

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

Katedra telekomunikační techniky

DISERTAČNÍ PRÁCE

Optimalizace protokolů v mobilních sítích

Kalfus

2017

Ing. et Ing. Radim Kalfus

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
Katedra telekomunikační techniky



Optimalizace protokolů v mobilních sítích

Disertační práce

Ing. et Ing. Radim Kalfus

Doktorský studijní program: Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: Telekomunikační technika

Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Chod, CSc.

Praha, únor 2017

Školitel:

doc. Ing. Jiří Chod, CSc.
Katedra telekomunikační techniky
Fakulta elektrotechnická
České vysoké učení technické v Praze
Technická 2
166 27 Praha 6
Česká republika

Copyright © 2017 Ing. et Ing. Radim Kalfus

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto disertační práci vypracoval samostatně, pouze za odborného vedení svého školitele Doc. Ing. Jiřího Choda, CSc.

Dále prohlašuji, že veškeré podklady a zdroje, ze kterých jsem čerpal, jsou uvedeny v seznamu použité literatury v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Nemám závažný důvod proti užívání tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze, 27. 2. 2017

.....

podpis doktoranda

Abstrakt a vlastní přínos

Cílem práce je optimalizace protokolů v mobilních sítích, zejména se zaměřením na síť LPWAN.

Práce zkoumá a navrhuje novou metodu SIGFOX-SFH a nový algoritmus SIGFOX-AFH určené pro LPWAN protokoly z prostředí internetu věcí. Dizertační práce v úvodní části analyzuje teoretické předpoklady a omezení technologií včetně návrhu nové metodologie za účelem zvýšení spolehlivosti přenosu jednotlivých zpráv. Studie by měla přispět k rozhodnutím při budoucí standardizaci navazujících protokolů a posléze při jejich implementaci.

Klíčová slova

Internet věcí, SIGFOX, modulace v extrémně úzkém frekvenčním pásmu, metodologie, LPWAN

Abstract and contributions

This dissertation thesis deals with optimization of protocols in mobile networks with focus on specific area of Low Power Wide Area Networks (LPWAN).

The main goal of this dissertation thesis is to design a new access method SIGFOX-SFH and algorithm SIGFOX-AFH for LPWAN protocols which are designed to be used in the context of Internet of things. Initially, this dissertation thesis analyzes technological backgrounds and constraints that are used in order to design a new methodology which increases probability of successful delivery. The main contribution of the thesis is in delivering knowledge for easing process of standardization of future protocols with following implementation.

Key words:

Internet of Things, SIGFOX, ultra-narrow modulation, methodology, LPWAN

Poděkování

V první řadě bych chtěl poděkovat svému vedoucímu disertační práce doc. Ing. Jiřímu Chodovi, CSc. za příkladné vedení, přístup, poskytnuté rady a ochotu.

Poděkování patří také mé manželce a rodině za trpělivost a podporu při psaní nejen této práce, ale i po celou dobu mých studií.

Praktická realizace komunikačního systému by nebyla možná bez prvotní podpory společnosti SimpleCell Networks a.s., zejména pak Ing. Pavla Sodomky. Dále bych rád poděkoval firmě T-Mobile Czech Republic a.s. (dále jen „T-Mobile“) za zpřístupnění technických dat a logů (především Davidu Týrovi). Za pomoc a cenné rady dále - RNDr. Štěpánu Roučkovi, Ph.D., Mgr. Martině Ulvrové, Ph.D., Ing. et Ing. Tomáši Urbanovi, Ing. Tomáši Hégrovi, RNDr. Pavlu Riedelovi, Ing. et Ing. Miloši Kozákovi, Ph.D., Ing. Tomáši Mitlenerovi, Jiřímu Beranovi a doc. Ing. Václavu Žaludovi, CSc.

Nakonec bych také rád poděkoval škole za možnost využít granty SGS15/200/OHK3/3T/13, TA 03011396 a 2107/2011/G1, které mi významnou měrou pomohly k dokončení výzkumu.

The most profound technologies are those that disappear. They weave themselves into the fabric of everyday life until they are indistinguishable from it.

–

Nejzásadnější technologie jsou ty, které zmizí. Ty se totiž spřádají do struktury každodenního života, dokud od něj nejsou k nerozeznání.

Mark Weiser, 1991

Seznam obrázků

Obrázek 1: Návrh buňkové sítě z roku 1947 [13]	16
Obrázek 2: Architektura mobilní sítě dle 3GPP-Rel 10 [35].....	18
Obrázek 3: (a) IoT pozice vůči buňkovým sítím 3GPP [83], [115]	18
Obrázek 4: Rozdělení bezdrátových sítí dle typických vzdáleností mezi vysílačem a přijímačem [84] [112]	19
Obrázek 5: Pozice LPWAN v závislosti na předpokládané přenosové [107]	20
Obrázek 6: Ukázka radarového signálu IFF generace Mark III [15]	22
Obrázek 7: Speciální trojitý rotační reflektor použitý Stockmannem [13]	23
Obrázek 8: Kolbův experimentální cyklus [136].....	26
Obrázek 9: Pozice 3GPP sítí vůči LPWAN	30
Obrázek 10: Zánik TSG GERAN [37]	32
Obrázek 11: Vývoj standardizace IoT v 3GPP.....	32
Obrázek 12: Optimalizace rádiového prostředí eDRX a PSM [45]	34
Obrázek 13: Spektrum NB-IoT	34
Obrázek 14: Třídy koncových zařízení LoRaWAN.....	37
Obrázek 15: Struktura LoRaWAN paketu koncového zařízení [61]	38
Obrázek 16: Ukázka chirp signálu a jeho autokorelační funkce [58].....	39
Obrázek 17: Síťová architektura	40
Obrázek 18: Frekvenční alokace kanálů technologie SIGFOX [22]	41
Obrázek 19: Naměřená frekvenční alokace kanálů technologie SIGFOX.....	42
Obrázek 20: Příklad R-FTDMA [79]	43
Obrázek 21: Detailní pohled na technologie a jejich dosah [135]	46
Obrázek 22: Analýza přístupových metod.....	48
Obrázek 23: Rozložení konkurenčních technologií ve frekvenčním pásmu [75]	55

Obrázek 24: Doplnění rádiové části Si446x [27] vedoucí ke zvýšení odolnosti proti Doplerovu jevu.....	57
Obrázek 25: Doplnění rádiové části Si446x [27] vedoucí ke zvýšení přesnosti LO.....	58
Obrázek 26: Bitová chybovost pro jednotlivé úniky při použití modulace (D)BPSK	60
Obrázek 27: Blokové schéma modulu TD1208 [26]	63
Obrázek 28: Blokové schéma mikrokontroléru EFM32G210 [26]	64
Obrázek 29: Blokové schéma rádiové části Si446x [27].....	64
Obrázek 30: Upravený stavový model algoritmu SIGFOX-AFH [143].....	65
Obrázek 31: Znázornění dopadu metody SIGFOX-SFH na rádiovou část Si446x [27].....	69
Obrázek 32: Testovací zapojení	71
Obrázek 33: Log z RaspberryPI	72
Obrázek 34: Výstup z přenosného spektrálního analyzátoru SPECTRAN	73
Obrázek 35: 3D tisk krytu na modul SIGFOX pro uchycení na hexakoptéru....	74
Obrázek 36: Měřicí prototypový dron	75
Obrázek 37: Pravděpodobnost doručení jako funkce vzdálenosti	76
Obrázek 38: Pozice statických měření vynesena do mapy	77
Obrázek 39: Výsledné hodnoty ztrát šířením	79
Obrázek 40: Realizace dynamických měření	81
Obrázek 41: Ztrátovost v závislosti na rychlostním intervalu	82
Obrázek 42: Počet duplicitních zpráv v závislosti na rychlostním intervalu	83
Obrázek 43: Rádiové parametry v závislosti na rychlostním intervalu.....	83
Obrázek 44: Analýza pohybu lidského těžiště [134][135]	84
Obrázek 45: Testovací stolice pro vertikální měření	85
Obrázek 46: Příklad simulace R-FTDMA metody (100 zařízení a 60 s).....	86
Obrázek 47: Simulace s rostoucím počtem zařízení v kolizní doméně	87
Obrázek 48: Simulace SIGFOX s rostoucím počtem zařízení v kolizní doméně	87

Obrázek 49: Originální SIGFOX metoda (1000 zařízení, 6os)	88
Obrázek 50: SIGFOX-AFH metoda (1000 zařízení, 6os).....	88
Obrázek 51: Originální SIGFOX metoda (1000 zařízení, 6os)	89
Obrázek 52: SIGFOX-SFH metoda (1000 zařízení, 6os)	89
Obrázek 53: Rám hexakoptéry Tarot T960.....	115
Obrázek 54: Pevná dvoulistá vrtule (CW a CCW) a směr otáčení listů na dronu.....	116
Obrázek 55: 3-osý stabilizační systém.....	116
Obrázek 56: FrSky Taranis-E.....	118
Obrázek 57: Měřicí prototypový dron	119
Obrázek 58: Program Mission Planner.....	120
Obrázek 59: Program VariCAD.....	121
Obrázek 60: Vnitřní uspořádání	121
Obrázek 61: Výsledné pouzdro.....	122

Seznam tabulek

Tabulka 1: Hodnoty kódovacích poměrů při SF=10 a BW=250kHz.....	38
Tabulka 2: Frekvenční regulace v pásmu 868MHz dle ČTÚ	40
Tabulka 3: SIGFOX Certifikační třídy	42
Tabulka 4: Hodnoty eDRX cyklu v sekundách.....	44
Tabulka 5: Výsledné zhodnocení technologií.....	47
Tabulka 6: Používané přístupové metody [70].....	52
Tabulka 7: Přehled vybraných AT příkazů pro modul TD1208	71
Tabulka 8: Porovnání hlavních parametrů kvadro- a hexa- koptér [63].....	75
Tabulka 9: Výsledné hodnoty stacionárních měření	79
Tabulka 10: Příklad frekvenčních posunů pro frekvenci 868 MHz	80
Tabulka 11: Výsledné hodnoty vertikálních měření	85

Seznam použitých zkratk a termínů

Zkratka	Význam zkratky
3GPP	3rd Generation Partnership Project
6S	Six-cells in Series
ADR	Adaptive Data Rate
ALOHA	Stochastická metoda mnohonásobného přístupu
AMPS	Advanced Mobile Phone Service
AWGN	Additive white Gaussian noise
BPSK	Binary Phase-Shift Keying
C-eDRX	Connected mode Extended Discontinuous Reception
CRC	Cyclic Redundancy Check
ČTÚ	Český telekomunikační úřad
CSL	Coordinated Sampled Listening
CSS	Chirp Spread Spectrum
DBPSK	Differential Binary Phase-Shift Keying
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
E-UTRAN	Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network
EC-EGPRS	Extended Coverage Enhanced General Packet Radio Service
EC-GSM-IoT	Extended Coverage GSM Internet of Things
eDRX	Extended idle-mode Discontinuous Reception
EGPRS	Enhanced General Packet Radio Service
ERP	Effective Radiated Power
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FH-DPSK	Frequency-Hopped Differential Phase-Shift Keying
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum
FSL	Free Space Path Loss
GFSK	Gaussian Frequency-Shift Keying
GNSS	Global Navigation Satellite System

GPRS	General Packet Radio Service
H2H	Human-to-Human
H2T	Human-to-Things
I-eDRX	Idle mode Extended Discontinuous Reception
IETF	Internet Engineering Task Force
IMU	Inertial Measuring Unit
IoT	Internet of Things
ITU	International Telecommunication Union
ISM	Industry, Science and Medicine
LBT	Listen Before Talk
LoRa™	Long Range modulation technique
LoRaWAN™	Long Range Wide Area Network Protocol
LPWA(N)	Low Power Wide Area (Network)
LTN	Low Throughput Networks
MAC	Medium Access Control
MEMS	Micro-Electro-Mechanical Systems
MTC	Machine Type Communication
NB-LTE	Narrow Band Long Term Evolution
NB-CIoT	Narrow Band Cellular Internet of Things
NB-IoT	Narrow Band Internet of Things
OFDMA	Orthogonal Orthogonal frequency-division multiple access
PDCCH	Physical Downlink Control Channel
PDN	Packet Data Network
PCH	Paging Channel
PSM	Power Saving Mode
RAN	Radio Access Network
R-FDMA	Random-Frequency Division Multiple Access
RHCP	Right Hand Circular Polarization
RRC_Idle	Radio Resource Control Idle
RSSI	Received Signal Strength Indicator

SC-FDMA	Single Carrier Orthogonal frequency-division multiple access
SNO	SIGFOX Network Operator
SNR	Signal-to-noise-ratio
SF	Spreading Factor
SRD	Short range devices
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
TPC	Transmit Power Control
TAU/RAU	Tracking/Routing Area Update
T2T	Things-to-Things
TDMA	Time Division Multiple Access
TSG	Technical Specification Group
UNB	Ultra-Narrow Band
Web API	Web Application Programming Interface
WG	Working Group
WSN	Wireless Sensor Network
WWAN	Wireless Wide Area Network

Obsah

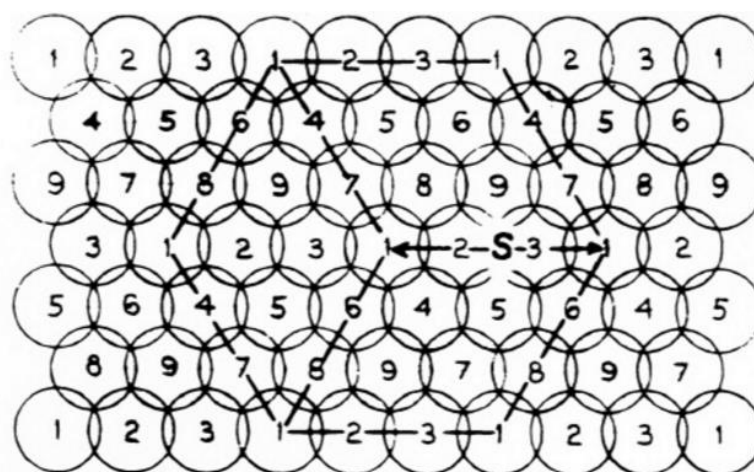
PROHLÁŠENÍ	III
ABSTRAKT A VLASTNÍ PŘÍNOS	IV
ABSTRACT AND CONTRIBUTIONS	V
PODĚKOVÁNÍ	VI
SEZNAM OBRÁZKŮ	VIII
SEZNAM TABULEK	XI
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A TERMÍNŮ	XII
OBSAH	XV
1 ÚVOD	16
1.1 Vývoj mobilních sítí	16
1.1.1 LPWAN síť	18
1.2 Vývoj internetu věcí a jeho definice	21
2 METODY ZPRACOVÁNÍ	25
2.1 Přístup k řešení problému	25
2.1.1 Deduktivní přístup	25
2.1.2 Induktivní přístup	25
2.2 Aplikace zvolené metody zpracování	26
3 HYPOTÉZY A CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	27
4 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	28
4.1.1 ETSI – LTN [89][91]	28
4.1.2 GSMA - LPWAN	29
4.1.3 3GPP	29
4.1.4 LoRa aliance [49] [59]	36
4.1.5 SIGFOX	39
4.2 Dílčí zhodnocení LPWAN technologií	43

5	ROZBOR ŘEŠENÍ	48
5.1	Směr výzkumu ostatních autorů	52
5.2	Teoretické směry optimalizace	53
5.2.1	Adaptivní chování protokolu	54
5.2.2	Kolizní doména	54
5.2.3	Odolnost proti pohybu	57
5.2.4	Synchronizace	58
5.2.5	Zpětný kanál	58
5.3	Zvolený přístup a návrh optimalizace	59
5.3.1	Použití techniky rozprostřeného pásma	59
5.3.2	Adaptivní algoritmus SIGFOX-AFH	61
5.3.3	Model algoritmu SIGFOX-SFH	65
5.3.4	Metoda SIGFOX-SFH	67
6	PRAKTICKÁ ČÁST [A1]	70
6.1	Návrh realizace	70
6.1.1	3D tisk pouzdra [A12]	73
6.1.2	Měřicí prototypový dron [A11]	74
6.2	Experimentální ověření	76
6.2.1	Stacionární měření	76
6.2.2	Nomadická měření - horizontální	79
6.2.3	Nomadická měření - vertikální	84
6.3	Dvoudimenzionální simulace kolizního chování	85
7	ZÁVĚR	91
7.1	Závěrečné shrnutí	91
7.2	Splnění vytčených cílů	91
7.3	Náměty na další směry výzkumu v dané oblasti	93
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	94
	PŘÍLOHY	115
	VYBRANÉ PUBLIKACE AUTORA	128

1 Úvod

1.1 Vývoj mobilních sítí

Za první komerčně dostupnou mobilní síť je považována námořní síť provozovaná ve Spojených státech amerických od roku 1929. Ta od roku 1936 umožnila bezdrátové spojení z veřejné telefonní sítě na určitou, předem zvolenou loď [1]. Mobilní sítě posléze zažily rychlý rozvoj díky vynálezu tranzistoru v roce 1947 v Bellových laboratořích, který umožnil miniaturizaci mobilních koncových zařízení [2]. Jak počet uživatelů sítě rostl, alokované frekvenční pásmo již přestalo kapacitně stačit a jako cílový byl vybrán koncept výhodně pracující s omezeným frekvenčním pásmem pomocí tzv. buňkové architektury. Ta je založena na myšlence, že síť může využívat své zdroje efektivněji, pokud pokrývanou oblast rozdělíme do menších celků. Antény mobilní sítě pokrývající tuto oblast (buňku, anglicky cell), které jsou vzdálené od sebe určitou minimální vzdálenost, pak používají stejné frekvenční pásmo. Tato myšlenka byla 11. prosince 1947 zformulována Douglesem H. Ringem v materiálu Bellových laboratoří nazvaném „Mobile Telephony – Wide Area Coverage – Case 20564“ [13].

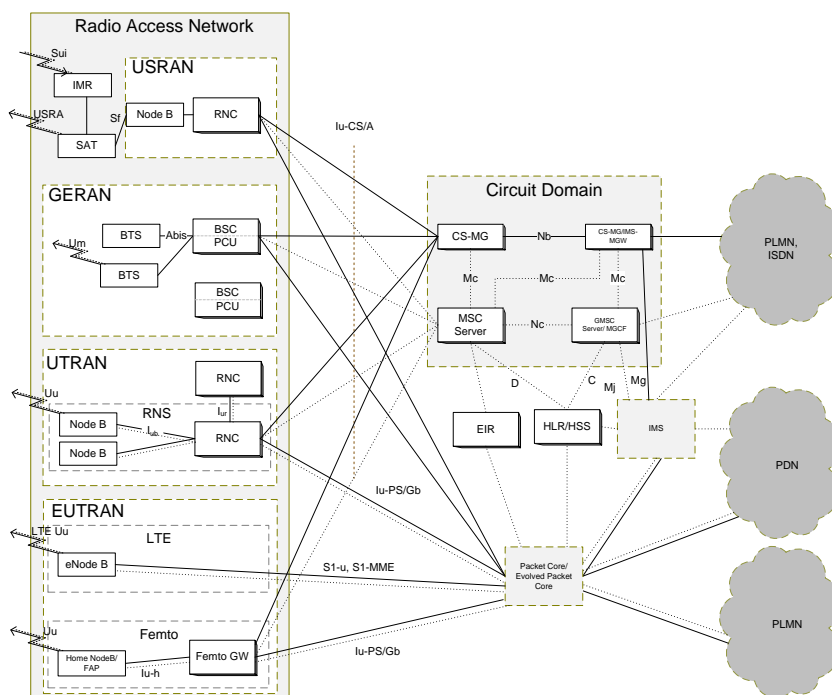


9 FREQUENCIES – MIN VALUE $D_2/D_1=4.19$

Obrázek 1: Návrh buňkové sítě z roku 1947 [13]

Prvního komerčního nasazení sítě, založeného na buňkovém konceptu, se síť dočkala v Bahrajnském království. Společnost Bahrain Telephone Company

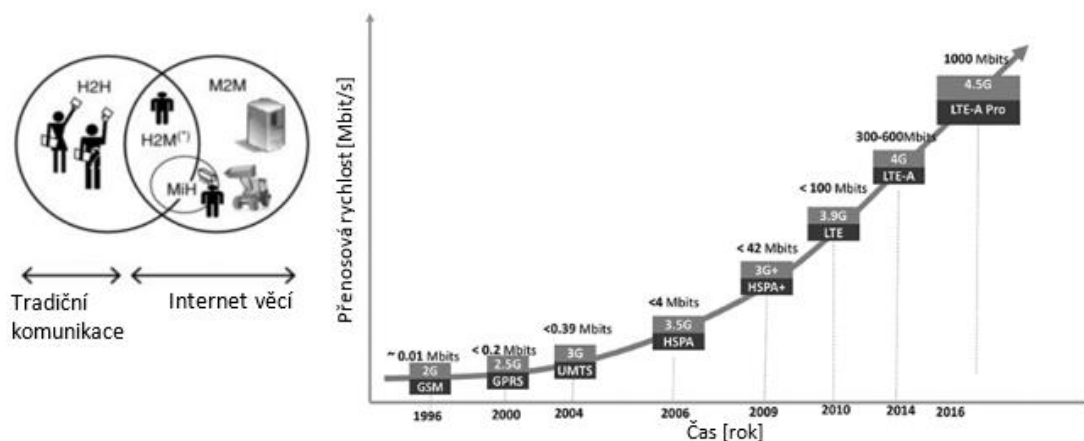
(Batelco) v květnu roku 1978 spustila jako první buňkovou síť určenou pro 250 zákazníků obsahující dvě buňky [12]. Síť s 20 frekvenčními kanály využívala 400 MHz pásmo a byla provozována na zařízeních společnosti Matsuhita (dnes Panasonic) [12]. Následována byla v rychlém sledu Japonskem 1979 (systém s 88 buňkami). Saúdská Arábie spolu s Dánskem, Finskem, Norskem a Švédskem spustily síť Nordisk MobilTelefoni (NMT) v roce 1981 [3]. Roku 1983 se ve městě Chicago dočkala komerčního spuštění první americká veřejná buňková mobilní síť Advanced Mobile Phone Service (AMPS), která tak spolu s ostatními dala základ mobilním analogovým buňkovým sítím tzv. první generace [2]. V roce 1982 proto Evropská komise pro pošty a telekomunikace (sdružující 26 evropských telekomunikačních společností) spustila projekt GSM (Groupe Spéciale Mobile), plně digitální celoevropskou mobilní telefonní síť pracující na frekvenci 900 MHz. Kromě telefonní služby později přibyla i datová a prvního komerčního spuštění plnohodnotného internetu v mobilní síti se roku 1999 dočkalo Japonsko v síti mobilního operátora DoCoMo [31]. Buňkové sítě jsou tedy historicky specificky zaměřené na telefonní služby, a ačkoliv v průběhu let začlenily řadu přístupových sítí (od Femto buněk E-UTRAN, po Satelitní buňky USRAN), zaměření vývoje bylo především na schopnost přenášet širokopásmová data (viz Obrázek 2), jedná se především o interakci mezi lidmi (H2H, Human-to-Human), která se zásadně liší od komunikace mezi zařízeními [80] [81][82].



Obrázek 2: Architektura mobilní sítě dle 3GPP-Rel 10 [35]

1.1.1 LPWAN sítě

Rozdělení této komunikace mezi zařízeními (M2M¹, Machine-to-Machine), zařízení s člověkem (Human-to-Machine), popř. medicínské senzory a čipy v lidech/zvířatech (MiH, Machine-in-Human) znázorňuje následující obrázek [82].



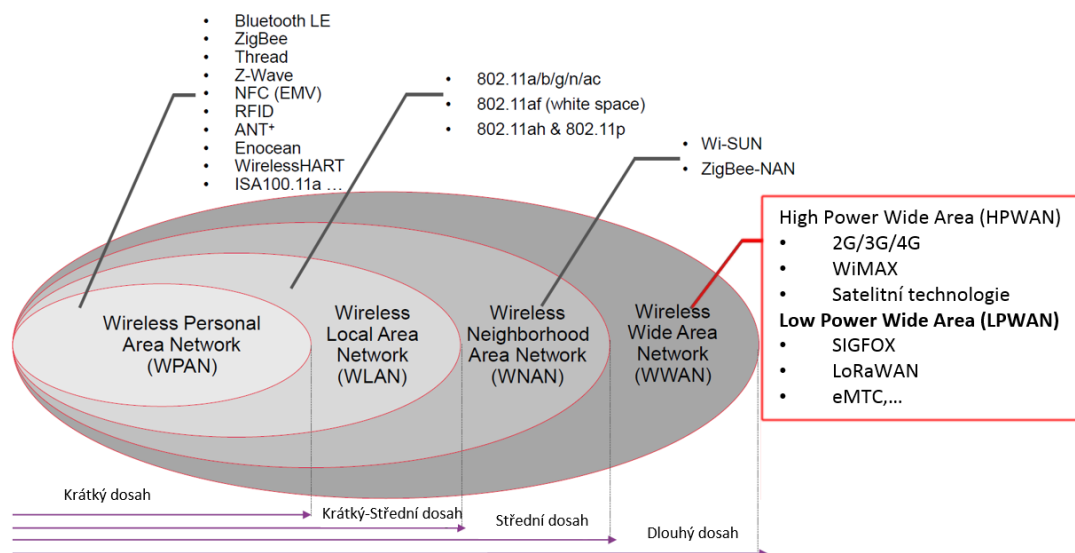
Obrázek 3: (a) IoT pozice vůči buňkovým sítím 3GPP [82], [114]
(b) vývoj přenosových rychlostí [85]

¹ 3GPP také používá termín MTC (Machine-Type Communication) [47]

Hlavními rozdíly mezi H2H a M2M komunikací jsou dle Soltanmohammediho et al. [80]:

- 1) Rozdílný poměr mezi přijímanými a odesílanými daty: M2M zařízení mají vyšší objem dat v odchozím směru (uplink) na rozdíl od H2H
- 2) Distribuční funkce: zatímco H2H provoz je většinou soustředěný na denní a večerní čas, M2M provoz je rozdělen více uniformě
- 3) Periodicita: na rozdíl od většiny H2H komunikace, část z M2M aplikací zasílá data v pravidelných cyklech (např. odečítací jednotky)
- 4) Konzistentnost: v části monitorovacích aplikací se může objem přenášených dat při detekci události náhle skokově zvýšit
- 5) Mobilita: z pohledu M2M zde existuje velká rozdílnost, odečítací jednotky/senzory jsou většinou fixované na jednu lokalitu, zatímco aplikace pro medicínské využití vykazují stejnou mobilitu jako H2H
- 6) Kvalita služby: z pohledu kvality existuje široké spektrum požadavků na M2M aplikace (v reálném čase až po ty časově relaxované)

Díky rozdílným požadavkům aplikací tak postupně vznikla řada standardizovaných i proprietárních bezdrátových sítí a technologií, které doplňují mobilní síť:

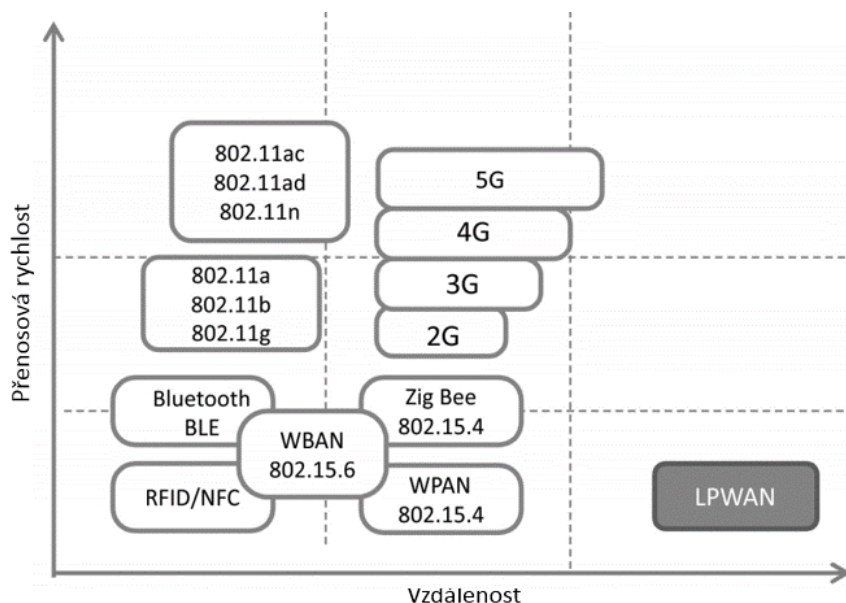


Obrázek 4: Rozdělení bezdrátových sítí dle typických vzdáleností mezi vysílačem a přijímačem [84] [112]

Cílem výzkumu této práce je právě oblast pozemních mobilních sítí velkého dosahu (WWAN, Wireless Wide Area Network), se zaměřením na podoblast LPWAN (Low Power Wide Area Network). Jak poukazuje ETSI, sítě LPWAN vyplňují niku mezi standartními mobilními sítěmi WWAN a technologiemi s krátkým dosahem (WPAN,WLAN)[89]. Jsou speciálně navržené pro komunikaci v IoT a ačkoliv vznikla řada protokolů, standardů a technologií, které se zaměřují na určitý výsek z balíku služeb, sdílejí společně následující hlavní cíle a vlastnosti [86][92][93][97]:

- Nízké přenosové rychlosti (~100(k)b/s)
- Maximalizace dosahu (~50km)
- Nízká spotřeba energie koncových zařízení (~20uAh)
- Velmi nízká cena - jak z pohledu koncových zařízení (KZ), tak z pohledu nákladů na výstavbu a provozování sítě

Na tyto aspekty poukazuje Egli v následujícím diagramu, ve kterém je znázorněna pozice LPWAN v závislosti na přenosové rychlosti:



Obrázek 5: Pozice LPWAN v závislosti na předpokládané přenosové [107]

1.2 Vývoj internetu věcí a jeho definice

Roku 1933² byl Sir Henry T. Tizard, rektor londýnské Imperial College, zvolen předsedou nově vznikající komise zřizované britským ministerstvem letectví za účelem nalézt nové technologie na obranu proti vzdušným útokům (CSSAD, Committee Scientific Survey of Air Defense)³ [11]. Ještě před první schůzí H. E. Wimperis, který se kromě členství v této komisi věnoval hledání nových vojenských technologií, kontaktoval vedoucího výzkumné laboratoře Radio Research Laboratory Roberta A. Watson-Watta (potomek známého vynálezce Jamese Watta) s žádostí o posouzení využití silných elektromagnetických vln za účelem vytvoření „smrtícího paprsku“ (v té době byla vysána odměna 1.000£ pro toho, kdo na vzdálenost 100 yardů dokáže zabít ovci) [10][11][12]. Výsledná hodnota vyzářeného výkonu byla odhadnuta jeho spolupracovníkem Wilkinsonem na 30 MW, což zdaleka překračovalo reálně dosažitelné hodnoty. Jedním z důvodů tak vysoké hodnoty byla i kovová konstrukce letadel, která posádku před zářením chránila [12]. Na druhou stranu si ale Watson-Watt uvědomil, že úroveň takto odraženého signálu se zdá být dostatečná, aby ji bylo možné detekovat, o čemž byl Wimperis ihned informován [11]. Tizardova komise se prvně sešla 28. ledna a zařadila Wimperise a Watson-Watta k hlubší analýze a pozdější reálné demonstraci [11].

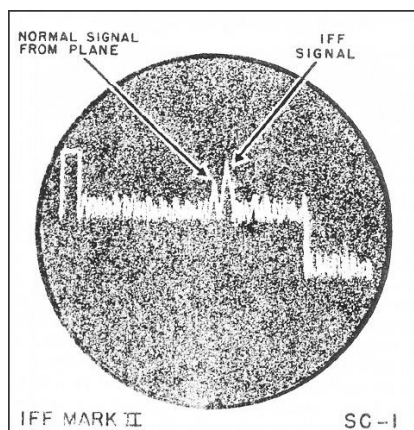
A tak skotský fyzik sir Robert Alexander Watson-Watt 26. února 1935 úspěšně demonstroval použití pasivního radaru⁴ (RADAR, RAdio Detection And Ranging) a dal tak vzniknout novému odvětví, totiž rádiové frekvenční identifikaci [17][12]. Nasazení radarové techniky ale ve Velké Británii už během oznámení národu premiérem země o vstupu do války

² Bowen ve své knize uvádí až prosinec 1934 [10], Brown dokonce až počátek roku 1935 [12]

³ Taktéž nazývanou v některých pramenech Tizardova komise [10], [11], [12]

⁴ Watson-Watt zdaleka nebyl první, kdo s myšlenkou rádiové lokalizace experimentoval [11][12]. První zařízení detekující objekt sestrojil Christian Hülsmeier již v roce 1904 [12][16], ale systém navržený Watson-Wattem a Wilkinsonem byl později schopný určit nejen vzdálenost, ale i azimut a sestupové úhly jednotlivých letadel a přestože Watson-Watt nebyl prvním kdo radar vynalezl, byl prvním, kdo ho dovedl do úspěšného masového nasazení [12]

s Německem v září roku 1939 způsobilo planý poplach, když bylo nesprávně vyhodnoceno spřátelené francouzské letadlo jako nepřátelské [14]. Když se den poté britská eskadra vracela z bombardování Hamburku a dostala se pod palbu vlastní protiletectvé obrany, bylo jasné, že je třeba vyvinout systém na rozlišení přátelských letadel od těch nepřátelských [14]. Jak Galati ve své knize uvádí, úkolem byl pověřen jako vedoucí opět sám Watson-Watt a ještě téhož roku si nechal patentovat nově vzniklý systém sekundárního radaru nazvaný IFF (z angl. Friend or Foe) [11][16]. Tento systém umístěný v letadle při detekci signálu z pozemního radaru odeslal silnější kódovaný signál zpět na stejné frekvenci a pomohl tak díky obrazu signálu na katodové obrazovce obsluze radaru odlišit letadlo od nepřátelského [14].



