



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

KOEXISTENCE SYSTÉMŮ LTE A LORA V ISM PÁSMU 2.4 GHZ

COEXISTENCE OF LTE AND LORA IN THE 2.4 GHZ ISM BAND

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Martin Potočňak

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Ladislav Polák, Ph.D.

BRNO 2019

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektronika a sdělovací technika**
Ústav radioelektroniky

Student: Bc. Martin Potočňak

ID: 164372

Ročník: 2

Akademický rok: 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

Koexistence systémů LTE a LoRa v ISM pásmu 2.4 GHz

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

V teoretické části práce detailně prostudujte vlastnosti bezdrátových komunikačních systémů LTE a LoRa. Definujte společné frekvenční pásmo, ve kterém systémy LTE a LoRa mohou koexistovat. Navrhnete kompletní laboratorní měřicí pracoviště a vhodnou metodiku pro měření (např. automatizované v programu MATLAB) a vyhodnocení koexistence mezi uvažovanými systémy.

V experimentální části práce provedte detailní měření definovaných koexistenčních scénářů v laboratorních podmínkách. Při měření uvažujte různé systémové parametry pro LTE a LoRa. Pro vyhodnocení a interpretaci výsledků zvolte vhodnou metodiku. Na základě získaných výsledků stanovte podmínky pro vznik kritických a nekritických koexistenčních scénářů pro systém LTE.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] SX1280 Long Range, Low Power 2.4 GHz Transceiver: Application Note: Wi-Fi Immunity of LoRa® at 2.4 GHz. Spojené státy americké, Camarillo, 2017. Dostupné také z: https://www.semtech.com/uploads/documents/WiFi_Immunity_App_Notes.pdf

[2] MIKLÁŠ, Michal. Koexistence bezdrátových komunikačních systémů a LTE v pásmu ISM. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2017. 56 s., 34 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Ladislav Polák, Ph.D.

Termín zadání: 4.2.2019

Termín odevzdání: 16.5.2019

Vedoucí práce: doc. Ing. Ladislav Polák, Ph.D.

Konzultant:

prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Diplomová práca sa zaoberá štúdiom a meraním koexistenčných scenárov bezdrôtových systémov LTE a LoRa v bezlicenčnom ISM pásme 2,4 GHz. Je definované spoločné rádiové frekvenčné pásmo, v ktorom tieto systémy môžu koexistovať. Navrhnuté meracie pracovisko umožňuje automatizované meranie definovaných koexistenčných scenárov. Využíva sa k tomu PC, profesionálne meracie prístroje a software MATLAB. Funkčnosť navrhnutého konceptu je overená rozsiahlymi meraniami. Dosiahnuté výsledky sú graficky spracované a detailne diskutované.

Klíčová slova

Koexistencia bezdrôtových systémov, LTE, LoRa, ISM pásmo 2.4 GHz, interferencia, ochranné pásmo, RF meranie

Abstract

This diploma thesis deals with the study and measurement of coexistence scenarios that can occur between the LTE and LoRa systems in the unlicensed ISM band 2.4 GHz. A common radio frequency band in which LTE and LoRa systems can coexist is defined. An appropriate laboratory measurement is proposed and realized, allowing automatized measurement of the defined coexistence scenarios. For this purpose, a personal computer, professional measurement equipment and software MATLAB are utilized. Functionality of the proposed concept is verified by extensive measurements. The obtained results are graphically shown and discussed in detail.

Keywords

Coexistence of wireless systems, LTE, LoRa, ISM band 2.4 GHz, interference, guard band, RF measurement

Bibliografická citace:

POTOČŇAK, M. Koexistence systému LTE a LoRa v ISM pásmu 2.4 GHz. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 54s., 6s. příloh. Vedoucí diplomové práce byl doc. Ing. Ladislav Polák, Ph.D.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Koexistence systému LTE a LoRa v ISM pásmu 2.4 GHz jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: **16.05.2019**

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Ladislavovi Polákovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne: 16. května 2019

.....
podpis autora

Obsah

1.	Úvod.....	15
2.	Lora	16
2.1	LoRa - Fyzická vrstva	17
2.1.1	Parametre fyzickej vrstvy	17
2.1.2	Formát rámcov	18
2.2	LoRaWAN	18
3.	LTE	20
3.1	Architektúra siete LTE	20
3.2	LTE - Fyzická vrstva.....	21
3.2.1	Štruktúra rámcov.....	22
3.2.2	Fyzické kanály	23
4.	LoRa a LTE v pásme ISM 2.4 GHz.....	24
5.	Popis meracieho pracoviska.....	26
6.	Metodika a meranie koexistencie systémov LTE a LoRa.....	29
6.1	Koexistenčný scenár.....	30
6.2	Skript pre automatizované meranie koexistencie systémov LTE a LoRa.....	32
6.3	Užívateľské rozhranie pre meranie koexistencie LTE a LoRa	34
7.	Laboratórne meranie	36
7.1.1	Koexistenčný scenár LTE a LoRa pri použití $SF_{LoRa} = 7$	37
7.1.2	Koexistenčný scenár LTE a LoRa pri použití $SF_{LoRa} = 10$	42
7.1.3	Koexistenčný scenár LTE a LoRa pri použití $SF_{LoRa} = 12$	46
7.1.4	Koexistenčný scenár LTE a LoRa pri použití GFSK _{LoRa}	49
8.	Záver	52

Seznam symbolů a zkratek

Zkratky:

16-QAM	...	16-Quadrature Amplitude Modulation
3GPP	...	The 3rd Generation Partnership Project
64-QAM	...	64-Quadrature Amplitude Modulation
ADC	...	Analog to Digital Converter
BW	...	Bandwidth
CR	...	Code Ratio
CRC	...	Cyclic Redundancy Check
CSS	...	Chirps Spread Spectrum
DAC	...	Digital to Analog Converter
DL	...	Downlink
EPC	...	Evolved Packet Core
ETSI	...	European Telecommunications Standards Institute
E-UTRAN	...	Enhanced UMTS Terrestrial Radio Access
EVM	...	Error Vector Magnitude
FDD	...	Frequency-Division Duplex
FEC	...	Forward Error Correction
iFFT	...	Fast Fourier Transformation
GB	...	Guard Band
GFSK	...	Gaussian Frequency Shift Keying
GSM	...	Groupe Spécial Mobile
I/Q	...	In-phase/Quadrature
IFFT	...	Inverse Fast Fourier Transformation
IoT	...	Internet of Things
ISM	...	Industry, Scientific and Medical
LoRaWAN	...	LoRa Wide Area Network
LTE	...	Long Term Evolution
MAC	...	Media Access Control Layer
MIMO	...	Multiple Input Multiple Output
OFDMA	...	Orthogonal Frequency Division Multiple Access

P/S	...	Parallel to Serial
PHY	...	Physical Layer
PR	...	Protection Ratio
QoS	...	Quality of Service
QPSK	...	Quadrature Phase Shift Keying
RB	...	Resource Block
RE	...	Resource Element
RF	...	Radio Frequency
S/P	...	Serial to Parallel
SC-FDMA	...	Single Carrier – Frequency Division Multiple Access
SCPI	...	Standard Commands for Programmable Instruments
SF	...	Spreading Factor
TDD	...	Time-Division Duplex
UHF	...	Ultra High Frequency
UL	...	Uplink
UREL	...	Ústav Rádioelektroniky
VISA	...	Virtual Instrument Software Architecture
VoIP	...	Voice over IP
Wi-Fi	...	Wireless-Fidelity

Symbols:

BW	...	šírka pásma	[Hz]
C	...	Carrier signal (rušený signál)	[dBm]
CNR _{min}	...	Carrier-To-Noise Ratio	[dB]
CR	...	kódový pomer	[-]
GB	...	ochranné pásmo	[MHz]
I	...	Interference signal (rušiaci signál)	[dBm]
k	...	Boltzmanova konštanta	[J.K ⁻¹]
NF	...	šumové číslo	[dB]
P _{min}	...	minimálny výkon	[dBm]
PR	...	ochranný pomer	[dB]
Rb	...	bitová rýchlosť	[bit/s]
SF	...	rozprostieraci faktor	[-]
T	...	teplota	[K]

Seznam obrázků

Obrázok 2-1: Architektúra siete LoRa.....	16
Obrázok 2-2: LoRa rámec.....	18
Obrázok 2-3: LoRa paket - formát správ pre UL.....	19
Obrázok 2-4: LoRa paket - formát správ pre DL.....	19
Obrázok 3-1: Architektúra bloku EPC (prevzaté z [13]).....	21
Obrázok 3-2: Blokovaná schéma LTE-DL.....	21
Obrázok 3-3: Blokovaná schéma LTE-UL.....	22
Obrázok 3-4: Vyplnený LTE resource grid	23
Obrázok 4-1: Koexistenčný scenár LTE v pásme 40 a LoRa v ISM pásme 2,4 GHz	25
Obrázok 5-1: Schéma meracieho pracoviska pre automatizované meranie koexistencie systémov LTE a LoRa	27
Obrázok 5-2: Zapojené meracie pracovisko	28
Obrázok 6-1: Spektrum signálov LTE a LoRa v pásme 2,4 GHz	30
Obrázok 6-2: Výpočet výkonu v kanále pre signál LTE	31
Obrázok 6-3: Výpočet výkonu v kanále pre signál LoRa.....	31
Obrázok 6-4: Diagram automatizovaného meracieho procesu.....	34
Obrázok 6-5: Uživatelské rozhranie pre meranie koexistencie systémov LTE a LoRa v ISM pásme 2,4 GHz v procese merania hodnôt.....	35
Obrázok 6-6: Uživatelské rozhranie pre meranie koexistencie systémov LTE a LoRa v ISM pásme 2,4 GHz, chybné pripojenie prístroja.....	35
Obrázok 7-1: Spektrum signálov LTE a LoRa pre koexistenčný scenár s použitím $BW_{LTE} = 1,4 \text{ MHz}$, $BW_{LoRa} = 125 \text{ kHz}$ a $SF_{LoRa} = 7$	37
Obrázok 7-2: Závislosť PR na GB pre $BW_{LTE} = 1,4$ a 5 MHz , $SF_{LoRa} = 7$, $BW_{LoRa} = 500 \text{ kHz}$	38
Obrázok 7-3: Závislosť PR na GB pre $BW_{LTE} = 10$ a 20 MHz , $SF_{LoRa} = 7$, $BW_{LoRa} = 500 \text{ kHz}$	38
Obrázok 7-4: Závislosť PR na GB pre $BW_{LTE} = 10$ a 20 MHz , $SF_{LoRa} = 7$, $BW_{LoRa} = 125 \text{ kHz}$	39

