2 módy radiové komunikace: Non-networking a Networking. Mód Non-networking je pro 2 či více peer-to-peer zařízení. Pakety v dané komunikaci jsou přístupné pro všechny zařízení v dosahu a vyjma jednoduchého adresování nevyužívají žádných routovacích algoritmů. V módu Networking existuje jeden koordinátor, který řídí síť s nanejvýš 249 (nebo až 65000) uzly (nodes). Pakety jsou přístupné jen pro adresovaný uzel v dané síti. Komplexní mesh síť má automatické routování skrze opakující se cesty a mnoho dalších podporovaných vlastností. V tomto jediném módu pracuje zařízení mající volitelnou softwarovou DPA vrstvu. [15]

2.4. Porovnání jednotlivých technologií

	LoRa	Sigfox	IQRF
Frekvenční pásma	868 MHz (Evropa) 915 MHz (S. Amerika) 433 MHz (Asie)	868 MHz (Evropa) 915 MHz (USA)	868 MHz (Evropa) 915 MHz (S. Amerika) 433 MHz (Asie)
Maximální dosah	15 - 20 km	30 - 50 km (mimo město) 3 - 10 km (ve městě)	Stovky metrů
Propustnost	0,25 - 50 kbit/s	100 bit/s	1,2 - 115 kbit/s Typická 19.836 kbit/s
Topologie	STAR	STAR	MESH
Technika fyzické vrstvy	DSSS	UNB	
Modulace	LoRa (FSK) s FEC	UNB (DBPSK)	FSK
Payload - Datový obsah	Rozsah: 2 - 255 B Max 56 B při nejnižší rychlosti 250 bit/s	Max 12 B	Max 64 B
Vysílaný výkon	10 – 18 dBm	0 – 14 dBm	Volitelný Max 11 dBm
Časování - jak často vysílá		limit 6 za hodinu 140 za den	
Energetická spotřeba	Řádově desítky μ A	standby režim cca 15 μ A při vysílání 5-45 mA	Standard Rx mód: 12.3 mA Low power Rx: 170 μ A Extra LP Rx mód: 25 μ A Sleep mód: 2 μ A
Vydrž zařízení na baterii	až 10 let	standby režim na 2.5 Ah baterii (2x AA baterie) je až 20 let	Standard Rx mód: 8,46 dne Low power Rx: 1,68 roku Extra LP Rx mód: 11,4 let

Tabulka 2-1 Porovnání technických parametrů technologií LoRa, Sigfox a IQRF [6] [8] [11] [13] [15] [16] [17]

3. Bezlicenční pásma ve vztahu k IoT

Bezlicenční pásma jsou části kmitočtového spektra, ve kterých je umožněno vysílat bez placení licenčních poplatků, a proto jsou hojně využívána také pro komerční účely technologií LoRa, Sigfox, IQRF a dalších. Je zde možné vysílat pouze na základě všeobecného oprávnění bez nutnosti žádat regulátora o povolení. Bezlicenční pásma se historicky dělí na dvě kategorie: Pásma ISM (Industrial, Science, Medical), která jsou popsána níže a pásma SRD (Short Range Devices). Ta jsou definována normou ETSI EN 300 220 [18], která přidává k ISM několik dalších pásem v rozsahu 25 až 1000 MHz a to zejména pásma na 868 MHz.

3.1. ISM pásma

Industrial, Scientific and Medical (ISM) pásma jsou skupiny bezlicenčních frekvenčních pásem, jež si vyhražují určitou část radiového spektra pro využití k vědeckým, medicínským a průmyslovým účelům. Jedná se o veřejně otevřená frekvenční pásma, jež se mohou mírně lišit podle regionálních omezení. Jsou definovány Mezinárodní telekomunikační unií ITU-R v regulacích RR 5.138, RR 5.150 a RR 5.280 [19]. Oficiálně by tato pásma měla sloužit výhradně pro průmysl, zdravotnictví nebo vědecké účely, ale nyní se jejich využití velmi rozšířilo i do jiných oblastí. Velkými zástupci jsou zde LPWAN platformy, Bluetooth zařízení, NFC zařízení či použití RFID čteček.

ISM pásma zahrnují dvě sub-GHz frekvenční pásma okolo frekvencí 433 MHz a 915 MHz a dobře známé 2,4 GHz pásmo.

Nižší skupina na 433 MHz je limitována 10 mW ERP (efektivně vyzářený výkon) a 10% klíčovacího poměru (duty cycle). Toto pásmo je charakteristické svou omezenou přenosovou rychlostí.

Skupina kolem 915 MHz je charakteristická svou penetrací vícero technologií, jako jsou například LPWAN. Nemusí mít žádné omezení v klíčovacím poměru (duty cycle) či aplikaci. Tato pásma jsou rozdělena na další sub-pásma s různou maximální velikostí ERP a klíčovacím poměrem (duty cycle).

Jedno z nejvíce používaných ISM pásem je také pásmo 2,4 GHz. Nabízí velkou šířku pásma a dostatečný dosah. V Evropě je výkon limitován na 10 mW (US 1 mW) ERP a u některých aplikací až 100 mW (US 1 W) ERP. Toto pásmo je používáno velkou řadou technologií jako IEEE 802.11 (Wi-Fi), IEEE 802.15.1 (Bluetooth), IEEE 802.15.4 (ZigBee, 6LoWPAN), či také mikrovlnnými troubami a aktivním RFID. [19] [20]

Frekvenční pásma	Frekvenční rozsah	Šířka pásma	Oblast
433,92	433,05 MHz – 434,79 MHz	1,74 MHz	Evropa, Asie
915	902–928 MHz	26 MHz	Amerika
2 450	2 400-2 500 MHz	100 MHz	-

Tabulka 3-1 Shrnutí frekvenčních pásem 433, 915 a 2 450 MHz [19] [20]

3.2. Pásmo 868 MHz

Pásmo 868 MHz jsou specifikovány v normě ETSI EN 300 220 [18] a v České republice také Všeobecným oprávněním (VO). Všeobecné oprávnění č. VO-R/10/05.2014-3 [21] bylo vydáno v roce 2004 Českým telekomunikačním úřadem. Udává podmínky k využívání radiových kmitočtů a k provozování zařízení krátkého dosahu.

Ve 3. článku, který nese název „Konkrétní podmínky pro nespécifikované stanice krátkého dosahu“ jsou specifikována zařízení, jež mohou být použita v pásmech důležitých pro LPWAN. Jedná se o zařízení všeho druhu bez ohledu na použití či účel, ale splňující technické podmínky stanovené pro dané kmitočtové pásmo.

Kmitočtové pásmo 868 MHz je označováno podle VO (všeobecného oprávnění) písmenem *h*. Dále je rozděleno na vícero sub-kanálů *h1* až *h5*. Pro každý sub-kanál jsou specifikovány konkrétní podmínky přenosu, jakými jsou například ERP (efektivně vyzářený výkon), klíčovací poměr (duty cycle) a další podmínky, jež se v tabulce přiřazují ke konkrétním kmitočtovým pásmům.

Ozn.	Kmitočtové pásmo	Vyzářený výkon, popř. intenzita magnetického pole	Klíčovací poměr	Další podmínky
h	863,0–870,0 MHz	25 mW e.r.p.	≤ 0,1 %	3, 4, 5, 6
h1	868,0–868,6 MHz	25 mW e.r.p.	≤ 1,0 %	5, 6
h2	868,7–869,2 MHz	25 mW e.r.p.	≤ 0,1 %	5, 6
h3	869,4–869,65 MHz	500 mW e.r.p.	≤ 10 %	3, 5, 6
h4	869,7–870,0 MHz	5 mW e.r.p.		3, 6
h5	869,7–870,0 MHz	25 mW e.r.p.		3, 5, 6

Tabulka 3-2 Kmitočtová pásma kolem 868 MHz a jejich specifikace [21]

Při použití technologie LBT (Listen Before Talk – vysílání pouze po vyžádání na základě příjmu) není klíčovací poměr omezen.

Podmínka č. 3 udává omezení použití pro vysílání analogových audio signálů s výjimkou přenosu hlasu. Součástí dalších podmínek je podmínka č. 4 zahrnující provozování:

- zařízení s modulací FHSS (frequency hopping spread spectrum) s kanálovou roztečí ≤ 100 kHz
- zařízení s modulací DSSS nebo s jinou širokopásmovou modulací kromě FHSS bez omezení kanálové rozteče
- úzkopásmové zařízení s kanálovou roztečí ≤ 100 kHz

Podmínka č. 5 odkazuje na použití dle normy v zákoně č. 22/1997 Sb., o technických požadavcích na výrobky a podmínka č. 6 říká, že není povoleno přenášet obrazové informace. Všechny tyto podmínky jsou jasně dané a jejich dodržování v konkrétních pásmech je povinné.

V rozsahu 863 – 870 MHz existují i jiné služby ustanoveny zvláště například aplikace poplachů, RFID, mobilní sítě a další. Na druhou stranu na kmitočtech 862 – 863 MHz a 870 – 872 MHz nejsou povoleny žádné služby. Jedná se o ochranné úseky, jež ČTÚ v souladu s evropskou harmonizací zakázala používat. Více viz kapitola „Ostatní kolidující technologie ve frekvenčním spektru“ a dokumentace VO. [21]

3.3. Limity využití bezlicenčních pásem

Bezlicenční pásma spektra jsou skvělý zdroj pro začínající komerční projekty a jejich možný úspěch, ale nejsou zde prostory pro budování globálního systému. Sítě zde přítomné postrádají spolehlivost, rozšiřitelnost a použitelnost potřebnou pro růst a udržení celosvětové technologické revoluce směrem k IoT.

Bezlicenční pásma byla dlouhou dobu používána pro M2M komunikaci. Nyní však nastává doba Internet of Things aplikací, s čímž úzce souvisí i vývoj bezdrátových sítí. Technologie jako ZigBee, Bluetooth LE a Wi-Fi mají společné rysy M2M/IoT, ale v současné době jsou na scéně hlavně LPWAN technologie jako zmíněná LoRa, Sigfox a další. Mnoho z těchto technologií využívá bezlicenční pásma včetně ISM zejména z důvodu nízké ceny za provoz a dalších, jež byly zmíněny již výše.

Tato kmitočtová pásma jsou volně dostupná po celé Zemi, ale omezení a frekvenční rozsahy jsou specifická pro různé oblasti. I přestože se jedná o nelicenční pásma, jsou stále regulována příslušnými orgány, jakým je v České republice Český telekomunikační úřad. Určitá otevřenost a svoboda v rámci těchto pásem je limitována zejména vysílaným výkonem (ERP) a klíčovacím poměrem (duty cycle), což se dá popsat jako čas strávený vysíláním. Tyto limity byly vytvořeny z důvodů, aby nedocházelo v takové míře k interferenci mezi jednotlivými zařízeními.

Je důležité si držet v paměti, že výše zmíněná omezení mohou mít dalekosáhlé důsledky, jsou totiž vztažena ke všem zařízením stejně. Nerozlišují tedy mezi centrálními uzly sítě (base station, koncentrátor nebo gateway) a koncovými zařízeními. Obdobně u technologie LoRa mají opět stejná pravidla i vícero klasifikovaných typů koncových zařízení. Je zřejmé, že regulace mohou mít v tomto případě přímé dopady na funkcionalitu a případy využití. Technologie Sigfox například má maximální počet 140 zpráv/den s kapacitou jedné zprávy o 12 B. [11] Toto řešení je skvělé pro jednoduché měřicí aplikace, ale je velmi limitován u mnoha dalších aplikací.

V některých regionech je klíčovací poměr (duty cycle) menší než 10%, což má dopad na objem a časování posílaných dat. U aplikací s vícero uzly je pro splnění podmínek klíčovacího poměru (duty cycle) nutné zavést distribuovaný provoz přes všechny zařízení, aby se nám jeden centrální uzel nepřetěžoval a splňoval takto podmínku klíčovacího poměru (duty cycle).