Obrázek 6: Ukázka radarového signálu IFF generace Mark III [15]

IFF systém tak lze považovat za příklad systému založeného na konceptu technologií RFID (Radio Frequency Identification), tedy kde signál je zaslán zařízení a to zpět odešle informaci identifikující toto zařízení (tedy aktivní cestou).

V roce 1948 Stockman poukázal na fakt, že informace kterou odrazem elmag. vlny z radaru získáme, lze považovat za identifikaci zařízení typu jedno bitového identifikátoru (ano/ne) a myšlenku dále rozvedl tak, že touto metodou lze vzdáleně nejen zařízení identifikovat, ale že vzdálený objekt může odražený signál upravit tak, aby nesl další přidanou informaci. Níže je snímek speciálního reflektoru ze Stockmanova článku [10] [13]. Tento článek je považován za první

veřejně dostupný popis technologie založené na pasivní identifikaci známý pod zkratkou RFID [17][18].



Obrázek 7: Speciální trojitý rotační reflektor použitý Stockmannem [13]

Samotný termín „Internet věcí“ (IoT, Internet of Things) pak použil jako první v roce 1999⁵ vizionář Kevin Ashton, výkonný ředitel Auto-ID Center, pro futuristický svět propojených zařízení ve snaze zviditelnit právě technologii RFID [105]. Od té doby došlo k mnoha pokusům o definici tohoto pojmu.

Definice Internetu věcí:

Mezinárodní telekomunikační unie ITU-T

Skupina Study Group 13 Mezinárodní telekomunikační unie (International Telecommunication Union, ITU) roku 2012 definovala Internet věcí jako: “Globální infrastrukturu pro informační společnost, jež umožňuje pokročilé služby propojením (fyzických a virtuálních) věcí na základě existujících a

⁵ Minerva et al. uvádějí, že pojem byl použitý již v roce 1997 na půdě ITU-T [99]

vyvíjejících se navzájem propojitelných informačních a komunikačních technologií“ [30].

Komise pro technickou stránku internetu (IETF)

Komise pro technickou stránku internetu (IETF, Internet Engineering Task Force) poskytla svoji definici v roce 2010 takto: *“Základní myšlenkou je, že internet věci propojí objekty kolem nás (elektronické, elektrické, neelektrické) s cílem zajistit bezešvou (seamless) komunikaci a souvislosti jimi poskytnutých služeb. Vývoj RFID tagů, senzorů, regulačních zařízení, mobilních telefonů umožní zhmotnit internet věcí, který tak interakcí a vzájemnou spoluprací poskytne lepší a přístupnější služby kdykoli a odkudkoli.“*

Evropský ústav pro telekomunikační normy (ETSI)

Ačkoliv ETSI (European Telecommunications Standards Institute) nabízí řadu řešení pro IoT, většina dokumentů se odkazuje na termín M2M, který byl v ETSI definován: *„M2M komunikace je komunikace probíhající mezi dvěma či více zařízeními nevyžadující přímý lidský zásah. M2M služby mají za cíl automatizované rozhodování i komunikační procesy [97]“*

2 Metody zpracování

Základním předpokladem pro úspěšnou realizaci vědeckého výzkumu je volba vhodného logického postupu. Zásadním krokem je tedy volba mezi dvěma základními přístupy.

2.1 Přístup k řešení problému

Přístup k vědecké práci lze podle různých měřítek a z různých pohledů klasifikovat více způsoby, níže je uvedeno základní rozdělení na deduktivní a induktivní formu přístupu [136].

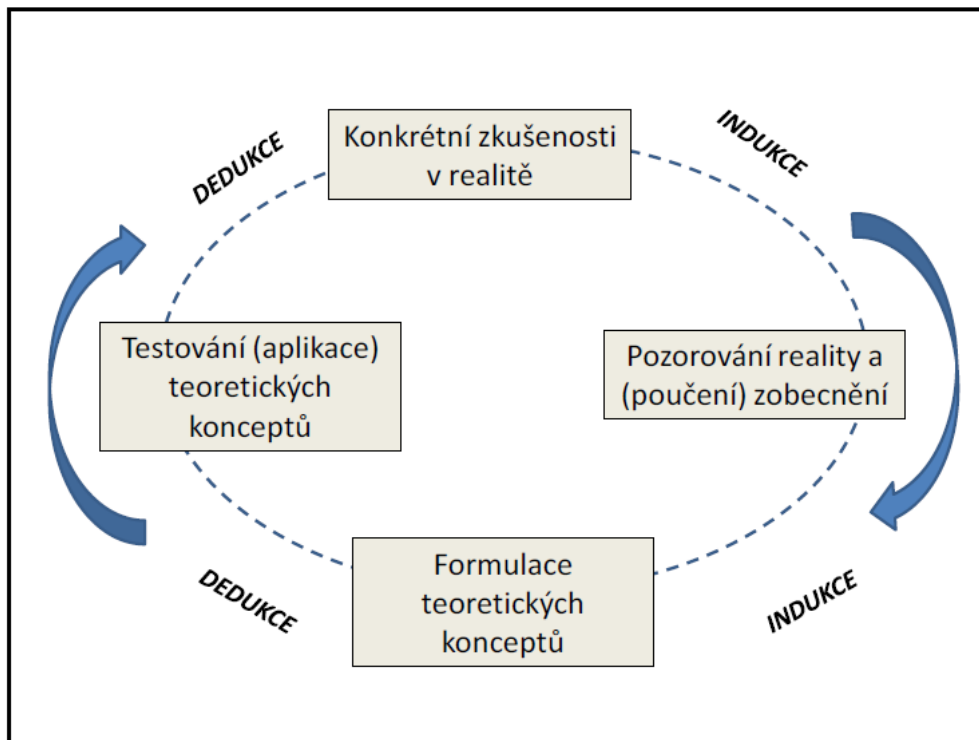
2.1.1 Deduktivní přístup

Tento přístup vychází z pozitivismu a předpokládá existenci teorie, na jejímž základě jsou zformulovány a následně ověřovány hypotézy. V podstatě se tak jedná o způsob myšlení, kdy vycházíme ze známých, ověřených a obecně platných závěrů a aplikujeme je na zkoumaný případ. Ověřujeme tak, zda je vyslovená hypotéza schopna vysvětlit daný fakt.

2.1.2 Induktivní přístup

Tento přístup vychází z konstruktivismu. Základem je sběr dat, na jejichž podkladu jsou vytvářeny hypotézy, které jsou následně testovány. Konečným cílem je zobecnění a vytvoření nové teorie, jedná se tak o vyvozování obecných závěrů na základě poznatků o jednotlivostech.

Metoda indukce a dedukce se v reálném výzkumu kombinují a vzájemně se doplňují. Tento vztah byl popsán jako tzv. Kolbův experimentální cyklus [136], který je zobrazen na obrázku níže:



Obrázek 8: Kolbův experimentální cyklus [136]

2.2 Aplikace zvolené metody zpracování

Jako stěžejní logický přístup pro zpracování optimalizace protokolů v mobilních sítích byla zvolena metoda induktivní. Samotnému návrhu optimalizace musela předcházet mnohá měření (sběr dat), na základě kterých mohl být definován cíl návrhu nové přístupové metody SIGFOX-SFH pro síť LPWAN z prostředí internetu věcí, spolu s rozborem jejího použití a dále k novému algoritmu SIGFOX-AFH.

Navržená optimalizace byla dále testována metodou Monte Carlo, výkonnou simulační technikou. V principu se jedná o stochastickou metodu, požadovaného výsledku je tedy dosaženo využitím náhody a pravděpodobnosti. Vzhledem k tomu, že je pro realizaci této metody nezbytné opakování velkého počtu náhodných jevů, došlo k jejímu masivnímu využití až s rozvojem výpočetní techniky, tedy po konci 2. světové války [137]. Velmi známou a typickou úlohou, při jejímž řešení byla využita metoda Monte Carlo, je zjištění hodnoty Ludolfova čísla π [138]. Proces spočívá ve vytvoření modelu, realizaci dostatečného počtu simulací a v následném vyhodnocení. Přesnost výpočtu a

jeho efektivita a použitelnost je založena na následujících faktorech: dostatečná kvalita generátoru náhodných čísel, výběr racionálního algoritmu a kontrola přesnosti výsledku [138].

Simulace chování navržené metody i algoritmu vedla k potvrzení předpokladů optimalizace.

3 Hypotézy a cíle disertační práce

Cílem práce je **optimalizace protokolů v mobilních sítích**. V průběhu práce a na základě výsledků obhajoby minima byla oblast dále upřesněna a směřována na síť LPWAN a v nich na perspektivní technologii **SIGFOX**. To ve svých důsledcích tedy zároveň vedlo i na prostředí internetu věcí ve vztahu k technologii **SIGFOX** a v souhrnu i k návrhu **nové přístupové metody SIGFOX-SFH** pro síť LPWAN z prostředí internetu věcí, spolu s rozбором jejího použití a dále k novému algoritmu **SIGFOX-AFH**. Nová metoda i algoritmus mají za úkol, při zachování velikosti kolizní domény, efektivněji přenést data tak, aby bylo dosaženo minimalizace chybovosti. Pro splnění hlavního cíle je však nezbytné splnit dílčí cíle:

1. **Provedení rešerše LPWAN řešení.** Rozbor teoretického principu činnosti těchto řešení, diskuze nejdůležitějších parametrů a jejich vzájemné porovnání.
2. **Formulace nové přístupové metody SIGFOX-SFH a algoritmu SIGFOX-AFH.** Teoretický návrh řešení a návrh jeho praktické realizace.
3. **Návrh a realizace měření na určení spolehlivosti** současné metody přenosu u stávajícího protokolu **SIGFOX**.
4. **Navržení a vytvoření simulačního modelu vhodného pro analýzu systémů R-FTDMA.** Stanovení vlivu počtu zařízení v kolizní doméně na spolehlivost přenosu.
5. **Aplikace simulačního modelu na přístupovou metodu SIGFOX-SFH** a její porovnání se současnou metodou.

4 Současný stav řešené problematiky

V této kapitole shrnuji nejdůležitější informace a řešení z pohledu LPWAN sítí, zaměření je především na organizace sdružující více subjektů, jakými jsou 3GPP (sdružující více než 389 firem [125]), ETSI, GSMA.

4.1.1 ETSI – LTN [89][91]

Předpokládaným přínosem je vytvoření nových sítí určených pro malé objemy dat (LTN, Low Throughput Network) s potenciálem pro miliardu připojených objektů, díky čemuž má být dosaženo následujícího:

- nižší náklady
- vytvoření nových aplikací
- snížení elektromagnetického záření zlepšením účinnosti přenosu dat

V roce 2012 byla vytvořena skupina LTN, jejímž úkolem bylo specifikovat novou technologii ultra úzkého pásma (UNB, Ultra-narrow Band) pro velmi nízké přenosové rychlosti dat u zařízení s dlouhou dobou provozu. V roce 2014 skupina dokončila tři specifikace pro:

- LTN - návrhy použití (GS LTN 001)
- funkční architektura (GS LTN 002)
- rozhraní a protokoly (GS LTN 003)

V souhrnu tyto údaje poskytují základ pro normalizační práci, která je v současné době prováděna v ETSI výboru pro elektromagnetickou kompatibilitu a rádiové spektrum (TC ERM).

Hlavní charakteristiky [106]:

- při použití UNB (Ultra Narrow Band):
 - velikost frekvenčních kanálů: 100 Hz (600 Hz v USA)
 - modulace: BPSK/GFSK
 - modulační rychlost: 100 Bd (600 Bd v USA)

- uživatelská data: 12 B/8 B
- při použití OSS (Orthogonal Sequence Spread Spectrum):
 - velikost frekvenčních kanálů: 8-500 kHz
 - modulace: DSSS
 - přenosová rychlost: 30-50 000 b/s
 - uživatelská data: 12 B/8 B

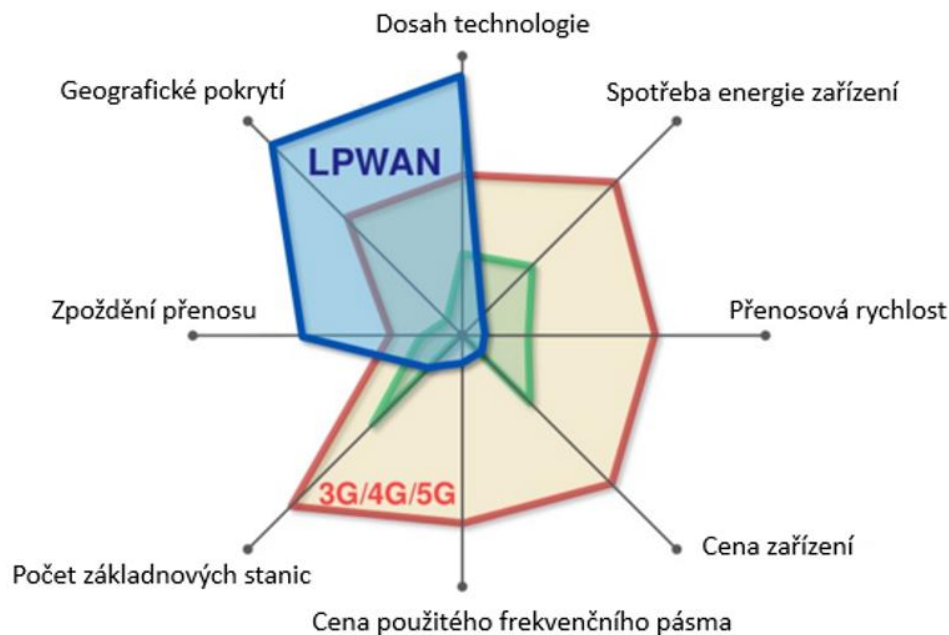
4.1.2 GSMA - LPWAN

LPWAN iniciativa

Iniciativa Low Power Wide Area Network (LPWAN) spojuje 26 mobilních operátorů, výrobců modulů, infrastruktury i čipů za účelem zrychlení vývoje a komerčního nasazení LPWAN řešení v licencovaném spektru (Rooney, 2015). Iniciativa uvádí, že široké spektrum požadavků není možné splnit jednou technologií, a proto se zaměřuje na tři komplementární 3GPP standardy – evoluci LTE, evoluci GSM, popř. na zcela novou technologii [48].

4.1.3 3GPP

Hlavní snahou je dohnat komerčně dostupné LPWAN technologie, které postupně získávají podíl na trhu a 3GPP doposud nenabízelo řešení pokrývající tuto část požadavků. Pozici LPWAN primárně vůči technologiím definovaným 3GPP uvádí např. Egli [107]:



Obrázek 9: Pozice 3GPP sítí vůči LPWAN

NB-IoT, EC-GSM-IoT

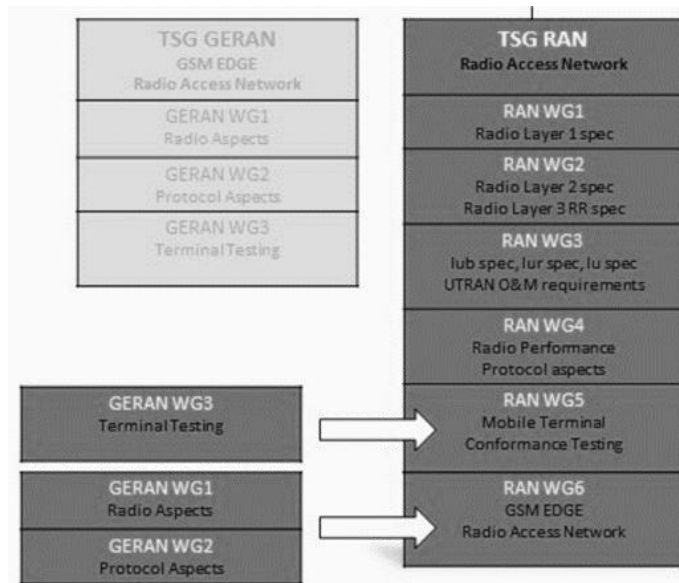
Jedním z přirozených kandidátů na řešení je možnost využití stávajících mobilních sítí. V rámci standardizační asociace 3GPP (3rd Generation Partnership Project) se touto myšlenkou zaobírá od roku 2013 pracovní skupina GERAN (GERAN TSG, Technical Specification Group). V zápise z jednání č. 62 GP-140421 skupina uvádí následující hlavní cíle studie hledající řešení pro buňkový systém internetu věcí (Cellular-IoT, CIoT) [29]:

- Rozšířené pokrytí uvnitř budov (o 20 dB vůči GPRS a datovou rychlostí 160 b/s)
- Podpora masivního počtu koncových zařízení určených pro komunikaci mezi stroji (MTC, Machine Type Communication): až 40 zařízení na domácnost (20 zařízení na člověka)
- Různá citlivost na zpoždění (od zaslání jednou za 24 h po každých 10 min)
- Nízká spotřeba (výdrž s baterií až 10 let při kapacitě baterie 10 Wh)

- Optimalizovaná architektura

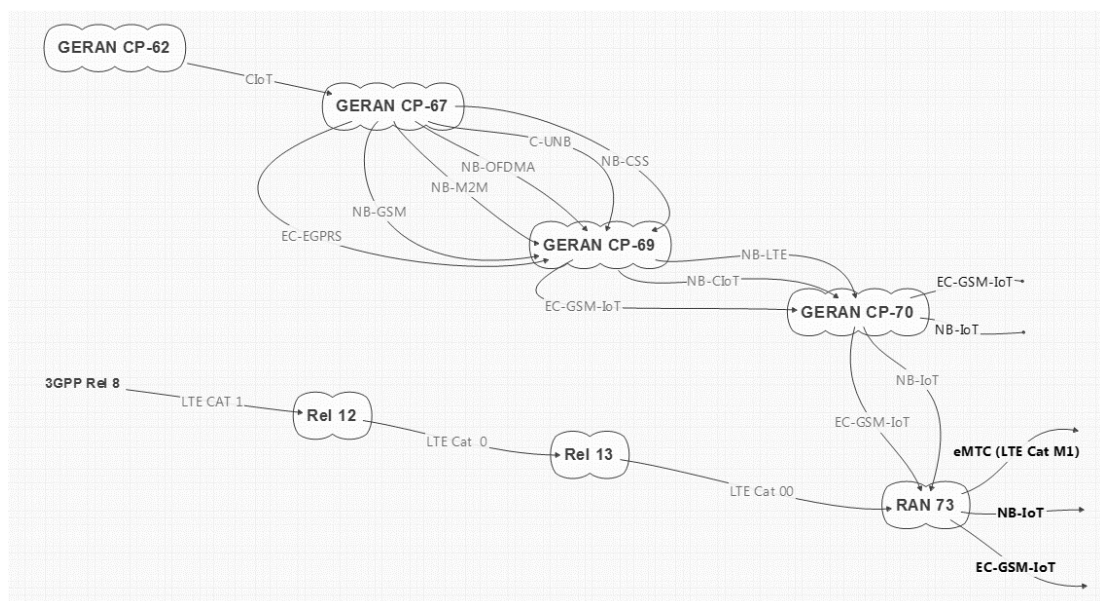
Na následujících plenárních zasedáních GERAN CP-67 (08/2015), GERAN CP-69 (09/2015), GERAN CP-70 (12/2015) byla posuzována řada návrhů bezdrátových technologií určených pro CIoT [36][37][38]. Přesněji se nejprve jednalo se o návrh a analýzu dvou variant evoluce GPRS technologie a čtyři úplně nové radikálně zjednodušené návrhy. Všechny návrhy měly společnou snahu o přepoužití licencované části spektra zakoupené mobilními operátory. Významného pokroku bylo dosaženo na zasedání GERAN CP-69 (02/2016), kde byly schváleny dvě z nových úzkopásmových řešení, splňující cíle stanovené GERAN CP-62, využívající techniky popsané v 3GPP TR 45.820 [39]. Prvním bylo NB-CIoT (Narrow Band Cellular Internet of Things), podporované především Huawei/Neul, Vodafone, T-Mobile a společností Qualcomm. Druhým NB-LTE (Narrow Band Long Term Evolution) podporované především společností Ericsson, Nokia a Intel. Dalším z důležitých kroků jednání bylo schválení EC-GSM-IoT (Extended Coverage GSM IoT) jako jediné technologie vhodné pro evoluci GSM a EGPRS (Enhanced General Packet Radio Service). Zároveň došlo ke změně předchozího pojmenování EC-EGPRS (Extended Coverage EGPRS) na EC-GSM-IoT [42].

V lednu 2016 byl oznámen zánik technické skupiny GERAN a přesun jejích pracovních podskupin (Working Group) WG1-WG3 do RAN TSG do podskupin RAN TSG WG5 a WG6, viz následující obrázek:



Obrázek 10: Zánik TSG GERAN [37]

Až na jednání CP-70 (05/2016) bylo stanoveno, že jediným řešením bude NB-IoT (NarrowBand IoT). Dále bylo rozhodnuto o zařazení NB-IoT jako funkcionality LTE, tudíž lze nyní NB-IoT nalézt ve specifikacích LTE/E-UTRAN řady 36.xxx (i přes fakt, že NB-IoT lze provozovat jak v LTE, tak ve 2G rádiové přístupové síti) [41]. Standardizace NB-IoT byla úspěšně dokončena v červnu 2016 zařazením cca 150 změnových požadavků do specifikací Release 13 (LTE Advanced Pro) [40]. Vývoj jsem shrnul do následujícího diagramu:



Obrázek 11: Vývoj standardizace IoT v 3GPP

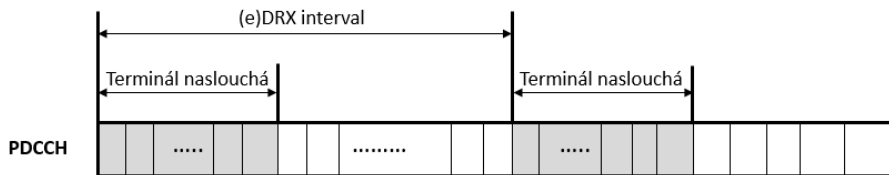
Specifika EC-GSM-IoT

Spotřeba energie je minimalizována díky následujícím funkcionalitám:

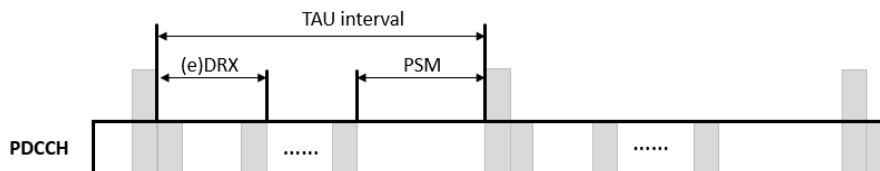
- Použití eDRX (extended Discontinuous Reception) - prodloužení intervalu, kdy terminál nenaslouchá na přijímací straně (není dekódován PDCCH (Physical Downlink Control Channel)) [46]. Interval byl prodloužen z 2560 ms na 5,12 s a 10,24 s v připojeném stavu (C-eDRX, Connected-eDRX) a přibližně 3 h v klidovém režimu (I-eDRX, Idle extended DRX) [43][44][45].
- Použití PSM (Power Saving Mode) [44] - umožňuje zařízení v RRC_Idle (Radio Resource Control Idle) periodicky spouštět proceduru aktualizace sledovací oblasti RAU/TAU (Routing/Tracking Area Update), přičemž v mezičase je zařízení nečinné v hlubokém spánku. V zařízení zároveň zůstává aktivní PDN konektivita.

Další důležité vlastnosti [47]:

- Výkonová bilance spoje:
 - o až 164 dB při efektivním vyzářeném výkonu 33 dBm
 - o až 154 dB při efektivním vyzářeném výkonu 23 dBm
- Přenosová rychlost:
 - o Při použití GMSK: 70-350 kb/s
 - o Při použití 8PSK: 240 kb/s
- Až 50 tis. zařízení v jedné buňce
- Šířka kanálu: 200 kHz na kanál, 2,4 MHz celkem
- Mód: HD-FDD (Half-Duplex Frequency Division Duplexing)
- Metoda mnohonásobného přístupu: TDMA (Time Division Multiple Access)/FDMA (Frequency Division Multiple Access)



(a) Znáornění intervalu (e)DRX

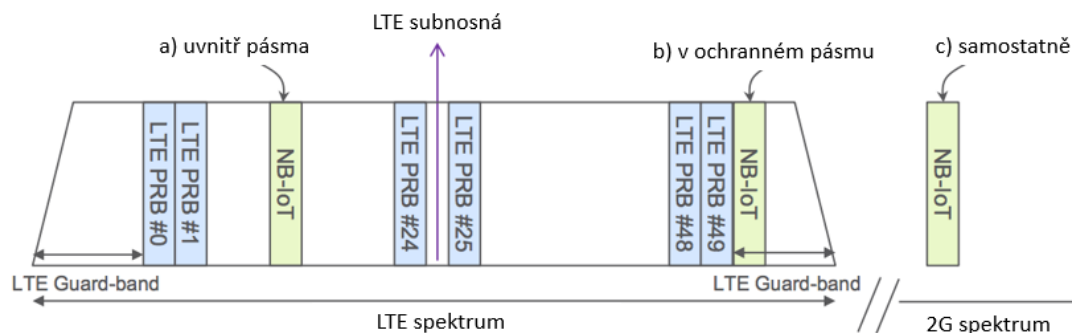


(b) Znáornění intervalu PSM

Obrázek 12: Optimalizace rádiového prostředí eDRX a PSM [44]

NB-IoT (LTE Cat NB1) [108],[109], [115]

Výhodou tohoto řešení je možnost být provozován v rádiovém pásmu 2G i LTE:



Obrázek 13: Spektrum NB-IoT

Příchozí směr:

- Metoda mnohonásobného přístupu: OFDMA (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access)
- V časové oblasti je přenos rozdělen do slotů s trváním 0,5 ms a každý dále na 7 OFDM symbolů. Data v kmitočtové oblasti jsou dále kódována na 12 sub-nosných s šířkou pásma 15 kHz [108]. Dva sloty (s délkou 0,5 ms) jsou

dále namapovány do 10 sub-rámců a ty do jednoho rámce s délkou trvání 10 ms

- Přenosová rychlost: až 250 kb/s

Odchozí směr:

- Metoda mnohonásobného přístupu: SC-FDMA (Single Carrier - Orthogonal Frequency-Division Multiple Access)
- V časové oblasti je přenos rozdělen do pěti slotů s trváním 0,5 ms a každý dále na 7 OFDM symbolů. Data v kmitočtové oblasti jsou ale dále kódována buď stejně jako v příchozím směru (12 sub-nosných), nebo na 48 sub-nosných s šířkou pásma 3,75 kHz a dobou trvání 2 ms
- Přenosová rychlost: 20/250 kb/s
- Vysílací výkon: 23 dBm

Použití eDRX[44]:

- C-eDRX: 5,12 s a 10,24 s
- I-eDRX: až cca. 3 h

eMTC (LTE Cat M1) [86] [110]

LTE MTC (Machine Type Communication) - základem je snaha přidat do LTE podporu pro MTC. První verze byla vydána v 3GPP Rel 8 na základě kategorie 1 (CAT 1). Tato verze ale ještě nespĺňovala zvýšené nároky na LPWAN sítě a až 3GPP Rel 12 a nová kategorie Cat 0 umožňuje zlevnit KZ např. opuštěním techniky MIMO a snížením přenosové rychlosti (na 5 Mb/s). Další výrazné zjednodušení přineslo 3GPP Rel 13, kde došlo k dalšímu ponížení přenosové rychlosti (1 Mb/s) zavedením polovičního duplexu a možnost snížení vysílacího výkonu na 20 dBm. Zařízení může být provozováno pouze v LTE pásmu, viz Obrázek 13 varianta a.

Příchozí směr:

- Metoda mnohonásobného přístupu: OFDMA, detaily viz NB-IoT
- Přenosová rychlost: 1 Mb/s

Odchozí směr:

- Metoda mnohonásobného přístupu: SC-FDMA (Single Carrier - Orthogonal Frequency-Division Multiple Access)
- V časové oblasti je přenos rozdělen opět do slotů s trváním 0,5ms a každý dále na 7 OFDM symbolů. Data v kmitočtové oblasti jsou ale dále kódována stejně jako v příchozím směru (12 sub-nosných)
- Přenosová rychlost: 1 Mb/s
- Vysílací výkon: 23 dBm

Použití eDRX:

- o C-eDRX: 5,12 s a 10,24 s
- o I-eDRX: cca. 44 min

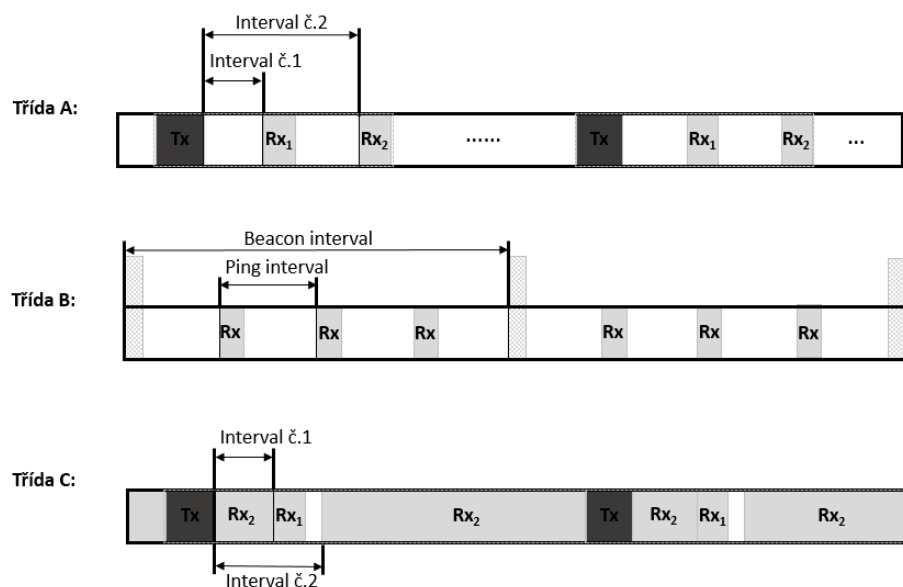
4.1.4 LoRa aliance [49] [59]

Tato LPWAN technologie byla navržena firmou Semtech a je nyní dále rozvíjena a standardizována neziskovou organizací LoRa Alliance [53]. Jádrem technologie tvoří dvě základní části – LoRa modulace a LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) síťový protokol [49]. Technologie je určena pro IoT aplikace v ISM pásmu. Protokol LoRaWAN umožňuje transparentní a zabezpečený přenos (algoritmus AES a 128 b klíč) dat mezi koncovým zařízením a LoRa Gateway na principu hvězdicové jednoskokové topologie [49][60]. Protokol umožňuje zvolit pro každé koncové zařízení jinou datovou rychlost (ADR, Adaptive Data Rate) i vysílací výkon a maximalizovat tak výdrž baterií daného zařízení [49]. Datovou rychlost lze zvolit v rozmezí 0,3 – 50 kb/s. V LoRa zařízení může aplikace nastavit následující přenosové parametry [59]:

Třídy koncových zařízení:

- **Třída A:** Obousměrná komunikace, kdy zařízení může v libovolném čase začít zprávu vysílat (na principu metody stochastického mnohonásobného přístupu prosté ALOHA [53]), a tím zároveň časově definuje dva intervaly, kdy bude zařízení naslouchat. Tuto třídu musejí splnit všechna zařízení.

- **Třída B (Beacon):** Třída s nepovinnou implementací, kdy zařízení může komunikovat opět obousměrně, ale kromě použití mechanismu třídy A musí navíc zařízení v předem definovaných časových oknech naslouchat (CSL, Coordinated Sampled Listening). Tato okna jsou synchronizována použitím krátkých synchronizačních rámců tzv. Beacon frames
- **Třída C (Continuous):** Stejně jako u třídy B její implementace není povinná, zařízení se chová obdobně jako u třídy A, ale zařízení naslouchá vždy, když právě nevysílá.