Obrázok 7-5: Spektrum signálov LTE a LoRa pre koexistenčný scenár s použitím $BW_{LTE} = 10$ MHz, $BW_{LoRa} = 125$ kHz a $SF_{LoRa} = 10$	42
Obrázok 7-6: Závislosť PR na GB pre $BW_{LTE} = 1,4$ a 5 MHz, $SF_{LoRa} = 10$, $BW_{LoRa} = 500$ kHz	43
Obrázok 7-7: Závislosť PR na GB pre $BW_{LTE} = 10$ a 20 MHz, $SF_{LoRa} = 10$, $BW_{LoRa} = 500$ kHz.....	43
Obrázok 7-8: Závislosť PR na GB pre $BW_{LTE} = 1,4$ a 5 MHz, $SF_{LoRa} = 10$, $BW_{LoRa} = 125$ kHz.....	44
Obrázok 7-9: Závislosť PR na GB pre $BW_{LTE} = 10$ a 20 MHz, $SF_{LoRa} = 10$, $BW_{LoRa} = 125$ kHz	44
Obrázok 7-10: Spektrum signálov LTE a LoRa pre koexistenčný scenár s použitím $BW_{LTE} = 10$ MHz, $BW_{LoRa} = 125$ kHz a $SF_{LoRa} = 12$	46
Obrázok 7-11: Závislosť PR na GB pre $BW_{LTE} = 10$ a 20 MHz, $SF_{LoRa} = 12$, $BW_{LoRa} = 500$ kHz	47
Obrázok 7-12: Závislosť PR na GB pre $BW_{LTE} = 10$ a 20 MHz, $SF_{LoRa} = 12$, $BW_{LoRa} = 125$ kHz	47
Obrázok 7-13: Spektrum signálov LTE a LoRa pre koexistenčný scenár s použitím $BW_{LTE} = 10$ MHz, $BW_{LoRa} = 125$ kHz a GFSK _{LoRa}	49
Obrázok 7-14: Závislosť PR na GB pre $BW_{LTE} = 1,4$ a 5 MHz a GFSK _{LoRa}	50
Obrázok 7-15: Závislosť PR na GB pre $BW_{LTE} = 1,4$ a 5 MHz, GFSK _{LoRa}	50
Obrázok P-1: Závislosť PR na GB pre $BW_{LTE} = 1,4$ a 5 MHz, $SF_{LoRa} = 8$, $BW_{LoRa} = 500$ kHz	56
Obrázok P-2: Závislosť PR na GB pre $BW_{LTE} = 10$ a 20 MHz, $SF_{LoRa} = 8$, $BW_{LoRa} = 500$ kHz	56
Obrázok P-3: Závislosť PR na GB pre $BW_{LTE} = 10$ a 20 MHz, $SF_{LoRa} = 8$, $BW_{LoRa} = 125$ kHz	57
Obrázok P-4: Závislosť PR na GB pre $BW_{LTE} = 1,4$ a 5 MHz, $SF_{LoRa} = 9$, $BW_{LoRa} = 500$ kHz	58
Obrázok P-5: Závislosť PR na GB pre $BW_{LTE} = 10$ a 20 MHz, $SF_{LoRa} = 9$, $BW_{LoRa} = 500$ kHz	58
Obrázok P-6: Závislosť PR na GB pre $BW_{LTE} = 1,4$ a 5 MHz, $SF_{LoRa} = 9$, $BW_{LoRa} = 125$ kHz	59

Obrázok P-7: Závislosť PR na GB pre $BW_{LTE} = 10$ a 20 MHz, $SF_{LoRa} = 9$, $BW_{LoRa} = 125$ kHz	59
Obrázok P-8: Závislosť PR na GB pre $BW_{LTE} = 10$ a 20 MHz, $SF_{LoRa} = 11$, $BW_{LoRa} = 500$ kHz	60
Obrázok P-9: Závislosť PR na GB pre $BW_{LTE} = 10$ a 20 MHz, $SF_{LoRa} = 11$, $BW_{LoRa} = 125$ kHz	60

Seznam tabulek

Tabuľka 1: Možné hodnoty parametrov signálu LoRa.....	17
Tabuľka 2: Bitové rýchlosti pre jednotlivé hodnoty BW_{LoRa} a SF_{LoRa} (na základe [7])	19
Tabuľka 3: Hodnoty ochranných pásem pre LTE v závislosti na BW_{LTE}	25
Tabuľka 4: Nastavenie sieťových adaptérov	26
Tabuľka 5: Parametre analyzovaných signálov použité počas meraní	36
Tabuľka 6: Minimálne hodnoty PR pre koexistenčný scenár za použitia $SF_{LoRa} = 7$	41
Tabuľka 7: Minimálne hodnoty PR pre koexistenčný scenár za použitia $SF_{LoRa} = 12$	49
Tabuľka 8: Minimálne hodnoty PR pre koexistenčný scenár za použitia $SF_{LoRa} = 10$	46

1. ÚVOD

V posledných rokoch sa zvyšuje dopyt po zariadeniach pracujúcich v sieti IoT (Internet of Things). Medzi tieto zariadenia patria napríklad senzory v tzv. chytrých domácnostiach (termostat, svietenie, klimatizácia a pod.), zariadenia na monitorovanie počasia, bezdrôtové prenosné zariadenia a iné. Systém LoRa (Long Range) nachádza uplatnenie v tejto oblasti vďaka možnosti realizovať komunikačný spoj na veľké vzdialenosti, nízkej energetickej náročnosti koncových zariadení či malej šírke pásma (malá dátová priepustnosť). V súčasnosti je systém LoRa licencovaný pre pásmo 863 až 870 MHz v Európskej únii (EÚ) [1], avšak firma Semtech, vývojár daného systému, uviedla na trh vysielač-prijímač pracujúci v pásme 2,4 GHz ISM (Industry, Science, Medicine) [2]. V prípade použitia systému LoRa v tomto pásme vzniká možný problém koexistencie so systémom LTE (Long Term Evolution) využívanom v pásme 2,3 až 2,4 GHz alebo Wi-Fi (Wireless-Fidelity) na 2,4 GHz.

Náplňou diplomovej práce je definovať spoločné rádiové frekvenčné (RF) pásmo, v ktorom by tieto bezdrôtové komunikačné systémy mohli koexistovať. Práca sa následne zaoberá návrhom meracieho pracoviska pre automatizované meranie definovaných koexistenčných scenárov, návrhom metodiky merania a vyhodnotením získaných výsledkov.

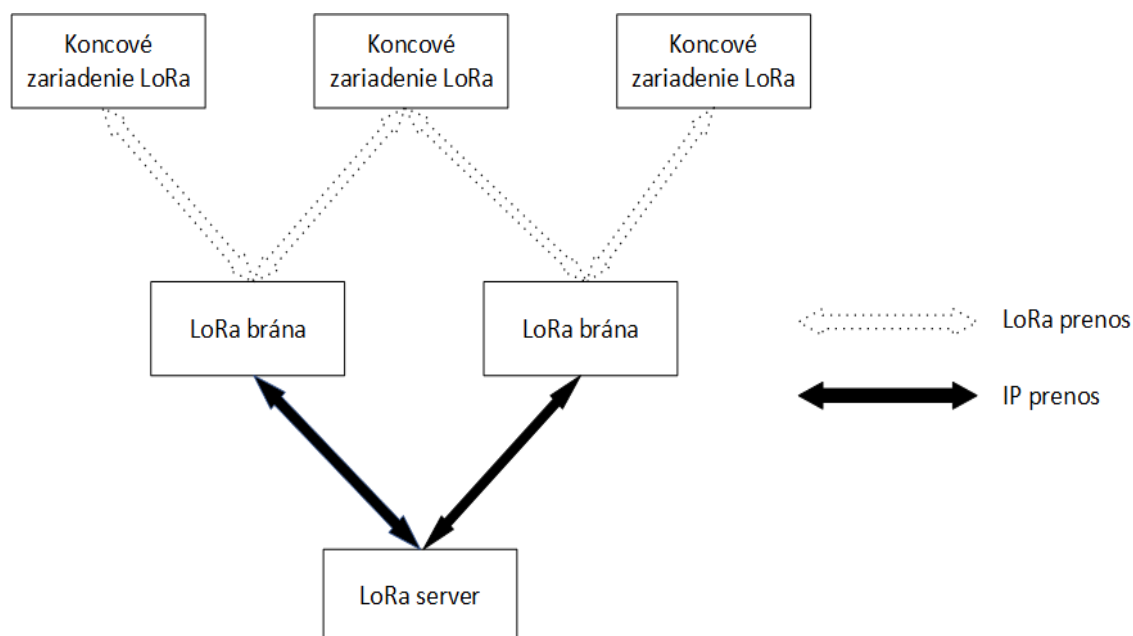
Kapitola 2 a 3 popisuje bezdrôtové komunikačné systémy LoRa a LTE z pohľadu ich základných parametrov, ich funkčnosti a vlastností na fyzickej vrstve (Physical Layer – PHY). Kapitola 4 popisuje koexistenčné scenáre a definuje spoločné RF pásmo, v ktorom je možné uvažovať koexistenciu LTE a LoRa. V kapitole 5 je navrhnuté meracie pracovisko podporujúce automatizované meranie definovaných koexistenčných scenárov. Kapitola 6 sa zaoberá návrhom metodiky a automatizovaným meraním koexistencie. Vyhodnotenie výsledkov prebieha v kapitole 7.

2. LORA

Skratka LoRa pochádza z anglického výrazu *Long Range*. Označuje bezdrôtový komunikačný systém so zameraním na prenos dát malých veľkostí na veľké vzdialenosti. Vyznačuje sa nízkym energetickým odberom na strane koncového zariadenia, malou šírkou pásma, spoľahlivosťou prenosu a cenovou dostupnosťou, ktorá ju predurčuje byť súčasťou IoT. Označenie LoRa častokrát odkazuje na dve veci: modulačná technika na PHY vrstve založená na princípe rozprostrenia spektra (Chirp Spread Spectrum - CSS) a protokol linkovej vrstvy (Medium Access Control - MAC) [3].

PHY vrstva bola vyvinutá spoločnosťou Semtech. Definované frekvenčné pásmo závisí od krajiny, v ktorej sa systém LoRa používa. V Európskej únii je použité RF pásmo – 870 MHz, v USA, Kanade a Južnej Amerike v RF pásme 902 – 928 MHz a v Číne v RF pásme 779 – 787 MHz. Mechanizmus prístupu k fyzickému médiu zastrešuje protokol LoRaWAN (LoRa Wide Area Network), ktorý je vyvíjaný a udržiavaný skupinou LoRa Alliance [3], [4].

Topológia siete LoRa má tvar hviezdy. Koncové zariadenia komunikujú s LoRa bránou (tzv. Gateway) pomocou spomínaného protokolu LoRaWAN. Brána komunikuje s LoRa serverom pomocou IP spojenia. Server je zodpovedný za dekodovanie vysielaných paketov a za prípadnú odpoveď odoslanú koncovému zariadeniu. Na Obr. 2-1 je zobrazená daná topológia [3].



Obrázok 2-1: Architektúra siete LoRa

2.1 LoRa - Fyzická vrstva

PHY vrstva systému LoRa je založená na technike CSS a dodatočne využíva tzv. dopredné kódovanie FEC (Forward Error Correction) na zvýšenie odolnosti systému voči chybám pri prenose. CSS je postavená na tzv. chirp pulzoch: za určitú časovú dobu sa frekvencia signálu lineárne zvyšuje z nižšej hodnoty na vyššiu hodnotu (upchirp) a opačne (downchirp). Frekvenčná šírka chirpu je totožná so spektrálnou šírkou signálu. Výsledkom je robustný systém s konštantnou výkonovou spektrálnou hustotou a dobrou odolnosťou voči viacccestnému šíreniu signálu, únikom v kanále či Dopplerovému efektu [5], [6].

Časový ofset (oneskorenie prijatého signálu voči očakávanému signálu od koncového zariadenia) je eliminovaný dekodérom, pričom frekvenčný ofset môže dosahovať až 20% z hodnoty šírky pásma bez výrazného obmedzenia dekódovania. Tým sa zamedzí potrebe presného referenčného zdroja hodinového signálu. LoRa prijímače dosahujú citlivosti až -130 dBm [3], [6].

2.1.1 Parametre fyzickej vrstvy

PHY vrstvu je možné popísať tromi parametrami: šírka pásma (Bandwidth - BW_{LoRa}), rozprostierací faktor (Spreading Factor - SF_{LoRa}) a kódový pomer (Code Ratio - CR_{LoRa}). Možné hodnoty spomínaných parametrov obsahuje Tabuľka 1. Parametre sú so sebou prepojené a ovplyvňujú bitovú rýchlosť či odolnosť systému využívajúcu LoRa technológiu voči šumu a iným bezdrôtovým systémom. SF_{LoRa} označuje počet kódovaných bitov na symbol. Zvýšením hodnoty SF_{LoRa} vzrastie citlivosť prijímača a zníži sa bitová rýchlosť. CR_{LoRa} podáva hodnotu kódového pomeru dopredného protichybového zabezpečenia (FEC) [3].