Doposud byla sub-GHz pásma jako 915 a 868 MHz stále velmi řídky obsazena, ovšem do budoucna se to má razantně změnit, jelikož v nynější době jsou zejména pro LPWAN systémy jednou z nejžádanějších oblastí. Je to dáno především technologiemi Sigfox a LoRa, které slibují vzájemné překrytí a více jak tisíce umístěných zařízení. Vysoká interference je proto nevyhnutelná a to stále nejsou uvedeny další technologie, jež by mohly mít podobnou roli. Je zcela jasné, že kvalita daných přenosů se bude muset někde projevit, čemuž odpovídá parametr Quality of Service (QoS). Každá LPWAN aplikace musí zaručit určitou kvalitu, i přestože tyto technologie mají relativně malé požadavky na šířku pásma.

Pokud by byly bezlicenční pásma zcela bez regulací, nebylo by možné zaručit určitou kvalitu služby tedy QoS, na které mohou být závislé komerční i nekomerční subjekty.

U bezdrátových systémů je tedy interference jednou z hlavních překážek. Zejména je to vidět u případu LPWAN technologie, která nemá implementovaný downlink pro potvrzování vysílaných dat. Při nedodržení QoS je tedy možné, že data nebudou správně přijata na druhé straně a dojde ke ztrátě informace. [22]

4. Technologie ve spektru

Výše zmíněné technologie mají každá své vlastní vlastnosti, ale především je důležité, čím jsou si podobné. Už zde bylo zmíněno pár parametrů jako je cena, či snadná rozšiřitelnost, ovšem dál by zde měly být rozvedeny ještě další charakteristické vlastnosti vystihující termín Low Throughput Networks (LTNs), kterými jsou nízké přenosové rychlosti a využití frekvenčního spektra.

Potřeba lidí využívat stále objemnější přenosy dat jako video streamy a další stále stoupá. Reakce standardních komunikačních technik doposud spočívají ve zvyšování přenosových rychlostí s každou novou generací, což se také neblaze projevuje na velikosti využívaného spektra. V myšlence IoT jsou zařízení závisející na konkrétní aplikaci, která nezaručují vysoké uplink a downlink rychlosti. Směřují k přenášení dat o velikosti několika kilobajtů přes velké vzdálenosti co nejefektivnější možnou cestou. Tímto se výrazně odlišují od obdobných IoT sítí založených na ZigBee, Bluetooth LE či podobných technologiích. Takováto myšlenka směřuje opět k nízké spotřebě elektrické energie v zařízeních a samozřejmě menšímu využití spektra, jež je rozebráno v této kapitole. [5]

4.1. Kanálové spektrum LoRa

LoRa, neboli LoRaWAN, je dalším hlavním zástupcem v oblasti LPWANs a LTNs. Specifikace LoRa je zamýšlena jako další z možných modelových typů IoT zařízení v regionální, národní i globální síti. Technologie je uzpůsobena na práci ve frekvenčních pásmech 433, 868 nebo 915 MHz. V Evropě se používají jak techniky GFSK (Gaussian frequency-shift keying), tak i proprietární modulační schémata od skupiny LoRa, jež využívají techniku rozprostřeného spektra s kanálem o šířce 125 kHz a občas i 250 kHz. Možný vysílaný objem dat (payload) se pohybuje v rozmezí od 2 do 255 B na zprávu. Veškeré parametry technologie LoRa jsou zde vztaženy ke koncovému zařízení třídy class A.

Každé zařízení LoRa na frekvenci 863-870 MHz je schopno využívat různé kanály v tomto rozsahu. Zařízení využívá vždy minimálně 3 základní výchozí kanály se standardní šířkou pásma již zmíněných 125 kHz, jež musí mít každé koncové zařízení, a ty jsou 868.10, 868.30 a 868.50 MHz. Jedná se o úplné minimum kanálů, na kterých bude každý síťový gateway vždy poslouchat a jejich modifikace není neumožněna. Jsou pro ně definovány jak klíčovací poměry (duty cycle), které jsou součástí regulací, tak možné přenosové rychlosti. Tyto kanály spadají do sub-pásma *h1* definovaného podle Všeobecného oprávnění v ČR a zároveň do sub-pásma *g1* podle evropských směrnic. Pro downlink směrem ke koncovému zařízení se pro první okno používá kanál stejné frekvence a rychlosti jako u předcházejícího uplink přenosu. U druhého okna je využito odlišného kanálu o výchozí hodnotě 869,525 MHz a rychlosti 250 bit/s.

Modulace	Šířka pásma [kHz]	Frekvence kanálu [MHz]	FSK / LoRa přenosová rychlost	Počet kanálů	Klíčovací poměr
LoRa	125	868.10 868.30 868.50	0.3-5 kbps	3	≤ 1,0 %
LoRa	125	864.10 864.30 864.50 868.10 868.30 868.50	0.3-5 kbps	6	≤ 0,1 %

Tabulka 4-1 Kanály výchozí a pro odesílání JoinReq zpráv pro LoRa zařízení [17]

Další varianty kanálů jsou již v závislosti na konkrétním zařízení a aplikaci. Vždy by měli být dodrženy regulace daného státu či regionu. Druhá varianta v tabulce 4-1 jsou kanály, které by měly být použity pro zařízení vysílající JoinReq zprávu dle specifikace LoRaWAN. [17]

Modulace	Šířka pásma [kHz]	Frekvence kanálu [MHz]	FSK / LoRa přenosová rychlost	Počet kanálů	Sub-band v ČR	Komentář
LoRa	250	868.30	10 kbps	1	h1	Bidirectional
FSK	250	868.30	100 kbps	1	h1	Bidirectional
LoRa	125	864.10 864.30 864.50 868.10	0.3-5 kbps	3	h1	Bidirectional
LoRa	125	868.85 869.05	0.3-5 kbps	2	h2	Bidirectional
LoRa	125	869.525	0.3-5 kbps	1	h3	Bidirectional

Tabulka 4-2 Frekvenční kanály použity ThingPark Wireless v Evropě [23]

Jako příklad je uvedena síťová technologie ThingPark Wireless, jež je založena na principu LoRaWAN. Z tabulky 4-2 je zřejmé, že jsou zde uvedeny jak 3 základní kanály, tak navíc několik dalších možných kanálů, které daná technologie také využívá. Je zde zmíněna i modulace FSK, jež se u LoRa technologie občas vyskytuje.

4.1.1. Detaily spojení

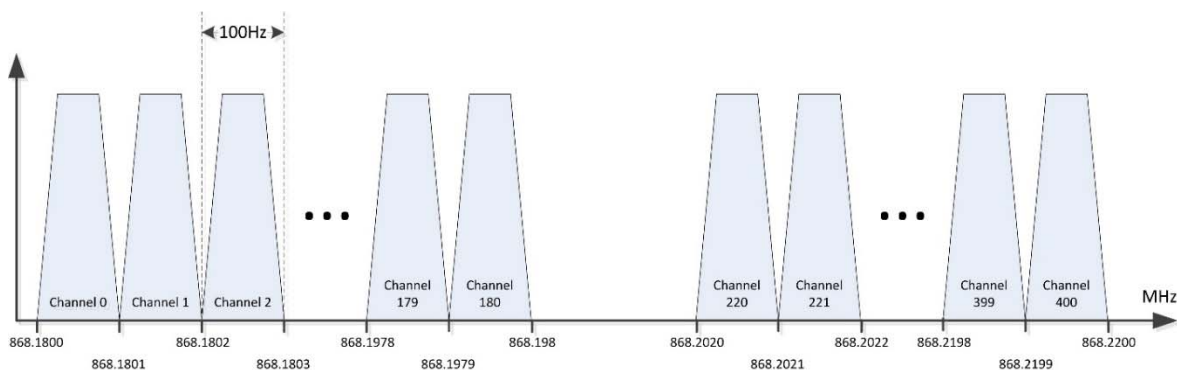
Síť je založena na topologii hvězdy, kde se koncová zařízení dělí do tří skupin podle časování downlinku (zmiňovaných výše v kapitole LoRa). Celý proces navázání spojení mezi koncovým uživatelem a centrálním uzlem probíhá dvěma způsoby:

- **Over-The-Air:** Koncové zařízení posílá požadavek na spojení obsahující jeho adresu, která indentifikuje vlastníka zařízení, a unikátní adresu koncového zařízení. Také zahrnuje příležitostné slovo, jež je použito ke generování Network Session Key a Application Session Key, se kterými koncové zařízení šifruje zprávy po připojení do sítě. Centrální uzel odpovídá na požadavek koncového zařízení zprávou obsahující jak adresu koncového zařízení, příležitostné slovo, tak hlavně identifikátor sítě a kanálu, který může přístroj použít.
- **Activation by Personalization:** Koncové zařízení již obsahuje všechny potřebné informace k připojení k síti včetně Network a Application Session Key a proces požadavku a potvrzení je tedy přeskočen.

4.2. Kanálové spektrum Sigfox

Jedná se o jednu z hlavních technologií v LPWANs a LTNs a o jednoho z hlavních příspěvovatelů ke snaze ETSI o vytvoření uceleného standardu. Sigfox je určitou variantou celulární sítě jakou používají mobilní operátoři, ale na místo velké šířky pásma s vysokými rychlostmi a nízkou časovou nestabilitou je založena na odlišných parametrech. Přenosy jsou prováděny s Ultra Narrow Band (UNB) popsanou výše, kde má každý signálový kanál šířku pásma 100 Hz. Také díky UNB spektrálnímu rozložení je vliv rušení velmi malý, a proto je možné demodulovat signály o velmi malém přijatém výkonu (až -142 dBm).

Sigfox využívá v Evropě frekvenční kanál 868 MHz, jehož výhody využívání byly zmíněny již dříve, zejména vyhnutí se plateb za licenční práva. Konkrétně se Sigfox pohybuje ve spektru v sub-pásmu *h1* podle Všeobecného oprávnění platného v ČR [21]. Spektrum je rozdělené do 400 kanálů o velikosti 100 Hz. Nultý kanál začíná na kmitočtu 868,1800 MHz a poslední 400. kanál na kmitočtu 868,2199 MHz. Existují zde kanály, jež nejsou využívány a jsou prozatím rezervovány. Jedná se o kanály 181 až 219. Toto rozdělení ovšem není fixní, jelikož každý výrobce si jej může stanovit odlišně. Frekvence pro downlink směrem ke koncovému zařízení jsou stanoveny právě o 1 MHz výše a je zde využíváno rychlosti přenosu 500 bit/s.



Obrázek 4-1 Fixně stanovené Sigfox kanály v rozmezí 868,18 - 868,22 MHz [5]

Vysílač si v některých režimech nemusí vůbec vybírat konkrétně z těchto nadefinovaných kanálů, ale je možné si přidělit jakoukoli hodnotu nosné frekvence z uvedeného předdefinovaného spektra. Základnové stanice poslouchají v celém tomto pásmu a jsou schopny detekovat až 300 signálů najednou. [24]

Každá zpráva je posílána defaultně třikrát v časových intervalech a na odlišných kanálech. Je to dáno zejména dvěma důvody. Zaprvé četnost výskytu downlink okna v komunikaci je pouze 4 zprávy (8 bajtů) za den a tím pádem je i velmi malá zpětná vazba na vyslané zprávy. Opakovaným odesíláním se o hodně zvyšuje šance doručení zprávy na centrální uzel (base station) v korektním stavu. Je zde možnost zvýšit i snížit počet opakování v závislosti na důležitosti odesílaných zpráv. Druhým důvodem je zmenšení kolísání radiového signálu, což se řeší vysíláním dané zprávy na různých frekvenčních kanálech z předdefinovaného rozsahu. Sigfox v základě využívá rozdílnost ve vysílání jak v čase, tak ve frekvenci.