Obrázek 14: Třídy koncových zařízení LoRaWAN

Další důležité vlastnosti:

- Vysílací výkon: koncové zařízení může být nastaveno v rozsahu -4 dBm až 20 dBm s 1 dB krokem, z důvodu regulatorních požadavků je rozsah většinou limitován na 2 až 14 dBm (parametr ovlivňující přímo úměrně dosažitelnou vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem a nepřímo úměrný výdrž baterie)
- Frekvence: centrální frekvence v rozmezí 137-1020 MHz s krokem 61 Hz
- Činitel rozprostření (SF, Spreading Factor): indikace, kolik bitů je zakódováno do každého symbolu, hodnoty v rozmezí 6-12 (přímo

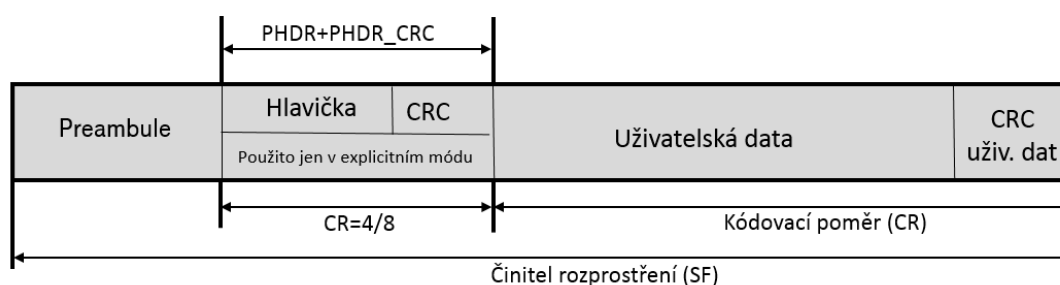
úměrný SNR, tedy i dosažitelné vzdálenosti, ale nepřímo úměrný přenosové rychlosti a výdrži baterie)

- Šířka pásma (BW, Bandwidth): může být nastavena v rozmezí 7,8-500 kHz, typicky však 125, 250 nebo 500 kHz (parametr přímo úměrný datové rychlosti a odolnosti vůči interferencím, nepřímo úměrný citlivosti)
- Kódovací poměr (CR, Coding Rate): množství nadbytečných dat určených pro dopřednou korekci chyb (FEC, Forward Error Correction), vyšší hodnota představuje lepší odolnost vůči interferencím, ale prodlužuje dobu vysílání zprávy, viz následující tabulka:

Tabulka 1: Hodnoty kódovacích poměrů při SF=10 a BW=250kHz

CR	Čas nutný k odeslání zprávy [ms]
1 (4/5)	123,9
2 (4/6)	132,1
4 (4/8)	148,5

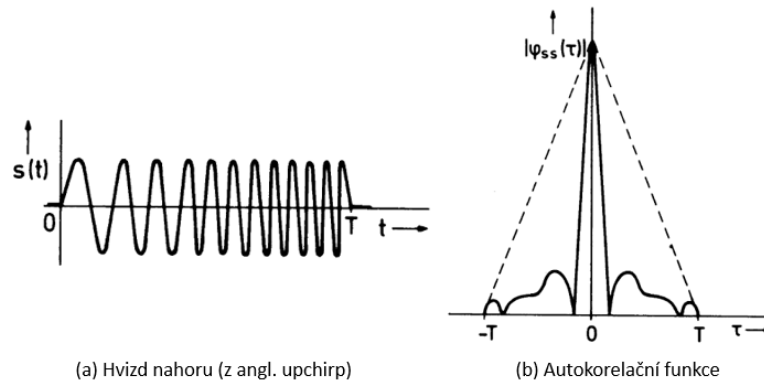
Struktura LoRa paketu [52]: preamble (6-65535 dymbolů), volitelná fyzická hlavička (PHDR, LoRa physical header) a 16 b CRC hlavička indikující, zda má být použito CRC uživ. dat (PHDR_CRC, LoRa fyzická Cyclic Redundancy Check hlavička), uživatelská data (1-255 B), volitelná 16 b CRC uživ. dat [61].



Obrázek 15: Struktura LoRaWAN paketu koncového zařízení [60]

Modulace – specifikace umožňuje klíčování frekvenčním posuvem (FSK, Frequency-shift Keying), ale pro snížení chybovosti při větších vzdálenostech je

použita technika rozprostření signálu použitím chirp⁶ modulace (CSS, Chirp Spread Spectrum) [60]. Tato lineární frekvenční modulace používá binární klíčování a signál s rostoucí frekvencí reprezentující symbol 1 a signál s klesající frekvencí symbol -1 (viz následující obrázek).



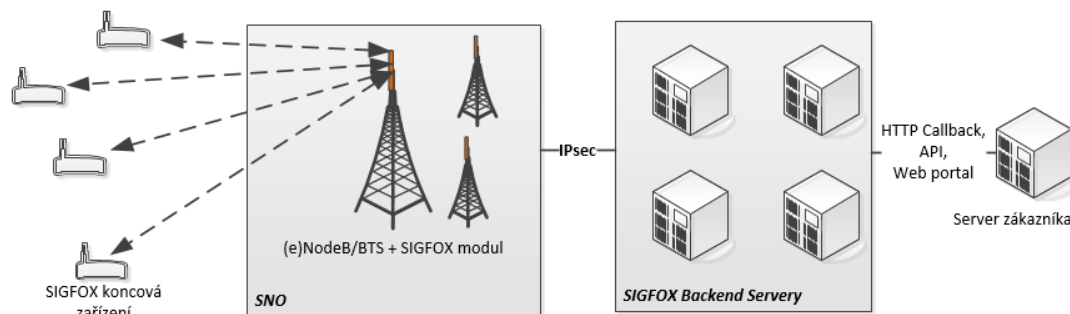
Obrázek 16: Ukázka chirp signálu a jeho autokorelační funkce [57]

4.1.5 SIGFOX

Společnost SIGFOX, francouzský technologický startup, byla založena v roce 2009. Ačkoliv je tato technologie považována za proprietární, firma úzce spolupracuje na vytváření LTN (z anglického Low Throughput Networks) standardů definovaných ETSI. Lze proto očekávat i významnou podobnost s budoucím standardizovaným řešením [4]. Za úspěchem SIGFOX technologie může být její výjimečný obchodní model [5]. Síť je postavená na jedno skokové hvězdicové topologii sestávající z koncových zařízení, základnových stanic (tzv. Gateway/base station) a z SIGFOX back-endu. Pokrytí států signálem je plánováno za pomoci tzv. národních SIGFOX operátorů (z anglického SIGFOX Network Operator (SNO)). Umístění SIGFOX základnových stanic je plánováno

⁶ Protože v době psaní práce neexistoval český ekvivalent, navrhuji pro překlad anglického termínu „Chirp“ použít termín „hvizd“. Při překladu jsem vycházel z historie, kdy prof. Hüttmann v roce 1940 přihlásil patent využívající „Chirp“ pulzy pro pulsní radar inspirovaný dorozumivací technikou používanou delfíny, netopýry a velrybami [56][57]. Další možný překlad nastínil ve své práci Hausner (2016), který termín překládá jako „čerpovou“ modulaci [55]

na věže s vysílači mobilních operátorů [6]. Pro vybudování celoplošné sítě ve Francii řádově stačilo 1000 základnových stanic za cenu 4 miliony USD, což je přibližně 100x méně, než obdobná síť na bázi GSM/CDMA [73].



Obrázek 17: Síťová architektura

Technologie

SIGFOX protokol využívá bezlicenční pásmo ISM (Industry, Science and Medicine). V Evropě je využíváno pásmo 868 MHz a v USA 902 MHz. Technologie využívá úzkopásmového přenosu signálu (UNB, Ultra Narrow Band). Jednou z výhod UNB technologií je teoretická vysoká citlivost umožňující větší dosah než standartní technologie, což s sebou ale nese i zvýšené požadavky na přístupové metody díky velkému počtu zařízení v jedné buňce. Díky použití úzkého signálu je i hodnota šumu velice nízká, přibližně -150 dBm při 290 K a výkonová bilance spoje může tedy dosáhnout až 160 dB [7][8].

Protokol aktuálně existuje ve dvou základních verzích. Ta první pro uplink používá 48 kHz makro kanál na 868,2 MHz. Druhá verze, z roku 2014, již využívá 192 kHz makro kanál na frekvenci 868,13 MHz [9]. Česká republika jako člen European Conference of Postal & Telecommunications Administrations (CEPT) alokuje tuto část frekvencí pro zařízení s krátkým dosahem (z anglického short range devices, SRD), přesněji pásmo h1 a h3, viz Tabulka 2 [19].

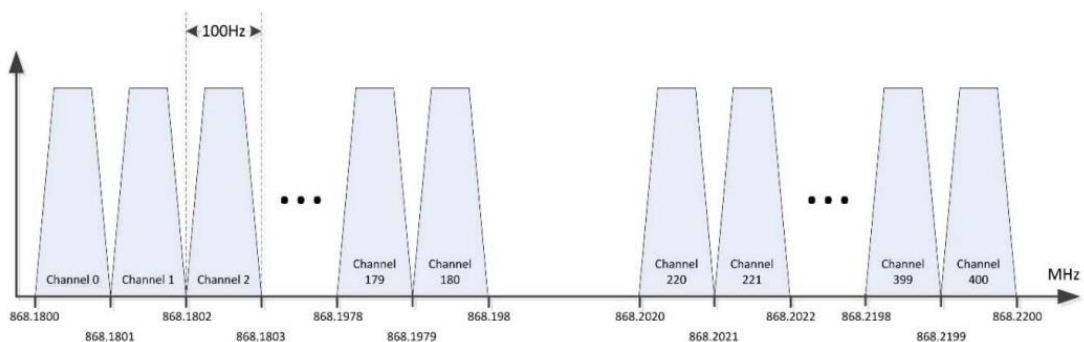
Tabulka 2: Frekvenční regulace v pásmu 868MHz dle ČTÚ

Označení	Kmitočtové pásmo	Vyzářený výkon,	Klíčovací poměr [%]
----------	------------------	-----------------	---------------------

	[MHz]	popř. intenzita magnetického pole [mW]	
h	863,0–870,0	25	< 0,1 nebo použití LBT, AFA
h1	868,0–868,6	25	< 1 nebo použití LBT
h2	868,7–869,2	25	< 0,1 nebo použití LBT
h3	869,4–869,65	500	< 10 nebo použití LBT
h4	869,7–870,0	25	
h5	869,7–870,0	25	

Protože SIGFOX nepoužívá technologii LBT (Listen Before Talk – vysílání pouze po vyžádání na základě příjmu), platí pro technologii omezený klíčovací poměr 1 % s maximálním vyzářeným výkonem (ERP, Effective Radiated Power) 500 mW (27 dBm) pro downlink a 25 mW (14 dBm) pro uplink [11][12].

Šířka kanálu je 100 Hz, k dispozici je tedy teoreticky 480 slotů pro první a až 1920 slotů pro druhou verzi. Autoři Margelis et al. však zároveň pro první verzi uvádějí, že kanály 181-219 jsou rezervovány [22]:



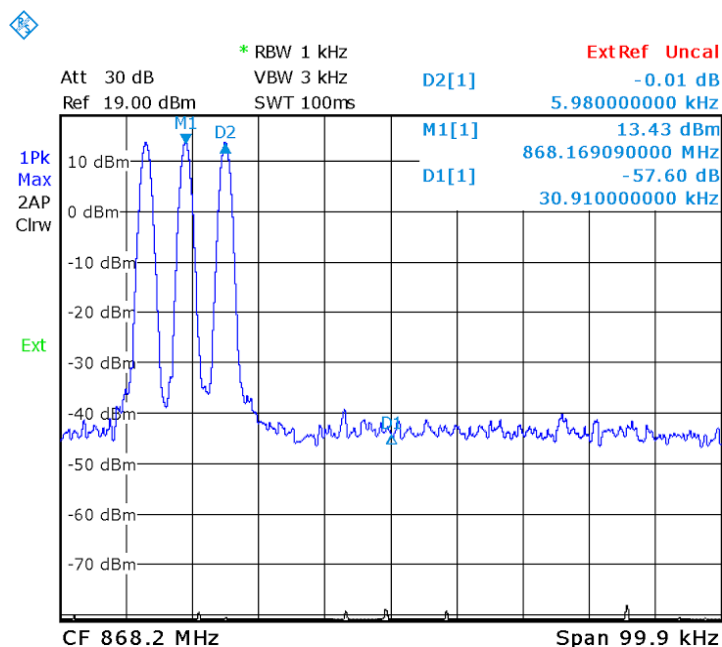
Obrázek 18: Frekvenční alokace kanálů technologie SIGFOX [22]

Zaslání zprávy může trvat řadu sekund podle počtu opakování na daných sub-kanálech. Pro přednastavené schéma trojího opakování trvá vyslání jedné zprávy přibližně 6 s (3 x 2 s zaslání). Podle Vzorce č. 1 tedy frekvenční regulace umožňuje zaslání maximálně 144 zpráv/zařízení/den.

$$n_{max} = \frac{t_d}{t_e} \quad (1)$$

kde n_{\max} [počet zpráv/den] je maximální počet zpráv, t_d [s] je počet sekund v jednom dni a t_e [s] je čas potřebný pro zaslání jedné zprávy.

Ověření schéma trojího opakování bylo provedeno v laboratoři ČVUT FEL na frekvenčním analyzátoru:



Obrázek 19: Naměřená frekvenční alokace kanálů technologie SIGFOX

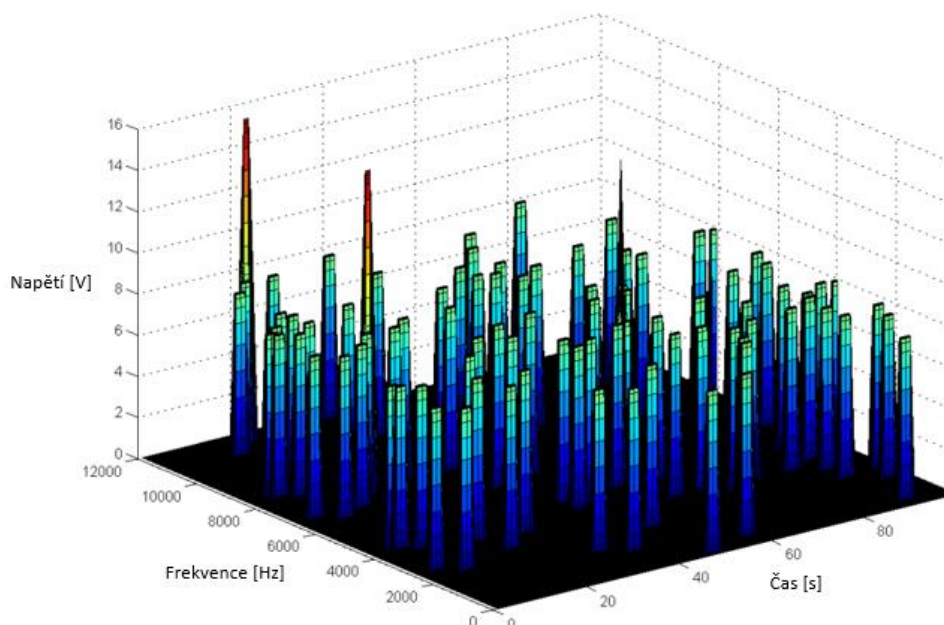
Pro výrobce zařízení je důležitý certifikační proces, který je povinný pro jednotlivá SIGFOX zařízení podle hodnoty efektivního vyzářeného výkonu viz Tabulka 3.

Tabulka 3: SIGFOX Certifikační třídy

Třída	ou	iu	2u	3u
ERP [dBm]	14 > P > 12	13 > P > 7	7 > P > 0	P < 0

Jak uvádí Do et al. [111], díky zúžené frekvenční šířce okupovaného pásma lze při dané cílené chybovosti dosáhnout na přijímací straně menšího příspěvku šumu. Modulační technikou použitou pro vzestupný směr (uplink) je diferenciální klíčování fázovým zdvihem DBPSK (Differential Binary Phase-Shift Keying), pro sestupný směr (downlink) pak Gaussovo klíčování frekvenčním

zdvihem (GFSK, Gaussian Frequency-Shift Keying) [23]. Z důvodu dodržení regulatorního omezení vysílacího výkonu a vzhledem k požadavku na maximalizaci dosahu byla přenosová rychlost omezena na 100 b/s pro vzestupný směr a pro nově doplněný sestupný směr až 600 b/s [23]. Ve svém článku Margelis et al [22] poukazuje na to, že SIGFOX umožňuje demodulovat i extrémně slabý signál -142 dBm a vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem tak může být i 50 km [23][23]. Pro řízení mnohonásobného přístupu k fyzické vrstvě byl zvolen multiplex s náhodným frekvenčním i časovým dělením (R-FTDMA, Random-Frequency and Time Division Multiple Access), kde vysílací strana k médiu přistupuje náhodně v čase a pseudonáhodně ve frekvenci a to bez řízení či naslouchání. Přístup je zobrazen na následujícím obrázku zobrazujícím vysílání 100 zařízení [76].



Obrázek 20: Příklad R-FTDMA [78]

4.2 Dílčí zhodnocení LPWAN technologií

Z přehledu vývoje mobilních sítí a internetu věcí je patrné, že LPWAN a IoT obecně mají vyplnit niku pro enormní počet nových použití [110] [86] [102] [98]. Okolo 60 % IoT zařízení je dnes založených na buňkových systémech používá mobilní sítě 2. generace (jako např. GPRS), které nesplňují žádné z hlavních

kritérií LPWAN. Odhady uvádějí, že tato nika dosáhne do roku 2020 na deset procent z celkového počtu 25-50 bilionů zařízení určených pro komunikaci mezi stroji (MTC, Machine Type Communication) a až 40 nových zařízení na domácnost (průměrně 20 zařízení na osobu)[1][89][91][90][100]. Jak uvádí Dufrene et al., při použití v tzv. chytrém městě je předpoklad 50.000 zařízení, většinou stacionárních, uvnitř jedné buňky s poloměrem 1km [84]. Komerční budovy mají být v roce 2017 největším spotřebitelem IoT a v roce 2018 mají vedení převzít chytré domácnosti. S podporou EU má být do roku 2020 nahrazeno 80% elektroměrů za chytré elektroměry jako součást inteligentní silové elektrické a komunikační sítě (z angl. Smart grid) [34].

Z analýzy LPWAN technologií vyplývá velká heterogenita technologií i metod k dosažení společných cílů vytčených v Kap. 1.1.1, tedy maximalizace dosahu technologie při minimální složitosti a energetických nárocích KZ. Z analýzy je dále patrné zpoždění standardizovaných řešení za komerčními technologiemi.

Organizace 3GPP nicméně v krátké době (od prosince 2015 do května 2016) vybrala tři možná řešení, která jsou součástí analýzy a dosahují jak cílů LPWAN, tak obdobných teoretických hodnot jako konkurenční řešení. Opatření navrhovaná 3GPP k dosažení těchto cílů se dají shrnout takto:

- prodloužení cyklu, kdy zařízení nenaslouchá na rádiové části (parametr eDRX). KZ může požádat o použití tohoto cyklu během prvotního přihlášení do sítě (procedura Attach) či během procedur RAU/TAU. Shrnutí dovolených hodnot eDRX je uvedeno v následující tabulce.

Tabulka 4: Hodnoty eDRX cyklu v sekundách

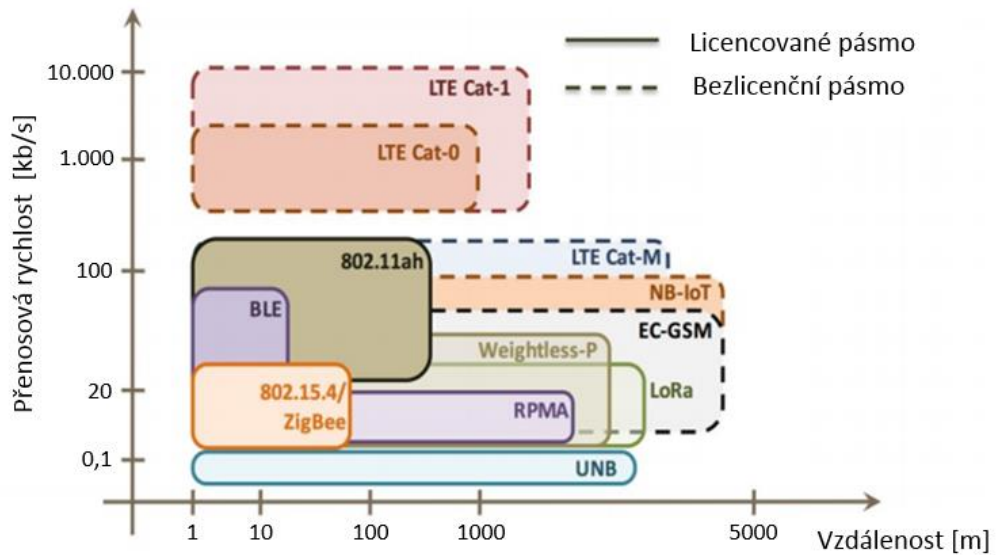
LTE/eMTC [s]	NB-IoT [s]	EC-GSM-IoT [s]
~5,12	20,48	1,88
~10,24	40,96	3,76
20,48	81,92	7,53
40,96	163,84	12,24

81,92	327,68	24,48
163,84	655,36	48,96
327,68	1310,72	97,92
655,36	2621,44	195,84
1310,72	5242,88	391,68
2621,44	10485,76	783,36
		1566,72
		3133,44

- prodloužení výdrže baterie umožňuje dále použití PSM, tedy stavu, kdy se KZ jeví jako vypnuté tzn. zařízení je sice z pohledu koncových služeb nedostupné, ale zároveň zůstává zaregistrované v síti [88]. Maximální hodnota parametru je omezena na 413 dní.
- Dalším aspektem je optimalizace přístupové části sítě, kde je kromě zjednodušení jednotlivých procedur zjednodušena i po architektonické stránce [140]

Technologie SIGFOX i LoRaWAN jsou příkladem z nejčastěji citovaného souboru komerčních řešení (mezi dalšími je například i český IQRF). LoRaWAN je unikátním řešením především díky využití patentově chráněné modulace, která signál rozprostírá do celého vysílacího kanálu, ale na rozdíl od tradičních řešení tak dělá lineární změnou (viz Obrázek 16). Tento přístup tak umožňuje snížit náklady na lokální oscilátor díky menším nárokům na stabilitu kmitočtu a minimalizuje vliv Dopplerova jevu. Protokol také definuje tři třídy režimu provozu. Jednou z největších limitací protokolu je jeho lokální nasazení v rámci jednotlivých firemních řešení. Pokud ale uživatel předpokládá použití napříč rozsáhlým územím, např. mezi více státy, musí zvolit jiné řešení. Jediným dnes dostupným řešením pokrývajícím desítky států [23] tak je protokol SIGFOX. Z teoretického rozboru vyplývá velký potenciál protokolu stát se zároveň plnohodnotným standardizovaným řešením pro LPWAN sítě [89][90][91]. Ač v současné době probíhá výstavba sítě v řadě států, SIGFOX technologie díky svému kontinuálnímu vývoji a částečné uzavřenosti doposud nebyla uspokojivě prozkoumána či optimalizována.

Shrnutí hlavních parametrů výše zmíněných protokolů je součástí Tabulky č.5. Grafická ilustrace porovnávající typickou oblast pokrytí daných LPWAN technologií:



Obrázek 21: Detailní pohled na technologie a jejich dosah [135]

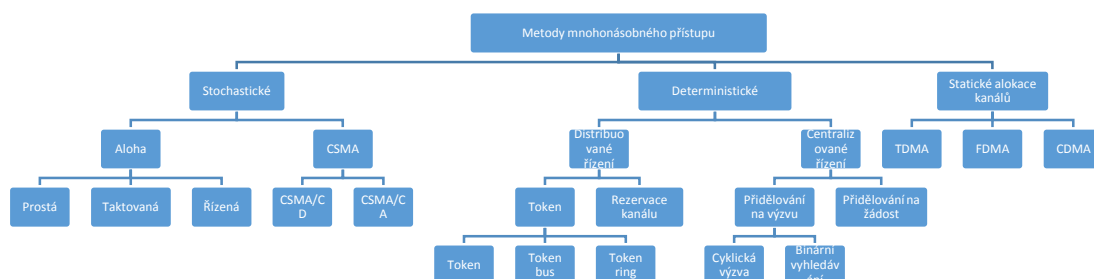
Tabulka 5: Výsledné zhodnocení technologií

	3GPP			SIGFOX	LoRa Aliance
	EC-GSM-IoT	NB-IoT (Kategorie NB1)	eMTC (Kategorie M1)	SIGFOX	LoRaWAN
	Licencované	Licencované	Licencované	ISM <1GHz	ISM <1GHz
Pásmo					
Šířka pásma [kHz]	200	180	1400	192	až 500
Vysílací výkon UL/DL [dBm]	23,33	23	20/23	až 14	až 14/27
Přen. rych. příchozí směr [kb/s]	až 350	170	1000	0,6	0,3- 50
Přen. rych. odchozí směr [kb/s]	10	až 250	1000	0,1	0,3- 50
Link budget [dB]	154, 164	164	155,7	160	154/162
Přístup k médiu	TDMA	FDMA, SC-FDMA/OFDMA	SC-FDMA/OFDMA	UNB/R-FTDMA	DSSS/TDMA
Citlivost BTS/KZ [- dBm]	164	164	164	160	157
Délka zprávy [s]				2	40m - 1,2
Zpráva UL/DL [B]				12/8	250
Max. počet zpráv/den	neomezeno	neomezeno	neomezeno	144/4	neomezeno
MAC				prostá ALOHA	prostá ALOHA
Modulace UL/DL	GMSK	BPSK,QPSK,8PSK,(16QAM)	QPSK,16QAM,64QAM	UNB DBPSK/GFSK	LoRa CSS
Kanál UL/DL [Hz]		3500,15000/15000	3500,15000/15000	100	125000
Fyzická vrstva				UNB	CSS

5 Rozbor řešení

LPWAN protokoly cílí na enormní počet zařízení v jedné buňce, nízké implementační náklady a zvýšený dosah zásadně mění požadavky na rádiové rozhraní tak jak ho známe z klasických mobilních sítí [102][115]. Z analýzy současného stavu (Kapitola č.o) vyplývá velká roztržitost strategií, jak se s těmito cíli vyrovnat. Komerční řešení se zaměřují především na snahu o snížení implementačních nákladů použitím bezlicenčního pásma (ISM) [22][20][49]. Jednotlivá LPWAN řešení implementují i celé spektrum přístupových metod (viz Kap 4.2). V této kapitole se zaměřuji na zhodnocení existujících metod, určuji a hodnotím možné směry optimalizace s následným návrhem pro optimalizaci zkoumaného protokolu SIGFOX.

Protokoly a metody řídicí přístup ke sdílenému médiumu bývají předmětem řady studií a výzkumů, protože rádiové prostředí je úzkým hrdlem přenosového řetězce[67][70]. Řízení přístupu k médiumu (MAC, Medium Access Control) jako podvrstva druhé linkové (spojové) vrstvy OSI modelu umožňuje určit kdo, kdy a jak může přistoupit k tomuto médiumu[70]. Metody mnohonásobného přístupu lze rozdělit podle řízení na deterministické (řízené), metody se stochastickým přístupem k médiumu a metody se statickou alokací kanálů:



Obrázek 22: Analýza přístupových metod

Nedeterministické/stochastické metody

Aloha/CSMA

Jedná se o nejstarší z metod mnohonásobného přístupu (1970, Universita Hawaii). Použitím metody prosté Aloha lze dosáhnout využití kapacity kanálu jen 18,4 % [54]. Jak poukazuje Laya et al., ani většina z modifikací není optimální pro použití v sítích internetu věcí díky velkému zatížení [70]. Řízená ALOHA dosahuje využití až 36,8 %, tuto metodu ovšem protokol SIGFOX na rozdíl od technologie NB-IoT neimplementuje [54]. Pokud má zařízení po úspěšném odvysílání prioritní právo pokračovat ve vysílání, jedná se o tzv. Rezervační ALOHA, a jak poukazuje Lam, ta je vhodná spíše pro satelitní spoje [152].

CSMA-CA (Carrier-sense Multiple Access with Collision Avoidance)

Vysílající v tomto případě odesílá požadavek na komunikaci (RTS, Request to Send), rámec NAV (Network Allocation Vector) upozorní ostatní uzly o úmyslu vysílání, adresát po přijetí RTS a NAV odpovídá zasláním CTS (Clear to Send) a vysílání začíná, potvrzeno je rámcem ACK (Acknowledge). Díky konečné rychlosti šíření elmag. vln tak kolize může nastat ale protokol dále pokračuje do konce rámce (na rozdíl od CSMA-CD, který při vysílání současně kontroluje médium na výskyt kolizí). Tento protokol má horší propustnost než CSMA-CD díky tomu, že pokračuje ve vysílání i přes nastalou kolizi na druhé straně ale při vyšším stupni zatížení sítě vykazuje až 3x vyšší propustnost než ALOHA nebo řízená ALOHA [115].

Účinnost metody klesá s velikostí kolizní domény, díky konečné rychlosti šíření elmag. vlny prostorem. Velký útlum přenosové trasy navíc může způsobit, že KZ daný signál nedetekuje [154]. Proto je tato metoda u LPWAN sítí neefektivní.

Důvodem použití pouze velice jednoduchého algoritmu/metody je použití tzv. nízkonákladových⁷ zařízení obsahujících omezené zdroje (především napěťové, paměťové a výpočetní), ale může tím být i použití v komplikovaném prostředí (požadavek na extrémní prostor na uložení, na terénní dostupnost atd.) [67][69].

Deterministické metody

Typickým představitelem je např. token bus, což je koncept kde vysílá pouze stanice, která vlastní speciální token/pešek. Token si stanice cyklicky předávají, čímž je zajištěno rovnoměrné rozdělení vysílacího času. U hvězdicových topologií se používá tzv. logický kruh. Stanice zná svou adresu a adresu následovníka, token má určitou platnost, pak se musí předat. Výhoda metody spočívá v odolnosti proti zahlcení velkým počtem zařízení, je ale složitá na počáteční evaluaci posloupnosti či rekonfigurace. Vhodná je pouze do sítí s definovaným počtem zařízení. V senzorových sítích je používána metoda s řízeným přístupem, která přináší vyšší spolehlivost přenosu. Pro většinu aplikací v prostředí IoT však není vhodná díky heterogenitě požadavků IoT aplikací pokrývajících rozdílnou citlivost na zpoždění, vzhledem k velikosti přenášené informace i rozdílné frekvenci komunikace (komunikace je často iniciována nastalou událostí) a především pak vzhledem ke koexistenci až desetitisíců zařízení⁸ v jedné buňce [70][72].

⁷ Člupek ve své disertační práci zařízení nazývá jako „hardwarově omezená“ zařízení [71]

⁸ Jak uvádí SNO síť Sigfox v České republice společnost SimpleCell s.r.o., velikost jedné buňky v husté městské zástavbě je předpokládána o průměru 3-5 km [23]. Pokud při výpočtu uvažujeme cílený počet zařízení očekávaný 3GPP na jednu osobu [29] a průměrné hustotě zalidnění v České republice 134 obyvatel/km² [68] odpovídá počet zařízení v jedné buňce cca. 76.000 zařízení, toto řádově odpovídá informaci SNO, že jedna BTS je schopna přijmout až 9 milionů zpráv denně, tedy cca. 62.000 zařízení [23].

Příkladem kombinace předešlých metod je studované R-FTDMA (Random-Frequency and Time Division Multiple Access), kde vysílací strana k médiu přistupuje náhodně v čase a pseudonáhodně ve frekvenci.

Metody rozprostřeného pásma [151][55]

Následující metody se vyznačují tím, že energie signálu se při přenosu nachází v pásmu širším než je nezbytně nutné. Samotné rozprostření vzniká modulací přenášených dat nezávislým signálem. Dále jsou uvedeny základní metody rozprostření:

- Rozprostření s přímou posloupností (DSS, Direct Sequence Spread Spectrum), někdy též nazývaná CDMA (Code Division Multiple Access) [40]. Tato metoda využívá pro zvýšení odolnosti proti rušení zavedení redundance. Signál přenášející užitečnou informaci je přenásoben na vyšší frekvenci pseudonáhodnou sekvencí -1 a 1 , tato sekvence je poté namodulována na nosný signál. Zvýšením délky této pseudonáhodné sekvence dosáhneme mírného snížení citlivosti na přijímací straně, ale výrazného zvýšení odolnosti. Výhodou je tedy odolnost proti rušení a odposlechu, nevýhodou může být výpočetní náročnost a nutnost zasynchronizování přijímače, autor [155] navíc poukazuje na nutnost kontroly vysílacího výkonu díky velké zranitelnosti citlivých přijímačů vůči silným signálům které je mohou zahltnit
- Rozprostření s frekvenčním hoppingem (FHSS, Frequency-Hopping Spread Spectrum), kdy se signál v daném okamžiku vyskytuje pouze v jenom úzkém pásmu. Tyto systémy jsou principiálně odolné vůči úzkopásmovému rušení díky zarušení pouze malého počtu z nich. Frekvence nosné se mění v závislosti na pseudonáhodné posloupnosti. Podle počtu vyslaných bitů přenesených v jednom skoku metodu dělíme na rychlý hopping (FFHSS, Fast Frequency Hopping Spread Spectrum), v případě že na jeden bit připadá více fr. skoků, a na pomalý hopping

(SFHSS, Slow Frequency Hopping Spread Spectrum) kde tomu tak není vyšší odolnost.

- Rozprostření pomocí chirp modulace (CSS, Chirp Spread Spectrum) je součástí analýzy protokolu LoRaWAN, který tuto metodu implementuje (Kap. 4.1.4).

Shrnutí metod u jednotlivých technologií je uvedeno v následující tabulce:

Tabulka 6: Používané přístupové metody [70]

Metoda	Technologie
Prostá ALOHA	SIGFOX ⁹ , LoRa
Taktovaná ALOHA	RFID, RACH v LTE, NB-IoT, Weightless
Neřízené CSMA/CA	ZigBee, WiFi
Taktované CSMA/CA	ZigBee
FDMA	WiFi, LTE, NB-IoT, Weightless
TDMA	Bluetooth LE, Weightless
CDMA	NB-IoT, LoRa
FHSS	Bluetooth LE, Weightless
CSS	ZigBee, LoRa

5.1 Směr výzkumu ostatních autorů

Ve většině případů se autoři zaměřují na konkurenční technologii LoRa. Jako například Wendt et al. [145], který zkoumá použití LPWAN řešení pro kritické aplikace a vyzdvihuje nutnost mít u protokolu volnost ve výběru rádiových parametrů a metod. Experimentální studie analyzují stejnou technologii za účelem stanovení útlumového modelu a limitů vzdálenosti pokrytí [149][150].

⁹ S omezením limitujícím počet zpráv na 144 za den na dle regulace pro 868MHz ČTÚ/ETSI [19]

Margelis et al. poskytuje teoretické srovnání technologie SIGFOX s konkurenčními řešeními [4] a dále zmiňuje jako hlavní směry pro IoT - elektronické zdravotnictví(e-HealthCare) a chytré měření (SmartMetering). Dále je diskutováno zabezpečení a struktura SIGFOX paketu. Koexistence více LPWAN technologií ve stejném frekvenčním pásmu je analyzována Krupkou et al. [75] s identifikací frekvenčního překryvu technologií SIGFOX, LoRa a IQRF na frekvenci 868,2 MHz. Také poukazují na největší pravděpodobnost kolize protokolu v tomto pásmu s 2x vyšším výskytem na rádiovém kanálu vůči technologii LoRa a 7x vyšší vůči IQRF. Nolan et al. uvádí omezenost zpětného kanálu technologie SIGFOX a demonstruje úspěšný test protokolu na vzdálenost 25km [150].