$SF_{LoRa}[-]$	7	8	9	10	11	12
$CR_{LoRa}[-]$	4/5	4/6	4/7	4/8		
$BW_{LoRa}[\text{kHz}]$	125	250	500			

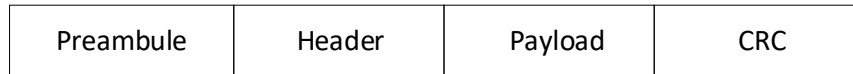
Tabuľka 1: Možné hodnoty parametrov systému LoRa

Bitová a symbolová rýchlosť (LoRa symbolov) priamo závisia od hodnoty BW_{LoRa} a prípadnému použitiu CR_{LoRa} . Zvýšenie šírky pásma o určitú hodnotu spôsobí zvýšenie bitovej rýchlosti (R_b) v rovnakom pomere. R_b v závislosti na všetkých troch vyššie spomínaných parametroch sa dá vypočítať nasledovne [6]:

$$R_b = SF_{LoRa} \times \frac{BW_{Lora}}{2^{SF_{LoRa}}} \times CR_{LoRa}. \quad (1)$$

2.1.2 Formát rámcov

LoRa rámec začína preambulou (preamble), nasleduje hlavička (header), dátová časť (payload) a CRC (Cyclic Redundancy Check – cyklický kontrolný súčet) kontrola dátovej časti. Schéma LoRa rámca je zobrazená na Obr. 2-2.



Obrázok 2-2: LoRa rámec

Preambula obsahuje sekvenciu konštantných tzv. upchirpov, ktoré vyplňujú celé RF pásmo. Synchronizačné slovo prenášané v preambule odlišuje viacero iných LoRa sietí v rovnakom RF pásme a je obsiahnuté v posledných dvoch upchirpoch. LoRa zariadenie má svoje vlastné synchronizačné slovo, ktoré je porovnávané počas prenosu s dekódovaným synchronizačným slovom. Prijem rozdielneho slova má za následok ukončenie komunikácie. Voliteľná 8 symbolová hlavička nasleduje po preambule, ktorá je prenášaná s najsilnejším kódovým pomerom $CR_{LoRa} = 4/8$. Indikuje sa tým veľkosť dátovej časti v bajtoch, kódový pomer použitý na konci prenosu a prítomnosť 16-bitového CRC na konci rámca. Ten je taktiež voliteľný. Maximálna veľkosť dátovej časti je 255 bajtov [2], [3].

2.2 LoRaWAN

Protokol popisuje štruktúru rámcov na PHY vrstve pre downlink (DL) a uplink (UL), formát správ na linkovej MAC vrstve a mnoho ďalších požiadaviek. Ďalej delí zariadenia komunikujúce pomocou technológie LoRa do troch tried: A, B a C. Zariadenia v triede A pracujú ako koncové, tzv. *end-devices*. Trieda B špecifikuje zariadenie ako tzv. maják (*beacon*) a trieda C popisuje koncové zariadenie s dostačujúcim výkonom bez potreby minimalizovať prijímací čas. Prijímací čas je časové okno implementované v každom zariadení triedy A. Koncové zariadenie vždy otvára dve krátke prijímacie okna po ukončení prenosu v UL. V tejto práci budeme pracovať s triedou A [1].

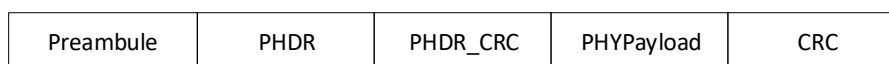
V pásme UHF (300 MHz až 3 GHz) je vyhradené pásmo od 863 MHz po 870 MHz pre ISM. V tejto špecifikácii je zadefinovaný maximálny výkon zariadenia: 14 dBm [1]. Definovaný je aj počet kanálov, ktoré musia byť implementované v každom koncovom zariadení využívajúce LoRa technológiu. Konkrétne sa jedná o 3 kanály na frekvencii 868,1; 868,3 a 868,5 MHz. Zariadenie musí spĺňať ETSI (Európsky úrad pre telekomunikačné normy) nariadenie [7], ktoré obmedzuje čas, po ktorého dobu môže vysielač vysielať, tzv. duty cycle (strieda signálu) = 1%. Všeobecne to znamená, že po odoslaní paketu nemôže zariadenie vysielať po zvyšok hodnoty striedy – 99%. Teda ak poslanie paketu trvá 1 sekundu, zariadenie sa musí odmlčať po dobu zvyšných 99 sekúnd, kým bude môcť odoslať ďalší paket [1].

$SF_{LoRa}[-]$	$BW_{LoRa}[kHz]$	$R_b[bit/s]$
12	125	250
11	125	440
10	125	980
9	125	1 760
8	125	3 125
7	125	5 470
7	250	11 000
$GFSK_{LoRa}$	-	50 000

Tabuľka 2: Bitové rýchlosti pre jednotlivé hodnoty BW_{LoRa} a SF_{LoRa} (na základe [7])

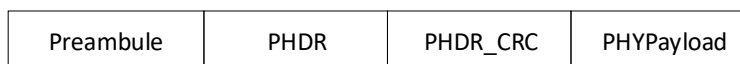
LoRa využíva okrem 7 rôznych hodnôt SF_{LoRa} aj doplnujúcu $GFSK_{LoRa}$ moduláciu poskytujúcu najvyššiu hodnotu R_b . Konkrétne hodnoty R_b pre určitú veľkosť BW_{LoRa} a SF_{LoRa} sú uvedené v Tabuľke 2.

Formát správ na PHY vrstve je členení na UL a DL. Správy v UL sú vysielané medzi koncovým zariadením a sieťou. Využívajú tzv. explicitný mód, v ktorom je obsiahnutý blok hlavičky PHDR (LoRa Physical Header) nasledovaný blokom PHDR_CRC. Explicitný mód je štandardný mód vysielania, pri ktorom hlavička obsahuje informácie o dĺžke dátovej časti v bajtoch, použitom kódovom pomere a CRC bloku pre dátovú časť. PHDR_CRC zabezpečuje kontrolu celistvosti hlavičky a umožňuje prijímači zahodiť poškodený blok s invalidnými informáciami. Bloky PHDR, PHDR_CRC a CRC sú vložené vysielateľom. Forma paketu je na nasledujúcom Obr. 2-3 [1],



Obrázok 2-3: LoRa paket - formát správ pre UL

V správe pre DL chýba koncový blok CRC. Kontrola celistvosti na tejto úrovni neprebíha z dôvodu udržania čo najkratších správ s minimálnym dopadom na limitovanú triedu signálu. Forma paketu je zobrazená na Obr. 2-4 [1],



Obrázok 2-4: LoRa paket - formát správ pre DL

3. LTE

LTE (Long Term Evolution) je pomenovanie pre mobilnú sieť predstavenú ako nástupcu UMTS (Universal Mobile Telecommunications System), zadanú v Release 8 od iniciatívy 3GPP v roku 2008. Upustilo sa od siete so spínanými okruhmi a začala sa využívať technika prepínania paketov. Nová technika umožnila vznik nových aplikácií ako VoIP (Voice over IP) či streamovanie videa. Zvyšoval sa dopyt po vyšších dátových rýchlostiach či zníženiu latencie (času odozvy). Aktuálny systém sa blížil ku koncu svojho evolučného cyklu a potreba zaistenia konkurencieschopnosti 3G služieb či potreba zníženia zložitosti siete takisto viedli k zavedeniu LTE. Definované požiadavky a ciele novej siete obsahovali: zvýšenie dátovej rýchlosti v DL/UL na $100 \text{ Mbit.s}^{-1} / 50 \text{ Mbit.s}^{-1}$ a zvýšenie spektrálnej účinnosti na takmer 4-násobok oproti súčasnému systému; variabilná šírka pásma, podpora prenosového módu MIMO (Multiple Input Multiple Output) či QoS (Quality of Service) [9], [10].

3.1 Architektúra siete LTE

V rámci zjednodušenia a prechodu na techniku prepínania paketov, sieť LTE vyzerá nasledovne:

1. blok E-UTRAN (Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network)
2. blok EPC (Evolved Packet Core)

Blok E-UTRAN obsahuje základňovú stanicu eNodeB a zariadenie užívateľa (User Equipment - UE) a má za úlohu sprostredkovať celkový prenos medzi užívateľom UE a IP sieťou. Konkrétne sa jedná o scheduling, dynamické pridelenie zdrojov pre UE v UL a DL, bezpečnosť dát, prepojenie na blok EPC a iné [11].

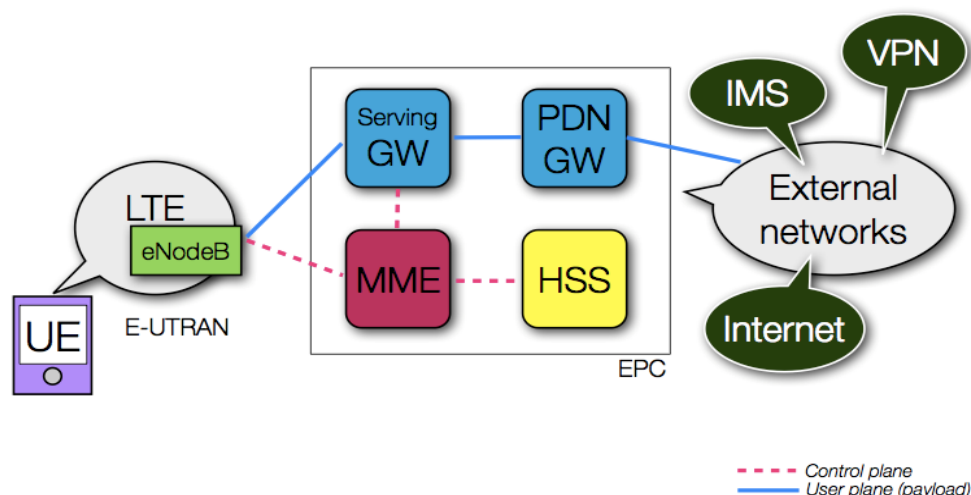
Blok EPC zaisťuje celkový chod siete a obsahuje štyri časti: *Serving GW*, *HSS*, *PDN GW*, *MME*. Architektúra bloku je zobrazená na Obr. 3-1.

Serving GW je brána, ktorá sa zaoberá užívateľskou časťou a to prenosom dát medzi UE a vonkajšou sieťou. Smeruje prichádzajúce a odchádzajúce IP pakety a slúži ako hlavný bod pre intra-LTE mobilitu a pre mobilitu medzi LTE a ostatnými 3GPP prístupmi [12].

PDN GW je bod, ktorý prepája vonkajšie IP siete a EPC. Smeruje pakety do a von z vonkajších sietí, označovaných *Packet Data Network*, podľa ktorých je aj pomenovaný [12].

HSS označuje databázu obsahujúcu užívateľské dáta. Dodatočne poskytuje podporu funkciám pri autentifikácii prístupu a užívateľa či zostaveniu hovoru [12].

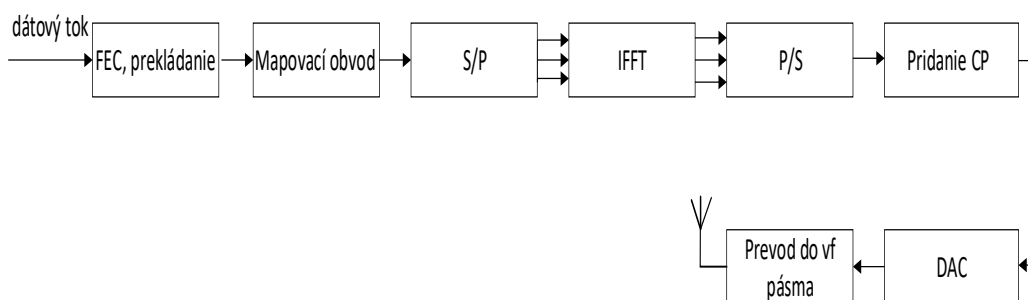
MME pracuje v rámci mobility a ochrany E-UTRAN prístupu. Sleduje a vykonáva paging zariadenia užívateľa v idle móde [12].