Existuje vícero možností vytváření komunikace mezi koncovým a centrálním uzlem, tedy takzvaný *channel access*. První možností je buď s již předdefinovanými parametry jako čas, kanál, kódování, modulace a další, což nazýváme *reservation-based access*. Anebo využití určitého pseudonáhodného generátoru s určitým rozsahem možných hodnot a přesným časováním. I když se tato technologie blíží více k druhé variantě kvůli využití určité pseudonáhodnosti, Sigfox ovšem nepoužívá ani jednu z nich. Namísto toho nastaví centrální uzel (base station) na skenování poslouchaných kanálů a použití algoritmu na zpracování signálu pro získání kóžené zprávy. Jednotlivé uzly vysílají na náhodné frekvenci připadající ke kanálu z rozsahu zmíněném výše a vyobrazeném na obrázku 4-1. V praxi je tato náhodnost předdefinovaná logickou implementací. Ta říká, že každý uzel má svou vlastní výchozí přenosovou frekvenci, definovanou vnitřními komponenty uzlu. Ta je následně ještě měněna v závislosti na dalších parametrech, jakými jsou teplota či stáří zařízení. Síť jako celek nemá žádné informace o tom, na jaké frekvenci bude určitý uzel vysílat. Takto je síť méně citlivá na teplotní odchylky či jiné přírodní jevy, jež mohou ovlivnit přenosový signál.

Tento typ channel access se nazývá *Random Frequency Division Multiple Access (R-FDMA)*, což je typ *random access*. Výhodami jsou levnější komponenty, řešení problémů s vysokou citlivostí systému na přesnost vysílacího oscilátoru a další věci týkající se IoT modemů. Zde není žádné snímání kanálu před přenosem, což také šetří energii.

4.2.1. Detaily přenosu

Přestože struktury rámce Sigfoxu nejsou momentálně k dispozici, je známé, že Sigfox nemá na své úrovni žádné šifrování přenášeného obsahu, což znamená, že je pouze zpracován scramblerem. Šifrování je přenecháno vyšším uživatelským aplikačním vrstvám. Ve vysílači i přijímači jsou nadefinovány určité scamblovací tabulky, s jejichž pomocí je možno přeložit bitové slovo z preamble, což je nezbytná informace pro přijetí dat. Toto má také za efekt zredukování velikosti paketu. Preamble je řádově desítky bitů dlouhá. Výsledné velikosti paketu jsou tak maximálně 12 B, z čehož 4 B vyjadřují unikátní ID zařízení (odesílací adresa), a 2 B CRC (cyklický kód) pole a *hash* pole k identifikaci dat v přijímači. *Hash* je generováno tajným klíčem, který je unikátní na každém koncovém zařízení.

Sigfox má typicky limit množství přenesených zpráv na 6 za hodinu a 140 za den. Down-link přenosy jsou podporovány, ale pro mnohem kratší vzdálenosti.

4.3. Kanálové spektrum IQRF

Technologie IQRF je jeden z dalších komunikačních zástupců na radiových frekvencích a potenciální účastník o boj v IoT. Byla uveřejněna roku 2004 a zabývají se jí zejména české vývojářské skupiny.

Pro modely LPWAN využívá atypickou topologii mesh místo topologie hvězdy, která je běžná pro technologie Sigfox či LoRa. Tato volba má své plusy i mínusy. Využívá speciálně vytvořený IQMESH protokol, jenž je pro lepší a efektivnější routování integrován do operačního systému zařízení. Jedná se tedy o paketově orientovanou technologii, kde je datový obsah (payload) maximálně 64 B, ale kde je skutečná velikost dána konkrétními požadavky zařízení. Dosah dané technologie je pouze několik stovek metrů na jeden hop. Může se to zdát nedostatečné, ale je nutné přihlédnout na celkovou topologii sítě, jež je proto uzpůsobena do mesh seskupení. Výsledná vzdálenost proto může být mnohonásobně větší, vzhledem k možnosti využití až 240 hopů na jeden paket. Výsledný dosah takovéto sítě se tedy pohybuje v řádech desítek kilometrů.

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

Tabulka 4-3 Výpis kanálů pro IQRF technologii v pásmu 868 MHz [25]

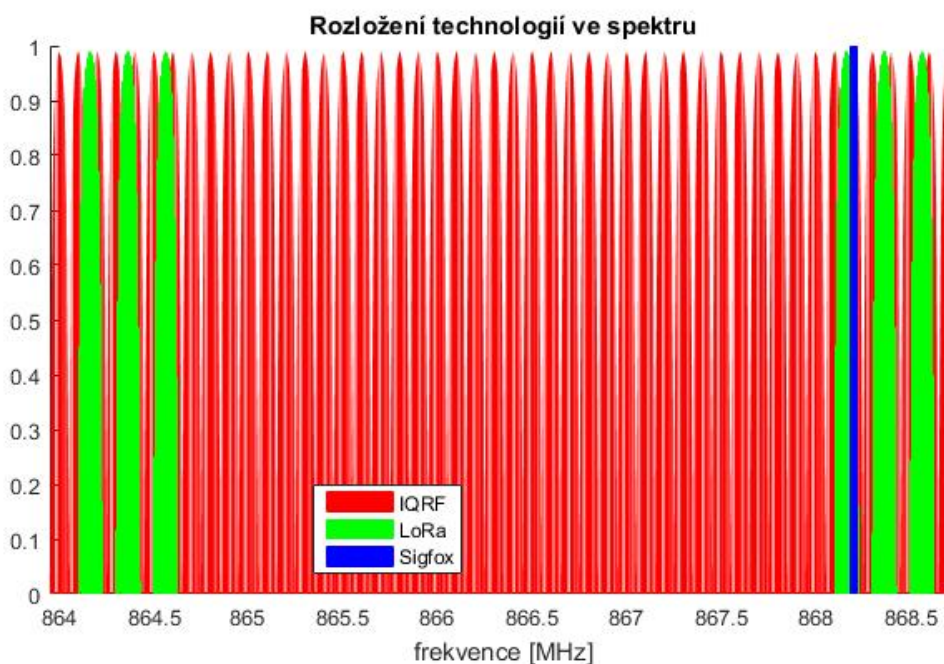
Ve frekvenčním spektru se technologie specifikuje na frekvence 868, 916 a 433 MHz. V těchto pásmech využívá určitý počet kanálů, jenž je pro všechny tři frekvence rozdílný. Dále se liší také maximálním vysílacím výkonem, který je u 433 MHz 5 mW a u pásem 868 a 916 MHz na 3,5mW (5,44 dBm).

Na pásmu kolem 868 MHz, které je zde nejvíce rozebíráno, se frekvence pohybují v rozmezí od 863,15 až 869,25 MHz, což odpovídá evropskému pásmu g s podskupinami g1 a g2. V České republice spadá do pásma h s podskupinami h1 a h2 podle Všeobecného oprávnění [21]. Je zde definováno 62 kanálů s čísly od 0 do 61 se standardní šířkou pásma 100 kHz. Velmi často se využívá zejména kanálu č. 52, jenž připadá na frekvenci 868,35 MHz. Dané kanály fungují s přenosovou rychlostí 19,836 kbit/s, což je u IQRF nejběžnější přenosová rychlost.

Kanály v tabulce 4-3 jsou podle specifikace [25] předdefinované a neměnné. U této technologie existuje celá řada aplikací, jež tyto předdefinované kanály skutečně využívají. U každé aplikace je nastavován konkrétní kanál z celkového výpisu kanálů (*channel maps*), přičemž je možné tyto parametry softwarově přenastavit. Často se udává za výchozí hodnotu kanál 52 jako například u IQRF Router RT-230-05 [26]. U většiny zařízení je daná volba volně přístupná a zařízení tedy není vyhraněné pro konkrétní kanál a je tedy možné nalézt technologii IQRF na kterémkoliv z výše uvedených předdefinovaných kanálů. [15] [27]

5. Překrytí LPWAN technologií ve frekvenčním spektru

V předcházejících sekcích bylo řečeno něco o zmíněných technologiích a hlavně jejich rozložení ve spektru. Z obrázků a tabulek v předcházející kapitole jsou tyto parametry zřejmé. Byl uveden jak počet, velikost tak i rozložení kanálů ve spektru. Tato problematika má úzkou souvislost s problematikou vzájemné koexistence technologií ve frekvenčním spektru a potenciálních kolizí. Zejména na těchto parametrech závisí, zdali budou systémy založené na obdobných technologiích správně fungovat. Proto zde jsou zavedeny tyto technologie do vzájemného kontextu. V této kapitole jsou uvedeny dohromady zmíněné parametry a na obrázcích jsou ukázány jejich spektrální rozložení a kanály, jež jsou nejpravděpodobnější ke kolizím.



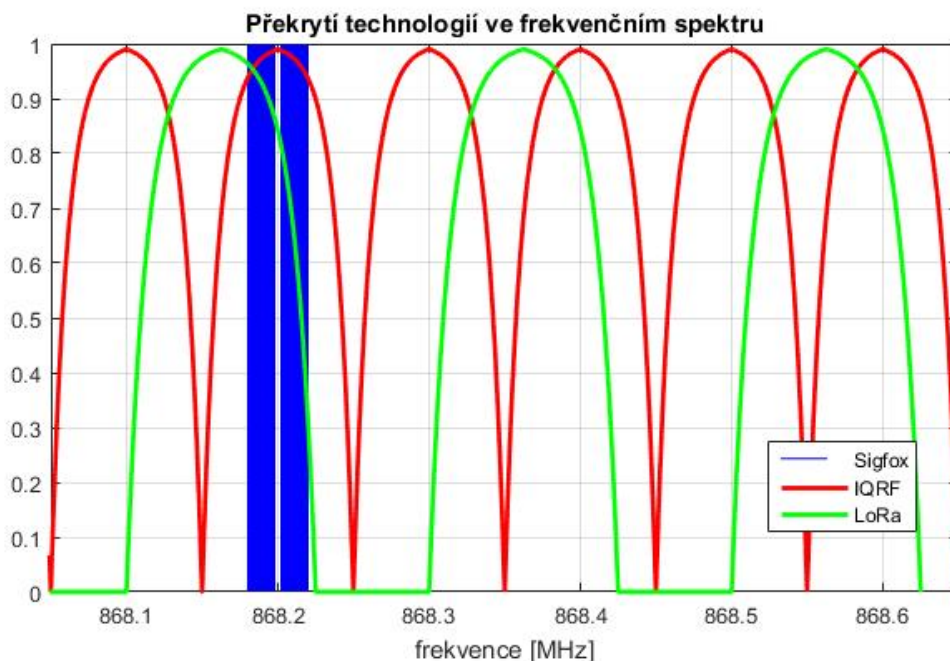
Obrázek 5-1 Rozložení technologií v rozsahu 863,95-868,75 MHz

Do schématu spektra na obrázku 5-1 jsou zahrnuty všechny tři technologie s rozsahem frekvencí takovým, aby bylo vidět celkové rozložení technologií ve spektru. Nejsou zde zobrazeny kanály pro downlink, jelikož jsou frekvenčně umístěny až nad 869 MHz a vzájemně se nepřekrývají. U technologie LoRa jsou zde uvedeny pouze nejvýznamnější výchozí kanály pro odesílání JoinReq zpráv, jinak je ovšem možné zvolit skoro libovolnou frekvenci kanálu v rozsahu 863 – 870 MHz. Podle Všeobecného oprávnění spadá vyobrazený rozsah do pásma h a sub-pásma $h1$. [21]

Na schématu je nejvíce zřejmé, že technologie IQRF má své kanály podle výpisu kanálů (*channel maps*) spektrálně velice rozptýlené, tedy že je celkový rozsah všech kanálů velký. To stejné platí i pro technologii LoRa při započítání zmíněného možného výběru frekvencí kanálů. Výsledkem je při zahrnutí i Sigfox kanálů možnost velkého obsazení spektra 863 – 870 MHz, což je dáno zejména velkou škálou možných voleb kanálů pro LoRa i IQRF zařízení.

IQRF zařízení ovšem využívají standardně pouze jeden z těchto kanálů o šířce 100 kHz. Výchozím kanálem je číslo 52 začínající na 868,35 MHz, jež je v překryvu také s kanálem LoRa začínajícím na frekvenci 868,3 MHz.