Na základě rozboru dostupných zdrojů lze tedy konstatovat, že tato práce je jedna z prvních (ne-li úplně první) pracující nejen s reálnými daty naměřenými pro protokol SIGFOX, ale zároveň se zabývá dalšími směry a aspekty vylepšení protokolu.

5.2 Teoretické směry optimalizace

Z teoretické analýzy protokolu v Kapitole 4.1.5 vyplývá, že protokol nepoužívá žádnou z výše popsaných metod pro detekci (CD) ani předcházení kolizím nasloucháním (CA). Mechanismus použitý protokolem na zvýšení pravděpodobnosti doručení je založený na jednoduchém principu minimalizace kolizí dvojího druhu:

- pseudonáhodný výběr frekvence před začátkem vysílání,
- zaslání stejné zprávy 3x.

Tento fakt spolu s neexistencí nejčastějšího mechanismu - zpětného kanálu - pro potvrzení doručení zprávy vnáší řadu pochybností nad účelností použití protokolu minimálně pro aplikace vyžadující vysokou míru spolehlivosti doručení, jako jsou například aplikace v krizových situacích, jmenujme implantáty a senzory pro monitoring životních funkcí nemocných lidí, či použití pro požární hlásiče [4][119][120][121].

Na základě kombinace hlavních cílů LPWAN technologií, výsledků experimentálních měření i směru výzkumu jiných autorů jsou definovány následující oblasti a směry pro teoretickou optimalizaci protokolu.

5.2.1 Adaptivní chování protokolu

Např. Bardyn et al. pro zvýšení dostupnosti a propustnosti přístupové sítě doporučuje implementaci adaptivních mechanismů pro řízení přenosové rychlosti (ADR) či vysílacího výkonu (TPC, Transmit Power Control)[155][157]. Tímto nejjednodušším mechanismem pro automatické zvýšení/snížení hodnoty odstupů signálu od šumu (SNR) lze zvýšit/snížit úroveň interferencí jednotlivých zařízení. Hodnota takto upraveného výkonu ERP musí stále splnit regulační požadavky na dané pásmo (v případě SIGFOX je to 14Bm) [19]. SIGFOX zařízení dělí do jednotlivých certifikačních tříd (ou-3u), hodnota ale zůstává po dobu životnosti jednotky konstantní.

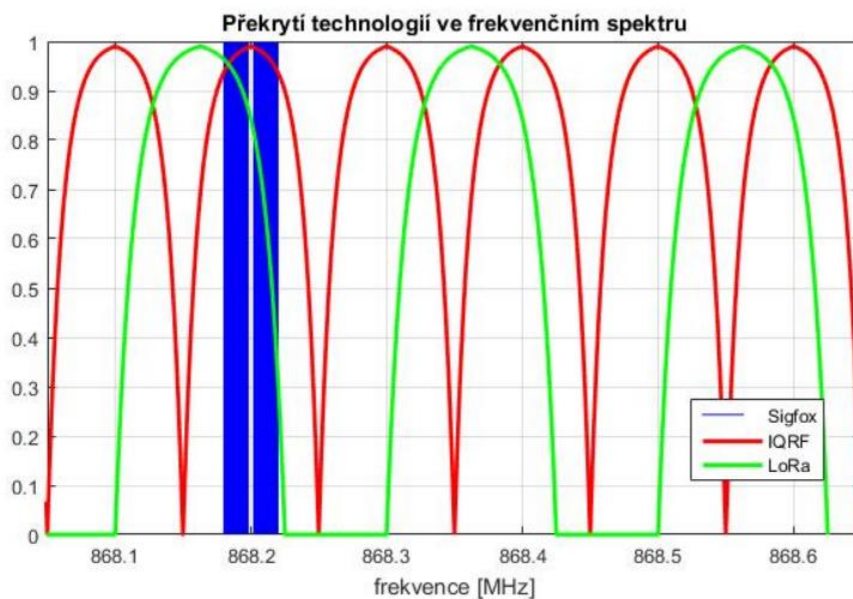
Touto cestou by pak bylo teoreticky možné např. vydefinovat určité 2 bity ve zprávě, ve kterých by na základě hodnoty RSSI BTS indikovala, zda vysílací výkon zvýšit či snížit, a tím výkon v KZ adaptivně přizpůsobovala. Návrh samozřejmě počítá s existencí zpětného kanálu sloužícího pro tuto indikaci. Podstatně komplikovanější situace nastává, pokud chceme docílit adaptivního chování ve frekvenční oblasti, tedy při výběru dané sub-nosné. Adaptivní algoritmus by v ideálním případě měl zohledňovat útlum na dané sub-nosné spolu se stářím této informace a tím upravovat váhu pro výběr dané rozprostírací pseudonáhodné sekvence. Protože pro protokol SIGFOX žádný takový algoritmus neexistuje, byla optimalizace protokolu SIGFOX zvolena jako jeden z cílů, viz Kapitola 5.3.2.

5.2.2 Kolizní doména

Použitím bezlicenčního ISM pásma se sice sníží implementační náklady, ale zároveň dochází ke zvýšení pravděpodobnosti potenciálních interferencí

s paralelními technologiemi využívajícími stejné pásmo. Díky heterogenitě řešení lze očekávat nejen interference mezi uživateli jedné technologie, ale i interference z konkurenčních technologií LPWAN. Většina z LPWAN technologií používá ISM pásmo centralizované v Evropě kolem 868 MHz (krom proprietárních technologií Weightless-W a Ingenu využívajících 2,4 GHz [90]). Toto pásmo sice podléhá větší regulaci z pohledu střídy a vysílacího výkonu, ale netrpí tolik na vícecestné šíření a útlum způsobený překážkami jako jsou zdi obydlí [99].

Dle analýzy provedené Krupkou et al. se technologie SIGFOX na zvoleném frekvenčním pásmu překrývá se dvěma dalšími LPWAN řešeními – LoRa a IQRF [146]. Situaci dále zhoršuje fakt použití metody prostá ALOHA (viz úvod Kap. 5.2).



Obrázek 23: Rozložení konkurenčních technologií ve frekvenčním pásmu [75]

Velikost potenciální kolizní domény je ovšem enormní díky plánovanému počtu až 40 zařízení na domácnost (20 zařízení na osobu) a různou citlivostí na zpoždění (od frekvence zaslání jednou za 24 h až po každých 10 min) (viz Kapitola 4.1.3). Jak uvádí SNO síť Sigfox v České republice společnost SimpleCell a.s., velikost jedné buňky v husté městské zástavbě je předpokládána o velikosti 3-5 km [24]. Pokud tedy při výpočtu uvažujeme počet zařízení

očekávaný 3GPP na jednu osobu [30] a při průměrné hustotě zalidnění v České republice 134 obyvatel/km² [69], odpovídá počet zařízení v jedné buňce cca 76.000 zařízení. Tento předpoklad řádově odpovídá informaci SNO, podle kterých má být jedna BTS schopna přijmout až 9 milionů zpráv denně, tedy obsloužit cca 62.000 zařízení při maximálním počtu zpráv za den [24]. Jak uvádí [154][153] správný návrh metody přístupu k médiu hraje zásadní roli v sítích s masivním počtem KZ.

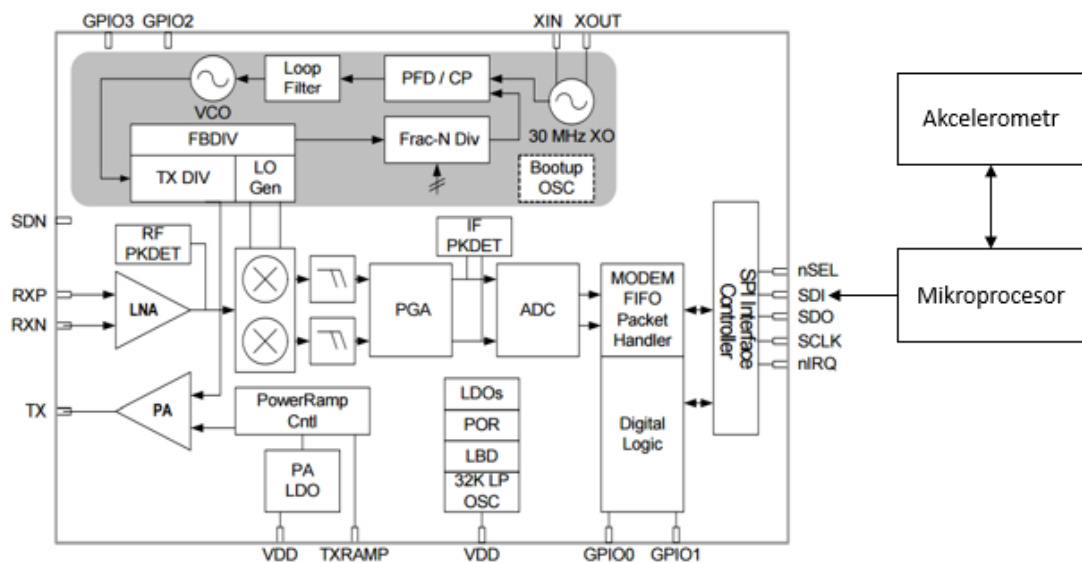
Zvýšení pravděpodobnosti doručení zmenšením počtu zařízení v jedné kolizní doméně lze provést tvrdou silou, tedy implementací více BTS do dané oblasti. Toto je způsob doporučený firmou SIGFOX [153], ovšem bez možnosti adaptivního řízení výkonu situaci neřeší. Použití většího počtu základnových stanic navíc odporuje jednomu z hlavních cílů LPWAN technologií, což je právě zvýšený dosah a tím i snížení implementačních a provozních nákladů [73]. Stejně problémy můžeme pozorovat i u konkurenčních technologií, např. LoRaWAN, na což poukazují Georgiou a Raza ve své analýze. Síť díky použití prosté ALOHA metody bude nevyhnutelně podléhat spíše limitacím z důvodu interferencí než limitacím způsobeným šumem [53][155]. Jak ale poukazuje řada autorů [22][121][154], předpokladem úspěšného nasazení IoT technologie je principiálně vysoká míra pravděpodobnosti doručení při aplikacích pro krizové situace. Dle Westlinga [121] se jedná o zařízení, kde nefunkčnost vytváří potenciálně životu ohrožující situaci, zranění či závažné ekonomické ztráty.

Na základě výše uvedeného a s přihlédnutím k analýze v Kap. 5, tak bylo přistoupeno k návrhu nové alternativní přístupové metody SIGFOX-SFH, která má za úkol zvýšit pravděpodobnost doručení zprávy při stejné velikosti kolizní domény. Jako nejvýhodnější se z analýzy přístupových metod jeví metoda rozprostřeného pásma s frekvenčním hoppingem. Ten minimalizuje vliv interferencí, zvyšuje odolnost systému díky rozprostření do šumové oblasti a vykazuje vysokou odolnost proti rušení. Pro rozprostření většího shluku chyb lze před samotnou modulací použít prokladače, ty rozprostírají kódové

symbols. Vůči DSSS umožňuje i koexistenci více zařízení při zachování stejné velikosti kolizní domény [155].

5.2.3 Odolnost proti pohybu

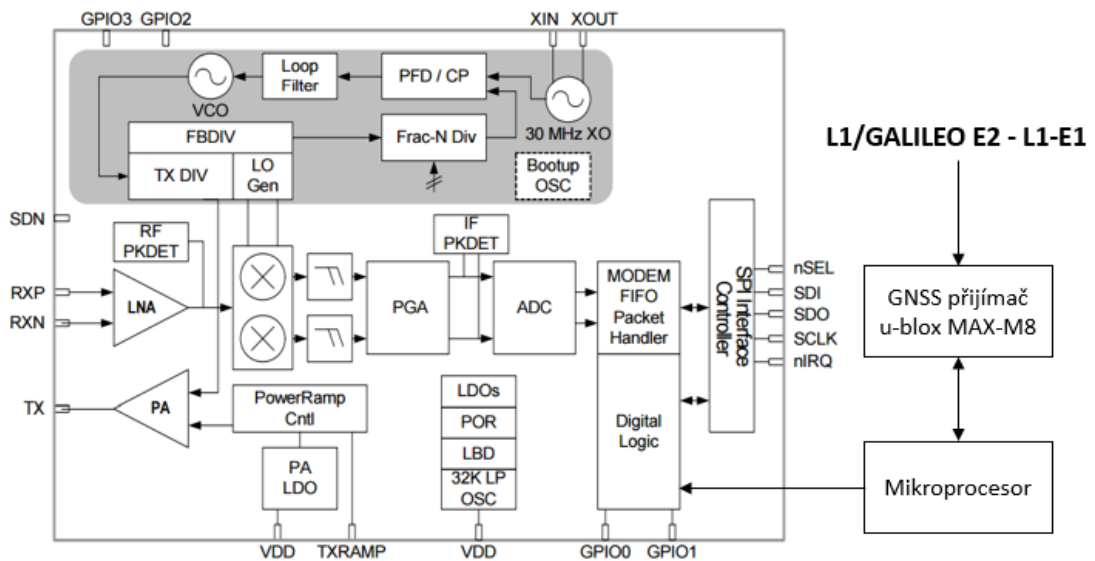
U SIGFOX technologie na používané frekvenci 868,2 MHz, dle výpočtů v Kapitole 6.2.1, dosahuje frekvenční Dopplerův posun f_D desítek Hz ($f_D=104,48$ Hz při $\alpha=0$ a $v=130$ km/h). Při pohybu zařízení vůči vysílači tudíž může docházet k interferencím způsobeným jen částečným překrytím kanálů (velikost kanálů je 100 Hz). Řešením by pravděpodobně mohla být HW implementace s využitím akcelerometru. Následná implementace logiky může být provedena dvěma způsoby, jednak detekcí akcelerace a zamezením vysílání, nebo při detekci akcelerace zařízení vysílat umožníme, ale na kompenzované frekvenci přepočítané ze změny napětí akcelerometru.



Obrázek 24: Doplnění rádiové části Si446x [26] vedoucí ke zvýšení odolnosti proti Doplerovu jevu

5.2.4 Synchronizace

Zkoumaná UNB technologie předpokládá zaslání signálu v rámci 100 Hz kanálu a tudíž vyžaduje zvýšenou přesnost lokálního oscilátoru (LO). Zkoumaný čip TD1208 s rádiovým členem Si4461 obsahuje pouze jeden LO (předpokládá se výlučnost odesílání a přijímání). Přesnost krystalového oscilátoru 10-30 ppm je nedostačující, proto se provádí periodická autokalibrace s výsledným frekvenčním krokem 28,6 Hz [26].



Obrázek 25: Doplnění rádiové části Si446x [26] vedoucí ke zvýšení přesnosti LO

Realizace návrhu vylepšujícího stabilitu LO na základě referenčního signálu z GNSS může tvořit řídicí smyčku pro řízení frekvence lokálního oscilátoru tak, že se bude přibližovat této referenci frekvencí i/nebo fází a tím dosáhne přesnosti LSB/2, kde (Least Significant Bit).registru nosné.

5.2.5 Zpětný kanál

Reálné nasazení protokolu, tak jak jsem se s ním setkal v začátcích evaluace pro disertační práci, by bylo těžko představitelné díky chybějícímu zpětnému kanálu. Zaslání informací pouze směrem od zařízení do sítě neodpovídá dnešnímu pojetí IoT, a to jak technicky (pokud například chceme dynamicky

měnit vysílací výkon s cílem zvýšit výdrž baterie), tak uživatelsky (kdy např. u senzoru řídicího vytápění potřebujeme zjistit teplotu na vyžádání). Klasifikace IoT dle GSMA [88] uvádí, že všechny čtyři IoT aplikační typy potřebují alespoň pro část z použití zpětný kanál. Nutnost implementace zpětného kanálu vyzdvihuje i řada autorů [155] [151].

Toto si naštěstí uvědomili i technici definující technologii SIGFOX a v roce 2016 již došlo k představení omezeného zpětného kanálu (na testovaném modulu TD1208 za použití nového FW lze použít AT příkazy 303, 304 viz Kap. 6.1). Použití obousměrné komunikace je ale stále těžko realizovatelné z důvodu limitace čtyř 8 B zpráv/den/zařízení. Tato limitace ovšem není dána regulací, ale vnitřní architekturou BTS, která umožňuje komunikaci pouze polovičním duplexem [126].

5.3 Zvolený přístup a návrh optimalizace

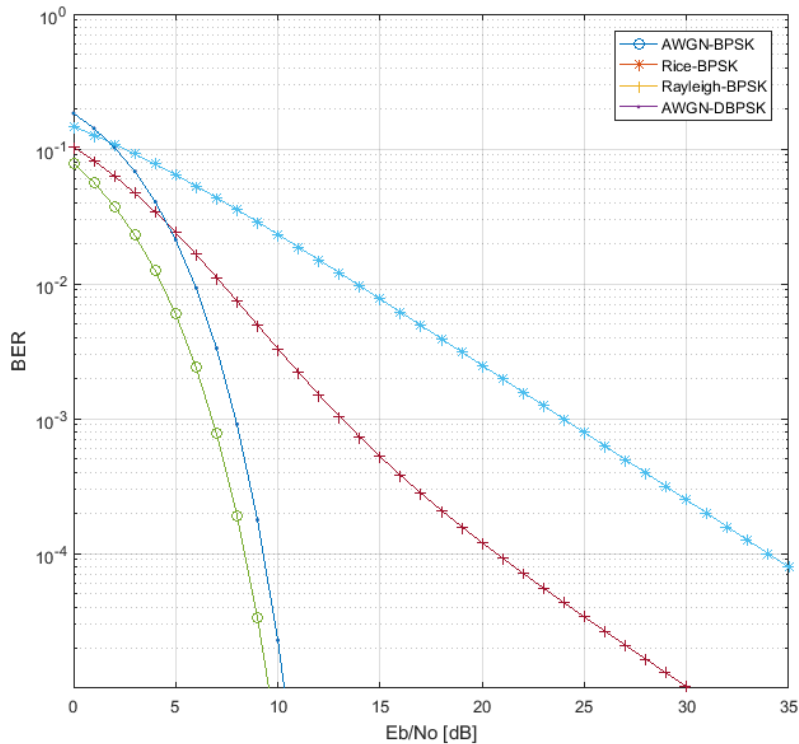
Pro optimalizaci protokolu SIGFOX byly na základě analýzy současného stavu v Kap. 4 a teoretického rozboru v Kap. 5.2 vybrány následující optimalizace:

- z Kapitoly 5.2.1 návrh adaptivního algoritmu po frekvenční hopping,
- z Kapitoly 5.2.8. návrh nové metody implementující techniku rozprostřeného spektra s frekvenčním hoppingem.

5.3.1 Použití techniky rozprostřeného pásma

V současné době patří mezi nejrozšířenější systém implementující frekvenční hopping technologie Bluetooth. Mezi hlavní výhody této techniky patří zvýšená odolnost proti rušení a vyšší bezpečnost [156]. Vysílač přepíná pomocí rychlého sledu pseudonáhodné sekvence mezi jednotlivými frekvencemi. Pro rozprostření většího shluku chyb se ještě před samotnou modulací používají prokladače, které rozprostírají kódové symboly. Tuto metodu lze kombinovat

s adaptivním algoritmem SIGFOX-AFH a zvýšit tak dále účinnost metody. Protokolem použitá modulace pro vzestupný směr (uplink) je diferenciální klíčování fázovým zdvihem DBPSK [23]. Vliv jednotlivých úniků je zobrazen na následujícím obrázku pro LOS (Riceho únik), NLOS (Rayleighův únik) i šum



Obrázek 26: Bitová chybovost pro jednotlivé úniky při použití modulace (D)BPSK

Při použití techniky rozprostřeného pásma a její aplikace na originální fázovou modulaci tak dostáváme tzv. FH-DPSK (Frequency-Hopped Differential Phase- Shift Keying). Pokud uvažujeme oblast pokrytí s M zařízeními, interference může nastat s $M-1$ takovými zařízeními. Tudiž $M-1$ interferenčních sekvencí může být považováno za úzkopásmové rušení navyšující hodnotu šumu. Tento šum v i -té chip periodě potom je

$$n_i(t) = I_{c,i}(t) * \cos(\omega_i t) + I_{s,i}(t) * \sin(\omega_i t), \quad (2)$$

kde $\omega_i = 2\pi(f_c + f_1 * a_i^k)$, f_c je frekvence nosné, f_1 je fundamentální frekvenční kanál před skokem, a_i^k je k -tý celočíselný kód z odpovídající kódové množiny a $I_{c,i}$ a $I_{s,i}$ jsou synfázní a kvadrurní komponenty šumu.

Aplikace metody Monte Carlo

Proces spočívá ve vytvoření modelu, realizaci dostatečného počtu simulací a v následném vyhodnocení. Postup lze rozdělit do následujících tří kroků [138]:

1. Rozbor problému a návrh modelu

Jedná se o zcela zásadní krok, na jehož zvládnutí závisí úspěšnost celého postupu. Ačkoliv je metoda využitelná pro řešení prakticky všech problémů, volba vhodného postupu může být komplikovaná.

2. Generování náhodných veličin, jejich transformace na veličiny s daným statistickým rozdělením.

Jedná se o krok cyklicky opakovaný do doby, kdy je hledaná hodnota přibližně rovna hodnotě dané výpočtem. Rychlost konvergence chyby výsledku k nulové hodnotě je přibližně rovna převrácené hodnotě odmocniny z počtu realizovaných pokusů.

3. Statistické zpracování výsledků

Hledaná hodnota je zpravidla určena některým z momentů statistických veličin, nejčastěji střední hodnotou.

5.3.2 Adaptivní algoritmus SIGFOX-AFH

Jedna z cílových metod optimalizace protokolu je použití adaptivního algoritmu. Tento algoritmus je navržený tak, aby prostřednictvím váhování minimalizoval pravděpodobnost výběru těch sub-kanálů, které při předchozím přenosu vykazovaly zhoršené přenosové vlastnosti.

Návrh algoritmu se skládá ze dvou kroků:

- prvním je teoretické odvození samotného algoritmu,
- druhým je návrh praktické realizace v technologii za použití mikrokontroléru TinyGecko EFM32TG210 a rádiového obvodu SiliconLabs Si4461.

Teoretické odvození

Cílem algoritmu je tedy vybrat z množiny kanálů $F=\{f_1, \dots, f_M\}$ pseudonáhodnou sekvenci $k_n, n \in \mathbb{N}$ tak, aby byla minimalizována pravděpodobnost interference s ostatními zařízeními i jinými vnějšími vlivy. Standardní algoritmus přiřazuje všem frekvencím stejnou pravděpodobnost $P_i = 1/M$. Myšlenkou nového algoritmu je využití informace získané při přenosu předchozích paketů pro výběr nové frekvence. Každému kanálu přiřadíme časově závislou váhu W_i^n , kterou snížíme v případě špatného poměru signál – šum na tomto kanálu (viz níže). Časově závislá pravděpodobnost výběru i -tého kanálu v n -tém kroku potom je

$$P_i^n = \frac{W_i^n}{\sum_{i=1}^M W_i^n} \quad (3)$$

Řekněme, že poslední náhodně vybraný kanál $k_n = i$ měl hodnotu $RSSI = RSSI^n$. Jeho váhu upravíme podle vztahu

$$W_i^n := W_i^n \cdot \min\{10^{RSSI_i^n - \overline{RSSI}}, 1\}, \quad (4)$$

kde $\overline{RSSI} = \sum_{j=n-M}^M RSSI^j$ je střední hodnota RSSI za posledních M kroků.

Váhy pro další časový krok potom vypočteme ze vztahu

$$W_i^{n+1} = \frac{KW_i^n}{K+1}, \quad (5)$$

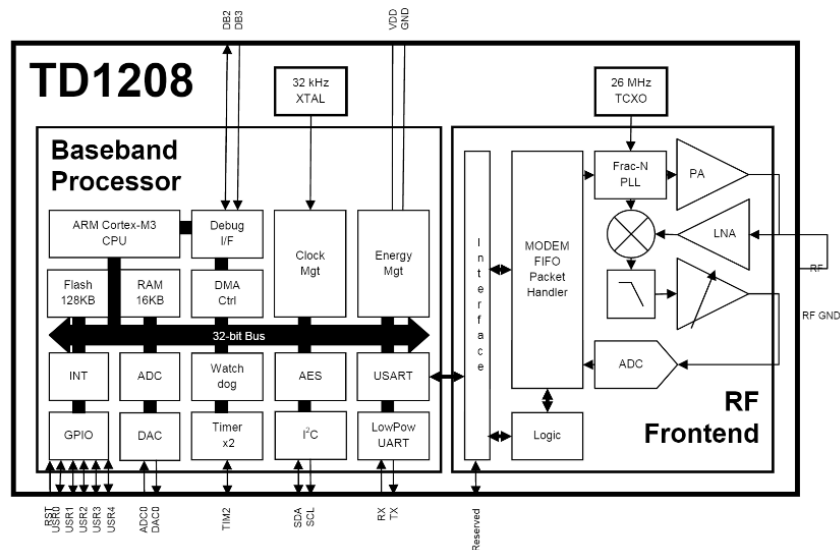
kde parametr K vyjadřuje „paměť“ systému a je úměrný době, za jakou se pravděpodobnosti navrátí do rovnoměrného rozdělení, pokud nedojde k další interferenci. Pokud položíme $K=0$, redukuje se tento algoritmus na standardní algoritmus s rovnoměrným rozdělením pravděpodobností. Dále je možné vypočítat pravděpodobnosti pro další krok dle vztahu (3) a opakovat postup.

Návrh implementace

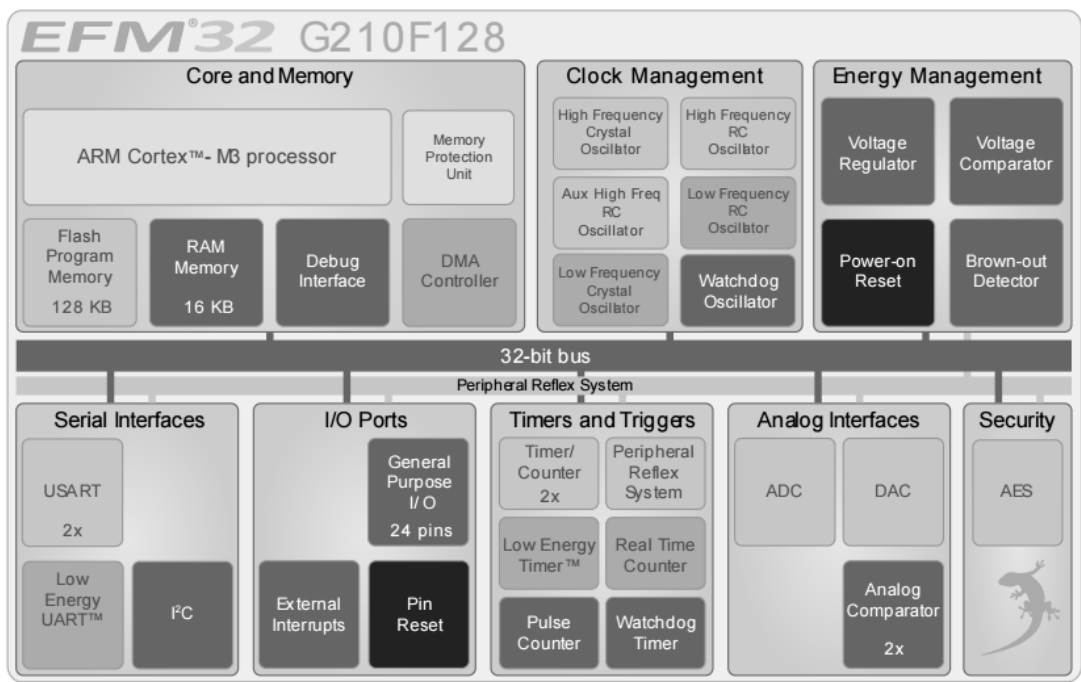
Implementace logiky algoritmu, tedy výpočet jednotlivých vah W_i^n tohoto algoritmu, je umístěna v BTS. Aplikování při výběru sub-nosných probíhá v koncovém zařízení.

Logika algoritmu umístěná v BTS - má podobu úpravy SW, který na základě v systému již dostupného parametru RSSI jednotlivých sub-nosných vypočítá hodnoty vah jednotlivých sub-nosných za použití vzorce (4). Předností algoritmu je časové váhování, tedy starší hodnoty mají na samotný výběr pseudonáhodné sekvence menší vliv, než později změřené hodnoty.

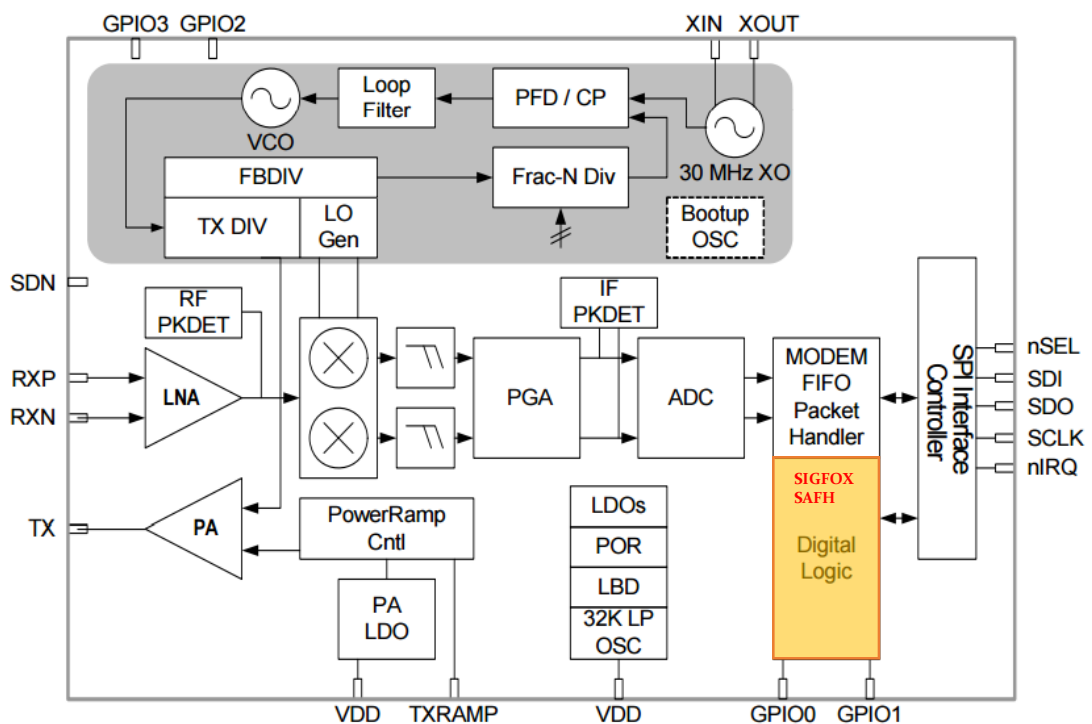
Logika v koncovém zařízení - pro návrh realizace byl zvolen modem použitý při experimentální testování v Kapitole 6.2 vybavený modulem TelecomDesign TD1208. Tento modul se dále skládá z 32 bitového mikrokontroléru Tiny Gecko s jádrem ARM Cortex-M3 (EFM32G210) a z rádiového čipu Silicon Labs (Si4461) [25] [26].



Obrázek 27: Blokové schéma modulu TD1208 [25]



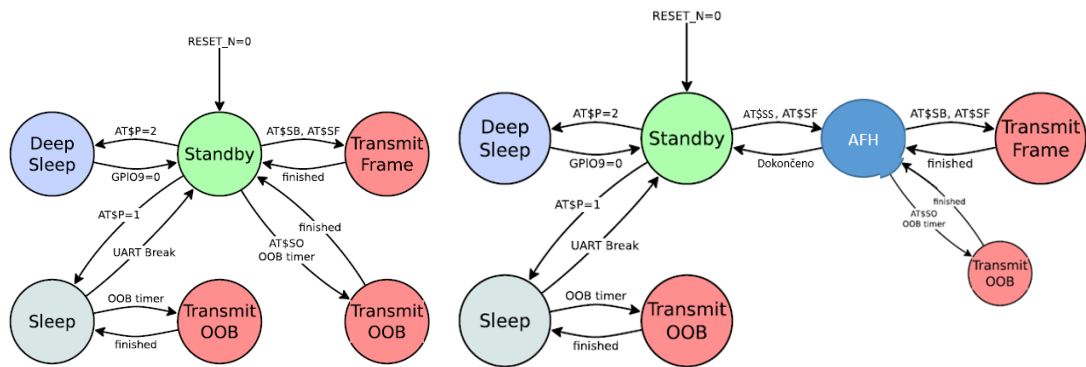
Obrázek 28: Blokové schéma mikrokontroléru EFM32G210 [25]



Obrázek 29: Blokové schéma rádiové části Si446x [26]

Aplikace algoritmu pro adaptivní výběr sub-nosných je realizována úpravou stavového diagramu modemu [142]. Původní i nově upravená schémata

stavového diagramu implementující algoritmus SIGFOX-AFH jsou znázorněna na Obrázek 30.