Obrázok 3-1: Architektúra bloku EPC (prevzaté z [13])

3.2 LTE - Fyzická vrstva

LTE-Downlink (LTE-DL) využíva prístupovú techniku OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Acces). Podstata OFDMA spočíva v rozdelení dostupného frekvenčného pásma na niekoľko navzájom ortogonálnych subnosných. Tento prístup s viacerými nosnými má za následok vyššiu spektrálnu účinnosť. Nevýhodou je vyššia hodnota PAPR (Peak to Average Power Ratio) a tým pádom potreba použitia koncových zosilňovačov s vysokou linearitou, ktoré majú za následok vyšší potrebný výkon a s tým spojenú vyššiu cenu koncového zariadenia (UE). Tento fakt vylučuje použitie OFDMA v UL [14]. Schéma vysielateľa LTE-DL je na Obr. 3-2,

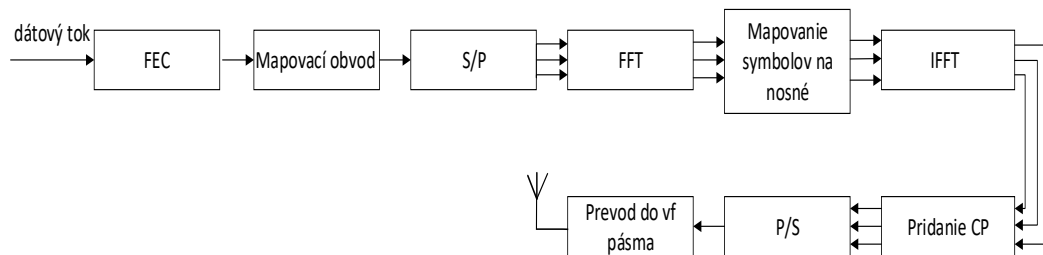


Obrázok 3-2: Blokóvá schéma LTE-DL

V prvom bloku sa dátový tok kóduje pomocou FEC a prekláda. Nasleduje mapovanie do symbolov podľa modulácie (QPSK, 16-QAM, 64-QAM). Blok S/P (Serial to Parallel) prevedie sériový blok dát na paralelný a vytvorí sa OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) symboly, ktoré vstupujú do bloku IFFT (Inverse Fast Fourier Transformation). OFDM symboly sú prevedené z frekvenčnej do časovej oblasti. Nasleduje blok P/S (Parallel to Serial) s prevodom paralelného toku dát na sériový, pridanie cyklického prefixu (CP) k zamedzeniu vzniku medzisymbolových interferencií a prevod digitálneho na analógový signál v bloku DAC (Digital to Analog)

Converter). Pred vyžiarením signálu do RF pásma je potrebná konverzia signálu do vysokofrekvenčného pásma [15].

LTE-Uplink (LTE-UL) využíva pozmenenú verziu OFDMA a to Single-Carrier Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA). Na vstupné bity je aplikovaný proces FFT (Fast Fourier Transformation), ktoré sú následne rozptorené na všetky subnosné. Takýto prístup ma za následok nižšiu hodnotu PAPR a nižší nárok na výkon zariadenia [14]. Schéma LTE-UL je zobrazená na Obr. 3-3,



Obrázok 3-3: Bloková schéma LTE-UL

Bloky FEC, mapovací obvod a S/P fungujú totožne ako pri LTE-DL. Blok FFT transformuje signál tak, že každá subnosná prenáša informácie odpovedajúce vstupným dátovým symbolom. Blok Mapovania symbolov na nosné realizuje dva možné typy prenosov. Prvý je označovaný ako lokalizovaný, kde užívateľ vysiela v pridelenom frekvenčnom pásme s možnosťou pružnej adaptácie pásma. Kladie sa veľký dôraz na synchronizáciu. Druhý typ prenosu sa označuje ako distribuovaný, kde užívatelia vysielaajú v celom frekvenčnom pásme, pričom jednotlivé subnosné nemôžu byť vedľa seba. Nasledujúce bloky (pridanie CP, P/S a prevod do VF pásma) fungujú rovnako ako v prípade LTE-DL [15].

Rozdelenie jednotlivých frekvenčných kanálov je dostupné na [16]. Kanály sú rozdelené podľa duplexného prenosu. Používa sa FDD (Frequency Division Duplex) alebo TDD (Time Division Duplex). Pri obojsmernom prenose za použitia FDD je potrebný pre každý smer prenosu rozdielne frekvenčné pásmo. Použitím FDD sa využíva jedno frekvenčné pásmo a prenos je rozdelený do dvoch časových intervalov – time slotov.

3.2.1 Štruktúra rámcov

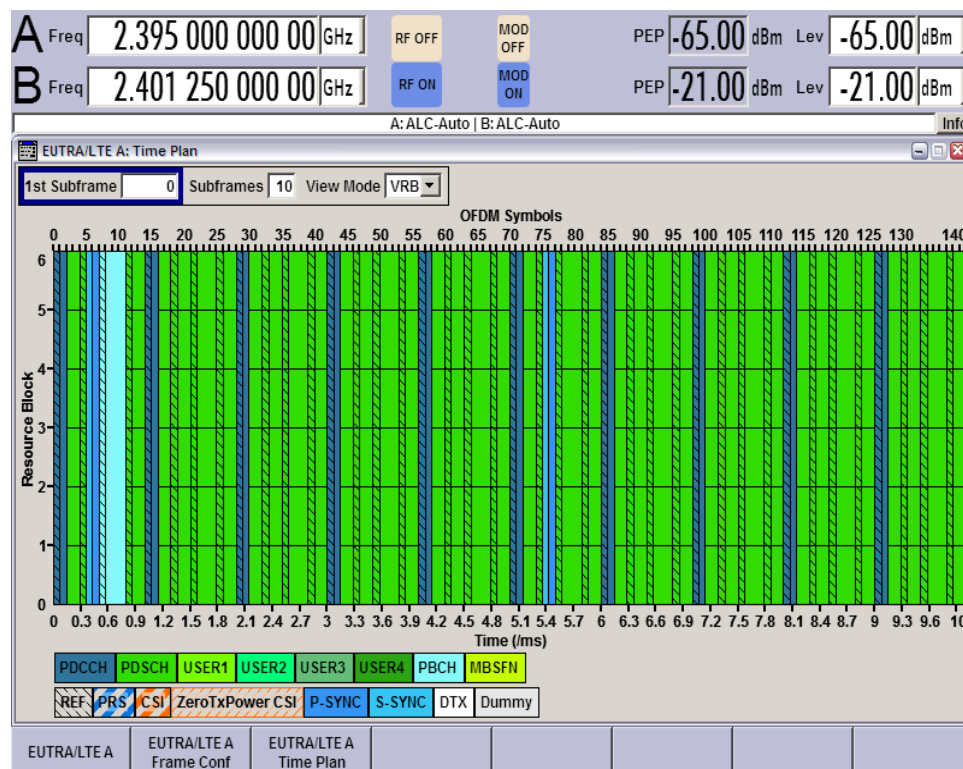
Rámec v LTE má dobu trvania 10 ms. Rozdelený je na 10 subrámcov, každý s dobou trvania 1 ms. Subrámec sa následne delí na dva sloty o dobe trvania 0,5 ms. Šírka pásma sa delí na 12 frekvenčných blokov, ktoré spolu s jedným slotom tvoria RB (Resource Block). RB je teda možné vyjadriť ako určitý počet OFDM symbolov v časovej oblasti (v závislosti na použítom CP) a skupinou 12-tich subnosných vo frekvenčnej oblasti, každej s rozstupom 15 KHz. Zoskupenie viacerých RB-ov sa nazýva RE (Resource Element) [9], [17].

3.2.2 Fyzické kanály

Fyzický kanál označuje prenosový kanál, ktorý obsahuje užívateľské dáta a kontrolné správy. Delia sa podľa použitia v UL alebo DL a každý z nich plní rozdielnu funkciu. Medzi hlavné fyzické kanály v DL patria [17]:

1. PDCCH Physical Downlink Control Channel – stará sa o prenos plánovacích informácií do UE.
2. PDSCH Physical Downlink Shared Channel – nesie užívateľské dáta.
3. PBCH Physical Broadcast Channel – prenáša systémové informácie pre UE, potrebné k pripojeniu k sieti.

Na Obr. 3-4 je ukážka vyplneného LTE resource gridu na signálovom generátore Rohde & Schwarz (R&S) SMU200A s modulom LTE, kde je možné pozorovať spomínané kanály. Taktiež sú prítomné aj synchronizačné signály P-SYNC (Primary Synchronization) a S-SYNC (Secondary Synchronization). Tie využíva UE k identifikácii bunky a k časovaniu rámcu.



Obrázok 3-4: Vyplnený LTE resource grid

Užívateľské dáta spolu s vyššie spomínanými signálmi a kanálmi sú modulované pomocou modulácií QPSK, 16-QAM a 64-QAM pre DL, pričom PDCCH využíva výhradne QPSK. UL využíva totožné modulácie s výnimkou možnosti voliteľnej 64-QAM modulácie [17].

4. LORA A LTE V PÁSME ISM 2.4 GHz

Výber spoločného RF pásma, v ktorom môžu systémy LTE a LoRa koexistovať, úzko súvisí s charakteristikou daných systémov. Zo zadania práce vyplýva požiadavka na 2,4 GHz pásmo. Dané pásmo je nelicencované, ktoré sa značí ako ISM. Konkrétne sa jedná o hodnoty od 2,4 GHz do 2,5 GHz.

LTE nie je prevádzkované v spomínanom ISM pásme. Najbližšie sa nachádza pásmo 40, ktoré využíva frekvencie od 2,3 GHz do 2,4 GHz. LTE v tomto pásme využíva časový duplex TDD. Vysielenie v UL a DL prebieha v tom istom RF pásme, ktoré je oddelené časovým intervalom. LoRa takisto nie je prevádzkovaná v pásme 2,4 GHz, ani v blízkom okolí. V budúcnosti ale nie je vylúčená táto možnosť, keďže vývojár technológie LoRa, spoločnosť Semtech, uviedla na trh vysielač-prijímač práve pre pásmo 2,4 GHz [2]. Vo vzťahu LTE a LoRa je prvý spomínaný systém dominantným faktorom. Šírka pásiem u LTE je niekoľkonásobne väčšia ako v prípade LoRa. LTE disponuje taktiež vyšším maximálnym výkonom signálu.

Pri uvažovaní možných koexistenčných scenárov sa počíta s neprekrývajúcimi alebo prekrývajúcimi sa RF pásmami dvoch signálov. Práca sa zaoberá len prvým variantom, keďže priame prekrytie pásmom LTE a LoRa signálu je momentálne vylúčené. Pri vysielení signálu LTE v pásme 40, prijímač zachytí žiadaný signál spolu s nechceným šumom či signálom z iných rádiových systémov, napr. LoRa, pracujúcim v tesnej blízkosti v pásme ISM 2,4 GHz. Ten môže pôsobiť ako interferenčný signál. V pásme 2,4 GHz sa primárne využíva WLAN, avšak v práci uvažujeme, že daný kanál nie je využitý.

V závislosti na veľkosti interferencie je možné pozorovať degradáciu prijatého signálu, stratu synchronizácie či úplný výpadok služby rušeného systému. Interferenciu je možné potlačiť znížením hodnoty výkonu či frekvenčným posuvom rušiaceho signálu. Systémy LTE aj LoRa majú v tomto ohľade definovanú maximálnu hodnotou vysieleného výkonu, ktorá by mala slúžiť k zamedzeniu interferencie. Oba spomínané možnosti zamedzenia interferencie budú využité pri meraní a analýze koexistencie systémov LTE a LoRa. Koexistenčný scenár uvažovaný v tejto práci predpokladá systém LoRa ako interferenčný signál LTE ako rušený signál (viz. Kapitola 6.1) [21].