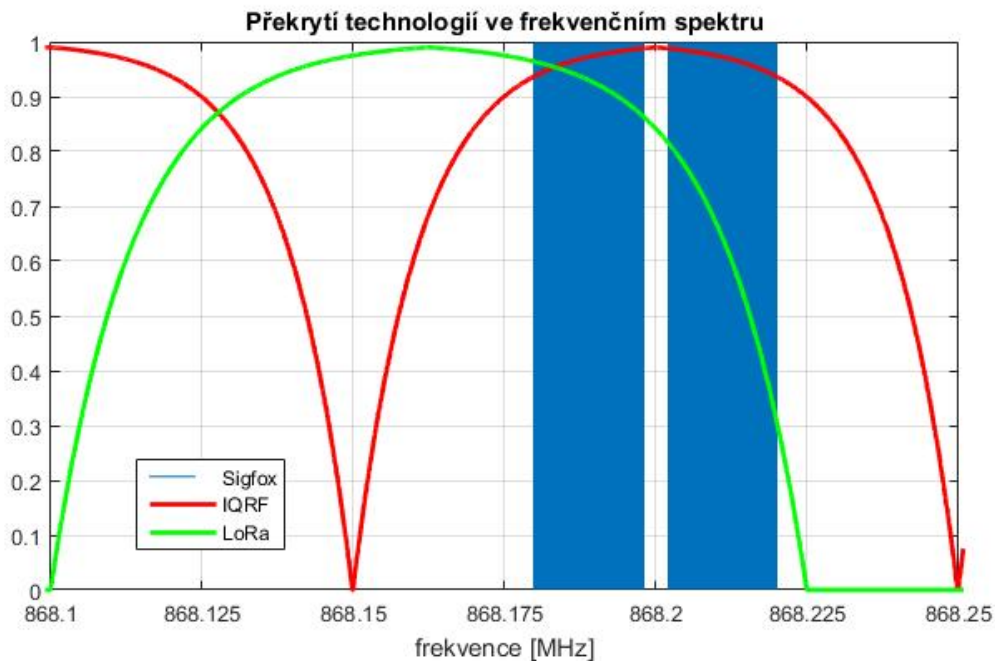
Z vyobrazených šesti LoRa kanálů jsou důležité zejména 3 základní o šířce 125 kHz začínající na frekvenci 868,1 MHz, a které jsou dobře viditelné dále na obrázku 5-2. Zařízení si může pamatovat 16 kanálů, ale tyto 3 jsou vždy přítomny, a proto budou brány dále jako standard.



Obrázek 5-2 Rozložení technologií ve spektru v menším rozsahu 868,05-868,65 MHz

Většina kanálů LoRa jako zmíněné výchozí jsou ve spektrálním překryvu zejména s kanály technologie IQRF. Ovšem například na kanálu začínající na 868,1 MHz by mohlo docházet k překryvu jak s technologií IQRF, tak zároveň i s produktem Sigfox, což pravděpodobnost možné kolize na kanále razantně zvyšuje. I přesto se mohou najít i další technologie, jež budou pracovat na stejné frekvenci a vytvářet potenciál pro kolize. [17] [25]

Na obrázku 5-1 je nejlépe vidět, že Sigfox je ze všech zmíněných technologií ve frekvenčním spektru neúspěšnější, což také vystihuje jeho další parametry, jež byly rozebrány výše. Sigfox má sice možných 400 předdefinovaných kanálů, což je nejvíce z těchto technologií, ale všechny mají šířku pouze 100 Hz, což je dáno technikou UNB. Tedy v porovnání s IQRF (100 kHz) se jedná o tisícinu a ve srovnání s kanály LoRa ještě méně. To se výrazně projevuje i na schématech spektra, ve kterém je rozložení kanálů Sigfoxu tak husté, že není možné jejich vzájemné rozpoznání a jedná se v tomto případě hlavně o porovnání s ostatními technologiemi.



Obrázek 5-3 Rozložení technologií ve spektru v nejmenším rozsahu 868,1-868,25 MHz

Zařízení Sigfox využívá v jednu chvíli většinou jeden kanál a tudíž je vytížení spektra minimální. Možné kolize u všech zmíněných kanálů Sigfoxu mohou vznikat s kanálem LoRa začínajícím na 868,1 MHz a kanálem IQRF začínajícím na 868,15 MHz viz obrázek 5-3. Menší komplikací se stává fakt, že zmíněný kanál LoRa je jedním ze tří základních, jež jsou přítomné v každém zařízení založeném na této technologii, a proto je pravděpodobnost kolize rapidně větší. U zmíněného kanálu IQRF se nejedná o žádný privilegovaný či výchozí kanál a jeho využití v technologii IQRF je stejně pravděpodobné jako u jakéhokoliv jiného z výpisu kanálů (*channel maps*). [5] [25]

6. Ostatní kolidující technologie ve frekvenčním spektru

Na světě existuje i mnoho dalších technologií, které jsou využívány pro nejrůznější účely a které jsou provozovány na nejrůznějších frekvenčních pásmech. Jelikož je celé frekvenční pásmo sdílené médium pro všechny a je zároveň omezené, je nutné tyto technologie brát v úvahu pro možnou koexistenci s LPWANs.

Možné komplikace by mohly vznikat především u technologií, jež jsou frekvenčně kolidující s rozsahy u LPWANs. Z tohoto důvodu byly vybrány hlavní tři technologie do tabulky 6-1, které pracují na obdobných frekvencích. Výjimkou jsou technologie profesionálních mobilních rádií (PMR) a mobilních systémů GSM a LTE, které jsou velice populární a jsou velice dobře známy jejich kanály na 800 či 900 MHz. Pro lepší ukázkou přesného rozdělení technologií do frekvenčních pásem v ČR podle dokumentu Všeobecného oprávnění, jsou zde zahrnuty pouze některé kanály. Je na nich dobře patrné, že využívají velké množství frekvenčních pásem na 800 MHz vyjma ochranných úseků a pásma využívaného právě LPWANs, což je od 863,0 do 870,0 MHz. Je velice pravděpodobné, že byl tento úsek zvolen vývojáři úmyslně i kvůli nepřítomnosti mobilních sítí, jež jsou po světě stále hojně rozšířené.

	Poplachová zařízení	Bezdrátový přenos zvuku	Rádiová identifikační zařízení (RFID)	Ochranné úseky mobil. sítí	Mobilní sítě LTE a GSM	Profes. rádio (PMR)
Kmitoč. pásma [MHz]	868,60 – 868,7 869,20 – 869,4 869,65 – 869,7	863 – 865	865,0 – 868,0 865,6 – 867,6 867,6 – 868,0	862 – 863 870 – 872	832 – 862 876 – 880 (GSM-R)	870 – 876
Vyzářený výkon	10 mW e.r.p. 10 mW e.r.p. 25 mW e.r.p.	10 mW e.r.p.	100 mW e.r.p. 2 W e.r.p. 500 mW e.r.p.	-	-	-
Kanálová rozteč	25 kHz	-	200 kHz	-	-	-
Klíčovací poměr	$\leq 1\%$ $\leq 0,1$ nebo 1% $\leq 10\%$	-	LBT	-	-	-

Tabulka 6-1 Souhrn dalších technologií frekvenčně blízkých LPWAN [21] [28] [29]

První ze tří technologií kolidující ve sdíleném frekvenčním spektru s technologiemi LPWAN jsou poplachová zařízení. Ta používají rádiovou komunikaci pro indikaci poplachu, jenž nastal na vzdáleném místě. Využívají také systémy pro přivolání pomoci, jež zajišťují spolehlivou komunikaci s člověkem v tísni. Tato zařízení mají definována velice malý klíčovací poměr a za účelem vysoké spolehlivosti, jsou určena přesná pravidla, která stanovují malé využívání frekvenčního spektra.

Další technologie je pro bezdrátový přenos zvuku. Bezdrátovými zařízeními jsou tak například bezdrátové mikrofony pro profesionály i spotřebitele, komunikační prostředky ve vozidlech nebo na koncertech a bezdrátové reproduktory či sluchátka. Dále do této skupiny patří také radiokomunikační systémy tzv. naslouchadla, jež se používají pro zlepšení sluchového vjemu u sluchově indisponovaných osob. Kvůli svému téměř nepřetržitému provozu a malým zpožděním přenosu, mají tato zařízení vysoký klíčovací poměr.

Poslední nezmíněná technologie je pro radiofrekvenční identifikaci (Radio Frequency Identification - RFID). Její pásma v oblasti ultra krátkých vln (UHF) pokrývají většinu spektra využívaného LPWANs. Využívá většinou takzvaných pasivních „tagů“ připevněných na všech možných druzích věcí či zboží a radiových přijímačů/vysílačů. Ty při přiblížení aktivují pasivní „tagy“ na zboží a následně přijímají informace z aktivovaného „tagu“. Tyto informace dále systémy zpracovávají a porovnávají s databázemi. Slouží především ke sledování a identifikaci předmětů, například při ochraně zboží proti krádeži a shromažďování informací související s předměty. Není u nich definován limit pro klíčovací poměr, jelikož z charakteru zařízení fungují pouze v režimu Listen Before Talk (LBT). Ten znamená, že je vysíláno pouze na základě přijatého požadavku.

Otázkou stále zůstává, zdali budou v problematice koexistence technologií ve frekvenčním pásmu 863,0–870,0 MHz využívaného LPWANs hrát zmíněné technologie vůbec nějakou roli. Největší překážkou by vzhledem ke své rozsáhlosti a charakteru mohly být mobilní systémy GSM či LTE, u těch ovšem víme, že frekvenčně nekolidují a jsou ve spektru pouze sousední. A to zejména když se do GSM zahrne i systém GSM-R, jenž je využíván ke komunikaci na železničních drahách.

Ostatní zmíněné technologie již ve spektru kolidují s LPWANs, ale vzhledem ke svému charakteru by nemusely dělat takové potíže jako v případě mobilních sítí. U případu poplachových zařízení je jasné, že přestože může u nich užitá technologie pokrývat vcelku velké území, není tak rozsáhlá jako předcházející. Technologie ovšem především využívá velice malý rozsah frekvenčního spektra a také velice krátký čas používání za den. To je dáno klíčovacím poměrem, jenž nepřekračuje ve většině případů 1%. Tím se možnost potencionálních problémů s kolizemi rapidně snižuje.

Zbylé dvě technologie jsou pro koexistenci technologií potencionálně ještě méně problematické. Nemají totiž tak velký globální rozsah a fungují ke komunikaci na mnohem kratší vzdálenosti, a proto se vyskytují jen v relativně malých oblastech. Ideálním příkladem je technologie RFID, která se se svými pasivními „tagy“ vyskytuje jen v rámci kas a kontrolních bran v knihovnách, supermarketech či dalších institucí a případech. Stejně tak i zařízení pro bezdrátový přenos zvuku se vyskytuje jen za určitých podmínek a v určitých situacích, jakými jsou například koncerty, festivaly či využití ve vozidlech a dalších. To vše minimalizuje možnost problémů při paralelním fungování zmíněných technologií.

7. Pravděpodobnost výskytu na kanále

V předcházejících kapitolách byly rozebrány jednotlivé technologie a bylo vzájemně porovnáno jejich frekvenční rozložení ve spektru. Dále se bude tato kapitola zabývat dalším potenciálním vlivem na problematiku koexistence technologií, tedy časovým rozložením a pravděpodobností výskytu technologií LoRa, Sigfox a IQRF na kanále.

Veškeré výpočty a úvahy jsou prováděny za předpokladu, že všechny technologie jsou pracující na takových frekvenčních kanálech, jež se vzájemně překrývají. Jedná se tedy pouze o jedinou možnou kombinaci kanálů u těchto technologií vyplývající z obrázku 5-1. Je mezi nimi kanál LoRa začínající na 868,1 MHz a spadající do 3 základních kanálů, které má každé LoRa zařízení. Dále k nim patří kanál č. 50 u technologie IQRF začínající od 868,15 MHz. Jelikož jsou díky malé šířce všechny Sigfox kanály v překryvu s kanály ostatních technologií, může technologie Sigfox využívat jakýkoliv z nich. Tyto kanály jsou dohromady vyobrazeny v detailu na obrázku 5-3.