Obrázek 30: Upravený stavový model algoritmu SIGFOX-AFH [142]

5.3.3 Model algoritmu SIGFOX-SFH

Tento stochastický model vychází z následujících zjednodušených předpokladů i vlastností simulovaného protokolu SIGFOX, které jsou porovnány s nově definovanou metodou SIGFOX-SFH. Výchozí modelovou situací je použití R-FTDMA, kde vysílací strana k médiu přistupuje náhodně (prostá ALOHA) v čase a pseudonáhodně ve frekvenci. Druhou částí je simulace navržené metody SIGFOX-SFH. Každé zařízení pro odeslání jedné zprávy používá n_0 opakování paketu, které odešle na různých frekvencích v po sobě jdoucích časech. Protokolem SIGFOX je definováno $n_0=3$ a doba odeslání paketu $d=1$ s. Navrhovaný algoritmus SIGFOX-SFH definuje $n_0=32$ a dobu odeslání paketu $d=1/32$ s, přičemž kratší doba přenosu je umožněna odpovídajícím rozšířením šířky frekvenčního pásma daného slotu. Na přijímací straně jsme tuto zprávu potom schopni dekódovat za následujících podmínek:

Čas odeslání

Zavedeme značení (x,i) pro i -tý paket rámcí x , kde $x,i \in \mathbb{N}$. Přijímací interval pro paket (x,i) tedy definujeme $(t_{x,i}, t_{x,i}+d)$ pokud na přijímací straně detekujeme

signál v čase $t_{x,i}$ a jeho konec v čase $t_{x,i} + d$. Pokud dále označíme střed tohoto intervalu jako $m_{x,i} = \frac{t_{x,i} + t_{x,i} + d}{2}$ a déku $d_{x,i} = \frac{t_{x,i} + d - t_{x,i}}{2}$, tak dochází k časovému překryvu příjmu dvou paketů i, j rámců x a y s pravděpodobností

$$K_T(x, i, y, j) = P(|m_{x,i} - m_{y,j}| < d_{x,i} + d_{y,j}). \quad (6)$$

Pro protokol platí pravidla definovaná ČTÚ pro frekvenci 868 MHz, tedy omezený klíčovací poměr 1 %, což při přenosové rychlosti 100 b/s a velikosti rámce 26 B přibližně odpovídá střídě 600 s [19][23].

Použitá frekvence

Časový překryv dvou paketů ještě neznamená, nebo ne nutně, že jeho vlivem dojde k interferenci těchto dvou rámců. Technologie používá na přijímací straně (MIMO, Multiple-input Multiple-output) [23], tudíž je potřeba dále zjistit, zda se překrývají zvolené rámce i ve frekvenční oblasti. Pravděpodobnost frekvenčního překryvu lze popsat výrazem

$$K_F(x, i, y, j) = P(|f_{x,i}(x) - f_{y,j}(y)| < f_L), \quad (7)$$

kde $f_{x,i}$ a $f_{y,j}$ jsou střední frekvence slotů zpráv (x,i) , (y,j) z rámců x , y a f_L je roven velikosti 100 Hz [8].

Amplituda signálu na přijímací straně

Pro zjednodušení modelu je uvažována situace, kdy jsou zařízení v rámci kolizní domény stejně vzdálená od vysílače, tudíž při interferenci paketu (x,i) s paketem (y,j) dojde vždy ke kolizi.

Pravděpodobnost kolize

Nedoručení paketu (x,i) v důsledku interference s paketem (y,j) tedy nastává, pokud dojde ke kolizi jak v časové oblasti K_T , tak ve frekvenční K_F

$$P_K(x, i, y, j) = K_T(x, i, y, j) * K_F(x, i, y, j). \quad (8)$$

Pravděpodobnost, že sledovaný paket koliduje s alespoň jedním z paketů rámce y je potom dána výrazem

$$P_K(x, i, y) = 1 - \prod_{j=1}^{n_0} (1 - K_T(x, i, y, j) * K_F(x, i, y, j)). \quad (9)$$

Vzhledem k tomu, že pro úspěšné přijetí zprávy x stačí přijetí pouze jednoho ze tří paketů i , je celková pravděpodobnost nedoručení x v důsledku interference s y dána pravděpodobnostmi nedoručení všech paketů (x, i) , $i=1,2,3$. Pokud by byly kolize jednotlivých paketů nezávislé, pro celkovou pravděpodobnost nedoručení by platil vztah

$$P_K(x, y) = \prod_{i=1}^{n_0} P_K(x, i, y) = \prod_{i=1}^{n_0} \left(1 - \prod_{j=1}^{n_0} (1 - K_T(x, i, y, j) * K_F(x, i, y, j)) \right).$$

(10)

U přístupových metod SIGFOX i SIGFOX-AFH je však sekvence paketů odesílána v těsné posloupnosti a jejich případné kolize v čase tedy nelze považovat za nezávislé. V takovém případě jednoduchý vztah (5) neplatí a pro vyhodnocení pravděpodobnosti kolize využíváme metody Monte Carlo.

5.3.4 Metoda SIGFOX-SFH

Implementace této metody má dopad především na rádiové rozhraní. Pokud se tedy zaměříme na výše zmíněný rádiový člen Si4461 použitý v modulech TD1208 zjistíme, že podpora D-BPSK modulace potřebné pro vzestupný směr protokolu SIGFOX není nativně podporována. Mezi dostupné modulace patří – FSK, GFSK, (G)MSK, 4FSK a OOK [26]. Aby metoda mohla být implementována za pomoci FH-DBPSK modulace, bude potřeba tuto modulaci do rádiového členu doprogramovat.

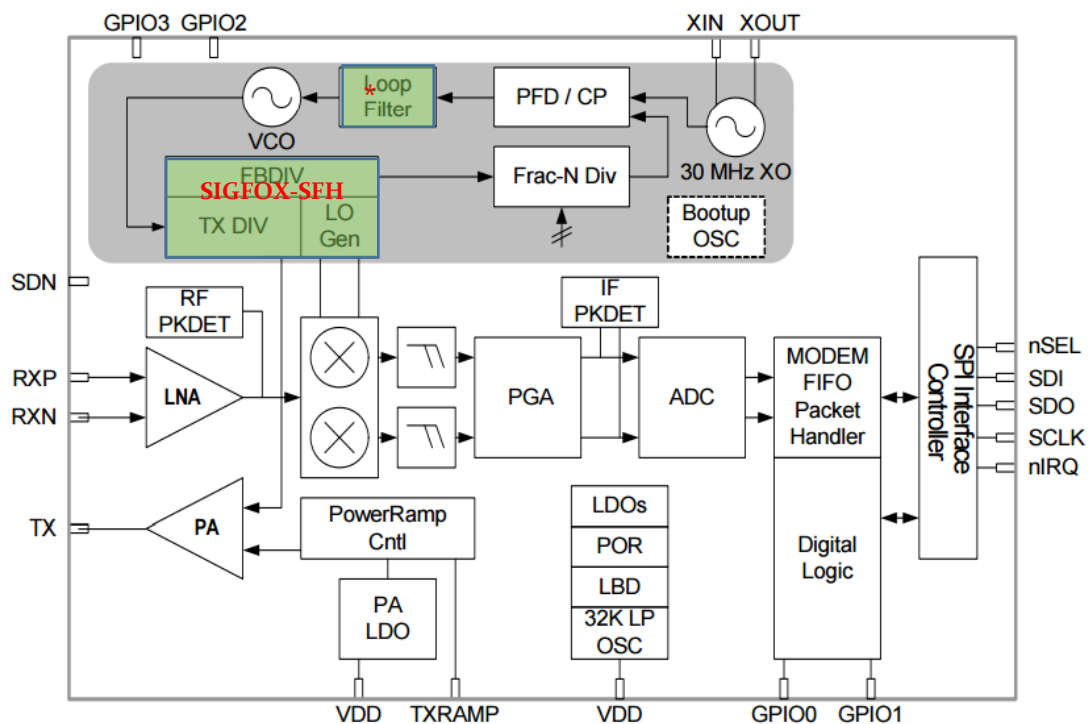
Z analýzy dostupné dokumentace vyplývá široké spektrum uživatelských nastavení. Například Kapitola 5.3.1.1 [26] týkající se programování Tx-Rx frekvencí uvádí možnost frekvenčního hopping v rozsahu (pro náš účel) 850-10580 MHz zadat do registru `FREQ_CONTROL_CHANNEL_STEP_SIZE_0` základní frekvenci f_b (kanál 0) a `FREQ_CONTROL_CHANNEL_STEP_SIZE_1` (S) zadat šířku kanálu. Pokud budeme chtít vysílat (přijímat) použijeme jednoduše příkaz `START_TX(RX)` s argumentem „CHANNEL“ podle následujícího vzorečku:

$$f_c = f_b + K * S. \quad (11)$$

Z dokumentace plyne (Kap. 5.3.1.2), že na přijímací straně lze teoreticky nastavit frekvenční hopping v automatickém režimu (auto-hopping). Ten v závislosti na nastavené úrovni síly signálu (RSSI) po vypršení timeoutu na preambuli, nebo při nepřijetí synchronizačního okna umí podle logiky v tabulce přeskocit na následující sub-kanál. Jak ale dále vyplývá z Tabulky 3, minimální povolená šířka kanálu (S) je 1,1 kHz. Pro implementaci protokolu SIGFOX s kanály o velikosti 100 Hz tedy nelze tento automatický režim použít, protože je filtrování realizováno až v digitální části (delta-sigma ADC). Návrh počítá s úpravou logiky filtru ke snížení dolní meze na např. 50 Hz, což by pro implementaci SIGFOX-AFH metody mělo být dostačující.

Pokud se zaměřím na frekvenci pro vzestupný směr (Tx), tu lze volit v kroku 28,6 Hz (viz Kapitola 2, [26]), a na aplikaci výše uvedeného vzorce tedy není problém daný sub-kanál zvolit i s veřejně dostupným FW. TX nastavení frekvence je tedy v kroku 28.6 Hz a settling time je 50 us (Tabulka 2, [26]), dále je třeba připočítat samotné nahrání registrů a poslání příkazů. Ale při uvážení hodnot v Tabulce 10 by implementace algoritmu neměla být problém ani v řádu stovek přeskoků za sekundu.

Přeskok na přijímací straně sdílí stejné RF registry a směšovač s odesílací stranou, tudíž nastavení frekvence z Kap. 5.3.1.1 je aplikované i na přijímací stranu [26].



Obrázek 31: Znáznornění dopadu metody SIGFOX-SFH na rádiovou část Si446x [26]

Návrh metody se tedy ukázal jako realizovatelný. Pro úspěšnou implementaci v rádiovém členu Si4461 však bude potřeba doprogramovat podporu (FH-)DBPSK. Tento fakt spolu s nutností úpravy softwarově definovaného rádia na přijímací straně BTS společností SIGFOX výsledně omezil realizaci metody na teoretický rozbor a simulace.

6 Praktická část [A1]

Praktická část je rozdělena do tří hlavních kapitol. V první kapitole se věnují přípravným krokům nutným pro realizaci měření. Druhá část obsahuje výsledky měření a diskuzi těchto výsledků. Třetí část obsahuje model vhodný pro analýzu sítí s přístupovou metodou R-FTDMA, realizovaný metodou Monte Carlo a analýzu výsledků při aplikaci simulace na protokol SIGFOX i na nově navrženou metodu SIGFOX-AFH.

6.1 Návrh realizace

Aby bylo možné provést plánovaná měření, bylo nutné splnit následující přípravné kroky.

1) Získat koncová zařízení

Zde pomohla společnost SimpleCell Networks a.s. bezplatným zapůjčením referenčních zařízení, u kterých bylo navíc možné odesílat zprávy bez technologického omezení.

2) Získat přístup do SIGFOX sítě

Díky společnostem T-Mobile a SimpleCellNetworks a.s., které začaly s budováním sítě mezi prvními na světě, bylo možné data naměřit již v takto rané fázi vývoje protokolu začátkem roku 2016.

3) Získat přístup k plánovacím a provozním datům sítě

Nejdůležitějším bodem pak bylo zpřístupněním plánovacích dat společností T-Mobile. Tento zásadní bod je hlavním důvodem, proč se zatím jiné výzkumné studie a články omezily pouze na teoretická konstatování. Např. bez přesné GPS pozice jednotlivých BTS by nebylo možné určit hodnoty ztrát šířením ani maximální dosažená vzdálenost mezi zařízeními a BTS.

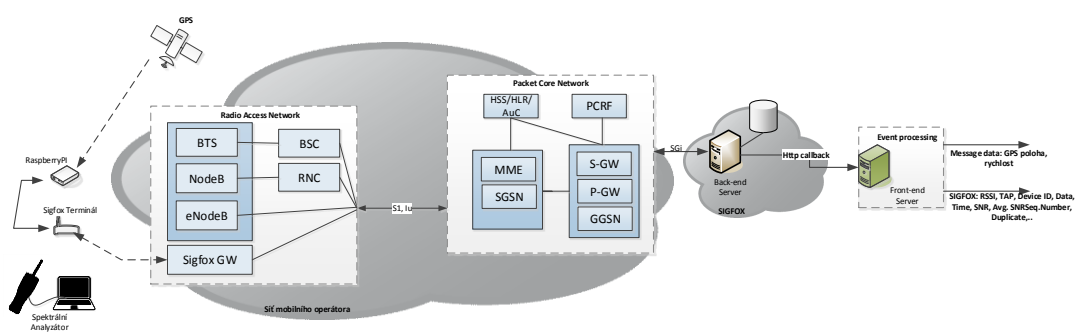
Pokrytí signálem

První sada měření probíhala na území hlavního města Prahy. Praha s populací řádově 1,2 milionu obyvatel byla součástí pilotního testování této technologie

pouze se čtyřmi instalovanými základnovými stanicemi. SNO SimpleCell Network a.s. a podle svých slov plánuje do konce roku 2016 celou Českou republiku pokrýt přibližně 350 takovými stanicemi [24]. Většina prvotních měření ale probíhala v této omezené pilotní fázi.

Testovací zapojení

Testovací zapojení je zobrazeno na následujícím diagramu.



Obrázek 32: Testovací zapojení

Pro testování byla použita koncová zařízení s moduly společnosti Telecom Design (TD) - TD1208, který je blíže analyzován v Kapitole 5.4.2.

Modul TD1208 lze ovládat za pomoci standardních AT příkazů, uživatel tak může upravit parametry rádiové části či zprávy. Přehled vybraných příkazů je v Tabulka 7 [25].

Tabulka 7: Přehled vybraných AT příkazů pro modul TD1208

AT	Výsledek
AT?	Nápověda
ATE	Echo {0,1}
ATZ	Reset
AT&V	Základní informace - modul, hardwarová a softwarová verze, sériové číslo zařízení atd.
AT&W	Uložení stávajícího nastavení
AT\$IF?	Tx frekvence [Hz]

AT\$DR?	Rx frekvence [Hz]
AT\$SS	Odeslání SIGFOX zprávy až s 12 B uživatelských dat <Byte>=00..FF Pole dvoumístných hexadecimálních hodnot
ATS300	SigFox keep-alive perioda
AT\$SB	Indikace požadavku na zpětný kanál {0,1}
ATS302	Vysílací výkon [dBm]
ATS304	Zpoždění po odeslání zprávy, kdy modem začne naslouchat v sestupném směru [s]
ATS305	Čas, po který modem v sestupném směru naslouchá, než dojde k vypnutí [s]

TD1208 není vybavený integrovaným GPS modulem, zařízení bylo napojeno na Raspberry PI, které bylo na GPS napojené. Perl skript spuštěný v Raspberry vložil GPS polohu do každé SIGFOX zprávy. Pro vygenerování zprávy byl použitý příkaz AT\$SS. Do zprávy bylo přidáno - krom GPS polohy - sekvenční číslo, číslo experimentu, a případně rychlost. Účelem vygenerování této zprávy bylo nejen umožnění zpětného párování ale i co nejuvěrohodnější simulace reálného použití, např. při sledování balíků. Příklad takové zprávy:

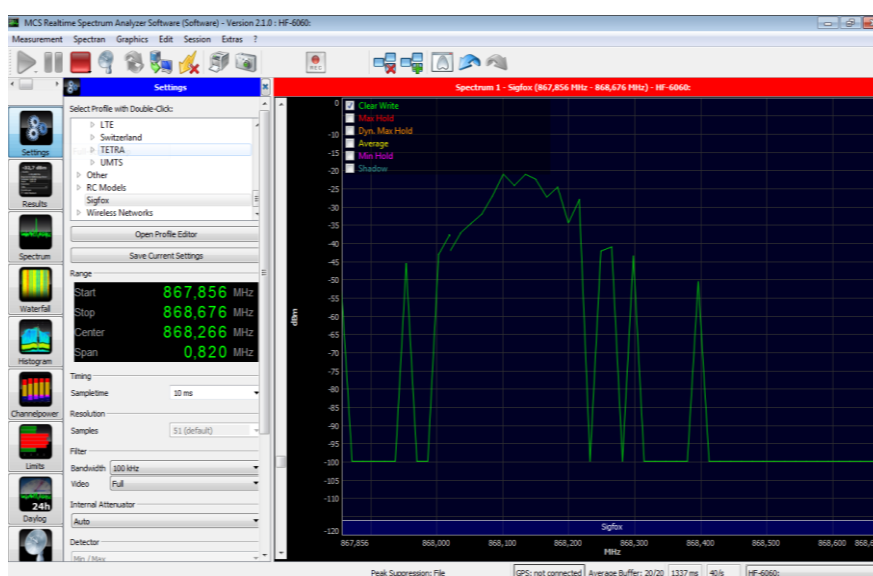
```
INFO:Message 02fc81ed00db9e9c00050000 has been
sent successfully for runid 0 and iteration 1.
DEBUG:Sleeping for 5 s
DEBUG:Date: 2016-03-08, Time: 17:23:14, Fix: 1, Quality:
1, HDop: 1.600000, Sats: 6, Alt: 248.300000, Lat:
50.102772, Lon: 14.392972, Vel: 0.200000.
DEBUG:Message created: 02fc81f300db9e8b00020001
DEBUG:Modem at /dev/ttyUSB1 responded:
AT$SS=02fc81f300db9e8b00020001
DEBUG:Modem at /dev/ttyUSB1 responded: OK
```

Obrázek 33: Log z RaspberryPI

Později bylo, díky grantu, testování rozšířeno o vývojový kit Arduino UNO (více informací viz [141]) doplněný o rozšiřující kartu Libelium s modulem

TD1207. Zařízení v pouzdře pro přímé uchycení na hexakoptéru znázorňuje Obrázek 35.

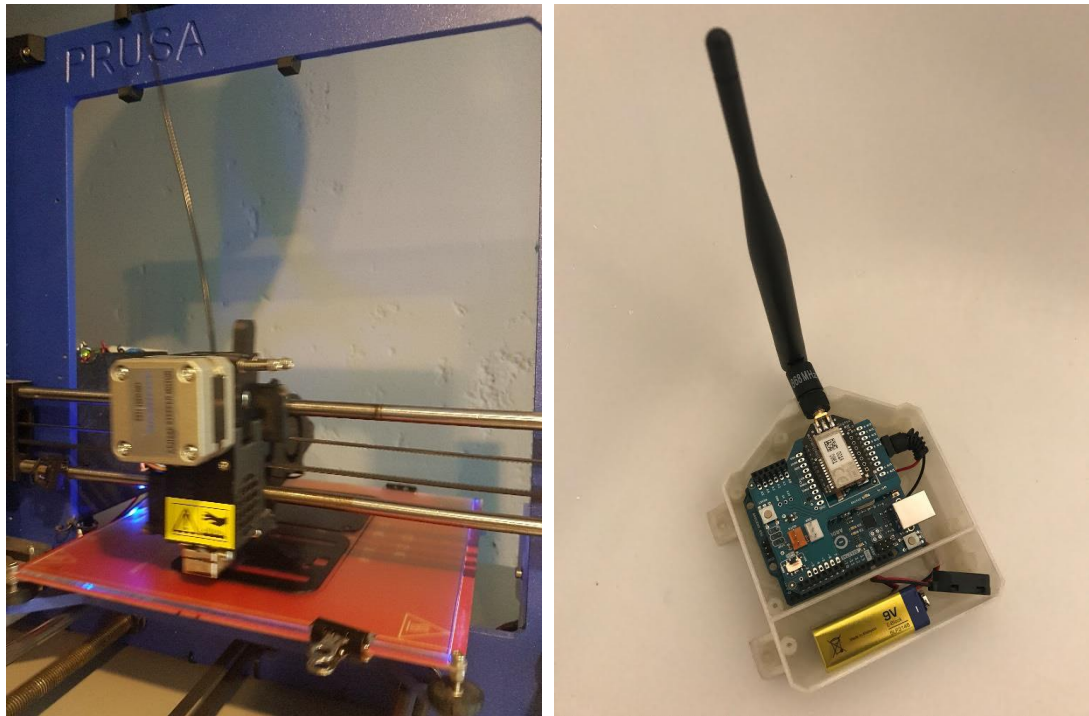
Technologie SIGFOX je navržena pro využití ve sdíleném pásmu ISM, před samotným testováním bylo pásmo vždy zanalyzováno na výskyt silných frekvenčních interferencí. Použit byl přenosný analyzátor RF Spectrum Analyzer SPECTRAN HF-6060 V4 připojený k počítači. Ukázka výstupu analyzátoru SPECTRAN je uvedena níže.



Obrázek 34: Výstup z přenosného spektrálního analyzátoru SPECTRAN

6.1.1 3D tisk pouzdra [A12]

K uchycení měřícího modulu na hexakoptéru bylo zapotřebí navrhnout a vytisknout na 3D tiskárně kryt, který slouží krom uchycení a ochrany před poškozením či povětrnostními vlivy. Návrh krytu byl realizován v programu VariCAD 2017-1.01. Tisk proběhl na multifunkční 3D tiskárně Prusa i3 s tryskou o průměru 0,4 mm a strunou z ekologického ABS plastu. K montáži k měřící plošině bylo použito šroubů M3x6. Detail návrhu je detailněji popsán v sekci příloh - Příloha B.



Obrázek 35: 3D tisk krytu na modul SIGFOX pro uchycení na hexakoptéru

6.1.2 Měřicí prototypový dron [A11]

Pro nomadická měření a jejich správnou evaluaci byl navržen a posléze z grantu 2107/2011/G1 zkonstruován prototypový dron. Na základě evaluace potřebných parametrů pro měření bylo jako klíčové stanoveno splnění následujících požadavků:

- spolehlivost/bezpečnost,
- minimální vibrace,
- výdrž baterií,
- stabilita.

Samozřejmostí je i dálkové řízení a monitoring. Z důvodu potřeby vertikálních měření byla zvolena konstrukce koptéry. Protože je to především počet vrtulí, který definuje výsledné konstrukční i letové vlastnosti koptér, výběr probíhal porovnáním vlastností dvou nejčastějších typů se sudým počtem rotorů kvadro- a hexa-koptéry. Zvolena byla konstrukce hexakoptéry. Byla upřednostněna vyšší spolehlivost díky odolnosti vůči výpadku rotoru (v některých případech i při

současném výpadku dvou rotorů), větší stabilita a nosnost i za cenu větší hmotnosti (která ale může být i výhodou díky větší odolnosti vůči povětrnostním vlivům) a vyšší pořizovací ceny [62].

Tabulka 8: Porovnání hlavních parametrů kvadro- a hexa- koptér [62]

	Kvadrokoptéra	Hexakoptéra
Hmotnost	<i>nižší</i>	<i>vyšší</i>
Stabilita pohybu	<i>menší</i>	<i>vyšší</i>
Manévrovatelnost/dynamika	<i>větší</i>	<i>menší</i>
Vibrace	<i>větší</i>	<i>menší</i>
Spotřeba elektrické energie	<i>menší</i>	<i>vyšší</i>
Nosnost	<i>menší</i>	<i>větší</i>
Odolnost vůči povětrnostním podmínkám	<i>menší</i>	<i>větší</i>
Spolehlivost/bezpečnost	<i>menší</i>	<i>vyšší</i>
Požizovací cena	<i>nižší</i>	<i>vyšší</i>

Realizovaný dron je zobrazen na obrázku níže, detailní přehled jednotlivých součástek je součástí Přílohy A.

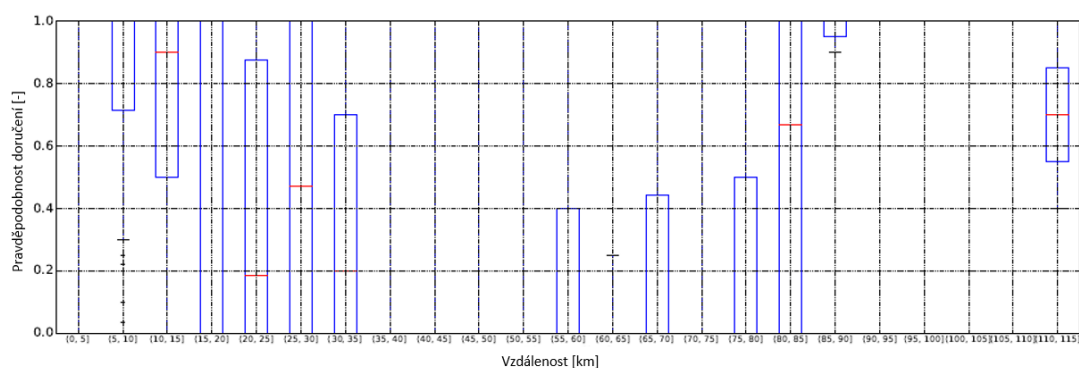


Obrázek 36: Měřicí prototypový dron

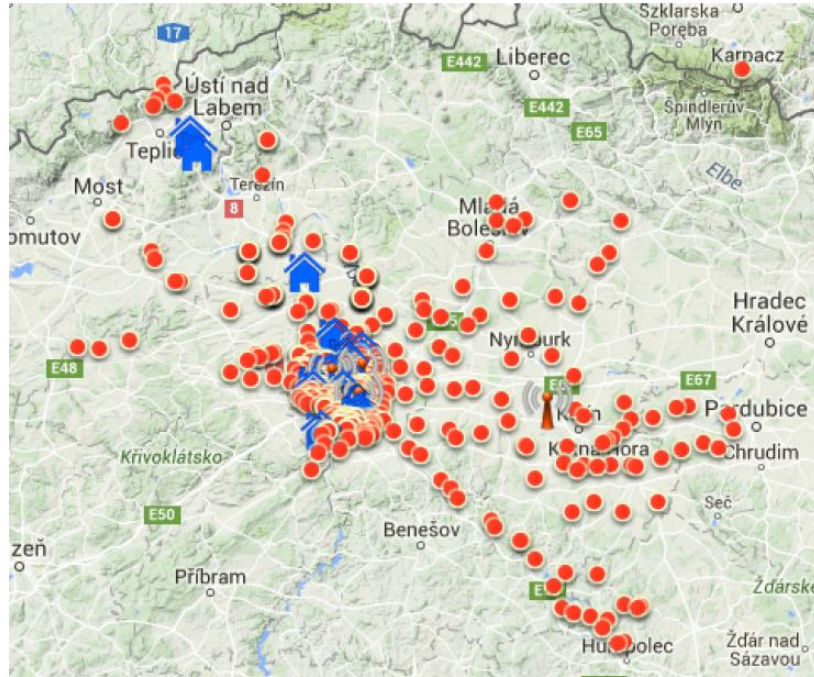
6.2 Experimentální ověření

6.2.1 Stacionární měření

V první sadě měření byla analyzována souvislost mezi pravděpodobností správného příjmu zprávy a její vzdáleností na základě přijatých zpráv třemi základnovými stanicemi. Výsledky jsou uskupené z důvodu větší názornosti do intervalů (viz Obrázek 38). Z výsledků lze usoudit jednak větší rozptyl pro kratší vzdálenosti, druhá v intervalu 35-45 km a 90-110 km nižší pravděpodobnost doručení. Vysvětlení je patrné při vynesení pozic jednotlivých měření do mapových podkladů (viz Obrázek 38). Vyšší pravděpodobnost doručení je přímo úměrná měřením prováděným na vyvýšených místech s lepší viditelností (LOS) na základnové stanice.



Obrázek 37: Pravděpodobnost doručení jako funkce vzdálenosti



Obrázek 38: Pozice statických měření vynesena do mapy

Cílem další analýzy naměřených dat bylo nalezení maximální vzdálenosti při uvažování dominantního šíření přímou cestou. Volba počtu a rozmístění základnových stanic úzce souvisí s maximální dosažitelnou vzdáleností mezi KZ a BTS. Z teoretického rozboru protokolu v Kap. 4.1.5 vyplývá, že většina autorů odkazuje na hodnotu v řádu 40 km. Teoretický vztah pro výpočet této maximální vzdálenosti LOS_{MAX} [km] je při uvažování zakřivení zemského povrchu E_R [m], vysílacího zařízení umístěného ve výšce H_1 [m] a přijímače ve výšce H_2 [m] následující [A1]:

$$LOS_{MAX} = \frac{\sqrt{2 * H_1 * E_R} + \sqrt{2 * H_2 * E_R}}{1000} \quad (12)$$

Z měření vyplývá maximální naměřená vzdálenost 119,9 km (při 100 % úspěšnosti přijetí zpráv a průměrném RSSI -96,6 dBm). Toto měření bylo v souladu s předpoklady vyvozenými při analýze pravděpodobnosti doručení, tedy z místa s přímou viditelností. Měření bylo provedeno z nejvýše položeného místa v České republice – Sněžky – s výškovým rozdílem mezi vysílačem a přijímačem 1258 m.

Posledním cílem byla analýza ztrát šířením. Statické, předem známé parametry vstupující do výpočtu jsou zisk přijímací antény (G_{Rx}) a vysílací výkon (P_{Tx}). Ty spolu s dynamickými parametry získanými z webového rozhraní (Web API), indikátoru přijaté síly signálu (RSSI) a odstupu signálu od šumu (SNR), vstupují do vzorce na výpočet ztrát šířením (PL) (uvažuje se stav impedančního přizpůsobení) [27]:

$$PL = |RSSI| + SNR + P_{Tx} + G_{Rx}. \quad (13)$$

Vzorec je definovaný jen pro vzdálenosti d větší než je Fraunhoferova vzdálenost d_f

$$d > d_f = \frac{2D^2}{\lambda}, \quad (14)$$

kde D je největší fyzický rozměr antény, λ vlnová délka elektricky velké antény, při podmínce $d_f \gg D$ a $d_f \gg \lambda$.

Polynomickým rozvojem pak lze určit podle následujícího vzorce hodnotu útlumového exponentu n

$$EPL = B + 10 * n * \log\left(\frac{d}{d_0}\right), \quad (15)$$

kde B je útlum [dB], d_0 referenční vzdálenost (v našem případě 1 km).

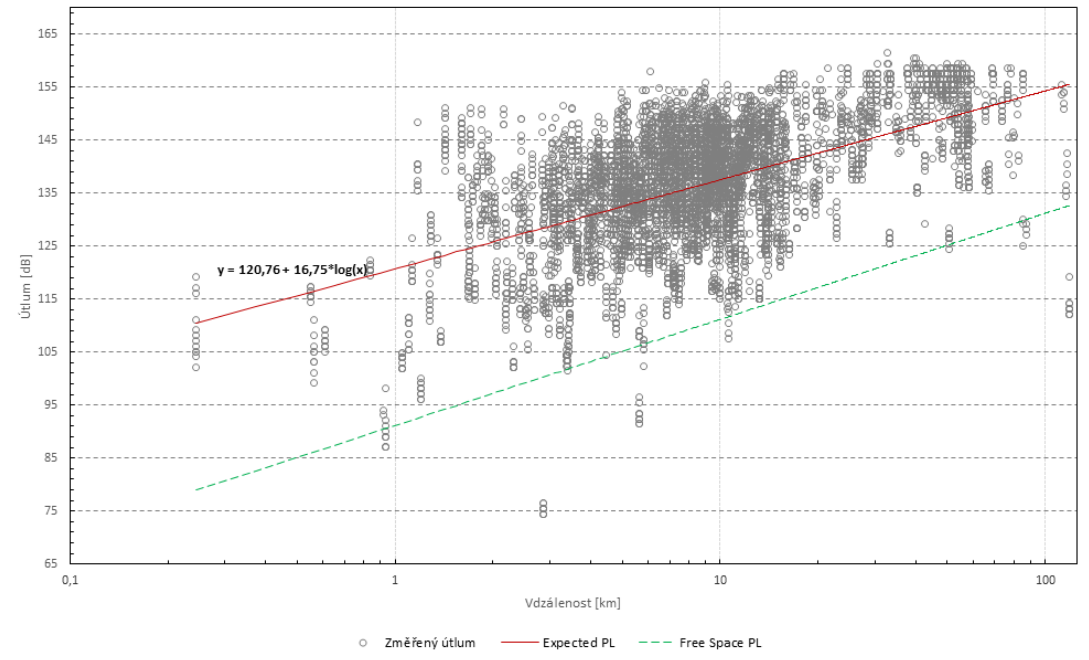
Speciálním případem pomalých úniků (Slow Fading) je tzv. stínový únik (SF, Shadow Fading), který vzniká krátkodobým zastíněním přijímače jiným objektem. Ten získáme jako standartní odchylku

$$SF = \mathbf{std}(PL - EPL). \quad (16)$$

Jako reference byla použita hodnota FSL (Free Space Path Loss), tedy ztráta síly signálu při jeho šíření otevřeným prostorem vypočítaná podle vzorce [4]

$$FSL = 20 \log\left(\frac{R}{1000}\right) + 20 \log(f) + 32,4. \quad (17)$$

Naměřené hodnoty ztrát šířením, zastínění i referenční hodnoty ztrát signálu při šíření otevřeným prostorem jako funkce logaritmické vzdálenosti jsou součástí Obrázku 39. Shrnutí naměřených hodnot je uvedeno v Tabulce 9.



Obrázek 39: Výsledné hodnoty ztrát šířením

Tabulka 9: Výsledné hodnoty stacionárních měření

	Hodnota
d_{\max} [km]	119,9
$LOS_{\max}(\text{pro } d_{\max})$ [km]	209,3
d_F [m]	0,984
B [dB]	120,76
n [-]	1,68
Stínový únik (SF) [dB]	12,01

6.2.2 Nomadická měření - horizontální

Následující kapitola se zabývá rozбором dynamických měření, tedy měřením kdy se SIGFOX modem pohyboval vůči základnové stanici za předem definovaných podmínek. Hlavním cílem bylo určení vlivu Dopplerova efektu na ztrátovost zpráv. Frekvenční Dopplerův posun f_D , který je způsobený nenulovou vzájemnou rychlostí přijímače a vysílače je přímo-úměrný frekvenci elektromagnetické vlny i rychlosti pohybu [28]. Při použití UNB přenosu může

i relativně malá rychlost značnou měrou ovlivnit ztrátovost přenosu. Dopplerův posun je definován vztahem

$$f_D = \frac{v_r f}{c} \cos(\alpha), \quad (18)$$

kde c je rychlost světla [m/s], v_r relativní rychlost mezi vysílačem a přijímačem [m/s] a $\alpha \in \langle 0; \pi \rangle$ je úhel, který svírá vektor rychlosti pohybu se spojnicí mezi vysílačem a přijímačem.