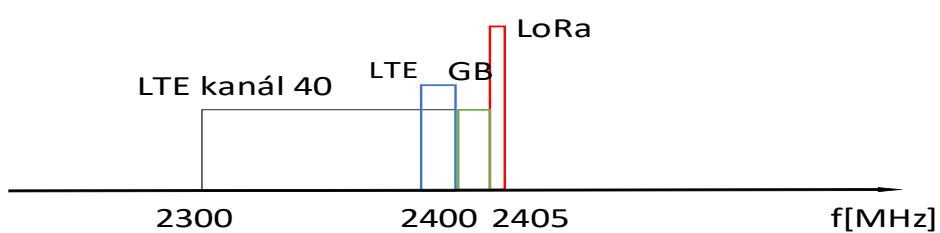
Signál LTE disponuje odporúčaným ochranným pásmom GB. Označuje sa tým frekvenčný rozostup medzi RF spektrami dvoch signálov, LTE a LoRa. Jedná sa o nevyužitú frekvenčné pásmo s cieľom zabrániť, prípadne minimalizovať vzájomnú interferenciu signálov. Pre každú z veľkostí BW_{LTE} bude hodnota GB medzi LTE a LoRa vopred pevne daná. Jej zmena je vykonávaná posuvom strednej frekvencie signálu LoRa. Minimálna hodnota GB je stanovená na 1 MHz a je postupne v priebehu merania zvyšovaná.

Princíp výpočtu GB podľa odporúčaní 3GPP je dostupný na [18]. Informačná tabuľka s hodnotami ochranných pásem pre rozlične hodnoty BW_{LTE} je zobrazená nižšie.

BW_{LTE} [MHz]	1,4	3	5	10	15	20
Max. využívaná BW_{LTE} [MHz]	1,08	2,7	4,5	9,0	13,5	18,0
GB – ochranné pásmo z jednej strany spektra [kHz]	160	150	250	500	750	1000

Tabuľka 3: Hodnoty ochranných pásem pre LTE v závislosti na BW_{LTE}

Obr. 4-1 znázorňuje uvažovanú koexistenciu systémov LTE a LoRa v ISM pásme 2,4 GHz s neprekrývajúcimi sa RF pásmami,



Obrázok 4-1: Koexistenčný scenár LTE v pásme 40 a LoRa v ISM pásme 2,4 GHz

5. POPIS MERACIEHO PRACOVISKA

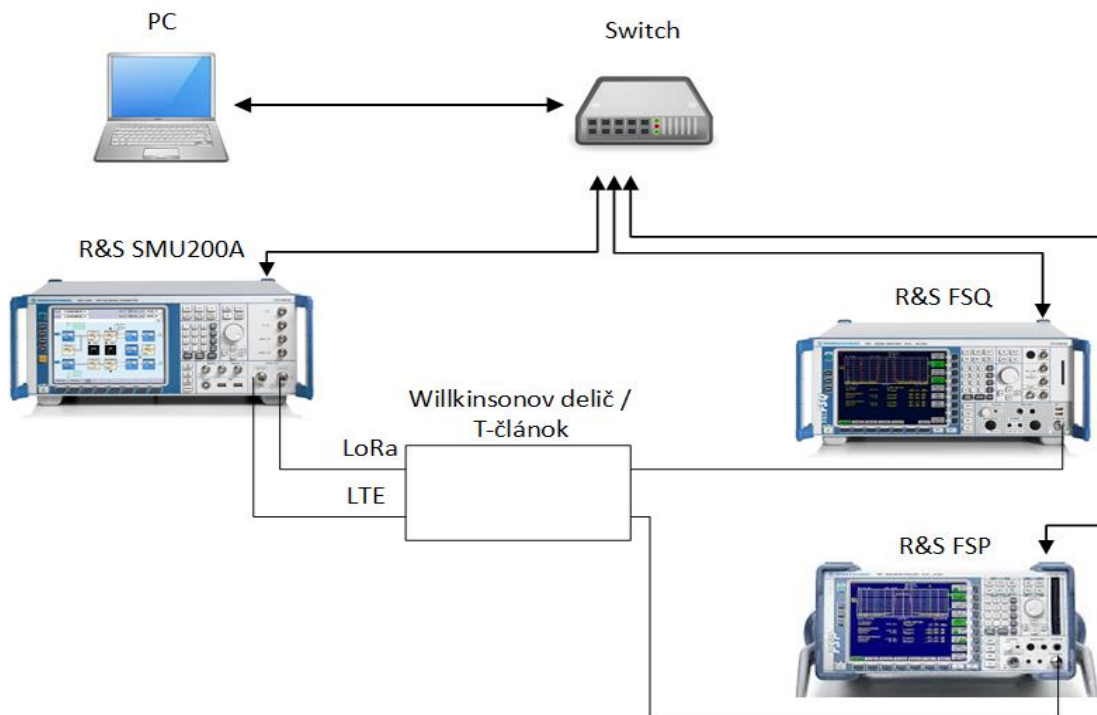
Zostavenie meracieho pracoviska pre analýzu koexistenčných scenárov LTE verzus LoRa podliehalo dvom podmienkam: využiť dostupné meracie zariadenia laboratória mobilných a bezdrôtových komunikácií na Ústave radioelektroniky (UREL) a automatizovať proces celého merania, ktoré bolo dosiahnuté použitím programu MATLAB. Pri zostavovaní pracoviska sa vychádzalo z práce [19].

Z toho hľadiska boli vybrané tri prístroje: Arbitrary generátor signálu R&S SMU200A, signálový a spektrálny analyzátor R&S FSQ a vektorový analyzátor R&S FSP. Súčasťou pracoviska je PC s nainštalovaným programom MATLAB R2018a. Ten vyžaduje *Instrument Control Toolbox*, ktorý zabezpečuje prepojenie programu s testovacími a meracími prístrojmi pomocou textových príkazov SCPI (Standard Commands for Programmable Instruments) a protokolu VISA (Virtual Instrument Software Architecture). Ten v sebe zahŕňa funkcie ako spravovanie zdrojov všetkých VISA vzdialených pripojení, vyhľadanie prístroja na základe zadaných parametrov, otvorenie a zatvorenie prenosu s daným prístrojom či zápis a vyčítanie správ medzi prístrojom a software-ovou aplikáciou. Využitá bola verzia programu MATLAB R2018a a to vďaka natívnej podpore prístrojov R&S VISA protokolom bez nutnosti inštalácie podporných balíčkov.

Prepojenie prístrojov s PC zabezpečuje sieťový prepínač (switch) NETGEAR GS108Tv2. Aby prístroje spolu dokázali komunikovať, je potrebné nastaviť správnu IP adresu, masku siete a adresu brány. Dané nastavenia je na prístrojoch možné meniť kliknutím na tlačidlo *Setup* dostupné v ľavej časti prístrojov vedľa zobrazovacieho panelu, následne kliknutím na položku *Network configuration*. Posledný krok spočíva v upravení vlastností sieťového adaptéra a zadaním konkrétnej IP adresy. Zoznam IP adries priradených prístrojom a PC je v Tabuľke 4 a schéma popísaného pracoviska na Obr. 5-1,

Názov prístroja	IP adresa	Maska siete	Adresa brány
PC	192.168.0.238	255.255.255.0	192.168.0.239
R&S SMU200A	192.168.0.237	255.255.255.0	192.168.0.239
R&S FSQ	192.168.0.236	255.255.255.0	192.168.0.239
R&S FSP	192.168.0.235	255.255.255.0	192.168.0.239

Tabuľka 4: Nastavenie sieťových adaptérov



Obrázok 5-1: Schéma meracieho pracoviska pre automatizované meranie koexistencie systémov LTE a LoRa

R&S SMU200A je dvojkanálový signálový generátor s maximálnou použiteľnou frekvenciou na výstupe - 6 GHz pre kanál A a 3 GHz pre kanál B. Tieto kanály označujú RF výstup signálu. Signály LTE a LoRa je teda možné generovať na frekvencii 2,4 GHz súčasne bez nejakých obmedzení. Je potrebné dodať, že pre signál LoRa sa nejedná o natívnu generáciu ako v prípade LTE ale o LoRa waveform nahraný z externého súboru do generátora. Waveformy boli stiahnuté zo stránok spoločnosti R&S. K dispozícii je waveform pre každý SF_{LoRa} faktor, BW_{LoRa} a $GFSK_{LoRa}$ moduláciu.

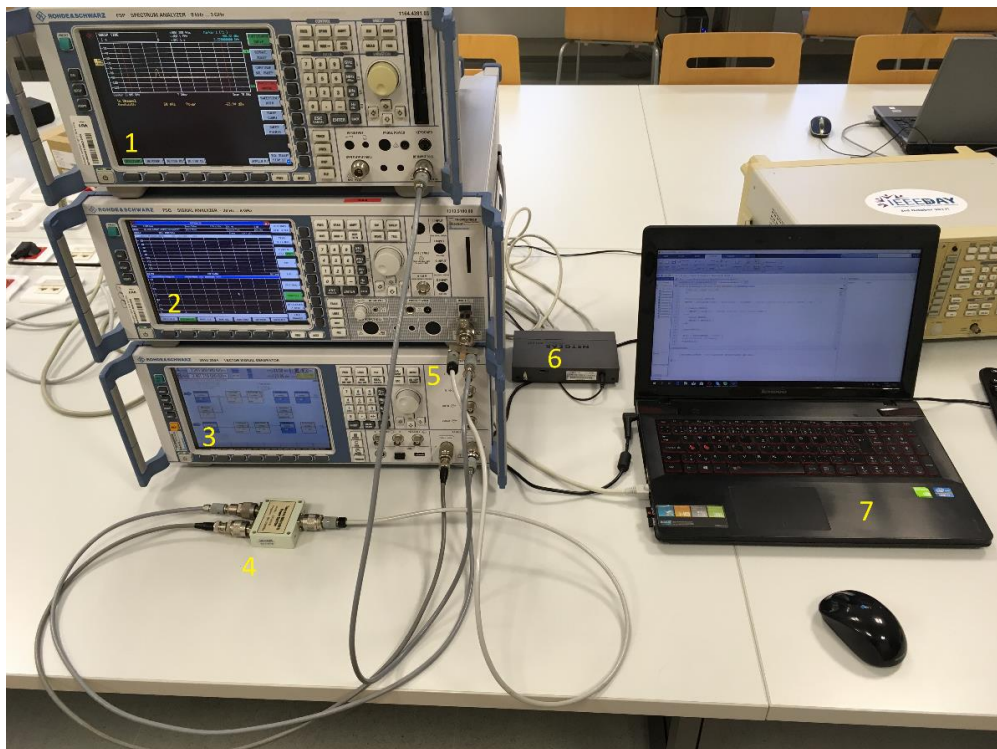
Signálový analyzátor R&S FSQ je využitý na zobrazenie RF spektier signálov a k určeniu výkonu v meranom RF kanále. Taktiež disponuje modulom pre analýzu LTE signálu. Konkrétne sa jedná o schopnosť výpočtu parametru EVM (Error Vector Magnitude), ktorý zaznamenáva chyby v konstelačnom diagrame a je ho možné použiť ako jeden z hodnotiacich objektívnych parametrov kvality prijatého LTE signálu (viz. Kapitola 6). Analyzátor je okrem iného schopný zobraziť konstelačný diagram prijatých symbolov, zmerať I/Q nerovnováhu (imbalance) či I/Q offset alebo skupinové oneskorenie.

Vektorový analyzátor FSP umožňuje zobrazenie RF spektra signálu a meranie výkonu RF signálu v kanále. Využitie nachádza z dôvodu, že tieto informácie nie je možné pozorovať na prístroji FSQ počas analýzy signálu LTE. Na prepojenie všetkých zariadení boli použité BNC kably.