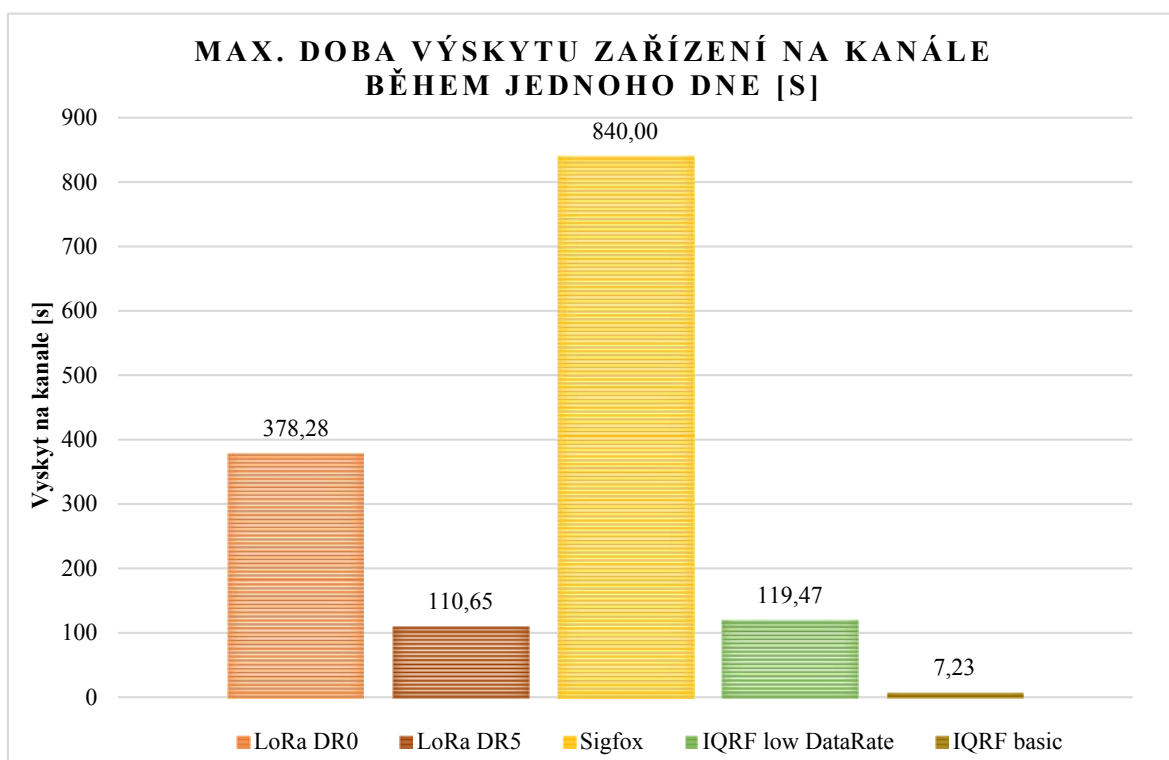
Při dodržení těchto předpokladů je možné dále uvažovat o časování jednotlivých technologií a z něho vyplývajících statistik a pravděpodobností, jež mohou vypovídat o možné vzájemné koexistenci na stejném kanále. Pro výpočet výsledných pravděpodobností výskytu byly vybrány jednotlivé varianty zmíněných technologií, jež byly pro naši potřebu vhodné. Jedná se z poloviny o ty s největším časovým zatížením na kanále, tedy z časového hlediska nejhorší možné varianty. Tyto budou také využity při výpočtech pravděpodobností v následující kapitole. Jako další byly vybrány standardní varianty technologií, které jsou často používány, a je s nimi možné dobré srovnání.

	LoRa DR0	LoRa DR5	Sigfox	IQRF low DataRate	IQRF basic
Přenosová rychlost [bit/s]	250	5470	100	1200	19836
Maximální payload [B]	59	250	12	64	64
Doba trvání jednoho přenosu [s]	2,30	0,39	2,00	0,85	0,05
Čas využívající kanál za den [s]	378,28	110,65	840,00	119,47	7,23
Procent času využívající kanále za den [%]	0,4378	0,1281	0,9722	0,1383	0,0084
Pravděpodobnost výskytu na kanálu [-]	0,004378	0,001281	0,009722	0,001383	0,000084

Tabulka 7-1 Časové a přenosové údaje vybraných variant technologií

Jako varianty s největším časovým zatížením kanálů byly do tabulky 7-1 konkrétně vybrány LoRa DR0 (DataRate0) a IQRF low DataRate. Důvodem výběru bylo především porovnání jejich přenosových rychlostí (data rate) a velikosti datového obsahu (payload) na fyzické vrstvě s ostatními variantami od dané technologie. Jedná se tedy o varianty, jež mají nejdelší časové trvání jednoho přenosu. Varianty LoRa DR5 a IQRF basic byly vybrány jakožto zástupci běžně využívaných případů. U technologie Sigfox je vybrána jen jediná varianta, jelikož je definována pouze jedna a nenabízí tedy vícero možností jako ostatní. [15] [17]

V tabulce 7-1 je u každé z možností vypočítána doba trvání jednoho přenosu, který vychází z přenosové rychlosti a velikosti zprávy. U zařízení LoRa bylo navíc použito výpočetního programu LoRa Modem Calculator tool. Již v těchto parametrech je zřejmé, která z variant je více či méně časově náročná. Pro možnost lepšího porovnání byla vypočítána doba, po kterou uvedené varianty využívají kanál během 24h. Předpokladem u všech technologií bylo vysílání 140 zpráv za den, což je maximální hodnota definovaná pro technologii Sigfox. U ostatních není tento parametr prozatím nijak omezen nad rámec Všeobecného oprávnění. Do doby přenosu byly započítány časy opakovaného vysílání zprávy vyskytující se u Sigfoxu a také časy přenosu pro downlink, jež jsou různě definované pro jednotlivé technologie. Výsledné doby, kdy zařízení jsou aktivní, jsou zvláště uvedeny na obrázku 7-1, kde jsou graficky vzájemně porovnány. Je zde již dobře vidět určitý rozdíl mezi technologiemi, přičemž je důležité rozlišit mezi variantami nejhoršími a optimálními, kde je propastný rozdíl.



Obrázek 7-1 Doba výskytu zařízení na kanále během 24h

Podle dříve zmíněného parametru časového zatížení je varianta Sigfox s přenosovou rychlostí 100 bit/s a max. datovým obsahem (payload) 12 B jednoznačně nejhorší. Je to dáno především faktem, že Sigfox vysílá každou zprávu třikrát za sebou. Jsou sice vysílány na jiných frekvencích, ale i ty svou polohou zasahují do zmíněného problematického pásma. Jak LoRa DR0, tak i v tomto parametru nejhorší IQRF low DataRate jsou oproti Sigfoxu mnohonásobně úspornější. Je dobré vědět, že LoRa stejně jako IQRF má vícero variant, přičemž tyto nejhorší nebývají zcela standardní. Těmi standardními jsou právě LoRa DR5 a IQRF basic, u nichž je možno vidět markantní rozdíl v množství doby strávené na kanále než u jejich horších variant. Jedná se o hodnoty, které jsou bližší skutečné hodnotě v praxi. Tyto hodnoty jsou dány především mnohonásobně vyšší přenosovou rychlostí, jež může být v závislosti na spolehlivosti či jiných parametrech definována pro jednotlivé varianty různě. Stále se ovšem nejedná o varianty s nejkratší dobou. Byly vybrány pouze proto, že se jedná o často používané varianty, které jsou zde čistě kvůli porovnání s nejhoršími.

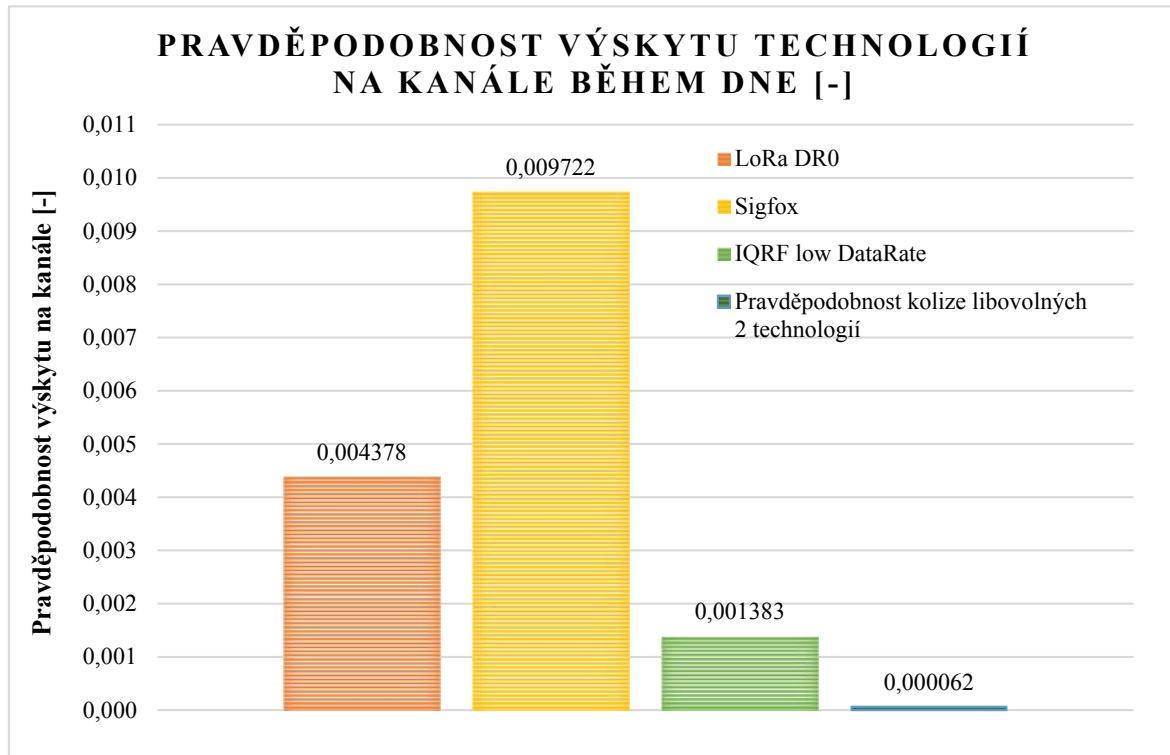
Zcela mimo toto rozdělení stojí Sigfox, jenž má s jedinou variantou dobu kolem 840 s, což je jednoznačně nejdelší čas, jelikož se pohybuje vysoko nad úrovní ostatních. Důvody takto velkého rozdílu jsou v konstrukci celé technologie, jež je specifická použitím techniky UNB, malé šířky pásma, nízké přenosové rychlosti i malého objemu dat. Sigfox tedy zvolil ve své politice jiné priority, jako jsou velký dosah či delší výdrž na baterii na úkor rychlosti či zabezpečení přenosu proti chybám.

8. Pravděpodobnost kolize na kanále

Problematika pravděpodobnosti výskytu jednotlivých variant technologií nebo i přímo jejich kolizí je zásadní otázkou pro potenciální koexistenci těchto technologií ve světě. V něm jsou začleněny do struktury globálního prostředí, kde se vyskytuje mnoho dalších technologií. V takovémto prostředí je nezbytné se zabývat koordinací jednotlivých prvků, a proto je způsob paralelního fungování těchto technologií důležitým aspektem při řešení koexistence s ostatními technologiemi. Stejně jako v reálném světě dochází ke kolizi lidí či vozidel pokud náhodou jedou zrovna ve stejném pruhu ve stejný časový okamžik, tak i v oblasti bezdrátových technologií dochází k podobné situaci, jejíž pravděpodobnost výskytu je rozebrána v této kapitole.