Úhel vektoru rychlosti způsobí maximální frekvenční posun při $\alpha=0$. V Tabulka 10 jsou zobrazeny rychlosti reálně očekávatelné při nasazení v IoT aplikacích a příslušné frekvenční posuny. Je zřejmé, že frekvenční posun může být reálnou slabinou, zvláště pokud bereme v potaz dobu potřebnou pro zaslání jedné zprávy UNB technologií jakou je i SIGFOX.

Z těchto hodnot byl dále vypočten pro maximální frekvenční posun (při $\alpha=0$) Dopplerův rozptyl DS (Doppler Spread) pro přímý a odražený signál, jehož přibližná reciproká hodnota v mnohacestných kanálech udává dobu koherence (T_{coh}), po kterou je impulsní odezva kanálu časově invariantní.

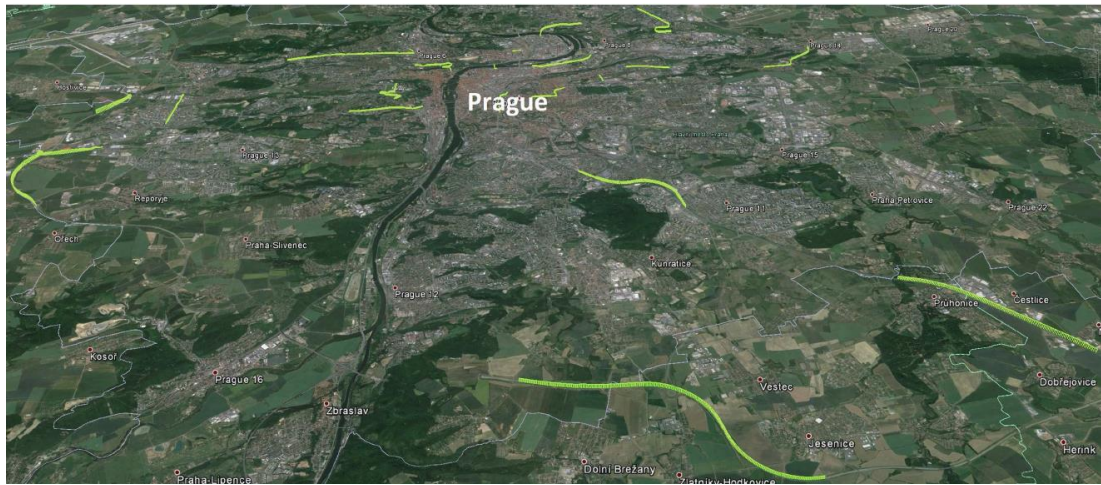
Tabulka 10: Příklad frekvenčních posunů pro frekvenci 868 MHz

Aktivita/Limit	Rychlost [km/h]	f_D ($\alpha=0$) [Hz]	f_D ($\alpha=\pi/2$) [Hz]	f_D ($\alpha=\pi$) [Hz]	T_{coh} [ms]
Běh	10	8,04	4,22	-3,60	62,19
Pěší zóna	30	24,11	12,67	-10,80	20,74
Město	50	40,19	21,11	-18,01	12,44
Tunel	70	56,26	29,55	-25,21	8,89
Mimo město	90	72,33	38,00	-32,41	6,91
Dálnice	130	104,48	54,89	-46,82	4,79

Pro vyloučení chyb způsobených zařízením bylo při měření použito dvou modemů. Tyto modemy byly upevněny na střechu automobilu a nastaveny tak, aby vysílaly v sériovém módu.

Měření probíhalo s 21 základnovými stanicemi na území města a 13 dalšími v jeho blízkém okolí. Měření jsou rozdělena do skupin dle různého stupně

zastavění území. Detail měření je vidět na následujícím obrázku, zeleně jsou zvýrazněny trasy měření.



Obrázek 40: Realizace dynamických měření

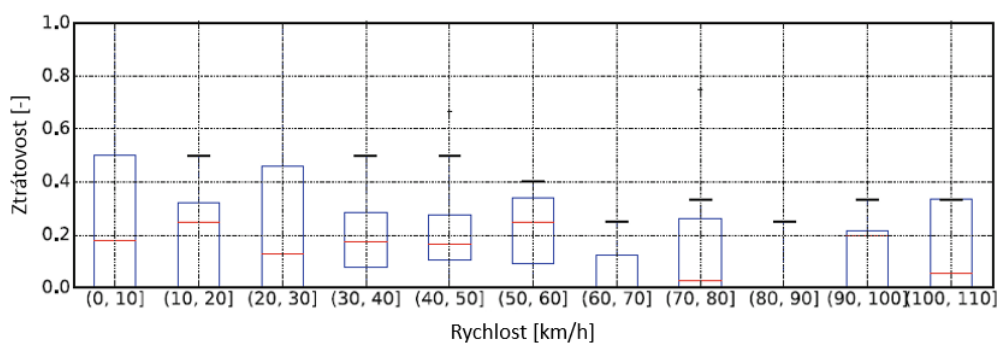
Při pokrytí oblasti více základnovými stanicemi dochází k rozdílnosti úhlu α pro každou z nich. Navíc tento úhel α se během odesílání zprávy může měnit. Proto je zpráva správně přijata přijímací stranou pouze v případě, kdy je frekvenční posun způsobený Dopplerovým jevem takový, že signál je přijatý v jednom z předdefinovaných slotů alespoň jednou základnovou stanicí. Toto kritérium není s největší pravděpodobností tak striktní a přijímač dokáže zpracovávat i případy, kdy přenos není dokonale přijímán ve středové frekvenci kanálového intervalu.

Protože počet faktorů způsobujících potenciální ztrátu zprávy je vysoký a celkový model komplexní, byla první měření prováděna na zjednodušeném modelu. Měřicí moduly byly nastaveny tak, aby vysílaly v pravidelných intervalech zprávy obsahující – GPS polohu, rychlost a unikátní identifikaci (v souvislosti s tímto měřením). Měřicí zařízení současně lokálně ukládalo údaje o sledování a detaily odeslaných zpráv pro další analýzu. Ačkoli rychlost a pozice ve zprávách nebylo nutné pro úspěšnou analýzu zasílat, byla motivací simulace skutečné aplikace koncovým uživatelem např. v sledovacím zařízení.

Takto získané hodnoty při měření byly porovnány s daty přicházejícími přes rozhraní systému SIGFOX, které zpřístupnilo každou přijatou zprávu sítě včetně

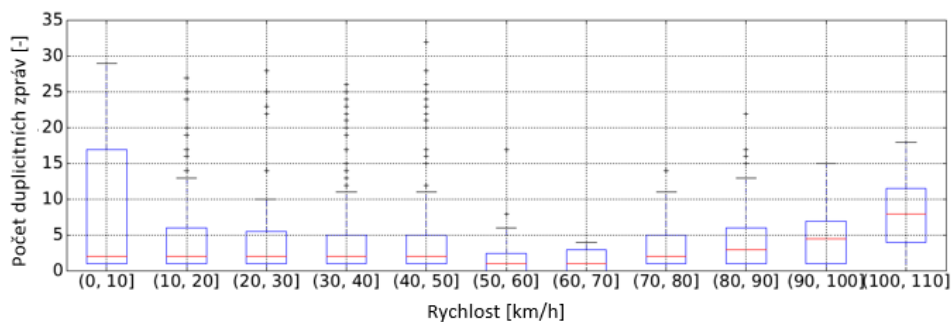
všech duplikátů. Srovnáním těchto datových souborů bylo možné určit ztrátovost přenosu pro jednotlivé cestovní rychlosti. Protože odeslání každé zprávy trvalo několik vteřin a nebylo možné docílit konstantní rychlosti při všech měřeních (díky silniční dopravě), jsou výsledky rozděleny do intervalů od 0 do 110 km/h.

Výsledky popisující ztrátovost v závislosti na rychlostním intervalu jsou vyneseny do grafu (Obrázek 41). Z tohoto grafu lze vypočítat závislost ztrátovosti na míře zastavení. Průměrná ztrátovost se pohybovala kolem 20 %, ale nevykazovala žádnou zjevnou závislost. Mírně větší ztrátovost lze pozorovat při rychlostech menších než 50 km/h, což může být způsobeno větší mírou zastavení. Naopak měření při vyšších rychlostech vykazovalo překvapivě nižší průměrnou ztrátovost, s výjimkou intervalů 60-70 km/h a 80-90 km/h, kde nebyl dostatečný počet vzorků. Toto bude nejspíše způsobeno vylepšenou hodnotou LOS díky menší míře zastavení a dále větší plynulostí provozu bez nutnosti časté akcelerace/decelerace. Změny rychlosti v tomto případě působí větší problémy díky průběžnému posunutí frekvence způsobené Dopplerovým jevem. Během vysílání zprávy tak dochází ke změnám frekvence a základnová stanice tak může mít problém s přijetím signálu.



Obrázek 41: Ztrátovost v závislosti na rychlostním intervalu

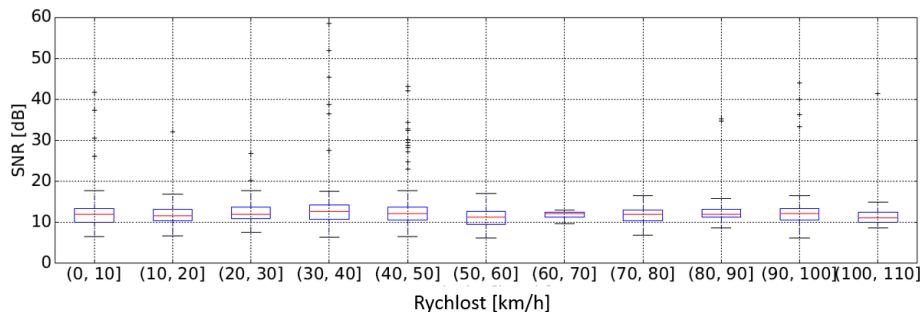
Předpoklad vlivu zastavenosti prostředí na snížení ztrátovosti je podpořen následující analýzou. Obrázek 42 znázorňuje počet přijatých duplikátů jednotlivých zpráv.



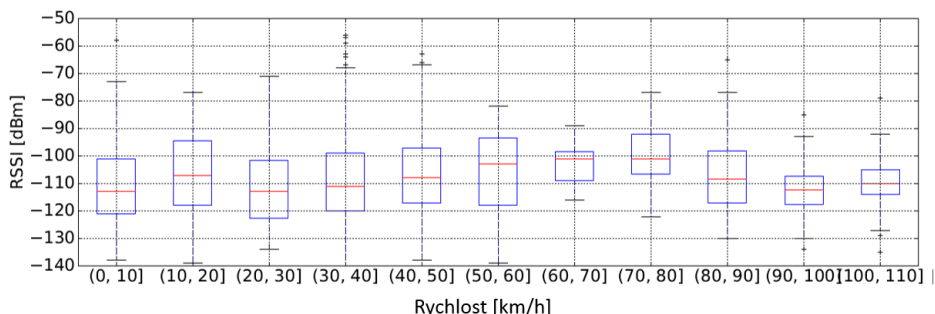
Obrázek 42: Počet duplicitních zpráv v závislosti na rychlostním intervalu

Z maximálního počtu 32 základnových stanic bylo možné dosáhnout téměř 30, což je způsobeno především terénním profilem a vyvýšenými místy s lepší LOS. Nicméně, trend rostoucího počtu duplikátů s rostoucí rychlostí a menší úrovní zastavení je zřejmý.

Zatímco počet duplicitních zpráv vykazuje určité tendence s rostoucí rychlostí, rádiové parametry jako RSSI a SNR nejsou tak zřejmé. Výsledné hodnoty jsou zobrazeny na Obrázek 43. Ačkoliv hodnoty SNR nevykazují velký rozptyl, nevykazují ani výraznou závislost na rychlosti.



(a) SNR v závislosti na rychlostním intervalu



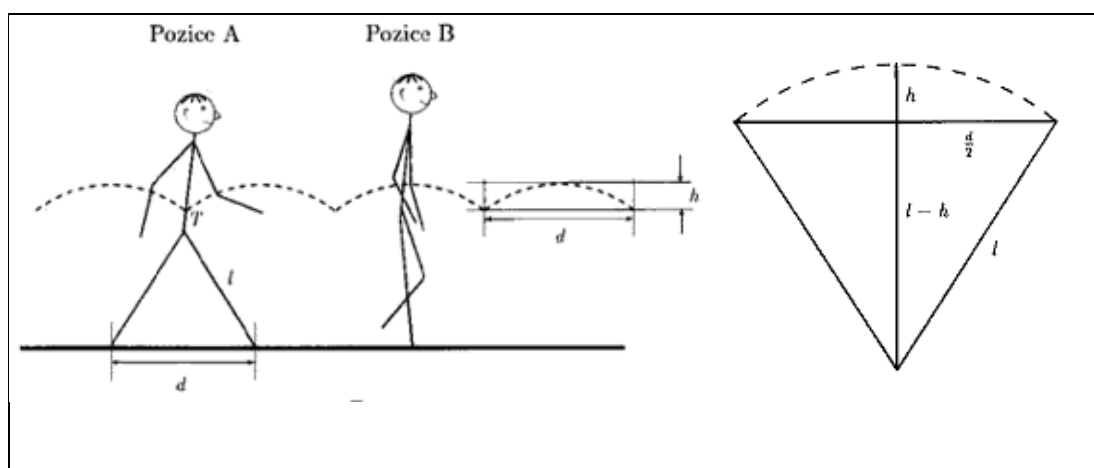
(b) RSSI v závislosti na rychlostním intervalu

Obrázek 43: Rádiové parametry v závislosti na rychlostním intervalu

6.2.3 Nomadická měření - vertikální

Další sadou měření zaměřených na pohybující se zařízení byla simulace využití zařízení při lidském běhu, kdy daná osoba nedosahuje sice takových rychlostí v horizontálním směru, ale přidává se pohyb ve vertikálním směru (pohyb těžiště) (viz Obrázek 44). Z dokumentace plyne, že pohyb těžiště při běhu je v rozsahu několika centimetrů, většina z autorů se přiklání k horní hranici rozsahu pohybu 10 cm [130][131][132][133][134], kterou lze stanovit taktéž propočtem typických hodnot ($l = 0,95$ m, $d = 0,8$ m), které vyplývají z následujícího vztahu [133][134]

$$h = l - \sqrt{l^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2}. \quad (19)$$



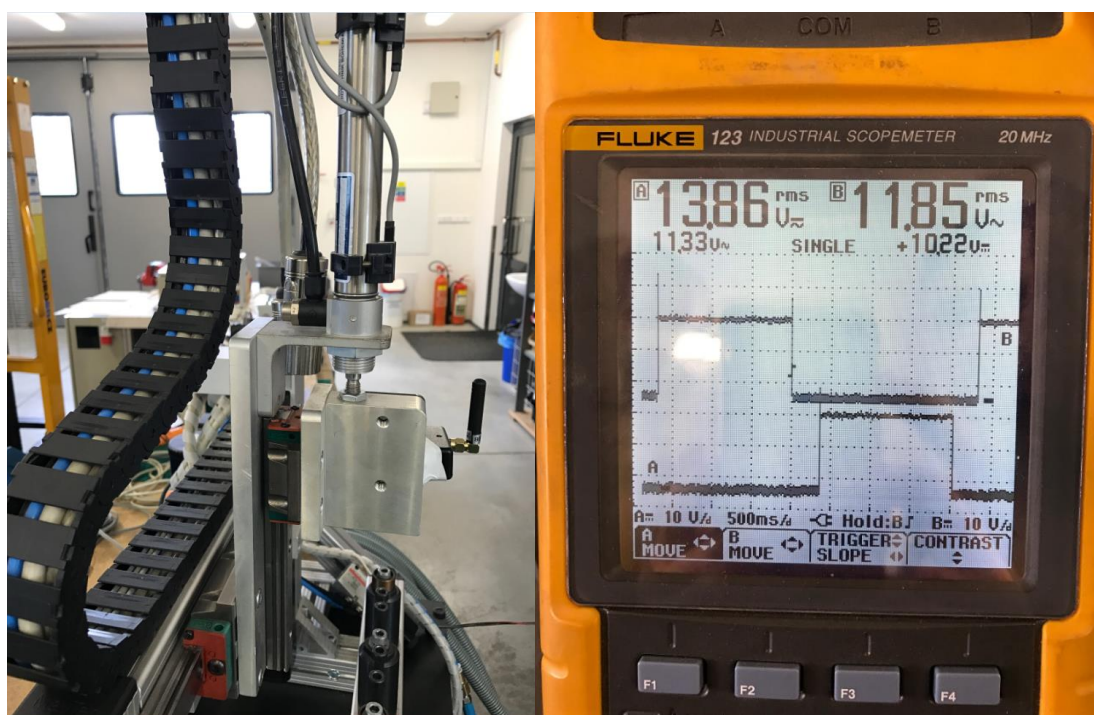
Obrázek 44: Analýza pohybu lidského těžiště [133][134]

Pro měření vertikálního pohybu byl vybrán pneumatický píst odpovídající horní hranici rozsahu 10 cm. Měřicí stolice (viz Obrázek 45) byla naprogramována tak, aby jeden běh trval 2 s. Hodnoty zrychlení dosahovaného při vertikálním pohybu pneumatickým pístem shrnuje Tabulka 11. Úprava zrychlení pístu probíhala za pomoci zobrazení zpoždění signálů ze senzorů umístěných v mezních pozicích pístu. Příklad detekovaného signálu ze senzorů je zobrazen níže, osciloskop použitý pro vynesení průběhu senzorů byl průmyslový ruční osciloskop Fluke 123 (rozsah časové základny 10 ns – 500 s /div).

Z výsledků lze usoudit, že při tomto zjednodušeném měření nezohledňujícím kombinaci pohybu těžiště s pohybem v horizontálním směru protokol nevykazoval pro dané rozmezí hodnot výrazné změny.

Tabulka 11: Výsledné hodnoty vertikálních měření

	50 ms	80 ms	200 ms	350 ms
RSSI _{min} [dB]	-132	-129	-122	-128
Počet duplicit	0	0	0	1
Průměrný počet BTS	1	1	1	1
Počet unikátních zpráv	10	10	10	10

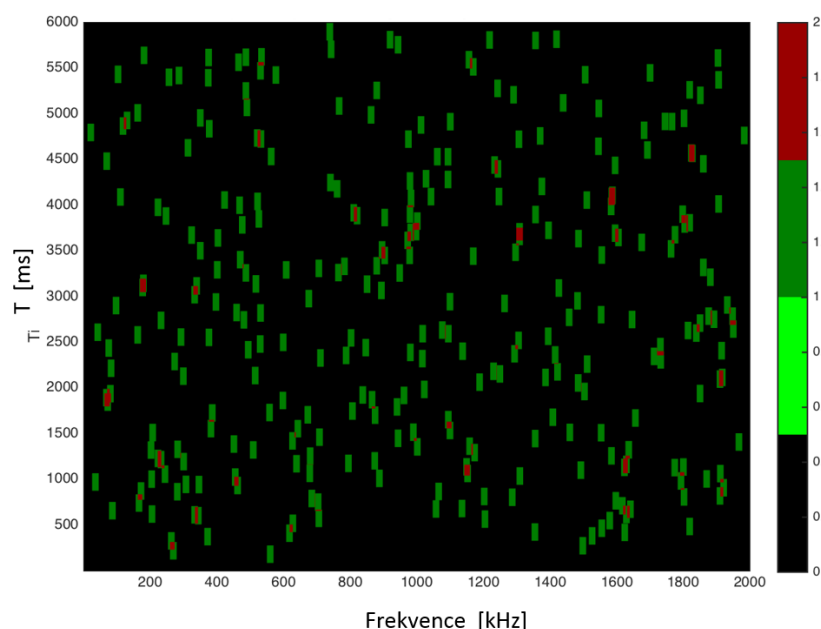


Obrázek 45: Testovací stolice pro vertikální měření

6.3 Dvoudimenzionální simulace kolizního chování

Tato sekce se věnuje teoretickému výpočtu pravděpodobnosti interference mezi zařízeními využívající metodu SIGFOX nebo SIGFOX-SFH. Pravděpodobnosti byly numericky vyhodnoceny metodou Monte Carlo pro případ vyslání až 1000

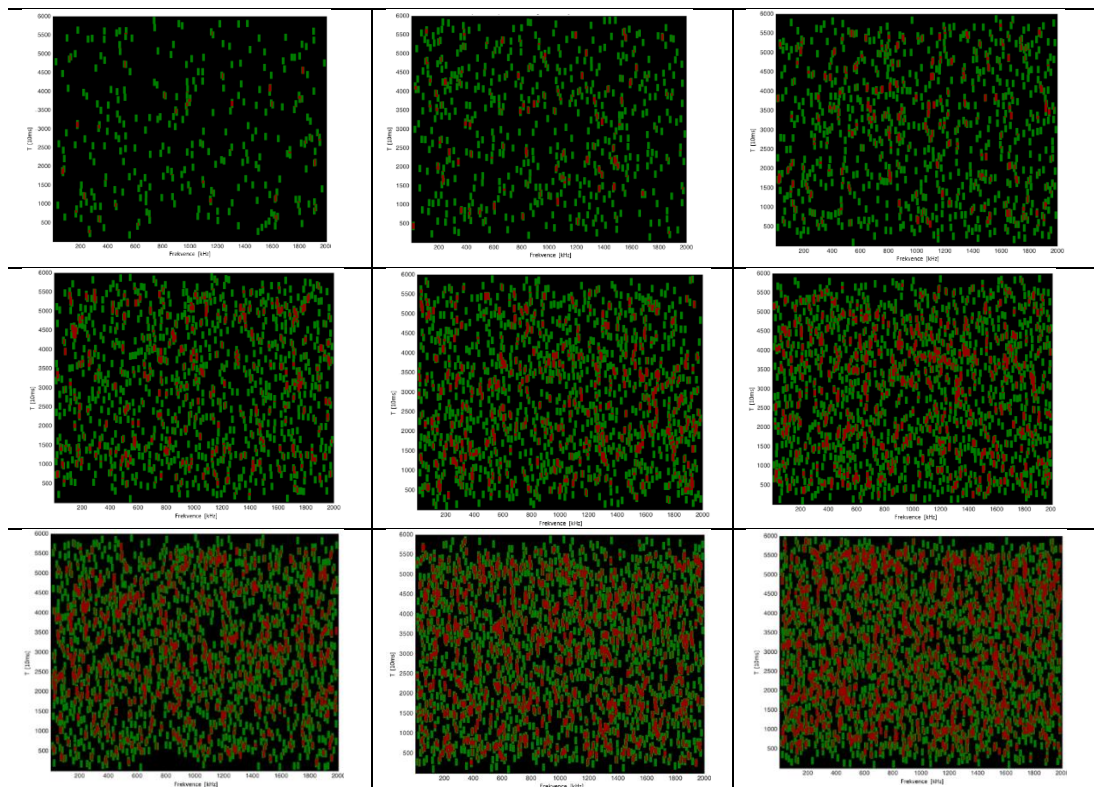
nezávislých rámců (tedy z 1000 různých zařízení) během 60 sekund. Střední frekvence každého paketu byla výběrem z rovnoměrného rozdělení na intervalu $\Omega_f=[0, 2000]$ Hz a počáteční čas vysílání každého rámce byl náhodným výběrem z rovnoměrného rozdělení na intervalu $\Omega_t=[0, 60]$ s. Polohy paketů v dvourozměrném intervalu $\Omega_f \times \Omega_t$ byly zaznamenány na dvourozměrné časově-frekvenční mříži diskretizované s kroky $\Delta f=100$ Hz. Příklad výpočtu je zobrazen na Obrázku 44, kde jsou znázorněny polohy paketů a zvýrazněna místa jejich překryvu pouze pro 100 zařízení. Simulace probíhala v programu Matlab2016b+Python3.5.2, kód simulačního programu je součástí CD přiloženého k této práci.



Obrázek 46: Příklad simulace R-FTDMA metody (100 zařízení a 60 s)

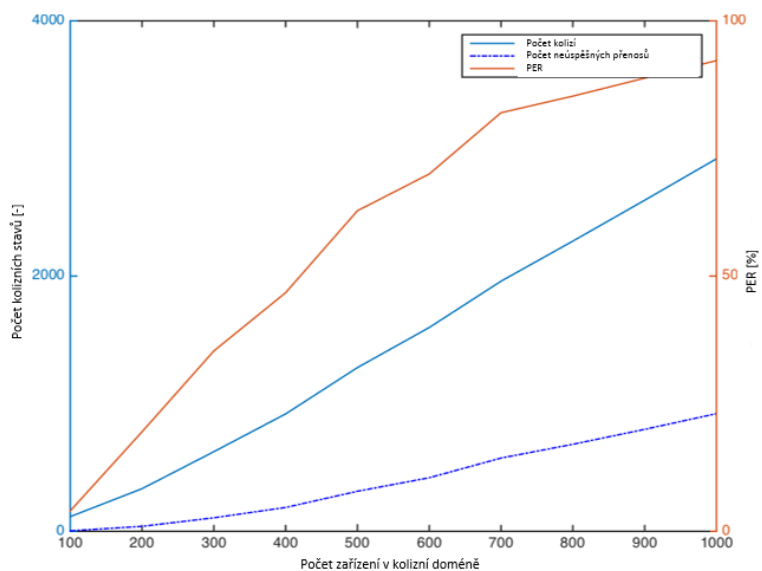
Analýza počtu kolizí

Takto navržený simulátor lze použít pro predikce chování sítě při vyšším zatížení. Následující sada simulací zachycuje nárůst počtu kolizí s přibývajícím počtem zařízení:



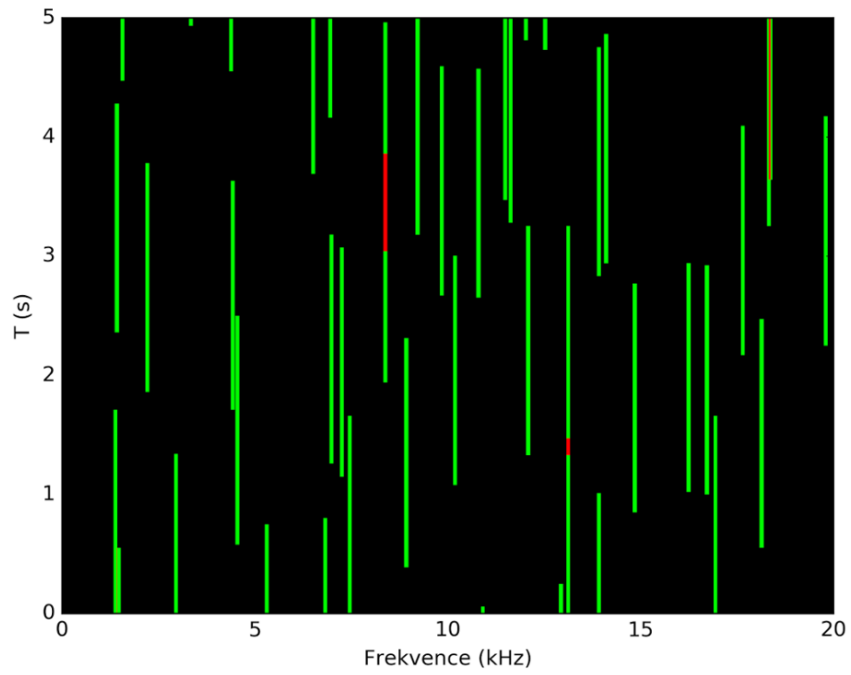
Obrázek 47: Simulace s rostoucím počtem zařízení v kolizní doméně

Graf zachycující průběh chybovosti s narůstajícím počtem zařízení v kolizní doméně:

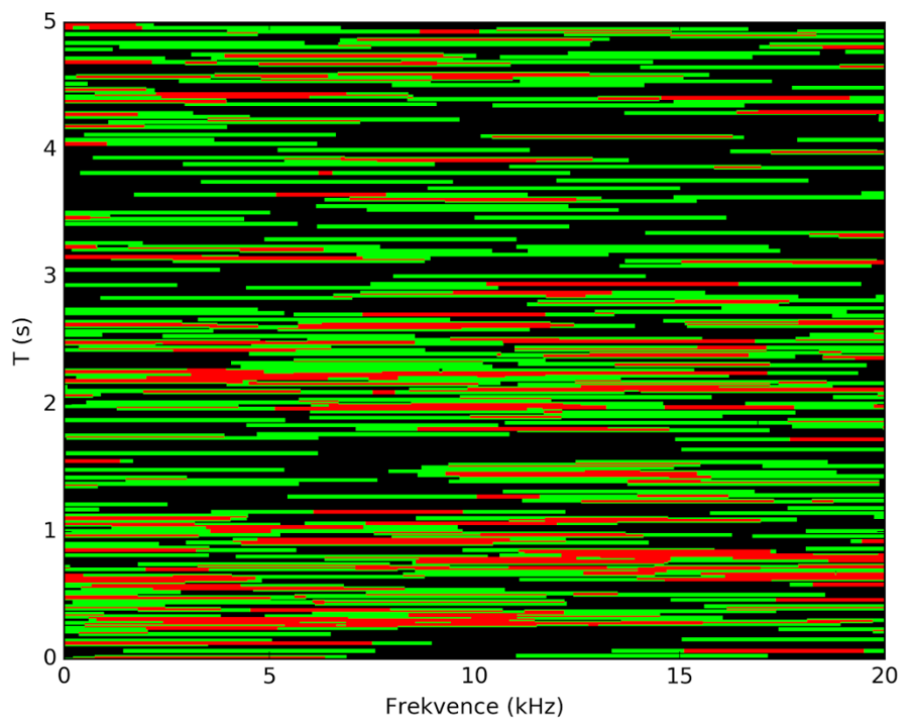


Obrázek 48: Simulace SIGFOX s rostoucím počtem zařízení v kolizní doméně

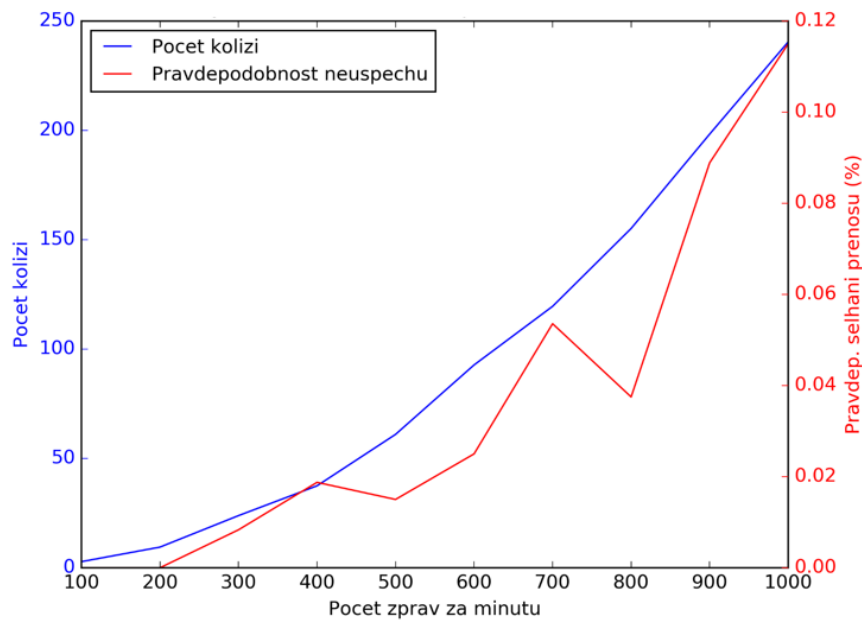
Následující závěrečné obrázky ukazují porovnání simulace originální metody protokou SIGFOX s nově navrženou metodou SIGFOX-SFH.



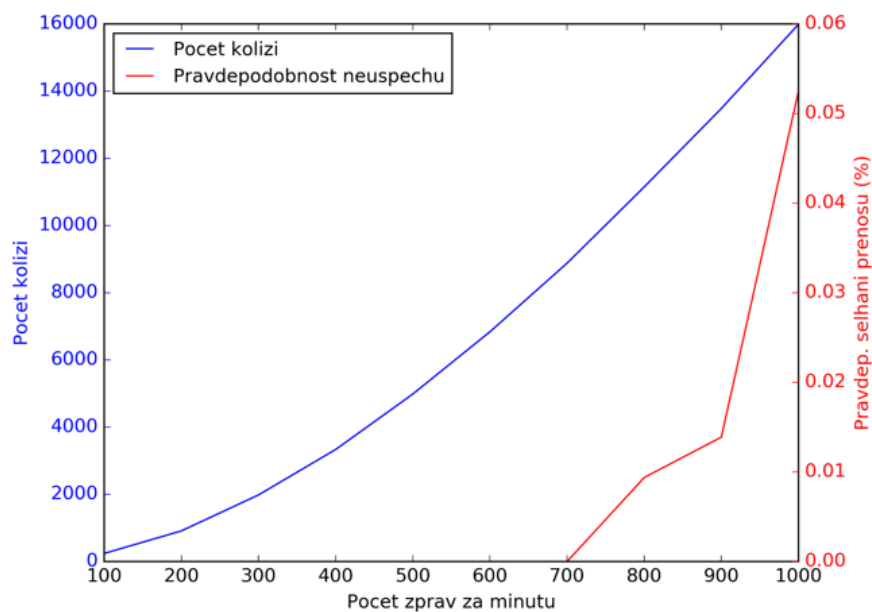
Obrázek 49: Originální SIGFOX metoda (1000 zařízení, 60s)



Obrázek 50: SIGFOX-AFH metoda (1000 zařízení, 60s)



Obrázek 51: Originální SIGFOX metoda (1000 zařízení, 60s)



Obrázek 52: SIGFOX-SFH metoda (1000 zařízení, 60s)

Pravděpodobnosti výpočtů této kapitoly byly numericky vyhodnoceny metodou Monte Carlo pro případ vyslání až 1000 nezávislých rámců, reprezentujících 1000 různých zařízení během 60 sekund. Střední frekvence paketů obou metod byla výběrem z rovnoměrného rozdělení na intervalu $\Omega_f = [0, 2000]$ Hz a počáteční čas vysílání každého rámce byl náhodným výběrem

z rovnoměrného rozdělení na intervalu $\Omega_t=[0, 60]$ s. Polohy paketů v dvourozměrném intervalu $\Omega_f \times \Omega_t$ byly zaznamenány na dvourozměrné časově-frekvenční mříži diskretizované s kroky $\Delta f= 100$ Hz.