Overenie možnosti komunikácie s danými prístrojmi pomocou programu MATLAB zabezpečí príkaz *instrhwinfo*. Všetky spomenuté príkazy je vhodné zadať do časti

s názvom *Command Window*. Príkaz *instrhwinfo* s parametrami *rs* a *visa* vracia informáciu o podpore daného výrobcu prístrojov protokolom VISA. Po overení nasleduje nadviazanie a overenie správnej komunikácie prístrojov s PC príkazmi *instrfind* a **IDN?*. *Instrfind* s parametrom ako IP adresa a skratka výrobcu prístroja (v tomto prípade *rs*) vytvorí špecifický MATLAB objekt pre konkrétny prístroj definovaný IP adresou. Overenie správnosti komunikácie sa vykoná zapísaním textového SCPI príkazu **IDN?* a vyčítaním odpovede. Využije sa k tomu funkcia *query*, ktorej parameter tvorí názov vytvoreného MATLAB objektu a samotný textový príkaz. Funkcia vráti odpoveď na dotaz. V *Command Window* sa následne objavia informácie o názve prístroja, jeho sériovom čísle, verzii firmware a pod.

Zostavené pracovisko v laboratóriu mobilných a bezdrôtových komunikácií na UREL je zobrazené na Obrázku 5-2. Číslo (1) označuje prístroj R&S FSP, nasledovaný R&S FSQ (2) a R&S SMU200A (3), Willkinsonov delič (4), T-článok (5), sieťový prepínač (6) a PC s programom MATLAB (7).



Obrázok 5-2: Zapojené meracie pracovisko

6. METODIKA A MERANIE KOEXISTENCIE SYSTÉMOV LTE A LORA

Metodika a vyhodnotenie koexistencie spočíva v rozdelení, v tomto prípade, dvoch signálov na signál rušený C (Carrier) a na signál, ktorý je rušiteľom I (Interference). S týmto úzko súvisí parameter C/I , ktorý vyjadruje pomer C a I . Výkon signálov je uvedený v jednotkách dBm, z čoho vyplýva jednotka dB pre ich pomer.

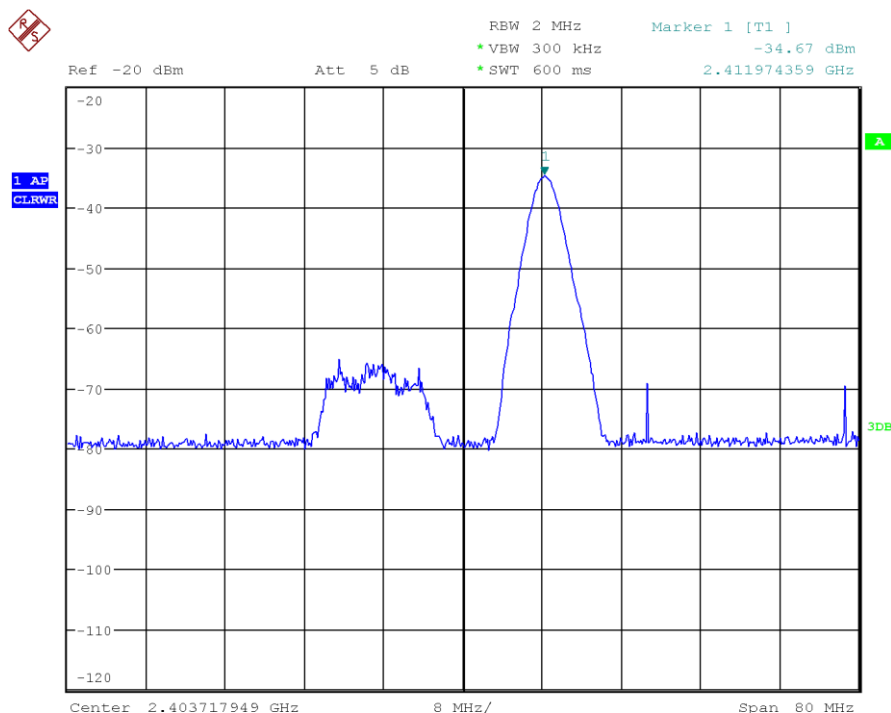
Pre určenie kvality LTE signálu na PHY vrstve je vhodný parameter EVM. Ten vyjadruje chybový vektor v I/Q konstelačnom diagrame medzi polohou prijatého symbolu pri ideálnych podmienkach a reálnou polohou prijatého symbolu. EVM je možné použiť pre viacero modulácií, ktoré vďaka rozdielnym hodnotám amplitúdy signálu je nutné normalizovať. Hodnota rozdielu medzi prijatým a ideálnym symbolom je spriemerovaná cez veľký počet symbolov a uvádza sa v %. LTE využíva modulácie QPSK, 16-QAM alebo 64-QAM a pre každú moduláciu je určená hodnota, nad ktorou je možné označiť prijatý signál za nevyhovujúci. Pre QPSK je to EVM s hodnotou 17,5%, pre 16-QAM 12,5% a pre 64-QAM 8% [20].

Ochranný pomer PR (Protection Ratio) vyjadruje minimálnu hodnotu pomeru C/I , pri ktorej rušený signál C ešte vykazuje požadovanú kvalitu za účasti rušiaceho signálu I o určitej hodnote výkonu. Pri ďalšom zvýšení výkonu I , signál C vypadne. Udáva sa v jednotkách dB. Jeho hodnota sa vypočíta z meraných údajov analyzátora FSP ako rozdiel výkonu oboch signálov. Postup výpočtu popisuje rovnica 2.

$$PR = C - I \quad (2)$$

Vyjadrenie kvality prijatého signálu LoRa nie je také jednoznačné ako v prípade LTE. Nie je možné použiť parameter EVM z dôvodu použitia rozdielnej modulačnej techniky. Ďalší problém spočíva v tom, že dostupné sú len tzv. waveformy LoRa signálu. Nie je dostupný určitý integrovaný modul na vysielačnej strane ako je to v prípade LTE. Tak isto nie k dispozícii koncové zariadenie *end-device* a LoRa Gateway potrebný k vysielačnej strane, resp. zachytávaniu posielaných dát cez LoRaWAN protokol. Tieto dôvody nedovoľujú otestovať koexistenčný scenár v prípade, že LTE je rušiacim signálom.

Zobrazenie oboch signálov s neprekrývajúcim sa RF spektrom pomocou prístroja R&S FSQ je na Obrázku 6-1. Na pravej strane je vidieť spektrum LoRa signálu s použitým $SF_{LoRa} = 10$ a $BW_{LoRa} = 125$ kHz. Na ľavej strane je možné pozorovať spektrum LTE signálu s hodnotou $BW_{LTE} = 1,4$ MHz.



Obrázok 6-1: Spektrum signálov LTE a LoRa v pásme 2,4 GHz

6.1 Koexistenčný scenár

Meranie koexistencie je založené na meraní parametrov PR a GB. Signál LoRa pôsobí ako rušivý signál voči LTE. Meranie prebieha pre každú šírku pásma LTE signálu a s využitím troch modulačných techník – QPSK, 16-QAM, 64-QAM. U LoRa signálu sa jedná o šesť dostupných rozprostieracích faktorov ($SF_{LoRa} = 7$ až $SF_{LoRa} = 12$) a moduláciu GFSK_{LoRa} spolu s rôznou šírkou pásma BW_{LoRa} pre každý SF_{LoRa} .

Výkon signálu LTE je počas celého merania nemenný. Jeho minimálna hodnota v dBm na vstupe prijímača sa stanoví podľa nasledujúceho vzorca [21],

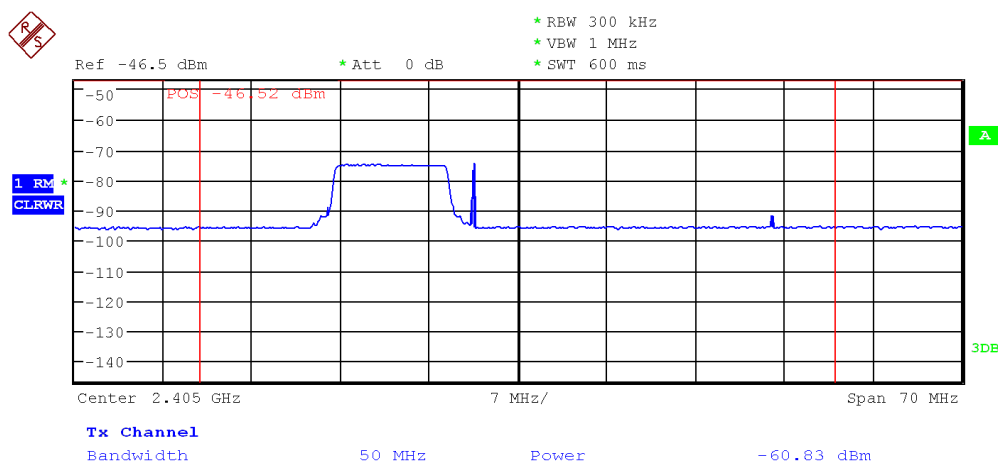
$$P_{min} = 10 \cdot \log(kTBW_{LTE}) + NF + CNR_{min} + 30, \quad (3)$$

kde parameter k označuje Boltzmannovu konštantu ($k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$), T teplotu okolia uvažovaných 20 °C ($T = 293,2 \text{ K}$), BW_{LTE} šírku použitého LTE pásma. NF značí šumové číslo s hodnotou 7 dB a veličina CNR_{min} určuje odstup užitočného signálu od šumu. Zvolená bola hodnota 40 dB, ktorá v reálnom prostredí poskytuje dostatočnú odolnosť voči únikom signálu či rušeniu. Výsledná hodnota činí -86 dBm pre $BW_{LTE} = 10 \text{ MHz}$. Počas celého merania je nastavená hodnota výkonu LTE v kanále na hodnotu -60 dBm, ktorá je vyššia a nesie so sebou zvýšenie odolnosti LTE voči stratám synchronizácie či prípadnému rušeniu.

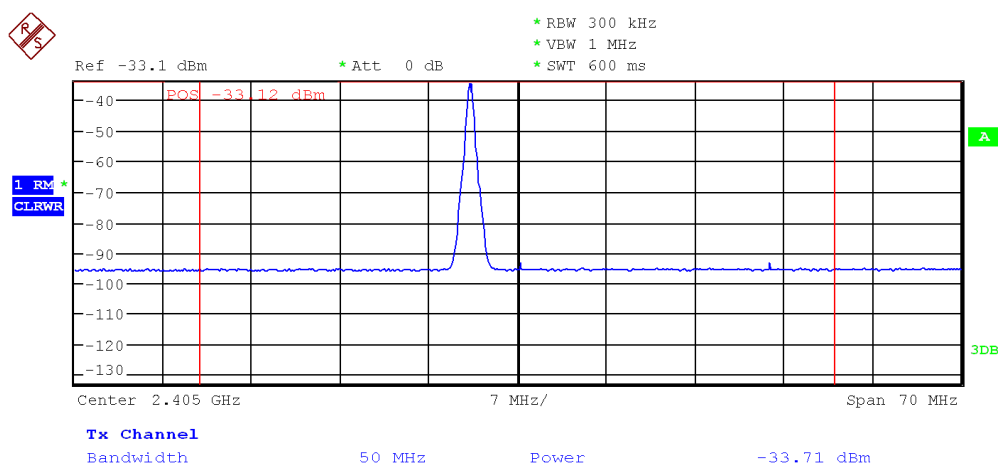
Veľkosť signálu LoRa je počiatočne nastavená na hodnotu okolo -80 dBm. Napriek obmedzeniu maximálnej hodnoty výkonu LoRa až na 14 dBm, hodnota počas merania

nepresiahne 8 dBm z dôvodu obmedzení na strane generátora signálu. Maximálny vysielací čas signálu je regulovaný s hodnotou triedy 1%, avšak pri realizácii konkrétneho merania je uvažované kontinuálne vysielanie LoRa signálu. Jedná sa o štandardný prístup pri laboratórnych meraniach.