U tohoto tématu je uvažováno a počítáno vždy s „nejhoršími možnými“ variantami, jež byly popsány v předcházející kapitole. Tento typ výběru je zcela úmyslný, aby bylo možné posléze odhadnout, či při nejmenším nastínit, jaký je možný potenciál koexistence těchto technologií paralelně vedle sebe. Tedy aby bylo možné odhadnout přibližné množství zařízení od každé technologie tak, aby byla pravděpodobnost kolize přiměřená pro správné fungování všech procesů.

Z těchto zmíněných důvodů se pravděpodobnost výskytu jednotlivých technologií určuje z množství času, které daná technologie stráví na kanále. Přičemž jsou dále vybrány varianty s největší možnou dobou výskytu. Tyto hodnoty jsou vyjádřeny v tabulce 7-1 v předcházející kapitole, kde byly také rozebrány a vyobrazeny na obrázku 7-1. Odpovídají jim varianty LoRa DR0, Sigfox a IQRF low DataRate. Dále již budou používány pouze jejich hlavní jména bez konkrétnější specifikace.



Obrázek 8-1 Pravděpodobnost výskytu technologií na kanále během dne

Pravděpodobnost výskytu technologií na kanále během dne vychází z poměru času, kdy technologie využívají kanál k celkovému času. Pravděpodobnost výskytu je hlavní vypovídající hodnotou, která může být porovnávána s jinými či využita pro výpočty pravděpodobností kolizí.

Ve specifikacích všeobecného oprávnění č. VO-R/10/05.2014-3 [21] rozebraném výše je také definován maximální přípustný klíčovací poměr (duty cycle), jenž určuje, kolik procent času může být zařízení na kanále aktivní. Konkrétně toto frekvenční pásmo, ve kterém jsou námi vybrané kanály, spadá do skupiny sub-kanálů *h1*, v níž je přípustný klíčovací poměr maximálně 0,01 (1%) včetně. Této podmínce odpovídají všechny varianty technologií i včetně časově nejnáročnějších, i přestože se do času zařízení započítaly i časy pro downlink. Sigfox s klíčovacím poměrem až 0,009722 se tedy i s malou rezervou vejde do daných limitů definovaných všeobecným oprávněním.

Vypočtená pravděpodobnost kolize na obrázku 8-1 popisuje situaci, při které se střetnou dvě či více různých zařízení na kanále ve stejný časový okamžik. Je vidět, že pravděpodobnost tohoto jevu je velice nízká a tedy mnohonásobně menší než pravděpodobnosti výskytu jednotlivých technologií. S rostoucím počtem zařízení se bude tato pravděpodobnost výrazně zvyšovat a limitně se bude zákonitě blížit k jisté pravděpodobnosti 1. Toto je předmětem následujících kapitol.

8.1. Výpočet pravděpodobnosti kolize

8.1.1. Pro jedno zařízení od každé technologie

Pravděpodobnost kolize pro dané technologie vychází z pravděpodobností jejich výskytu na kanále, jež byly vybrány ze dříve zmíněných důvodů v předcházejících kapitolách. Tyto jevy jsou všechny vyobrazeny na obrázku 8-1. Dále je u pravděpodobnosti kolize počítáno, že všechny technologie mají k dispozici stejný počet zařízení. V tomto prvním případě právě pouze jediné.

Pro lepší pochopení myšlenky jsou rovnice rozepsány a substituovány do jednodušších zápisů, jež dohromady dávají ucelenou rovnici. Hlavní úvaha pro výpočet pravděpodobnosti kolize je, že se hledají stavy, kdy alespoň dvě ze tří zařízení jsou aktivní. Využívá se pravděpodobnostního doplňku, kdy se hledají ostatní stavy a poté jsou odečteny od 1. Tato varianta značně zjednodušuje proces výpočtu. Myšlenka je shrnuta v rovnici

$$P(K_1) = 1 - (P_1 + P_2 + P_3) - P_0 \quad [-] \quad (1)$$

, kde jednotlivé neznámé popisují pravděpodobnosti konkrétních stavů popsané dále.

K_1 ... kolize minimálně dvou zařízení

K_0 ... nenastala kolize minimálně dvou zařízení

$P_1 = P(L) P(S^c) P(I^c) \quad [-]$... aktivní jen zařízení od technologie LoRa

$P_2 = P(L^c) P(S) P(I^c) \quad [-]$... aktivní jen zařízení od technologie Sigfox

$P_3 = P(L^c) P(S^c) P(I) \quad [-]$... aktivní jen zařízení od technologie IQRF

$P_0 = P(L^c) P(S^c) P(I^c) \quad [-]$... všechny zařízení jsou neaktivní

Tyto neznámé jsou vypočteny z již známých pravděpodobností výskytu jednotlivých technologií na kanále, jež jsou sepsány v tabulce 7-1 a vidět na obrázku 8-1. Je zde opět použita funkce doplňku pro vyjádření jevu opačného, která se označuje C v horním indexu.

Výsledná pravděpodobnost kolize $P(K_I)$ je vyobrazena na obrázku 8-1 a nabývá hodnoty 0,000062. Ta se může jevit jako velmi malá hodnota, při níž by se problematika koexistence nemusela vůbec řešit. Dalo by se skoro s jistotou říci, že dané technologie i za předpokladu sounáležitosti na stejném kanálu téměř nemohou kolidovat. Ovšem předpoklady mluví o mnohem větším množství připojených zařízení. Tedy je nutné zjistit, jak by se vyvíjela pravděpodobnost kolize při značném zvyšování počtu připojených zařízení a zdali existuje určitá hranice, přes kterou by se nemělo jít, aby nedošlo ke zhoršení či dostupnosti služeb provozovaných na těchto technologiích.

8.1.2. Pro větší počet zařízení

Problematika koexistence technologií pro větší počet n zařízení a tedy i pravděpodobnosti kolize je velice důležité pro následné stanovení možným limitů. Vzhledem k potenciálu značného zvyšování počtu připojených zařízení, jaký tyto technologie mají, je přímo zásadní úvaha, zdali existuje určitá hranice počtu zařízení, přes která by neměla být přesažena, aby nedošlo ke zhoršení kvality či dostupnosti služeb provozovaných na těchto technologiích.

Problematika výpočtu pravděpodobnosti kolize pro větší počet n zařízení od každé ze zmíněných technologií je značně komplikovanější. Za problematické stavy kolize jsou definovány stavy souběžně aktivních 2 a více zařízení jak od různých technologií, tak i od technologie stejné. Pravděpodobnost vychází z první rovnice z předcházející kapitoly, ovšem je zde vícero řečených pravděpodobnostních stavů, jejichž počet se násobně zvyšuje s počtem n zařízení právě podle rovnice.

$$S = 3n + 1 \quad (2)$$

S ... počet pravděpodobnostních stavů v rovnici

n ... počet zařízení od každé technologie

Při představě většího počtu n zařízení se námi sestavená rovnice stává neúnosně dlouhou a komplikovanou. A právě pro tento konkrétní případ byla rovnice upravena a přesně popisuje chování pravděpodobnosti kolize 2 a více zařízení při větším počtu zařízení n

$$P(N \leq n) = 1 - n(P_L + P_S + P_I) - P'_0 [-] \quad (3)$$

, kde jednotlivé neznámé popisují pravděpodobnosti konkrétních stavů popsané níže. Tyto neznámé jsou dále vypočteny z již známých pravděpodobností výskytu jednotlivých technologií na kanále, jež jsou sepsány v tabulce 7-1. Je zde použit doplněk pro vyjádření jevu opačného, jenž má označení C v horním indexu. Předpokladem zůstává, že počet zařízení n je stejný pro všechny technologie.

N ... počet zařízení od každé technologie, kdy nastane kolize

$P_L = P(L) P(L^c)^{n-1} P(S^c)^n P(I^c)^n [-]$... aktivní jedno zařízení LoRa

$P_S = P(L^c)^n P(S) P(S^c)^{n-1} P(I^c)^n [-]$... aktivní jedno zařízení Sigfox

$P_I = P(L^c)^n P(S^c)^n P(I) P(I^c)^{n-1} [-]$... aktivní jedno zařízení IQRf

$$P'_0 = (P(L^c)P(S^c)P(I^c))^n \quad \dots \text{všechny zařizení jsou neaktivní}$$

Výsledná závislost pravděpodobnosti kolize na kanále je při dosazení do původní rovnice neúnosně dlouhá a nesrozumitelná, proto je rozdělena do dílčích sekcí, jež jasně osvětlují jejich použití. Výsledky výpočtu pravděpodobnosti kolize pro zvyšující se počet zařizení jsou rozebrány v následující kapitole.

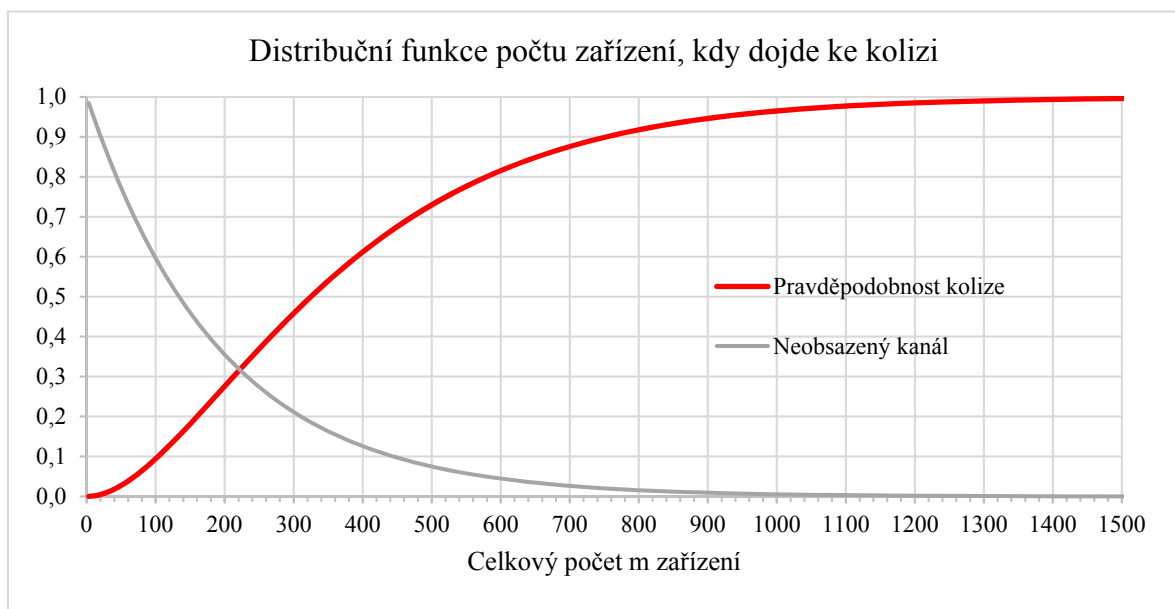
8.2. Distribuční funkce počtu zařizení

Distribuční funkce na obrázku 8-2 vychází z výpočtu pravděpodobnosti kolize pro větší počet zařizení v předcházející kapitole. Závisí na zvyšujícím se celkovém počtu m zařizení, což je počet n zařizení od každé ze tří technologií. Pro lepší přehlednost je zde použito celkového počtu m zařizení. Další neznámé vychází z výpočtu v předcházející kapitole.

$$m = 3n \quad (4)$$

$$F(m) = 1 - \frac{m}{3}(P_L + P_S + P_I) - P'_0 \quad (5)$$

Je z ní zřejmé, že se nejedná o funkci s lineárním průběhem, čemuž také odpovídá výpočetní rovnice. Ten by se mohl jevit jako nejjednodušším řešením při nárůstu počtu zařizení. Ovšem průběh je značně složitější a je možné jej aproximovat polynomiální křivkou minimálně 4. řádu. Funkce začíná v nule a limitně se blíží k jedné, což je průběh, jenž byl předpokládán vzhledem k charakteru výpočtu i podle základní logiky věci pro danou problematiku.