Porovnání simulace originální metody protokolu SIGFOX s nově navrženou metodou SIGFOX-SFH ukázalo, že **nově navržená metoda dosahuje až 5x nižší pravděpodobnosti úplného selhání**, tedy kolize všech paketů daného rámce než originální metoda SIGFOX.

7 Závěr

7.1 Závěrečné shrnutí

V práci jsem se zaměřil nejen na optimalizaci samotného protokolu SIGFOX, ale i na komplexní doporučení metod a technologií tak, aby mohly být průmyslově použity a masově nasazeny. To se týká i doporučení k odstranění výrazných nedostatků, jako je praktická absence zpětného kanálu (viz Kapitola 5.2.5), malá odolnost proti pohybu jednotky v 3D prostoru (viz Kapitola 6.2.2) a z toho plynoucí požadavky na systémové úpravy jako je frekvenční hopping – SIGFOX-SFH a nebo návrh na nový princip stabilizace nosné frekvence (Kapitola 5.2.3). Teprve tehdy lze důvodně předpokládat, že SIGFOX splní naděje do něj vkládané a spolu s dalšími LPWAN technologiemi obsadí niku v internetu věcí a to je prostor čítající - dle odhadů - až deset procent z predikovaného počtu 25-50 miliard IoT/M2M zařízení generujících řádově 300 mld. dolarů.

7.2 Splnění vytčených cílů

Stanovené cíle – viz Kapitola 3 – tedy: **optimalizace protokolů v mobilních sítích**. V průběhu práce a na základě výsledků obhajoby minima byla oblast dále upřesněna a směřována na sítě LPWAN a v nich na perspektivní technologii **SIGFOX**. To ve svých důsledcích zároveň vedlo i do prostředí internetu věcí ve vztahu k technologii SIGFOX a v souhrnu i k návrhu **nové přístupové metody SIGFOX-SFH** pro sítě LPWAN z prostředí internetu věcí, spolu s rozбором jejího použití, a dále k novému algoritmu **SIGFOX-AFH**. Nová metoda i algoritmus mají za úkol, při zachování velikosti kolizní domény, efektivněji přenést data tak, aby bylo dosaženo minimalizace chybovosti. Pro splnění hlavního cíle bylo však nezbytné splnit dílčí cíle:

1. Provedení rešerše LPWAN řešení.

Rešerše a rozbor je součástí Kapitoly 4. Shrnutí nejdůležitějších vlastností hlavních řešení LPWAN technologií komerčního i nekomerčního původu je součástí Podkapitoly 4.2. Porovnání technologií potvrdilo velký potenciál zkoumané technologie SIGFOX.

2. Formulace nové přístupové metody SIGFOX-SFH a algoritmu SIGFOX-AFH.

Teoretické odvození algoritmu SIGFOX-AFH je součástí Kapitoly 5.4.2, příklad realizace za použití mikrokontroléru TinyGecko EFM32TG210 a rádiového obvodu SiliconLabs Si4461 je součástí stejné kapitoly. Teoretické odvození metody SIGFOX-SFH je součástí Kapitoly 5.3.3, její návrh na stejném obvodu je součástí Kapitoly 5.3.4

3. Návrh a realizace měření na určení spolehlivosti současné metody přenosu u stávajícího protokolu SIGFOX.

Rozsáhlá měření jsou součástí Kapitoly č. 6. Výsledkem stacionárních měření je vytvoření útlumového modelu, který může sloužit pro plánování budoucí implementace sítí, popř. pro návrhy algoritmů na odhad polohy zařízení. Při měřeních maximální dosažitelné vzdálenosti vysílač-přijímač s dodržáním regulačních podmínek ISM pásma bylo dosaženo obdivuhodných 120 km s teoretickým dosahem přes 200 km. Protokol zároveň vykázal silnou závislost útlumu na 3D profilu okolí jednotky a přímé viditelnosti (LOS) v zastavěných oblastech. Výsledky nomadických měření při zvýšené ztrátovosti opět potvrdily vysokou závislost protokolu na 3D profilu okolí.

4. Navržení a vytvoření simulačního modelu vhodného pro analýzu systémů R-FTDMA. Stanovení vlivu počtu zařízení v kolizní doméně na spolehlivost přenosu.

Teoretická diskuse modelu je součástí Kapitoly 5.4.3. Výsledný model implementující na výpočty metodu Monte Carlo byl vytvořen v programu Matlab2016b a je součástí příloh.

5. Aplikace simulačního modelu na přístupovou metodu SIGFOX-SFH a její porovnání se současnou metodou.

Porovnání originální metody protokolu SIGFOX s nově navrženou metodou SIGFOX-SFH při zachování velikosti kolizní domény je součástí Kapitoly 6.3. Výsledky 40 nezávislých simulací potvrdily zvýšenou odolnost nové metody proti ztrátovosti paketů.

Hlavní cíl i dílčí cíle práce byly tudíž splněny.

7.3 Náměty na další směry výzkumu v dané oblasti

Mezi další směry, kterými se plánuji při svém dalším výzkumu zabývat, patří:

- Práce na algoritmu SIGFOX-AFH implementujícím nejen adaptivní frekvenční selekci, ale i adaptivní řízení výkonu na základě potvrzení a jeho publikace.
- Vytvoření funkčního vzorku (demonstrátoru) implementujícího navržený SIGFOX-AFGH algoritmus.
- Propracování návrhu zpětného kanálu.
- Prostudování a navržení metody stabilizace frekvence lokálního oscilátoru z referenčního signálu GNSS za pomoci fázového závěsu napojeného na GPS čip (M8Q od firmy u-blox). Aplikovat stejný postup pro SIGFOX modul TD1204 s vestavěným GPS modulem UBX G7020 firmy u-blox.

Seznam použitých zdrojů

- [1] WICKER, Stephen B. *Cellular convergence and the death of privacy*. New York, NY: Oxford University Press, 2013. ISBN 9780199915354.
- [2] ADIBI, Sasan, Amin MOBASHER a Tom TOFIGH. *Fourth-generation wireless networks: applications and innovations*. Hershey, PA: Information Science Reference, c2010. ISBN 1615206752.
- [3] NAHA, Abhi a Peter. *WHALE. Essentials of mobile handset design*. New York: Cambridge University Press, 2012. ISBN 9781107010048.
- [4] G. Margelis, R. Piechocki, D.K., Thoma, P. *Low throughput networks for the iot: Lessons learned from industrial implementations*, pp. 181-186 (2015).
- [5] Davies, A.. *On lpwans: Why sigfox and lora are rather different, and the importance of the business model* [online]. Dostupné z: <http://rethink-iot.com/2015/03/20/on-lpwans-why-sigfox-and-lora-are-rather-different-and-the-importance-of-the-business-model/>
- [6] Link Labs, I.. *A comprehensive look at low power, wide area networks* [online]. Dostupné z: <http://info.link-labs.com/lpwan>
- [7] Minh-Tien Do, Claire Goursaud, J.M.G.: *Interference modelling and analysis of random fdma scheme in ultra narrowband networks* [online]. 2014. Dostupné z: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01096493>
- [8] SIGFOX: *Sigfox specics* [cit. 2016-05-10]. 2016. Dostupné z: <http://makers.SIGFOX.com/#about>
- [9] Smierzchalsk, S.: *Sigfox technical specification* [online]. Dostupné z:
- [10] Lord Edward George Bowen z Chersterfieldu. *Radar Days*. Reprint. Bristol: Institute of Physics Publishing, 1987. ISBN 9780750305860.

- [11] Galati, G. *100 Years of Radar*. Springer eBook. 2016. ISBN 9783319005843.
- [12] Brown, R. H. *Robert Alexander Watson-Watt, the father of radar*. Engineering Science and Education Journal. 1994, Volume: 3, Issue: 1. Pages: 31 - 40. DOI: 10.1049/esej:19940108
- [13] Stockman, H. *Communication by Means of Reflected Power* [online]. 1948 [cit. 06-05-2012]. Dostupné z: DOI: 10.1109/JRPROC.1948.226245
- [14] Lord Bowden of Chesterfield. *The story of IFF (identification friend or foe)*. Proc. IEE Vol. A132 [online]. 1985 [cit. 10-05-2012]. Dostupné z:
- [15] U.S. Navy. *U.S. Radar Operational Characteristics of Radar Classified by Tactical Application FTP 217*. 1943 [cit. 15-05-2012]. Dostupné z: <http://www.ibiblio.org/hyperwar/USN/ref/Radar/Radar-13.html>
- [16] Černošous, J. *Polohovací zařízení radaru*. Diplomová práce VUT Brno. 2010 [cit. 16-05-2012]. Dostupné z: http://dl.uk.fme.vutbr.cz/zobraz_soubor.php?id=1191
- [17] JONES, Erick C. a Christopher A. CHUNG. *RFID in logistics: a practical introduction*. Boca Raton: CRC Press, c2008. ISBN 0849385261.
- [18] Rieback, M. R., Crispo, B., Tanenbaum, A. S. *The evolution of RFID Security. IEEE Percasive Computing 5.1*. c2006 [cit. 20-06-2012]. Dostupné z: <http://rfidguardian.org/images/3/37/leeepc.06.pdf>
- [19] Český telekomunikační úřad. *Všeobecné oprávnění vo-r/10/05.2014-3 k využívání rádiových kmitočtů u a k provozování zařízení krátkého dosahu* [online]. Dostupné z: http://www.ctu.cz/cs/download/ooP/rok_2014/vo-r_10-05_2014-03.pdf#page=2
- [20] SIGFOX: *Sigfox, m2m and iot redefined through coste effective and energy optimized connectivity* [online]. Dostupné z:

http://www.SIGFOX.com/static/media/Files/Documentation/SIGFOX_Whitepaper.pdf

- [21] Do, M-T., Goursaud, C., Gorce, J-M.: *Interference Modelling and Analysis of Random FDMA schemes in Ultra Narrowband Networks*, pp. 132-137 (2014). ISBN 978-1-61208-360-5.
- [22] G. Margelis, R. Piechocki, D.K., Thoma, P. *Low throughput networks for the IoT: Lessons learned from industrial implementations* [online] pp. 181-186 (2015). Dostupné z: doi: 10.1109/WF-IoT.2015.7389049
- [23] SimpleCell Networks a.s.: *Technologie SIGFOX* [online]. 2016 [cit. 3.4.2016]. Dostupné z: https://www.simplecell.eu/technologie_sigfox/
- [24] T-Mobile Czech Republic a.s. *T-Mobile pokryje Českou republiku sítí SIGFOX pro internet věci* [online], 2015 [cit. 10.9.2015]. Dostupné z: <https://www.t-press.cz/cs/tiskove-materialy/tiskove-zpravy-t-mobile/t-mobile-pokryje-ceskou-republiku-siti-sigfox-pro-internet-veci.html>
- [25] Telecom Design: *TD1208 Datasheet* [online], 2014 [cit. 5.5.2015]. Dostupné z: < https://github.com/Telecom-Design/Documentation_TD_RF_Module/blob/master/TD1208%20Datasheet.pdf>
- [26] Silicon Labs. *Si4464/63/61/60 Rev 1.2 1/6* [online], 2016 [cit. 3.4.2016]. Dostupné z: <https://www.silabs.com/Support%20Documents/TechnicalDocs/Si4464-63-61-60.pdf>
- [27] Meinilä J. et al. *D5.3: WINNER+ Final Channel Models* [online], 2010 [cit. 4.4.2016]. Dostupné z: http://projects.celtic-initiative.org/winner+/WINNER+%20Deliverables/D5.3_v1.o.pdf
- [28] Xiong, F., Andro, M.: *The Effect of Doppler Frequency Shift, Frequency Offset of the Local Oscillators, and Phase Noise on the Performance of Coherent OFDM Receivers* [online], NASA Glenn Research Center, 2001.

Dostupné z:

<https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20010049375.pdf>

- [29] 3GPP GERAN#63: *Cellular System Support for Ultra Low Complexity and Low Throughput Internet of Things*, 2014 [online]. Dostupné z: <
http://www.3gpp.org/ftp/tsg_geran/TSG_GERAN/GERAN_62_Valencia/Docs/GP-140421.zip>
- [30] ITU-T: Y.4000/Y.2060 (06/2012), *Overview of the Internet of things* [online]. Dostupné z: <http://www.itu.int/en/ITU-T/studygroups/2013-2016/13/Pages/default.aspx>.
- [31] Marakami, T., *Ubiquitous networking: Business Opportunities and Strategic Issues*. 2004 No. 79. Japonsko. Nomura Research Institute. Dostupné z: <
<http://www.nri.com/global/opinion/papers/2004/pdf/np200479.pdf>>
- [32] ITU: *Internet Reports The Internet of Things*, 2005. Dostupné z: <https://www.itu.int/net/wsis/tunis/newsroom/stats/The-Internet-of-Things-2005.pdf>
- [33] Weiser, M., *Ubiquitous Computing*, 1991, Computer Scientist. Dostupné online: < <https://www.ics.uci.edu/~corps/phaseii/Weiser-Computer21stCentury-SciAm.pdf> >
- [34] Evropská komise. *Úřední věstník – Rozhodnutí Komise K(2006) 3226*, 2007. Dostupné z:< <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2007:086:0001:0010:CS:PDF> >
- [35] Karaliopoulos, M., Narenthiran, K., Evans, B.: AIN, R. K., KATIYAR, S., AGRAWAL, N. K.: *Satellite Radio Interface and Radio Resource Management Strategy for the Delivery of Multicast/Broadcast Services via an Integrated Satellite-Terrestrial System* [online]. c2004. Dostupné z:

<<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.141.2009&rep=rep1&type=pdf>>

- [36] 3GPP: GERAN#67, 2015 [online]. Dostupné z: <
http://www.3gpp.org/ftp/tsg_geran/TSG_GERAN/GERAN_67_Yinchuan/>
- [37] 3GPP: GERAN#69, 2015 [online]. Dostupné z: <
http://www.3gpp.org/ftp/tsg_geran/TSG_GERAN/GERAN_69_Malta/>
- [38] 3GPP: GERAN#70, 2016 [online]. Dostupné z: <
http://www.3gpp.org/ftp/tsg_geran/TSG_GERAN/GERAN_70_Nanjing/>
- [39] 3GPP: GERAN#69: Narrowband IOT, 2015 [online]. Dostupné z: <
ftp://ftp.3gpp.org/tsg_ran/TSG_RAN/TSGR_69/Docs/RP-151621.zip>
- [40] 3GPP: List of Change Requests that allow NB-IoT to be implemented in Release 13, 2016 [online]. Dostupné z:
http://www.3gpp.org/images/PDF/R13_IOT_rev3.pdf
- [41] RICO-ALVARINO, et al. An overview of 3GPP enhancements on machine to machine communications. IEEE Communications Magazine [online]. 2016, 54(6), 14-21 [cit. 2016-12-11]. DOI: 10.1109/MCOM.2016.7497761. ISSN 0163-6804. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7497761/>
- [42] 3GPP: GERAN#69: LS on name change to EC-GSM-IoT, 2015 [online]. Dostupné z: <
ftp://ftp.3gpp.org/tsg_ran/TSG_RAN/TSGR_69/Docs/GP-160221.zip>
- [43] XINHUI, Wang. 3GPP TSG GERAN. GIS MOTS Convention Center Taipei, Taiwan. 2015, 9, 6-8 [cit. 2016-01-10]. Dostupné z: http://www.3gpp.org/ftp/workshop/2015-11-15_Taipei_summit_5G/Docs/2_5_2015_ITRI_3GPP_summit_GERANv05.pdf

- [44] 3GPP. 3GPP TR 23.770 v13.0.0 Study on system impacts of extended Discontinuous Reception (DRX) cycle for power consumption optimization (Release 13). 2015, 42 [cit. 2015-09-09]. Dostupné z: http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/23_series/23.770/23770-doo.zip
- [45] CHANG, Chia-Wei a Jyh-Cheng CHEN. Adjustable Extended Discontinuous Reception Cycle for Idle-State Users in LTE-A. IEEE Communications Letters [online]. 2016, 2288-2291 [cit. 2016-11-11]. DOI: 10.1109/LCOMM.2016.2602200. ISSN 1089-7798. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7549050/>
- [46] DA SILVA, Icaro Leonardo, Gunnar MILDH, Mikko SAILY a Sofonias HAILU. A novel state model for 5G Radio Access Networks. In: 2016 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC)[online]. IEEE, 2016, s. 632-637 [cit. 2016-12-11]. DOI: 10.1109/ICCW.2016.7503858. ISBN 978-1-5090-0448-5. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7503858/>
- [47] 3GPP. LPWA June 2016 [online]. 2016 [cit. 2016-10-02]. Dostupné z: http://www.3gpp.org/ftp/Information/presentations/presentations_2016/3GPP_Standards_for_IoT.pdf
- [48] ROONEY, Shane. GSMA news article for 3GPP [online]. 2015 [cit. 2016-02-10]. Dostupné z: http://www.3gpp.org/news-events/partners-news/1758-gsma_iot
- [49] LoRa Alliance: LoRaWAN Specification v1.0.2 [online]. 2016 [cit. 2016-10-11]. Dostupné z: http://portal.lora-alliance.org/DesktopModules/Inventures_Document/FileDownload.aspx?ContentID=1398
- [50] SEMTECH. SX 1272/3/6/7/8: LoRa Modem. Designer's Guide [online]. 2013 [cit. 2016-05-01]. Dostupné z: https://www.semtech.com/images/datasheet/LoraDesignGuide_STD.pdf

- [51] SEMTECH. *SX 1272/3/6/7/8: LoRa Modem. Designer's Guide* [online]. 2013 [cit. 2016-05-01]. Dostupné z: https://www.semtech.com/images/datasheet/LoraDesignGuide_STD.pdf
- [52] SIKORA, Axel, AREF, Mohamed. *Free Space Range Measurements with Semtech LoRa™ Technology* [online]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6954616/>
- [53] GEORGIU, O., RAZA, U. *Low power wide area network analysis: Can LoRa scale?* [online]. 2016 [cit. 2016-11-20]. Dostupné z: arXiv preprint arXiv:1610.04793.
- [54] ILČEV, S. D. *Global Mobile Satellite Communications Theory*. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2016. ISBN 9783319391694.
- [55] HAUSNER, V. *Bezpečnost v sítích LPWAN/LPN pro aplikace v IoT* [online]. 2016 [cit. 2016-09-09]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/64726/F3-BP-2016-Hauser-Vojtech-Bezpecnost%20v%20sitich%20LPWAN%3fLPN%20pro%20aplikace%20v%20IoT.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>
- [56] LAMPE, J., IANELLI Z. *Introduction to Chirp Spread Spectrum (CSS) Technology* [online]. Doc. IEEE 802.15-03-0460-00-0000 Nanotron Technologies (2003) [cit. 2016-09-09]. Dostupné z: http://www.ieee802.org/802_tutorials/03-November/15-03-0460-00-0040-IEEE-802-CSS-Tutorial-part1.ppt
- [57] LÜKE, H. D. *Korrelationssignale: Korrelationsfolgen und Korrelationsarrays in Nachrichten- und Informationstechnik, Messtechnik und Optik*. Springer- Verlag Berlin Heidelberg, 1992. ISBN-13: 978-3-642-76953-5.

- [58] Mikhaylov, K., Petäjälä, J., Hänninen, T. *Analysis of the Capacity and Scalability of the LoWa Wide Area Network Technology*. European Wireless 2016; 22th European Wireless Conference (2016) [cit. 2016-09-20]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/profile/Konstantin_Mikhaylov/publication/303917895_Analysis_of_the_Capacity_and_Scalability_of_the_LoRa_Wide_Area_Network_Technology/links/577956bfo8aeb9427e2bfeao.pdf
- [59] Voigt, T., Bor M., Roedig, U., Alonso, J. *Mitigating Inter-network Interference in LoRa Networks* [online]. arXiv:1611.00688v1 [cs.NI]. 2016 [cit. 2016-12-01]. Dostupné z: <https://arxiv.org/pdf/1611.00688v1.pdf>
- [60] Semtech Corporation. *Designer's Guide AN1200.13 SX1272/3/6/8: LoRa Modem*. 2013 [cit. 2016-12-02]. Dostupné z: https://www.semtech.com/images/datasheet/LoraDesignGuide_STD.pdf
- [61] Bor M., Roedig, Voigt, T., U., Alonso, J. *Do LoRa Low-Power Wide-Area Networks Scale?* [online]. arXiv:1610.04793 [cs.NI]. 2016 [cit. 2016-12-02]. Dostupné z: <https://arxiv.org/pdf/1610.04793v1>
- [62] Macek, J. *Létající robot pro práci v exteriéru* [online]. Diplomová práce VUT v Brně 2016. Dostupné z: https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/59582/2016_DP_Macek_Jakub_133663.pdf?sequence=1
- [63] ETSI: *EN 300 328 v 1.9.1 (2015-02)* [online]. 2015 [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: http://www.etsi.org/deliver/etsi_en/300300_300399/300328/01.09.01_60/en_300328v010901p.pdf
- [64] MojeRC.cz. *FrSky Taranis X9E* [online]. 2016 [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: <http://www.mojerc.cz/vysilacky-a-prislusenstvi/rc-vysilacky/pakove-vysilacky/pristroj-frsky-taranis-x9e-mode2-prijimac-x6r-eva-pouzdro.html>

- [65] Česnek, D. *Mapování vnitřního prostředí autonomní helikoptérou* [online]. 2016 [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/64642/F3-BP-2016-Cesenek-David-Mapovani_vnitriho_prostredi_autonomni_helikopterou.pdf
- [66] Merentitis, A. et al. *WSN Trends: Sensor Infrastructure Virtualization as a Driver Towards the Evolution of the Internet of Things* [online]. 2013 [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/profile/Vangelis_Gazis/publication/275032566_WSN_Trends_Sensor_Infrastructure_Virtualization_as_a_Driver_Towards_the_Evolution_of_the_Internet_of_Things/links/552ffifoocf20eaoao6f60ea.pdf
- [67] Kabara, J., Calle, M. *MAC Protocols Used by Wireless Sensor Networks and a General Method of Performance Evaluation*. 2012 [cit. 2016-01-05]. Dostupné z: <http://journals.sagepub.com/doi/full/10.1155/2012/834784>
- [68] Český statistický úřad. *Malý lexikon obcí České republiky 2016* [cit. 2016-12-07]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/documents/10180/50418271/32019916001.pdf>
- [69] IETF. *Terminology for Constrained-Node Networks*. 2014 [cit. 2016-12-10]. Dostupné z: <https://tools.ietf.org/html/rfc7228>
- [70] A. Laya, C. Kalalas, F. Vazquez-Gallego, L. Alonso, J. A. Zarate. *Goodbye, ALOHA!* IEEE Access, vol. PP, no. 99, pp. 1–1, 2016 [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/97385/Access-2016-00170-goodbye-ALOHA.pdf>
- [71] Člupek, V.. *Autentizace s využitím lehké kryptografie* (dizertační práce). Vysoké učení technické v Brně. 2016 [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/63129>

- [72] TU, Jun, Zhi ZHANG, Yu CHENG, Zhi-wei YE a An-qing WU. *An Adaptive HARQ System Based on Cross-Layer Design in Wireless Sensor Networks*. In: *2010 2nd International Workshop on Intelligent Systems and Applications* [online]. IEEE, 2010, s. 1-4 [cit. 2017-02-04]. DOI: 10.1109/IWISA.2010.5473323. ISBN 978-1-4244-5872-1. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5473323/>
- [73] Emmerson, B. *License-Free Spectrum Goes Cellular*. 2014 [cit. 2016-10-01]. Dostupné z: <http://www.nojitter.com/post/240168055/licensefree-spectrum-goes-cellular>
- [74] Kostecký, I. *SIGFOX jako přenosová síť*. 2016 [cit. 2016-12-28]. Dostupné z: <http://www.slideshare.net/ivokostecky/sigfox-jako-penosov-s>
- [75] Krupka, L. *Problematika koexistence LPWAN/LPN technologií v prostředí IoT*. 2016 [cit. 2017-01-02]. Dostupné z: [https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/64707/F3-BP-2016-Krupka-Lukas-Architektura%20Internetu%20oveci%20\(IoT\).pdf](https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/64707/F3-BP-2016-Krupka-Lukas-Architektura%20Internetu%20oveci%20(IoT).pdf)
- [76] Demirkol, I., Ersoy, C., Alagoz, F. *MAC protocols for wireless sensor networks: a survey*. *Communications Magazine*, IEEE, vol. 44, no. 4, pp. 115-121. 2006 [cit. 2016-04-01]. Dostupné z: DOI: 10.1109/MCOM.2006.1632658
- [77] VT NETWORKS (SNO pro Irsko). *SIGFOX capacity, scalability and stability*. 2016 [cit. 2016-12-29]. Dostupné z: <http://vtnetworks.ie/wp-content/uploads/2016/12/VT-Networks-capacity-scalability-and-stability.pdf>
- [78] Claire Goursaud, Jean-Marie Gorce. *Dedicated networks for IoT : PHY / MAC state of the art and challenges*. *EAI endorsed transactions on Internet of Things*. 2015 [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: <10.4108/eai.26-10-2015.150597>.<hal-01231221>

- [79] SIGFOX. *Lightweight Protocol For Small Messages*. 2016 [cit. 2016-12-30].
Dostupné z: - <https://www.youtube.com/watch?v=mS-6n5yAjRo>
- [80] E. Soltanmohammadi, K. Ghavami and M. Naraghi-Pour. *A Survey of Traffic Issues in Machine-to-Machine Communications Over LTE*. *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 3, no. 6, pp. 865-884, Dec. 2016 [cit. 2017-01-05]. Doi: 10.1109/JIOT.2016.2533541
- [81] GHOSH, Amitabha a Rapeepat. RATASUK. *Essentials of LTE and LTE-A*. New York: Cambridge University Press, 2011. Cambridge wireless essentials series. ISBN 9780521768702.
- [82] MINOLI, Daniel. *Innovations in satellite communications and satellite technology: the industry implications of DVB-S2X, high throughput satellites, Ultra HD, M2M, and IP*. John Wiley & Sons, 2015. ISBN 9781118984055.
- [83] Dhillon, H. S., Huang, H., & Viswanathan, H. (2015). *Wide-area wireless communication challenges for the Internet of Things* [online]. Dostupné z: arXiv preprint arXiv:1504.03242.
- [84] L. A. Dufrene, M. Liu, M. Crussiere, J. F. Helard and J. Schwoerer. *Blind repetitions for cellular-IoT: Performance analysis of combination mechanisms*. 23rd International Conference on Telecommunications (ICT), Thessaloniki, 2016, pp. 1-6. doi: 10.1109/ICT.2016.7500359
- [85] Haidine, S., El Hassani, S., Aqqal, A., El Hannani, A. *The Role of Communication Technologies in Building Future Smart Cities*. *Smart Cities Technologies*. 2016. Dostupné z: <http://www.intechopen.com/books/export/citation/EndNote/smart-cities-technologies/the-role-of-communication-technologies-in-building-future-smart-cities>
- [86] Elnashar, A. *Building IoT Network for Smart City*. *Forum on Internet of Things: Empowering the New Urban Agenda*. 2015 Dostupné z:

https://www.itu.int/en/ITU-T/Workshops-and-Seminars/iot/20151019/Documents/S1P2_Ayman_ElNashar.pptx

- [87] Hunn, N. *NB-IoT is dead. Long live NB-IoT*. 2016 [cit. 2017-01-10]. Wireless Connectivity. Dostupné z: <http://www.nickhunn.com/nb-iot-is-dead-long-live-nb-iot/>
- [88] GSMA. *Press Release- GSMA LAUNCHES LOW POWER WIDE AREA NETWORK INITIATIVE TO ACCELERATE GROWTH OF THE INTERNET OF THINGS*. 2015 [cit. 2017-01-10]. Dostupné z: <http://www.gsma.com/newsroom/press-release/gsma-launches-low-power-wide-area-network-initiative-accelerate-growth-internet-of-things/>
- [89] ETSI. *Low Throughput Networks*. Dostupné z: <http://www.etsi.org/technologies-clusters/technologies/low-throughput-networks>
- [90] Raza, U., Kulkarni, P., Sooriyabandara, M. *Low Power Wide Area Networks: An overview*. IEEE. 2017 [cit. 2017-01-20]. Dostupné z: <https://arxiv.org/pdf/1606.07360.pdf>
- [91] 20. Mišić, V., Mišić, J.: *Machine-to-machine communications* (348) (2014)
- [92] 3GPP: *Network architecture (release 12), ts 23.002 v12.7.0* (2015)
- [93] M. B. Alaya, S. Medjiah, T.M., Drira, K.: *Toward semantic interoperability in onem2m architecture* 53(12), 35{41 (2015)
- [94] 3GPP: *Cellular system support for ultra-low complexity and low throughput internet of things (ciot) (release 13), tr 45.820 v13.1.0* (2015)
- [95] 5. Ashton, K.: *That internet of things thing*. RFID Journal pp. 97{114 (2009)
- [96] Gomez, C., Paradells, J.: *Urban automation networks: Current and emerging solutions for sensed data collection and actuation in smart cities*. Sensors 9, 22874{22898 (2015)

- [97] ETSI. *Machine-to-Machine communications (M2M); M2M service requirements*. 2013. Dostupné z: http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/102600_102699/102689/02.01.01_60/ts_102689v020101p.pdf
- [98] AVNET Memec, Silica. *IoT connectivity/LoRa networks/Security*. 2015. Dostupné z: <http://deneonline.nl/wp-content/uploads/sites/56/2015/07/4.AvnetMemecSilica.pdf>
- [99] Minerva, R., Biru, A., Rotondi, D. *Towards a definition of the Internet of Things (IoT)*. 2015. Dostupné z: http://iot.ieee.org/images/files/pdf/IEEE_IoT_Towards_Definition_Internet_of_Things_Issue1_14MAY15.pdf
- [100] Machina Research. *Global Internet of Things Market to Grow to 27 Billion Devices, Generating USD 3 Trillion Revenue in 2025* [online]. 2016. Dostupné z: <https://machinaresearch.com/news/press-release-global-internet-of-things-market-to-grow-to-27-billion-devices-generating-usd3-trillion-revenue-in-2025/>
- [101] BALOBAID, Awatef. *A survey and comparative study on different energy efficient MAC-protocols for Wireless Sensor Networks*. In: *Internet of Things and Applications (IOTA)*, International Conference on. IEEE, 2016. p. 321-326. Dostupné z: 10.1109/IOTA.2016.7562745
- [102] Sanchez-Iborra R, Cano M-D. *State of the Art in LP-WAN Solutions for Industrial IoT Services*. Pajares Martinsanz G, ed. *Sensors* (Basel, Switzerland). 2016;16(5):708. doi:10.3390/s16050708.
- [103] Mills, D. L.. *Adaptive hybrid clock discipline algorithm for the network time protocol*. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, roč. 6, č. 5, s. 505-514. 1998. Dostupné z: <https://www.eecis.udel.edu/~mills/database/papers/allan.pdf>

- [104] Telecom Design. *TD 1208 Datasheet*. Dostupný z: https://github.com/Telecom-Design/Documentation_TD_RF_Module/raw/master/TD1208%20Datasheet.pdf
- [105] Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., & Palaniswami, M. (2013). *Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions*. *Future generation computer systems*, 29(7), 1645-1660. Dostupné z: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1207/1207.0203.pdf>
- [106] ETSI. GS LTN 003. *Low Throughput Networks (LTN); Protocols and Interfaces*. 2014. Dostupné z: http://www.etsi.org/deliver/etsi_gs/LTN/001_099/003/01.01.01_60/gs_LTN003v010101p.pdf
- [107] Egli, P. R. *LPWAN Technologies for Internet of Things (IoT) and M2M Scenarios* [online]. 2015 [cit. 2016-05-29]. Dostupné z: <http://fr.slideshare.net/PeterREgli/lpwan>
- [108] 3GPP. RP-151621: *Narrowband IOT* [online]. 2015. Dostupné z: ftp://ftp.3gpp.org/tsg_ran/TSG_RAN/TSGR_69/Docs/RP-151621.zip
- [109] Schlien, J., Raddino, D. *Narrowband Internet of Things (Rohde&Schwarz Whitepaper)* [online]. 2016. Dostupné z: https://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_application/application_notes/ima266/1MA266_oe_NB_IoT.pdf
- [110] Nokia. *LTE evolution for IoT connectivity* [online]. 2017. Dostupné z: <http://resources.alcatel-lucent.com/asset/200178>
- [111] Do, M.-T., Goursaud, C., Gorce, J.-M. *On the Benefits of Random FDMA Schemes in Ultra Narrow Band Networks* [online]. 2014. Dostupné z: 10.1109/WIOPT.2014.6850364