K získaniu hodnoty PR je potrebné poznať hodnoty výkonov C a I . Hodnota C , resp. I predstavuje výkon daného signálu v kanále a nie hodnotu nastavenú na signálovom generátore SMU200A. Sú merané pomocou vektorového analyzátora R&S FSP a PR je následne dopočítaný podľa vzorca (2). Hodnota C predstavuje výkon signálu LTE v kanále pri vypnutom signály I . Hodnota I označuje výkon signálu LoRa v kanále pri vypnutom zdroji signálu C . V prípade veľmi malého rozdielu hodnôt C a I , konkrétne $\pm 1,5$ dBm, je možné zanedbať hodnotu I . Ukážka určenia týchto hodnôt pomocou prístroja R&S FSP je zobrazená na Obr. 6-2 a 6-3 najprv pre signál C a následne I . Keďže rozdiel v hodnotách výkonov je väčší než $\pm 1,5$ dBm, platí vzorec (2),



Obrázok 6-2: Výpočet výkonu v kanále pre signál LTE



Obrázok 6-3: Výpočet výkonu v kanále pre signál LoRa

Hodnoty GB sa pohybujú v rozmedzí od 1 MHz do 3 MHz s krokom 0,5 MHz a od hodnoty 3 MHz do 5 MHz s krokom 1 MHz. Sú pevne stanované pre celý priebeh merania, pričom zmena ochranného pásma je vykonávaná posunom strednej frekvencie LoRa signálu.

6.2 Skript pre automatizované meranie koexistencie systémov LTE a LoRa

Podľa navrhutej metodiky je vytvorený skript pre samotný proces automatizovaného merania koexistencie systémov LTE a LoRa v prostredí MATLAB. Po vytvorení a overení správnej komunikácie meracích prístrojov a PC príkazmi *instrfind* a **IDN?* nasleduje vytvorenie vektorov pre údaje potrebné k meraniu. Patria sem vektory hodnoty výkonu a strednej frekvencie signálu LoRa. Hodnota výkonu je určená v rozsahu od -80 dBm po +8 dBm s krokom 1 dB. Hodnota -80 dBm označuje hraničnú hodnotu nastaveného výkonu na generátore R&S SMU200A, od ktorej je pri zapnutom výstupe signálu LTE možné na signálovom analyzátore R&S FSP detekovať hodnotu výkonu signálu LoRa v kanále. Zvýšením hodnoty výkonu nad 8 dBm môže dôjsť k poškodeniu generátora. Krok o hodnote 1 dB bol vybraný na základe niekoľkých experimentálnych meraní a pozorovaní zmien meraných hodnôt EVM. Zvyšné štyri vektory slúžia na zápis nameraných hodnôt EVM pre tri rôzne modulácie – 64-QAM, 16-QAM a QPSK a výkon signálu LoRa v kanále.

Nasleduje uvedenie prístrojov do základného stavu príkazom *SYST:PRES*. Ďalší krok spočíva v nastavení generátora R&S SMU200A. Pre kanál A sa z dostupných blokov signálov vyberie E-UTRA/LTE. Nastaví sa požadovaná hodnota šírky pásma v záložke *General Settings*, ktorá je nasledovaná vyplnením časového rámca dátami s tromi rôznymi moduláciami, viz obr. 3-4. Vzhľadom k skutočnosti, že spomenuté nastavenie prístroj SMU 200A nedokáže pri zmene hodnoty šírky pásma uchovať, je vhodné si vyplnený časový rámec uložiť do pamäte prístroja. Tento krok je nutné spraviť ručne pred meraním. V ďalšom kroku sa nastaví stredná frekvencia signálu LTE podľa zvolenej šírky pásma vždy tak, aby pravý lalok RF spektra dosahoval na okraj vybraného pásma 2,3 až 2,4 GHz. Nastavenie výkonu prebehne ručne, keďže nastavený výkon neodpovedá výkonu v kanále vďaka stratám pri prenose. Po nastavení výkonu na -60 dBm v kanále nasleduje obdobné nastavenie pre kanál B signálu LoRa. Z pamäte prístroja sa príkazom načíta zvolený waveform podľa vybranej hodnoty SF_{LoRa} a následne BW_{LoRa} . Stredná frekvencia LoRa sa mení v závislosti na vybranej hodnote BW_{LoRa} s zvyšovaním parametru GB. Pre $BW_{LoRa} = 125$ kHz a GB = 1 MHz stredná frekvencia začína na hodnote 2,4010625 MHz, pre $BW_{LoRa} = 500$ kHz a GB = 1 MHz sa jedná o hodnotu 2,40125 MHz [23].

Nastavenie signálového analyzátora R&S FSQ spočíva v spustení modulu pre analýzu signálu LTE príkazom *INST LTE*. Nasleduje výber frekvenčného duplexu príkazom *CONF:DUPL FDD* a downlink-u *CONF:LDIR DL*. V závislosti na nastavenej hodnote BW_{LTE} a strednej frekvencie LTE sa tieto hodnoty zapisujú príkazmi *FREQ:CENT* a *CONF:DL:BW*. Medzi dôležité nastavenia patrí výber cyklického prefixu, nastavenie výkonovej úrovne prijatého signálu, ktorý prístroj očakáva na vstupe či počet rámcov k analýze. Pre potreby správneho merania hodnôt parametru EVM nie je nutná zmena troch vyššie uvedených parametrov oproti základnému nastaveniu.

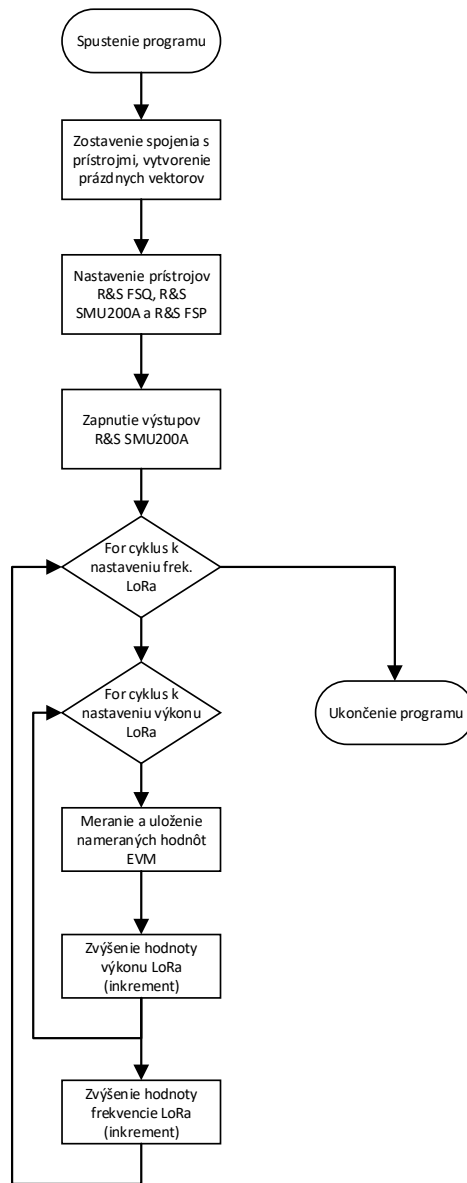
Pre správnu demoduláciu prijatého LTE signálu slúžia parametre v záložke *Demod Settings*. Konkrétne sa jedná o výber metódy výpočtu EVM podľa 3GPP TS 36.141 príkazom *SENS:LTE:DL:DEM:EVMC TGPP* [24]. Zapnutie automatickej demodulácie

PDSCH kanálu príkazom *SENS:LTE:DL:DEM AUTO ON*, fyzickú detekciu PDSCH podrámca príkazom *SENS:LTE:DL:FORM:PSCD PHYDET*. Do tejto oblasti patrí nastavenie automatickej detekcie referenčných dát pre kanál PDSCH analýzou prijatého signálu - *SENS:LTE:DL:DEM:PRD AUTO*. Zvyšné nastavenie prístroja je opäť možné ponechať v základnom nastavení.

Nastavenie R&S FSP podlieha požiadavkám na zobrazenie RF spektier a meranie hodnoty výkonu oboch analyzovaných signálov v kanále. K tomu je potrebný príkaz *CALC:MARK:FUNC:POW:SEL CPOW*, ktorý spustí meranie hodnoty výkonu v kanále. K správne meraniu hodnoty výkonu je nutné nastaviť šírku pásma kanálu. RF spektrum analyzovaných signálov sa musí nachádzať v tomto pásme v celej svojej šírke. Použije sa príkaz *SENS:POW:ACH:BWID:CHAN*. Vhodné je aktivovať zobrazenie maximálnej hodnoty výkonu. R&S FSP následne uloží každú novú hodnotu výkonu len vtedy, ak je jeho hodnota väčšia než v predchádzajúcom prípade. Na to slúži príkaz *SENS:POW:ACH:MODE ABS*.

Po nastavení všetkých potrebných parametrov meracích prístrojov nasleduje samotný cyklus merania. Z navrhutej metodiky vyplýva, že pre každú hodnotu GB sa meria hodnota EVM prístrojom R&S FSQ, pri ktorej je signál LTE synchronizovaný a interferencia nespôsobila výpadok poskytovanej služby. Dosiahne sa to použitím dvoch *for* cyklov. Prvý cyklus nastavuje hodnoty strednej frekvencie LoRa, ktorými sa dosiahne postupné zväčšovanie hodnoty GB od 1 MHz do 5 MHz. Druhý, vnorený cyklus, nastavuje hodnotu výkonu signálu LoRa na výstupe kanálu B generátora R&S SMU200A. Následne je potrebné zadať príkazy k spusteniu merania pre prístroje R&S FSQ a R&S FSP. Hodnoty EVM je možné merať ako ich maximálnu, minimálnu alebo priemernú hodnotu za stanovenú časovú dobu. Namerané hodnoty pre tri použité modulácie (64-QAM, 16-QAM, QPSK) a výkon signálu v kanále sa uložia do vytvorených prázdnych vektorov.

Hodnoty sa v poslednej časti skriptu uložia do *xlsx* (Microsoft Excel) súboru k následnej analýze a vyhodnoteniu koexistenčného scenára. Vyššie popísaný celkový proces merania hodnôt je zobrazený na Obr. 6-4 vo forme diagramu.