Obrázek 8-2 Distribuční funkce pravděpodobnosti kolize libovolných 2 a více zařizení

Je zde vyobrazen i průběh pravděpodobnosti neobsazeného kanálu, která je kvůli nepřítomnosti žádného zařízení na kanále zpočátku jedna. Průběh exponenciálně klesá k nule s mocninou počtu n zařízení od každé technologie. Tento průběh byl vypočten z rovnice

$$P'_0 = (P(L^c)P(S^c)P(I^c))^n [-] \quad (6)$$

, kde neznámé vychází z předcházející kapitoly.

Další možný popis pro průběh pravděpodobnosti s rostoucím počtem zařízení je hustota pravděpodobnosti počtu zařízení, při nichž dochází ke kolizi, jež je zobrazena na obrázku 8-3. Znárodnuje velké množství pravděpodobnosti shromážděné do počtu 500 zařízení a zejména kolem hodnoty 200. Tedy distribuční funkce v tomto místě velice strmě stoupá.



Obrázek 8-3 Hustota pravděpodobnosti kolize libovolných 2 a více zařízení

Pro další úvahu je důležité, že při počtu do 500 zařízení se může velice výrazně projevit každé další přidané zařízení. To totiž může výrazně zvýšit pravděpodobnost kolize na kanále a mohl by výrazně zhoršit funkčnost systému. Proto je důležité zvážit zapojení každého dalšího zařízení, aby nemohlo dojít k přehlcení kanálu.

9. Kapacita počtu zařízení na kanále

Problematika koexistence závisí na dvou hlavních pilířích, které mají oba své limity. Prvním je frekvenční rozdělení, jež je popsáno v kapitolách č. 6-7 a druhý je časové rozdělení, které bylo rozebráno v kapitolách č. 8-9 a na niž bude zde navázáno.

Časové rozdělení je složeno hlavně z pravděpodobností výskytu jednotlivých technologií a tedy i pravděpodobnosti kolize na kanále. Z těchto poznatků je možno už nadále usuzovat další podmínky či limity v těchto přenosových systémech. Jeden z hlavních limitů je potencionální maximální kapacita počtu zařízení fungujících na daném kanále. Ta vychází z vytíženosti daného kanálu, tedy jak moc jej zatěžují příslušná zařízení. Jinými slovy nám vyjadřuje hranici, do které je možno provozovat systém bez značného zhoršení kvality či dostupnosti provozovaných služeb. Určité parametry určující také kvalitu služby jsou právě QoS (Quality of Service) a QoE (Quality of Experience), jež především vychází z jak v prvním případě HW a SW předpokladů pro danou službu, tak v druhém případě vlastností služby a subjektivním pohledu uživatele.

Kapacita počtu zařízení na kanále je zásadní věc, která je důležitá hlavně pro zhotovitele veřejných i soukromých sítí. Ti totiž musí právě podle již předem určené maximální možné kapacity jednoho kanálu dimenzovat celou svou síť i s ohledem na ostatní možné technologie na stejných frekvencích. Brát ohled musí často také na plánovanou *Dostupnost služby* podle dokumentu SLA (service-level agreement), která je domlouvána a sepsána mezi provozovatelem služby a jejím uživatelem. Tento dokument včetně *Dostupnosti služby* je pro ně závazný. S těmito možnostmi musí počítat i provozovatele vcelku nových LPWANs, jež jsou právě ve velkém rozvoji, a proto takovouto podobnou úvahu musí mít neustále na paměti.

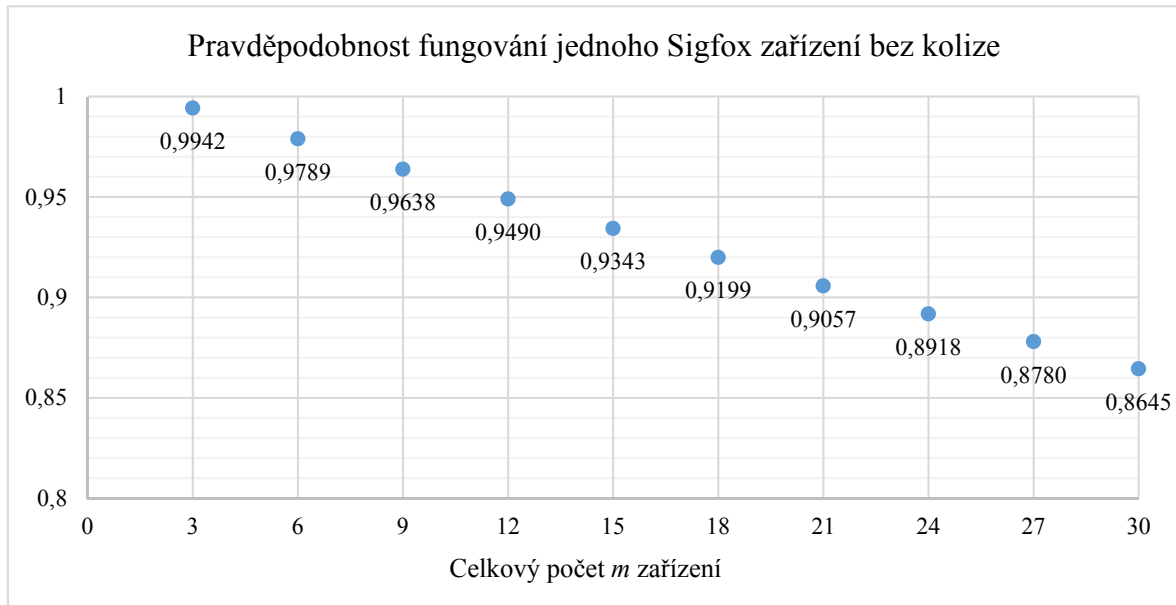
Přesné stanovení kapacity množství zařízení na kanále ovšem není zcela možné. Závisí na mnoha faktorech popisujících jak stav kanálu, tak i kvalitu a dostupnost využívané služby. Jedním z nich je konkrétně pravděpodobnost kolize vícero zařízení na kanále, jež je rozebrána výše. Jedná se o pojem popisující právě stav kanálu při určitém počtu připojených zařízení. Je dále vyobrazena distribuční funkcí na obrázku 8-2. Tento graf, jenž zohledňuje veškeré časové zákonitosti rozebrány v předcházejících kapitolách, vyobrazuje zvyšující vytíženost daného kanálu s rostoucím počtem m zařízení.

Z něj je možné čistě orientačně odhadnout, jaká může být maximální kapacita kanálu. Dále totiž závisí na dalších parametrech jednotlivých provozovaných služeb, jakými jsou konkrétně *Dostupnost služby* a způsob zavedení parametrů QoS a QoE pro rezervaci a řízení datových toků.

Tyto tři pojmy jsou jedny z hlavních pro kapacitu na kanále. Parametry QoS a QoE jsou ukazatelé úrovně kvality, a proto by právě jejich protokoly reagovaly, pokud by došlo ke zhoršení podmínek vlivem například vícero zařízení na kanále než je stanovená jeho maximální kapacita. Při takovémto zhoršení podmínek v síti by také *Dostupnost služby* pro danou službu mohla poklesnout a to až pod ve SLA dokumentu stanovenou hranici, což je porušení jejich podmínek a často následuje finanční penalizace. Hranice bývá ustanovená kolem 99%, což platí i pro technologii Sigfox. Proto je důležité pro ideální a správné fungování celé sítě, aby nebyla překročena maximální kapacita kanálu. Zároveň je i velice složité takovou hranici najít bez experimentálních pokusů na kanále s konkrétními technologiemi a službami.

9.1. Kapacita podle *Dostupnosti služby*

Jedna z možných úvah, jak určit maximální možnou kapacitu kanálu, by mohla být přes *Dostupnost služby*. Vyjadřuje množství času za rok, po který je zaručena funkčnost dané služby dle dokumentu SLA. Ta je pro technologii Sigfox definována na hladině 99%. Při porovnání této hodnoty s grafem na obrázku 9-1 je vidět, že dané zařízení by vyhovělo podmínce pouze tehdy, pokud by se na kanále nevyskytovalo více jak 3 zařízení včetně jeho. Graf vychází ze situace, která byla použita již v předcházejících výpočtech pravděpodobnosti, tedy kdy stejný kanál využívá celkový počet m zařízení a to stejný počet od každé technologie. A zároveň byly použity nejhorší možné případy výskytu na kanále.



Obrázek 9-1 Pravděpodobnost fungování jednoho Sigfox zařízení bez kolize

Toto by mohla být možná teoretická kapacita, i když velice nízká a přísná. Takováto myšlenka kapacity kanálu vychází z předpokladů, že v případě kolize dochází k úplnému přerušení komunikace. Tedy moment, kdy daná služba není k dispozici. Tomu tak nemusí ve skutečnosti být, jelikož existují mechanismy a procesy, jež i tuto překážku umí více či méně zmírnit. Zároveň technologie používají i jiné techniky fyzických vrstev, jako jsou DSSS či UNB, které snižují možnosti vzájemné kolize.

Technologie mohou těmito způsoby dosáhnout zvýšení spolehlivosti za účelem zachování komunikace na úkor zpoždění. To sice může do jisté míry ovlivnit parametr QoS k horšímu, ale je především schopno zachovat požadovanou *Dostupnost služby* a tedy zvýšit možnou maximální kapacitu systému. V tomto ohledu má provozovatel nutnost nalézt určitý kompromis, jenž balancuje jak s parametry, které jsou domluvené a nasmlouvané s uživateli, tak i ekonomickou stránkou věci, kdy je snaha o co největší využití dané technologie.

K tomu mohou složit i částečně techniky QoS a QoE, které jsou schopny upřednostňovat určitý datový provoz, a tím u něj dodržet podmínky *Dostupnosti služby* na úkor provozu, jenž je v dané chvíli podřadný či nemusí mít vůbec ustanovené podmínky *Dostupnosti služby*. Tedy se jedná opět o možnost navýšení kapacity systému.

Na druhou stranu zde ovšem vystává ještě jedna otázka. Je možné říci, že obsazenost kanálu v průběhu celého dne je stacionární? Z praxe je zřejmé, že to možné není. Systémy často vysílají po určitých skupinách jinak řečeno shlucích či ve vybraných okamžicích

během dne. Dochází tedy k nerovnoměrnému rozprostření zátěže na kanálu v čase. Toto určitě ovlivní možný vznik kolizí nad rámec pouze pravděpodobnosti výskytu technologií. V důsledku těchto skutečností by skutečná kapacita kanálu při požadované dostupnosti mohl být zase podstatně nižší.

10. Závěr

V této bakalářské práci byly popsány různé aspekty koexistence technologií v rámci prostředí IoT. Byl specifikován pojem LPWAN se zástupci jako LoRa, Sigfox či IQRF, což jsou jedni z hlavních průkopníků v této oblasti. Rozebrány byly jejich typické znaky za účelem vyjádření bližší problematiky v IoT technologiích. Na druhou stranu jsou podtrženy také odlišnosti jako topologie do hvězdy či mesh a také techniky na fyzické vrstvě jako UNB či DSSS.

Speciální kapitola se věnuje frekvenčnímu rozložení jednotlivých LPWAN technologií. Zmíněné tři byly detailně rozebrány a případně vyobrazeny na grafech. Kapitola také uvádí do vzájemné souvislosti jejich předdefinované kanály či oblasti vysílání za účelem přehledného celkového rozložení ve spektru. Ty se nalézají úmyslně v oblasti bezlicenčních pásem, jež umožňují vysílat pouze na základě *Všeobecného oprávnění* [21] [28] a tedy bez placení licenčních poplatků. *Všeobecné oprávnění* ovšem vymezuje i pro bezlicenční pásma přesně daná pravidla a limity, jež musí být u zařízení dodrženy.