- [112] AvnetMemecSilica. *IoT connectivity/LoRa networks/Security* [online]. 2015. Dostupné z: <http://deneonline.nl/wp-content/uploads/sites/56/2015/07/4.AvnetMemecSilica.pdf>
- [113] INISWIFT. *LPWAN for IoT* [online]. 2016 [cit. 2016-07-16]. Dostupné z: http://www.slideshare.net/infiswift/lpwan-for-iot-62591541?qid=e931cdad-bode-478b-8904-obd2105fa8f3&v=&b=&from_search=2
- [114] Haidine, A., El Hassani, S., Aqqal, A., El Hannani, A. *The Role of Communication Technologies in Building Future Smart Cities*. ISBN 978-953-51-2808-3. IEEE Smart Cities Technologies 2016. Dostupné z: DOI: 10.5772/64732
- [115] Wang Y.-P., et al. *A Primer on 3GPP Narrowband Internet of Things (NB-IoT)* [online]. Dostupné z: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1606/1606.04171.pdf>
- [116] Genali, F. *Analysis of Computer Networks: Edition 2*. Springer 2015. ISBN: 978-3-319-15656-9
- [117] I. F. Akyildiz, J. McNair, L. C. Martorell, R. Puigjaner and Y. Yesha. *Medium access control protocols for multimedia traffic in wireless networks* [online]. *IEEE Network*, vol. 13, no. 4, pp. 39-47, Jul/Aug 1999. doi: 10.1109/65.777440
- [118] Forouzan, B.A. *Data Communications and Networking*. McGraw-Hill 2007. 1134p. ISBN: 978-0-07-296775-3.
- [119] Maalel, N.; Natalizio, E.; Bouabdallah, A.; Roux, P.; Kellil, M. *Reliability for emergency applications in internet of things* [online]. In Proceedings of the IEEE International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems, Cambridge, MA, USA, 20-23 May 2013; pp. 361-366. Dostupné z: https://www.hds.utc.fr/~enataliz/dokuwiki/_media/en/iotip2013-1.pdf

- [120] Fraga-Lamas, P.; Fernández-Caramés, T.M.; Suárez-Albela, M.; Castedo, L.; González-López, M. *A review on internet of things for defense and public safety* [online]. *Sensors* 2016, 16, 1644. Dostupné z: doi:10.3390/s16101644
- [121] Westling, J. *Future of the Internet of Things on Mission Critical Applications* [online]. 2016. Dostupné z: https://papers.ssrn.com/sol3/papers2.cfm?abstract_id=2863204
- [122] Zyren, J., Gandolfo, P. *Effects of WBFH Power Reduction and Hop Rate* [online]. 1999. IEEE 802.11-99/203. Dostupné z: http://www.ieee802.org/11/Documents/DocumentArchives/1999_docs/92033R-Effects-of-WBFH-Power-Reduction-and-Hop-Rate.pdf
- [123] VT (Sigfox Network Operator Ireland). *Connecting the Internet of Things with the power of SIGFOX* [online]. 2017 [cit. 10.2.2017]. Dostupné z: <http://vt-iot.com/>
- [124] Rohde&Schwarz. *eMTC and NB-IoT pave the way to 5G/IoT* [online]. 2016 [cit. 2016-05-20]. Dostupné z: https://www.rohde-schwarz.com/in/solutions/wireless-communications/lte/in-focus/emtc-and-nb-iot-pave-the-way-to-5g-iot_230416.html
- [125] Nakamura, T. *3GPP TSG-RAN Activities toward Further Enhancements for LTE/LTE-Advanced* [online]. WP5D Worskhop 2012 [cit. 2016-05-21]. Dostupné z: <http://player.slideplayer.com/2/749828/#>
- [126] Chapelet, A. *SIGFOX: radio questions* [elektronická pošta]. Message to: adrien3d@gmail.com. 22.2.2017 16:00 [cit. 22.2.2017]. Osobní komunikace.
- [127] Česká tisková kancelář. *Internet věcí pokrývá už 80% České republiky. Síť Sigfox má 5200 obcí* [online]. 2016 [cit. 22.1.2017]. Dostupné z: <http://technet.idnes.cz/simplecell-t-mobile-pokryli-sigfox-internet->

veci-80-procent-cr-pub-
/sw_internet.aspx?c=A160707_111916_sw_internet_kuz

- [128] Viswanathan, M. *SIMULATION OF DIGITAL COMMUNICATION SYSTEMS USING MATLAB*. Second edition [online]. 2013. Dostupné z: <http://www.gaussianwaves.com>
- [129] Babu, A. S., Rao, K.V. *Evaluation of BER for AWGN, Rayleigh and Rician Fading Channels under Various Modulation Schemes* [online]. International Journal of Computer Applications (0975 – 8887) Volume 26– No.9. 2011 [cit. 2016-08-10]. Dostupné z: <http://www.ijcaonline.org/archives/volume26/number9/3132-4317>
- [130] Soulek I., Tvrzník A. Soumar L. *Běhání*. Praha: Grada Publishing a.s., 2004. ISBN 80-247-0715-2.
- [131] Nosek M., Valter L. *Atletika pro školní TV (multimediální učební text), Pedagogická fakulta Univerzity J. E. Purkyně v Ústí nad Labem* [online]. 2010 [cit. 2016-10-09]. Dostupné z: <http://pf.ujep.cz/~nosek/atletika/index.html>
- [132] Martinková J., Tomášková I., Slámová P., Tejchman T. *Kardiofitness, vytrvalostní aktivity v každém věku*. Praha: Grada Publishing, a.s., 2008. ISBN 978-80-247-2273-3.
- [133] ŠTAIGER M., ČERVINKA L. *Aplikace technické mechaniky pro učitele: Jízdní kolo a jiné příklady pro techn. výchovu na ZDŠ*. Praha: SPN, 1971.
- [134] Duršpek J., Prokšová J., Jindra J., Kielbusová Z. *Fyzikální vlastnosti živých organismů - Chůze a běh, Fakulta pedagogická Západočeské univerzity v Plzni* [online], [cit. 2016-10-09]. Dostupné z: <http://kof.zcu.cz/vusc/pg/termo09/physics.htm>
- [135] Ovidio. *Range vs Data Rate for IoT connectivity technologies* [online]. 2016 [cit. 2016-10-12]. Dostupné z:

<http://iot4e.blogspot.cz/2016/02/range-vs-data-rate-for-iot-connectivity.html>

- [136] MOLNÁR, Z. *Pokročilé metody vědecké práce: Věda pro praxi*. Zeleneč: Profess Consulting, 2012. ISBN 978-80-7259-064-3
- [137] Dřímal, J., Trunec, D. *Úvod do metody Monte-Carlo*. 1. vyd. Brno: Masarykova univerzita, 1989. 122s. : g. ISBN 80-210-0228-X.
- [138] Fabian, F., Klüber, Z. *Metoda Monte Carlo a možnosti jejího uplatnění*. Praha : PROSPEKTRUM s.r.o., 1998. ISBN 80-7175-058-1. Kapitola 1.3, s. 152. (česky).
- [139] J. Kuusijärvi, R. Savola, P. Savolainen and A. Evesti. *Mitigating IoT security threats with a trusted Network element* [online]. 11th International Conference for Internet Technology and Secured Transactions (ICITST). 2016. pp. 260-265. Dostupné z: doi: 10.1109/ICITST.2016.7856708
- [140] Qualcomm. *Paving the path to Narrowband 5G with LTE Internet of Things* [online]. 2016 [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: <http://www.qualcomm.com/media/documents/files/paving-the-path-to-narrowband-5G-with-lte-iot.pdf>
- [141] Sobotková, Š. *Detektor dětského pláče s digitálním signálovým procesorem* [online]. Brno, 2013 [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=64418
- [142] ON Semiconductor. *AX-SIGFOX. Ultra-Low Power, AT Command Controlled, SIGFOX Compliant Transceiver IC for Up-Link and Down-Link* [online]. 2016 [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/AX-SIGFOX-D.PDF>

- [143] P. Demestichas et al. 5G on the Horizon: Key Challenges for the Radio-Access Network. *IEEE Vehicular Technology Magazine* [online], vol. 8, no. 3, pp. 47-53. 2013 [cit. 2016-12-16]. Dostupné z: doi: 10.1109/MVT.2013.2269187
- [144] Zheng, J, Jamalipour, A. *Wireless Sensor Networks: A Networking Perspective*. October 2009, Wiley-IEEE Press. 489p. ISBN: 978-0-470-16763-2 Asdasd
- [145] T. Wendt, F. Volk and E. Mackensen, "A benchmark survey of long range (LoRaTM) spread-spectrum-communication at 2.45 GHz for safety applications," *2015 IEEE 16th Annual Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICON)*, Cocoa Beach, FL, 2015, pp. 1-4. doi: 10.1109/WAMICON.2015.7120312
- [146] Krupka, L., Vojtěch, L., Neruda, M. The Issue of LPWAN Technology Coexistence in IoT Environment [online]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7827866&isnumber=7827779>
- [147] A. Roivainen, P. Jayasinghe, J. Meinila", V. Hovinen and M. Latva-aho, "Vehicle-to-vehicle radio channel characterization in urban environment at 2.3 GHz and 5.25 GHz," *2014 IEEE 25th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communication (PIMRC)*, Washington DC, 2014, pp. 63-67. doi: 10.1109/PIMRC.2014.7136133Asd
- [148] J. Petäjajarvi, M. Pettissalo, K. Mikhaylov, A. Roivainen and T. Hänninen, "On the Outdoor Coverage of Low Power Wide Area Networks: Range Evaluation and Channel Attenuation Model for LoRa Technology", *Proc. International Conference on Intelligent Transportation Systems Telecommunications (ITST)*, Copenhagen, Denmark, Dec. 2015. Dostupné z: doi: 10.1109/WiMOB.2016.7865211Asd

- [149] P. Neumann, J. Montavont and T. Noël, "Indoor deployment of low-power wide area networks (LPWAN): A LoRaWAN case study," *2016 IEEE 12th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*, New York, NY, 2016, pp. 1-8.
Dostupné z: doi: 10.1109/WiMOB.2016.7763213Asd
- [150] K. E. Nolan, W. Guibene and M. Y. Kelly, "An evaluation of low power wide area network technologies for the Internet of Things," *2016 International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*, Paphos, 2016, pp. 439-444.
Dostupné z: doi: 10.1109/IWCMC.2016.7577098
- [151] Žalud, Václav: *Moderní radioelektronika*. 1. vyd. Praha: BEN – Technická literatura, 2000. ISBN / EAN, 80-86056-47-3
- [152] Lam, S. An Analysis of the Reservation-ALOHA Protocol [online]. 1978.
Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4367392/>
- [153] Realwireless. A Comparison of UNB and Spread Spectrum Wireless Technologies as used in LPWA M2M Applications.
- [154] X. Xiong, K. Zheng, R. Xu, W. Xiang and P. Chatzimisios, "Low power wide area machine-to-machine networks: key techniques and prototype [online]. *IEEE Communications Magazine*, vol. 53, no. 9, pp. 64-71, September 2015. Dostupné z:
doi: 10.1109/MCOM.2015.7263374
- [155] Weightless. LPWAN Decisions: 17 Critical Features [online]. 2016.
Dostupné z: <http://www.weightless.org/membership/lpwan-technology-features-document-update/NTZjMC9MUFdBTiBUZWNobm9sb2d5IERlY2lzaW9uc192MS4xLnBkZg==>

- [156] Schwartz, S. M. Frequency Hopping Spread Spectrum vs. Direct Sequence Spread Spectrum in Broadband Wireless Access and Wireless LAN. 2006. Dostupné z: sorin-schwartz.com/white_papers/fhvsds.pdf
- [157] J. P. Bardyn, T. Melly, O. Seller and N. Sornin, "*IoT: The era of LPWAN is starting now*," ESSCIRC Conference 2016: 42nd European Solid-State Circuits Conference, Lausanne, 2016, pp. 25-30. Dostupné z: doi: [10.1109/ESSCIRC.2016.7598235](https://doi.org/10.1109/ESSCIRC.2016.7598235)

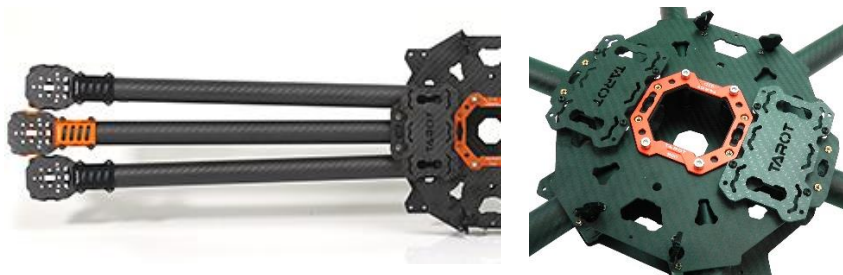
Přílohy

Příloha A

Konstrukce měřicího dronu

V této části jsou uvedeny hlavní součásti dronu a jejich hlavní parametry.

- Rám – Tarot T960 – 1050g, pro snazší manipulaci byl vybrán skládací karbonový rám s šesti rameny:

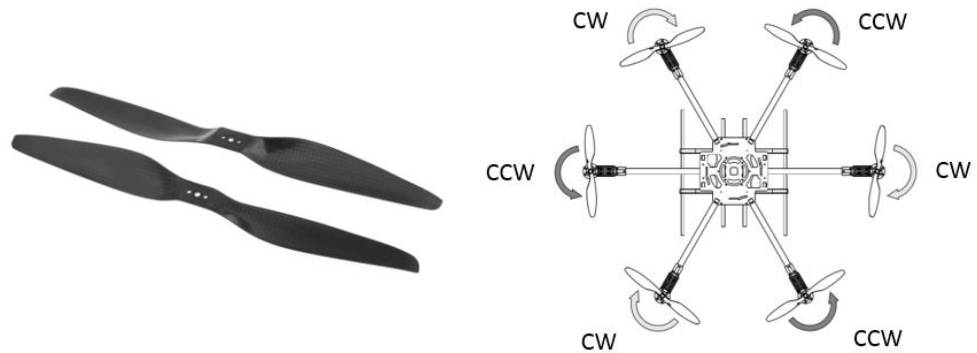


Obrázek 53: Rám hexakoptéry Tarot T960

- Motory – pro hexakoptéru byli vybrány stejnosměrné bezkomutátorové motory (BLDC, Brushless DC Motor), které jsou pro tyto aplikace používány nejčastěji [62]. Zvolený model: 4114/320KV Tarot Brushless Motor
- Regulátory – pro jednodušší ovládání bezkomutátorových motorů jejichž křivka otáček v závislosti na napětí není lineární i pro spínání proudové zátěže v řádu desítek ampér jsou používány regulátory [62] - v našem případě se jedná o Afro HV 20A MultiRotor ESC High Voltage 3~8s
- Vrtule – jak uvádí Macek [62], dva nejdůležitější parametry jsou průměr a stoupání - pro těžké drony je vhodnější zvolit větší průměr vrtule s větším stoupáním¹⁰ a díky tomu snížit počet otáček na optimální hodnotu motoru, ale je to za cenu horší manipulovatelnosti. Pro dron byl zvolen nejčastější typ pevné dvoulisté vrtule o průměru 17cm

¹⁰ Parametr udávající vzdálenost, kterou rotor urazí za jednu otáčku

v kombinaci karbonovou konstrukcí (Toray 3K), která umožnila minimalizovat její pružnost a docílit tak hbitějšího řízení, o stoupavosti 5,5cm a váze 33g. Směr otáčení – směr otáčení byl zvolen po směru hodinových ručiček (CW, Clockwise) a proti směru hodinových ručiček (CCW, Counter-clockwise) dle diagramu níže.



Obrázek 54: Pevná dvoulistá vrtule (CW a CCW) a směr otáčení listů na dronu

- 3-osý stabilizační systém (gimbal) – Shuaichi Feiyu Tech FY MiNi 3D – 149g, umožňující otáčení kamerou ve třech základních osách ($x \pm 45^\circ$, $y \pm 15^\circ$, $z \in \langle -120^\circ; 135^\circ \rangle$):



Obrázek 55: 3-osý stabilizační systém

- Baterie –2x Turnigy Graphene Professional 8000mAh 6S 15C LiPo – váha 2519g, typ konektoru JST-XH, Lithium-polymerový typ akumulátoru (LiPo^2), šest článků (6S, Six-cells in Series) s výsledným nominálním

napětím 22,2V, max. proudové zatížení 25C (C, Capacity Factor) trvale, max. vybíjecí proud 50C (500A)

- Plošina na měřící přípravek s tlumícími objímkami – karbonová plošina určená pro uchycených měřících přípravků s rozměry 150 x 340 x 1,5 mm

Senzorické systémy a rádiová rozhraní

Platforma dronu byla vybavena následujícími senzory:

- Inerciální senzory: jejich hlavním použitím je v navrhnutém řešení zjištění náklonů dronu, technologicky bylo zvoleno řešení kombinující trojici gyroskopů a trojici akcelerometrů (IMU, Inertial Measuring Unit):
 - Gyroskop – senzor měřící úhlovou rychlost, pro dron byl zvolen nejpoužívanější typ využívající MEMS (Micro-Electro-Mechanical System) technologii založený na analýze tzv. Coriolisovy síly
 - Akcelerometr – určený především pro měření zrychlení, zvolen byl tzv. piezoelektrický akcelerometr
- Magnetometr: - HMC5883l digital compass
- GPS/Glonass/Galileo: Ublox Neo-7M GPS 56ch 10Hz
- Telemetrie: 915MHz Telemetry set MAVLINK

Záznamová a přenosová zařízení

- Přední HD kamera – GOPRO HERO 5 nahrávající obraz s max. úhlem záběru 170° a maximálním rozlišením 4K 17:9 (4096 x 2160px) a rychlostí až 120 snímků za sekundu (při Full HD), použité kódování H.264
- Obvod sloužící pro vkládání telemetrických dat do video záznamu (OSD, On Screen Display) - Minim OSD, váha 9g
- Video vysílač – Insight 5G 1080P 100mW Full HD Digital Video Transmission: 19g, konektor RP-SMA, maximální vysílací výkon 500mW, 32 kanálů, video formát PAL/NTSC

- FrSky Taranis-E (X9E) – 16 kanálů, 2,4 splňující vysílací standard EU LBT (ETSI EN 300 328 v1.9.1 [63]), Open source software OpenTx nabízející široké možnosti konfigurace, přepínače – 6 třípolohových, 1 dvoupolohový, 1 momentový, 4 potenciometry, port pro trenážér, atd.



Obrázek 56: FrSky Taranis-E

Dron připravený k použití



(a) Předletová kontrola



(b) Letová fáze

Obrázek 57: Měřicí prototypový dron

SW použitý pro analýzu GPS trasy

Snímek obrazovky z programu Mission Planner 1.3.44 který byl použitý pro import telemetrických dat a export trajektorie GPS polohy do formátu GPX.

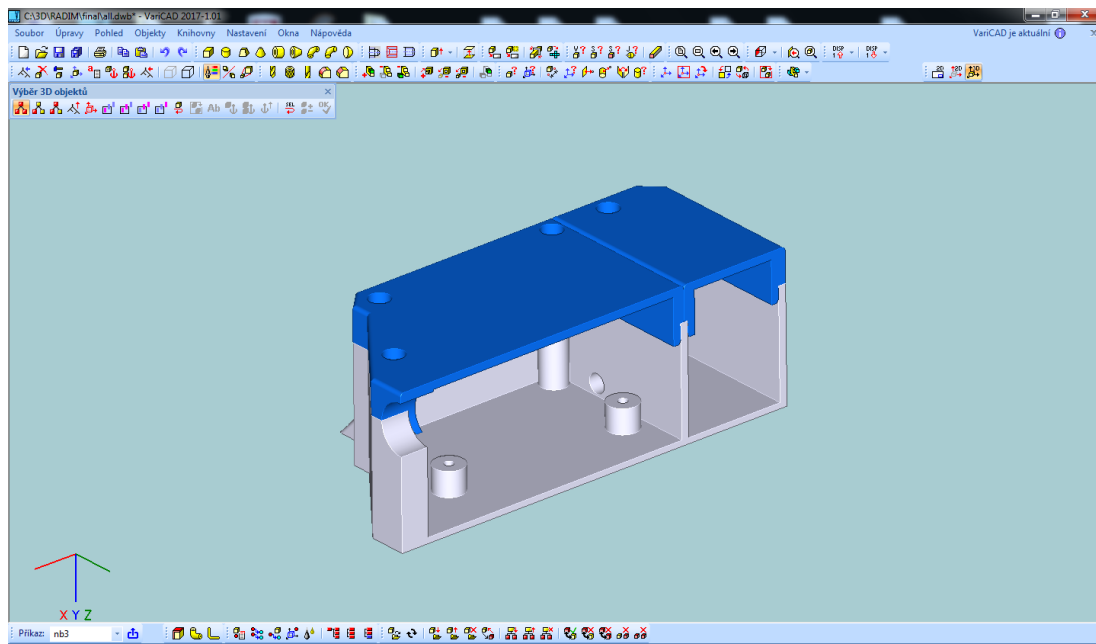


Obrázek 58: Program Mission Planner

Příloha B

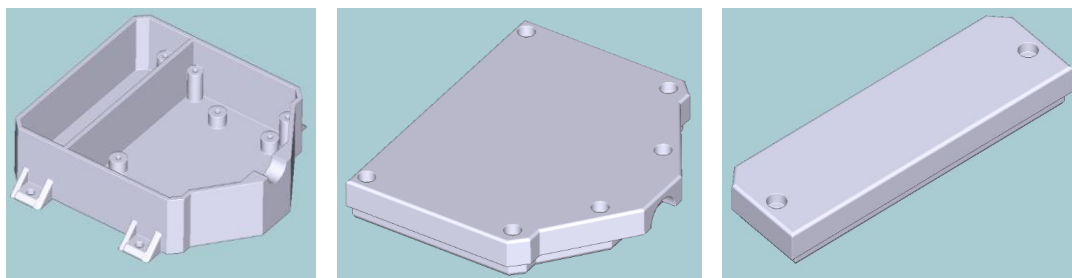
Software použitý pro návrh pouzdra

Pro návrh byl použit SW VariCAD 2017-1.01, který umí navržený model uložit ve formátu .STL, který slouží jako zdrojový formát pro samotný 3D tisk.

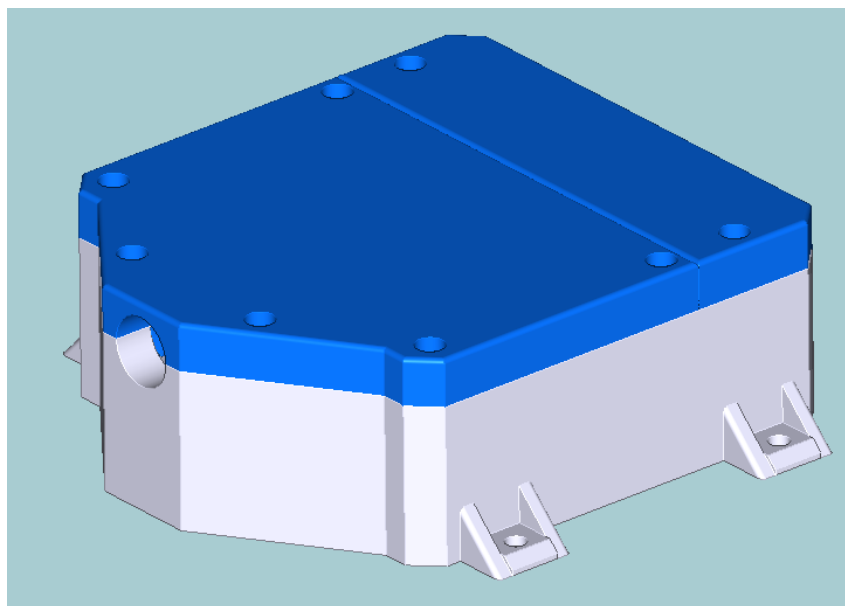


Obrázek 59: Program VariCAD

3D tisk – návrh konstrukce



Obrázek 60: Vnitřní uspořádání



Obrázek 6i: Výsledné pouzdro

Příloha C

SW Arduino UNO

/*

Sigfox demonstrator kit

Explanation: This example shows how to send Sigfox message based on xBee shield equipped with SIGFOX modem.

Copyright (C) 2016

Czech Technical University in Prague

Faculty of Electrical Engineering

Department of Telecommunication Engineering

<http://www.comtel.fel.cvut.cz/en>

This program is free software: you can redistribute it and/or modify it under the terms of the GNU General Public License as published by the Free Software Foundation, either version 3 of the License, or (at your option) any later version.

This program is distributed in the hope that it will be useful, but WITHOUT ANY WARRANTY; without even the implied warranty of MERCHANTABILITY or FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. See the GNU General Public License for more details.

You should have received a copy of the GNU General Public License along with this program. If not, see <<http://www.gnu.org/licenses/>>.

Version: 0.9

Author: Radim Kalfus

*/

```
// Load libraries
```

```
#include <Wire.h>
```

```
#include <arduinoUART.h>
```

```
#include <arduinoUtils.h>
```

```
#include <arduinoSigfox.h>
```

```
uint8_t socket = SOCKET0; // position of Sigfox module on the shield
```

```
// ADDRESS: Define the LAN network address.
```

```
// Range: From 0x000000 to 0xFFFFFF.
```

```
// Default: 0x000000
```

```
uint32_t address = 0x000001;
```

```
uint8_t error;
```

```
// sigfox packet is 12-byte length (96b, 24 hexa)
```

```
char sigfox_packet[25];
```

```
uint8_t data[12];
```

```
uint8_t size;
```

```

void setup()
{
  // switch on
  error = Sigfox.ON(socket);
  Serial.println("\t");
  // Check status
  if( error == 0 )
  {
    Serial.println("Switch ON status: OK ");
  }
  else
  {
    Serial.println("Switch ON status: ERROR ");
  }

  // Set LAN address
  error = Sigfox.setAddressLAN(address);
  Serial.println("\t");
  // Check status
  if( error == 0 )
  {
    Serial.println("Set LAN Address: OK ");
  }
  else
  {
    Serial.println("Set LAN Address: ERROR ");
  }

  size=12;
  for (int Packet = 1; Packet< 11; Packet++){
    data[2]=Packet;
    delay(5000);
    for (int Resend = 1; Resend < 4; Resend++) {
      data[7]=Resend;
      error = Sigfox.send(data,size);
      if( error == 0 )
      {
        Serial.println(F("\tSigfox packet sent OK"));
      }
      else
      {
        Serial.println(F("\tSigfox packet sent ERROR"));
      }
      Serial.println(F("-----"));
    }
  }
}

void loop()
{
}

```

Konfigurace REST-API na klientské straně

```
<html>
<style type="text/css">
body,td,th {
    color: #000;
}
body {
    background-color: #FFF;
}
</style>
<script>
$(document).ready(function(){
    setInterval(function(){cache_clear()},60000);
});
function cache_clear()
{
    window.location.reload(true);
}
</script>
<?php
// url backend
$url = 'https://backend.sigfox.com/api/devices/77F8F/';
// init, username & passwd
$curl = curl_init();
$login = '587a69df5005743eecb3787'; // from backend API access
$pass = '28effd2846b9b967d76594c648a5344'; // from backend API access
// set up
curl_setopt($curl, CURLOPT_URL, $url);
curl_setopt($curl, CURLOPT_HTTPGET, true);
//curl_setopt($curl, CURLOPT_COOKIESESSION, true);
curl_setopt($curl, CURLOPT_RETURNTRANSFER, true);
curl_setopt($curl, CURLOPT_HTTPAUTH, CURLAUTH_ANY); // Need SSL
curl_setopt($curl, CURLOPT_USERPWD, "$login:$pass");
// store data
$dt = curl_exec ($curl);
// open file and write data
$f = fopen('sigfoxData.json','a'); // write json file sigfoxData.json for test
{
    fwrite($f, $dt);
    fclose($f);
}

// displaying data
$json_url = "http://www.belohrad.eu/sigfox2/sigfoxData.json";
$json = file_get_contents($json_url);
$dt = json_decode($json, TRUE);
/*
echo "<pre>";
print_r($data);
echo "</pre>";
*/
curl_close($curl);
?>

<p><strong>Device Type Infos:</strong></p>
<table width="500" height="179" border="1">
<tr>
```

```

<td width="90"><strong>
Id</strong></td>
<td width="365" height="23"><? echo "<pre>";
    echo $dt['data'][o]['id'];
    echo "</pre>";?></td>
</tr>
<tr>
<td><strong>
Name</strong></td>
<td height="10"><? echo "<pre>";
    echo $dt['data'][o]['name'];
    echo "</pre>";?></td>
</tr>
<tr>
<td><strong>
Group</strong></td>
<td height="10"><? echo "<pre>";
    echo $dt['data'][o]['group'];
    echo "</pre>";?></td>
</tr>
<tr>
<td><strong>
Description</strong></td>
<td height="10">
<? echo "<pre>";
    echo $dt['data'][o]['description'];
    echo "</pre>";
?>
</td>
</tr>
<tr>
<td><strong>
PayloadType</strong></td>
<td height="10">
<? echo "<pre>";
    echo $dt['data'][o]['payloadType'];
    echo "</pre>";?>
</td>
</tr>
<tr>
<td><strong>
Contract</strong></td>
<td height="23">
<? echo "<pre>";
    echo $dt['data'][o]['contract'];
    echo "</pre>";?>
</td>
</tr>
<tr>
<td><strong>
KeepAlive</strong></td>
<td height="23"><? echo "<pre>";
    echo $dt['data'][o]['keepAlive'];
    echo "</pre>";?></td>
</tr>
</table></html>

```


Ukázka výsledných dat v JSON formátu

```
{
  "id" : "77F8F",
  "name" : "KeyApp 77F8F FEL CVUT",
  "type" : "56d9c05b93363ae00824479d",
  "last" : 1484512636,
  "averageSignal" : 34.70143,
  "averageSnr" : 34.70143,
  "averageRssi" : -109.75885,
  "state" : 0,
  "activationTime" : 1456155373099,
  "lat" : 0.0,
  "lng" : 0.0,
  "pac" : "oC5D702968B34E73",
  "tokenType" : "CONTRACT",
  "contractId" : "55f7e1d493364e72362dd22d",
  "tokenEnd" : 1487777773099
}
{
  "id" : "77F8F",
  "name" : "KeyApp 77F8F FEL CVUT",
  "type" : "56d9c05b93363ae00824479d",
  "last" : 1484512636,
  "averageSignal" : 32.09081,
  "averageSnr" : 32.09081,
  "averageRssi" : -110.191154,
  "state" : 0,
  "activationTime" : 1456155373099,
  "lat" : 0.0,
  "lng" : 0.0,
  "pac" : "oC5D702968B34E73",
  "tokenType" : "CONTRACT",
  "contractId" : "55f7e1d493364e72362dd22d",
  "tokenEnd" : 1487777773099
}
{
  "id" : "77F8F",
  "name" : "KeyApp 77F8F FEL CVUT",
  "type" : "56d9c05b93363ae00824479d",
  "last" : 1484512690,
  "averageSignal" : 32.09081,
  "averageSnr" : 32.09081,
  "averageRssi" : -110.191154,
  "state" : 0,
  "activationTime" : 1456155373099,
  "lat" : 0.0,
  "lng" : 0.0,
  "pac" : "oC5D702968B34E73",
  "tokenType" : "CONTRACT",
  "contractId" : "55f7e1d493364e72362dd22d",
  "tokenEnd" : 1487777773099
}
}
```

Vybrané publikace autora

- [A1] Kalfus, R., Hégr, T. Ultra Narrow Band Radio Technology in High-density Built-up Areas. In: Communications in Computer and Information Science. The 22nd International Conference on Information and Software Technologies, Druskininkai, 2016-10-13/2016-10-15. Cham: Springer International Publishing, 2016. pp. 663-676. 639. ISSN 1865-0929. ISBN 978-3-319-46253-0. DOI 10.1007/978-3-319-46254-7_54.
- [A2] Kalfus, R. Rich Communication Suite (RCS). Elektrovue. 2014, 16(3), 125-131. ISSN 1213-1539.
- [A3] Kalfus, R., Chod, J., Pisova, P. Detection of Reflected GPS Signals In: 13th International Conference on Research in Telecommunication Technologies 2011 - Vol. II Poster Section. Brno: VUT v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011, pp. II-35-II-39. ISBN 978-80-214-4283-2.

Granty

- [A4] Kalfus, R. Výzkum, vývoj, realizace a optimalizace systémů a protokolů mobilních komunikací vhodných pro jednotky s rozhraním pro komunikaci v oblasti nanotechnologií i jednotky komunikace s rychle se pohybujícími objekty. SGS15/200/OHK3/3T/13, 2015-2016.
- [A5] Kalfus, R. Pířová, P.: Modernization of Laboratory Exercises in the Field of Navigation Systems. 11--11, FRVŠ G1 2107, 2011.
- [A6] Bešťák, R. et al. Aspekty mobility v moderních bezdrátových sítích. SGS10/274/OHK3/3T/13, 2010.

Projekty

- [A7] Kalfus, R. Analýza a evaluace OpenIMS. SITRONICS centrum při ČVUT FEL v Praze.
- [A8] Kalfus, R. Řešení NGN Release – TISPAN. SITRONICS centrum při ČVUT FEL v Praze.

[A9] Problematika zkoumaná v disertační práci je součástí výzkumného úkolu řešeného v rámci spolupráce se společností T-Mobile Czech Republic a.s.

Funkční vzorky

[A10] Kalfus, R. Jednotka pro vzdálený sběr dat z elektroměru pomocí protokolu SIGFOX [Funkční vzorek]. 2016. Vlastník: OTO ELEKTRO s.r.o.

[A11] Kalfus, R. Měřicí prototypový dron. [Funkční vzorek]. 2016. Vlastník: ČVUT FEL.

[A12] Kalfus, R. Referenční jednotka pro měření vlastností SIGFOX protokolu. [Funkční vzorek]. 2016. Vlastník: ČVUT FEL.

[A13] Kalfus, R. Testovací stolice pro vertikální měření. [Funkční vzorek]. 2016. Vlastník: TORQUE s.r.o.