Na celkovém rozložení technologií jsou také dobře vidět velké rozdíly mezi LoRou a Sigfoxem v pojetí přístupu k fyzické vrstvě a také potenciální krizová pásma. V těchto pásmech totiž dochází k překrývání nejvíce frekvenčních kanálů, a tyto kanály jsou proto nejvíce náchylné na možnou kolizi mezi zařízeními od zmíněných technologií. Je zde zaveden i kontext ostatních technologií, jež pracují na obdobných frekvenčních pásmech. Toto celkové rozložení je tedy velice důležitým prvkem při zkoumání míry koexistence LPWAN technologií v rámci oblasti IoT.

S předpokladem, že všechny LPWAN technologie pracují na stejných frekvencích, bylo také rozebráno časové schéma chování těchto technologií. Řešena byla doba aktivity jednotlivých technologií na kanále během dne za účelem zjištění potenciální maximální kapacity kanálu při jejich koexistenci. Tyto časy utváří také srovnání mezi technologiemi i jejich variantami a opět byly viditelné velké rozdíly mezi LoRou, Sigfoxem a dalšími, které jsou dány jejich rozdílnou povahou. Pro možné stanovení kapacity kanálu byla dále vypočtena pravděpodobnost kolize pro zvyšujícím se počet zařízení od každé technologie. Vyobrazena je distribuční funkcí celkového počtu zařízení a byly u ní použity varianty technologií s nejdelší dobou výskytu, aby bylo možno nalézt „nejhorší možný“ stav na kanále.

Přesné stanovení maximální kapacity kanálu podle úrovně pravděpodobnosti kolize ovšem není bohužel možné, jelikož pouze nastiňuje situaci na kanále. Její přibližný odhad by mohl vycházet z *Dostupnosti služby* dle dokumentace SLA, jež je například pro Sigfox známá. I tento výsledek je ale výrazně ovlivněn zejména různými obranými reakcemi na kolize a technikami QoS či QoE. Ty jsou schopny tuto kapacitu velice výrazně zvýšit. Na druhou stranu je nutné uvažovat, že zařízení mohou být více aktivní v určitých upřednostňovaných okamžicích během dne, tedy že pravděpodobnost výskytu na kanále není během dne stálá. V důsledku této skutečnosti by skutečná kapacita kanálu při dodržení požadované dostupnosti mohla o něco klesnout.

Výsledná maximální kapacita kanálu pro LPWAN technologie je souhrnem mnoha faktorů z vícera oblastí. V této bakalářské práci byly shrnuty některé z nich, a bylo stanoveno pásmo frekvencí kolem 868,20 MHz, které se jeví jako nejnáchylnější ke kolizím.

V dnešní době je stále vcelku malé množství zprovozněných zařízení postavených na těchto technologiích, a proto se nemusí zdát problematika kolizí a koexistence tolik důležitá. Ovšem do budoucna se to má razantně změnit, jelikož v nynější době jsou zejména

LPWAN systémy jednou z nejžádanějších oblastí. Je to dáno především technologiemi Sigfox a LoRa, které slibují vzájemné překrytí a více jak tisíce umístěných zařízení. Velké množství kolizí a rušení je proto nevyhnutelné a to stále nejsou uvedeny další technologie, jež by mohly mít podobnou roli. Z tohoto důvodu je důležité, aby se touto problematikou zabývalo a aby byla připravena půdu pro budoucí rozmach éry IoT. Některé standardizační skupiny jako ETSI či IEEE tak již činí a výsledky na sebe jistě nenechají dlouho čekat.

V této bakalářské práci byly vhodně rozebrány překryvy ve frekvenčním pásmu a časová schémata přenosů. Pro následující práci by bylo na dále vhodné pokračovat v úvahách a výpočtech maximální kapacity kanálu, jež zde byly pouze nastíněny, ale nejsou pro budoucí vývoj vůbec zanedbatelné. Vhodné by také bylo provedení experimentu na stanovení kapacity kanálu na jedné z technologií nebo případně by mohla být podobná situace řešena pomocí simulace.

Seznam obrázků

Obrázek 1-1 Topologie hvězdy	12
Obrázek 2-1 Schéma provozu LoRa zařízení, Gateway a serveru	15
Obrázek 2-2 Mesh topologie sítě.....	17
Obrázek 4-1 Fixně stanovené Sigfox kanály v rozmezí 868,18 - 868,22 MHz	25
Obrázek 5-1 Rozložení technologií v rozsahu 863,95-868,75 MHz	29
Obrázek 5-2 Rozložení technologií ve spektru v menším rozsahu 868,05-868,65 MHz....	30
Obrázek 5-3 Rozložení technologií ve spektru v nejmenším rozsahu 868,1-868,25 MHz. 31	
Obrázek 7-1 Doba výskytu zařízení na kanále během 24h	35
Obrázek 8-1 Pravděpodobnost výskytu technologií na kanále během dne	37
Obrázek 8-2 Distribuční funkce pravděpodobnosti kolize libovolných 2 a více zařízení... 40	
Obrázek 8-3 Hustota pravděpodobnosti kolize libovolných 2 a více zařízení	41
Obrázek 9-1 Pravděpodobnost fungování jednoho Sigfox zařízení bez kolize.....	43

Seznam tabulek

Tabulka 2-1 Porovnání technických parametrů technologií LoRa, Sigfox a IQRF	18
Tabulka 3-1 Shrnutí frekvenčních pásem 433, 915 a 2 450 MHz.....	19
Tabulka 3-2 Kmitočtová pásma kolem 868 MHz a jejich specifikace.....	20
Tabulka 4-1 Kanály výchozí a pro odesílání JoinReq zpráv pro LoRa zařízení	24
Tabulka 4-2 Frekvenční kanály použity ThingPark Wireless v Evropě.....	24
Tabulka 4-3 Výpis kanálů pro IQRF technologii v pásmu 868 MHz	27
Tabulka 6-1 Souhrn dalších technologií frekvenčně blízkých LPWAN	32
Tabulka 7-1 Časové a přenosové údaje vybraných variant technologií	34

Reference

- [1] X. Xiong , Z. Kan , X. Rongtao , X. Wei a C. Periklis , „Low power area machine-to-machine networks: Key techniques and prototype,“ IEEE Communications Magazine, 2015.
- [2] M. Rouse, „IoT Agenda,“ November 2015. [Online]. Available: <http://internetofthingsagenda.techtarget.com/definition/LPWAN-low-power-wide-area-network>. [Přístup získán December 2015].
- [3] M. Mawad, „Bloomberg Technology,“ June 2015. [Online]. Available: <http://www.bloomberg.com/news/articles/2014-10-09/sigfox-revives-war-tech-in-u-s-for-alternative-network>. [Přístup získán 29 December 2015].
- [4] MVDconnect, „Mesh Network,“ [Online]. Available: <https://www.mvdconnect.com/business-solutions/subcategory/mesh-network/>. [Přístup získán 4 February 2016].
- [5] G. Margelis, R. Piechocki, D. Kaleshi a P. Thomas, „Low Throughput Networks for the IoT: Lessons Learned From Industrial Implementations,“ IEEE Journal, Bristol, 2015.
- [6] Microchip Technology Inc., „LoRa® Technology,“ Microchip, [Online]. Available: <http://www.microchip.com/pagehandler/en-us/technology/personalareanetworks/technology/lora.html>. [Přístup získán 2 February 2016].
- [7] I. Poole, „Radio-Electronics.com,“ [Online]. Available: <http://www.radio-electronics.com/info/wireless/lora/basics-tutorial.php>. [Přístup získán December 2015].
- [8] LoRa Alliance, „LoRa® Technology,“ [Online]. Available: <http://www.lora-alliance.org/What-Is-LoRa/Technology>. [Přístup získán 28 December 2015].
- [9] B. Dale, „Fortune,“ 27 May 2015. [Online]. Available: <http://fortune.com/2015/05/27/anne-lauvergeon-internet-of-things/>. [Přístup získán 28 December 2015].
- [10] I. Poole, „Radio-Electronics.com,“ [Online]. Available: <http://www.radio-electronics.com/info/wireless/sigfox/basics-tutorial.php>. [Přístup získán December 2015].
- [11] Sigfox, „Sigfox,“ [Online]. Available: <http://www.sigfox.com/en/>. [Přístup získán December 2015].
- [12] T-Mobile Czech Republic a.s., „Tiskové centrum,“ 9 September 2015. [Online]. Available: <http://t-press.cz/cs/tiskove-materialy/tiskove-zpravy-t-mobile/t-mobile-pokryje-ceskou-republiku-siti-sigfox-pro-internet-veci.html>. [Přístup získán 28 December 2015].
- [13] SimpleCell Networks a.s., „Technologie SIGFOX,“ [Online]. Available: http://www.simplecell.eu/pages/technologie_sigfox/. [Přístup získán 10 April 2016].
- [14] V. Sulc, R. Kuchta a R. Vrba, „IQMESH, Technology for Wireless Mesh Networks: Implementation Case Studies,“ The Eighth International Conference on Networking and Services, Jičín, Brno, Czech Republic, 2012. ISBN 978-1-61208-186-1.

- [15] Microrisc s.r.o., „IQRF technology,“ [Online]. Available: <http://iqr.org/technology>. [Přístup získán 29 December 2015].
- [16] RF Wireless World 2012, „What is SIGFOX?,“ [Online]. Available: <http://www.rfwireless-world.com/Terminology/SIGFOX-technology-basics.html>. [Přístup získán 26 December 2015].
- [17] N. Sornin, M. Luis, T. Eirich a T. Kramp, „LoRa Specification v1.0,“ LoRa™ Alliance, San Ramon, 2015.
- [18] European Telecommunications Standards Institute, „ETSI EN 300 220-1 V2.4.1,“ ETSI, Sophia Antipolis, 2012.
- [19] International Telecommunications Union, „Radio regulations,“ ITU, Geneva, 2012. ISBN 978-92-61-14021-2.
- [20] M. Smolnikar, M. Mihelin, G. Berke, G. Kandus a M. Mohorcic, „ISM Bands Spectrum Sensing based on Versatile Sensor Node Platform,“ IEEE Journal, Ljubljana, 2010. ISBN 978-1-4244-8132-3.
- [21] Český telekomunikační úřad, „www.ctu.cz,“ 2004. [Online]. Available: http://www.ctu.cz/cs/download/oop/rok_2014/vo-r_10-05_2014-03.pdf. [Přístup získán 15 January 2016].
- [22] F. Gibbs, „ISM Bands Limit Opportunity,“ EETimes, 23 October 2015. [Online]. Available: http://www.eetimes.com/author.asp?section_id=36&doc_id=1328095. [Přístup získán 2 February 2015].
- [23] Cocoon, Actility S.A., „ThingPark Wireless PHY and MAC layer specifications v1.0,“ [Online]. Available: http://cocoon.actility.com/system/files/wireless/ThingPark_Wireless%20PHY_and_MAC_layer_specifications_v1.pdf. [Přístup získán 4 February 2016].
- [24] Disk91.com, „One day at SigFox,“ WordPress, 29 January 2015. [Online]. Available: <https://www.disk91.com/2015/news/technologies/one-day-at-sigfox/>. [Přístup získán 4 May 2016].
- [25] MICRORISC s.r.o., „IQRF OS, User`s Guide,“ IQRF, Jičín, Czech Republic, 2015.
- [26] MICRORISC s.r.o., „RT-230-05 User's Guide,“ IQRF, Jičín, Czech Republic, 2015.
- [27] P. Seflova, V. Sulc, J. Pos a R. Spinar, „IQRF Wireless Technology Utilizing IQMESH Protocol,“ IEEE Journal, Jičín, Czech Republic, 2012.
- [28] Český telekomunikační úřad, „www.ctu.cz,“ 2014. [Online]. Available: https://www.ctu.cz/cs/download/oop/rok_2014/vo-r_01-04_2014-02.pdf. [Přístup získán 3 April 2016].
- [29] V. Bílý, „GSMweb.cz,“ 2015. [Online]. Available: <http://www.gsmweb.cz/>. [Přístup získán 3 April 2016].