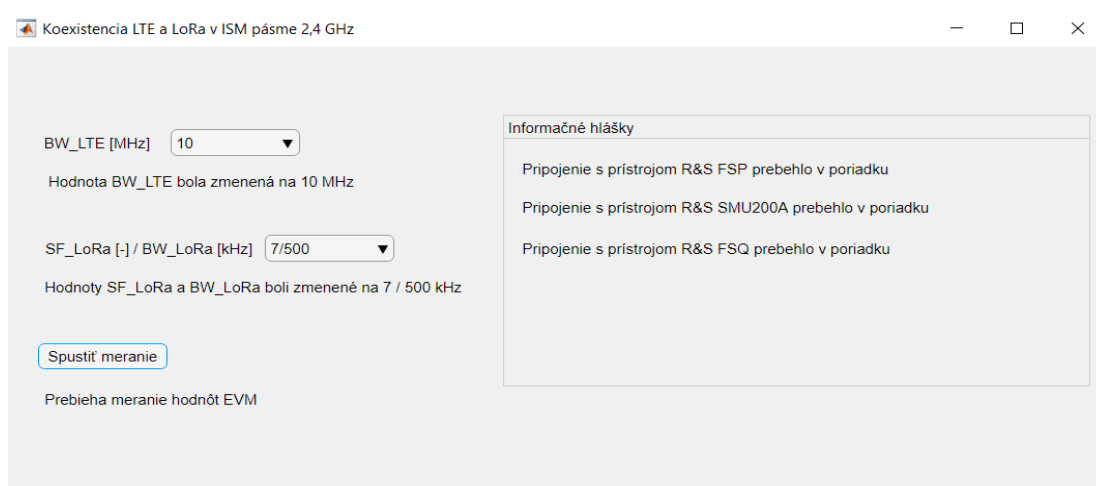


Obrázok 6-4: Diagram automatizovaného meracieho procesu

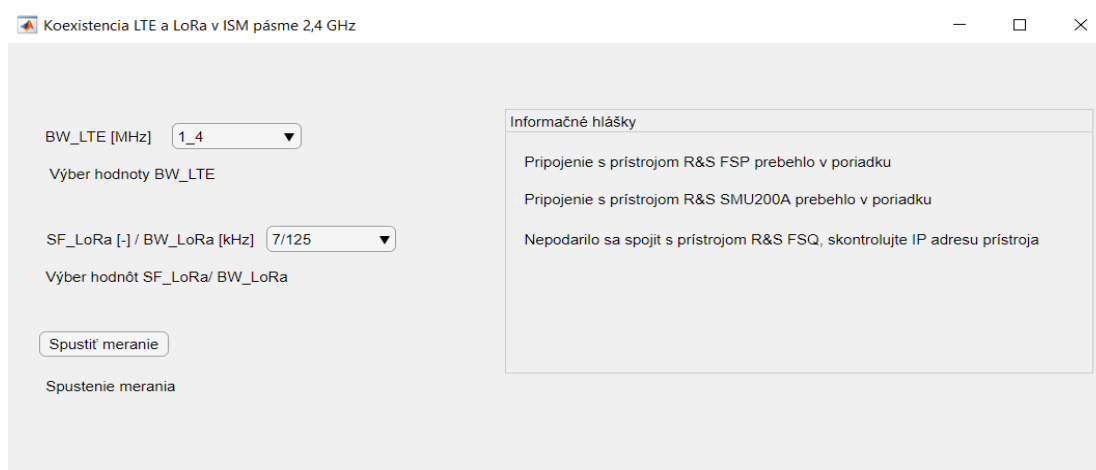
6.3 Uživatelské rozhranie pre meranie koexistencie LTE a LoRa

Vytvorený skript a nastavené hodnoty je potrebné pri každej zmene parametrov oboch signálov upraviť. Čas, ktorý používateľ ušetrí automatizovaným odčítaním nameraných hodnôt a ich následným uložením do xlsx súboru sa stratí v tomto kroku. Týka sa to správnych nastavení hodnôt strednej frekvencie RF signálov či výkonov na výstupe generátora SMU200A. K zjednodušeniu a k dosiahnutiu lepšej automatizácie celého meracieho procesu slúži užívateľské rozhranie (Graphical User Interface – GUI) vytvorené v prostredí MATLAB App Designer.

Po spustení aplikácie sa pred možnosťou ovládania užívateľského prostredia vykoná tzv. štartovacia funkcia. V tomto kroku sa vytvorí prepojenie s meracími prístrojmi, nastaví sa rozsah výkonu signálu LoRa a vytvorí sa prázdne vektory pre uloženie nameraných dát. V prípade neprepojenia prístroja, či už z dôvodu zle nastavenej IP adresy alebo nepripojenia LAN kábla, informačná hláška upozorní používateľa na túto skutočnosť. V užívateľskom prostredí je na výber z parametrov BW_{LTE} a SF_{LoRa} spolu s BW_{LoRa} . Podľa výberu v týchto poliach program správne nastaví stredné frekvencie oboch signálov a hodnoty GB k následnému meraniu. Kliknutím na tlačidlo *Spustiť meranie* sa vykoná merací cyklus, popísaný v podkapitole 6.2. Výstupom z tohto merania je vytvorenie xlsx súboru v mieste uloženia aplikácie. Užívateľské prostredie je doplnené o textové informačné správy, oznamujúce výber konkrétnych hodnôt parametrov či spustenie a dokončenie merania. Obr. 6-5 zobrazuje užívateľské prostredie v procese merania hodnôt EVM a Obr. 6-6 ukazuje na chybu v pripojení prístroja pred samotným meraním.



Obrázok 6-5: Užívateľské rozhranie pre meranie koexistencie systémov LTE a LoRa v ISM pásme 2,4 GHz v procese merania hodnôt



Obrázok 6-6: Užívateľské rozhranie pre meranie koexistencie systémov LTE a LoRa v ISM pásme 2,4 GHz, chybné pripojenie prístroja

7. LABORATÓRNE MERANIE

Vykonané bolo meranie koexistenčných scenárov systémov LTE a LoRa a jeho závislosť pri zmene parametrov BW_{LTE} , BW_{LoRa} a SF_{LoRa} . Jeden koexistenčný scenár uvažoval využitie signálu LoRa s moduláciou $GFSK_{LoRa}$. Konkrétne hodnoty použitých parametrov sú zobrazené v Tabuľke 5.

BW_{LTE} [MHz]	BW_{LoRa} [kHz]	SF_{LoRa} [-]
1,4; 5; 10; 20	125; 500	7; 8; 9; 10; 11; 12

Tabuľka 5: Parametre analyzovaných signálov použité počas meraní

Merania boli uskutočnené samostatne pre každú moduláciu LTE signálu (QPSK, 16-QAM, 64-QAM). Merania pokrývajú prípad rušenia úzkopásmového a širokopásmového LTE signálu úzkopásmovým a širokopásmovým LoRa signálom.

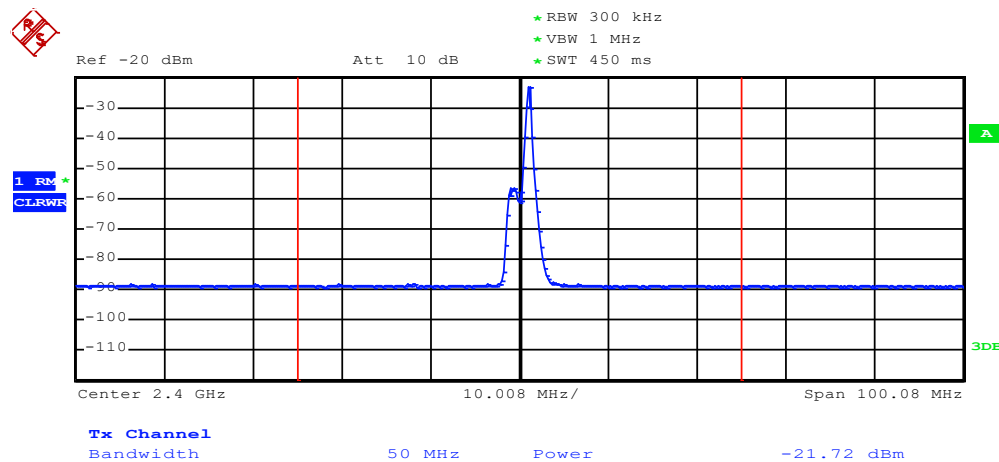
Namerané hodnoty boli spracované podľa navrhutej metodiky ako závislosť hodnoty ochranného pomeru PR na ochrannom pásme GB. Graficky sú výsledky zobrazené v nasledujúcich podkapitolách pre okrajové hodnoty SF_{LoRa} (7; 12), doplnené hodnotou $SF_{LoRa} = 10$. Pokryjú sa tým limitné a najvýraznejšie hodnoty z meraní, pričom výsledky zo zvyšných kombinácií parametrov by sa mali nachádzať medzi týmito okrajovými hodnotami. Zvyšuje to taktiež prehľadnosť práce, pričom vynechané výstupy z meraní sú presunuté do prílohy 1. Niektoré merania neboli zobrazené v prípade, že to počet nameraných prvkov nedovoľoval. Týka sa to meraní, pri ktorých nebol zaznamenaný žiaden vplyv signálu LoRa na správnu funkčnosť signálu LTE. Tieto prípady nebolo možné vyniesť do grafov. Pre prípad, že výpadok signálu LTE nastal len pre jednu či dve hodnoty GB, hodnoty PR pre stávajúce GB dosahujú limitných veľkostí okolo -50 dB. Je to minimálna dosiahnuteľná hodnota PR pre uvažovaný pomer výkonu nosnej k šumu u použitých moduláciách ($C/N = 30$ dB).

7.1.1 Koexistenčný scenár LTE a LoRa pri použití $SF_{LoRa} = 7$

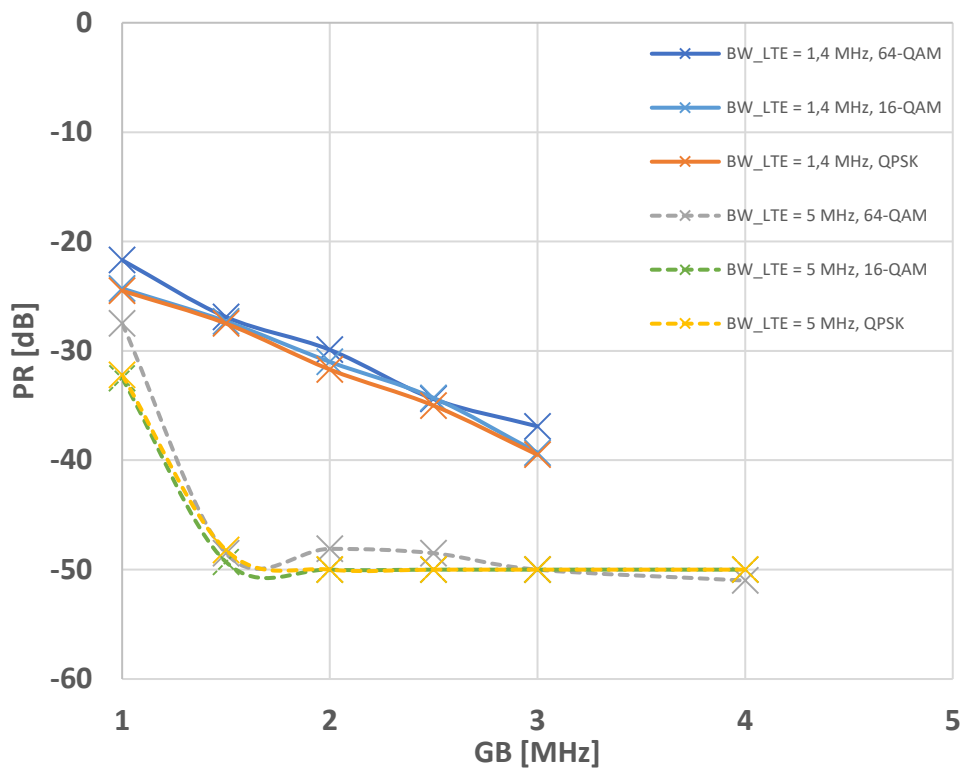
V tejto podkapitole sú prezentované výsledky z meraní koexistencie medzi systémami LTE a LoRa pre konštantnú hodnotu parametra $SF_{LoRa} = 7$. Skúmaná je závislosť odolnosti systému LTE na rušenie systémom LoRa pre štyri rôzne hodnoty BW_{LTE} (1,4 MHz; 5 MHz; 10 MHz; 20 MHz) a dve rôzne hodnoty BW_{LoRa} (500 kHz; 125 kHz). Výsledky sú zobrazené pre modulácie 64-QAM, 16-QAM a QPSK. Výkon signálu LTE v kanále je počas celého merania konštantný a nastavený na hodnotu -60 dBm. Proces merania koexistencie medzi oboma systémami podlieha navrhutej metodike a využíva proces automatizovaného merania pre zadané parametre.

Využíva sa formát zobrazenia dvoch grafov na stranu kvôli prehľadnosti a dobrej orientácii v nameraných hodnotách. Jeden graf obsahuje výsledky pre dve hodnoty BW_{LTE} a jednu konkrétnu hodnotu BW_{LoRa} . V prípade, že vplyvom zvyšujúceho sa výkonu signálu LoRa k výpadku príjmu signálu LTE nedošlo pre značný rozsah hodnôt GB, grafické zobrazenie dát chýba a koexistenčný scenár je popísaný slovne.

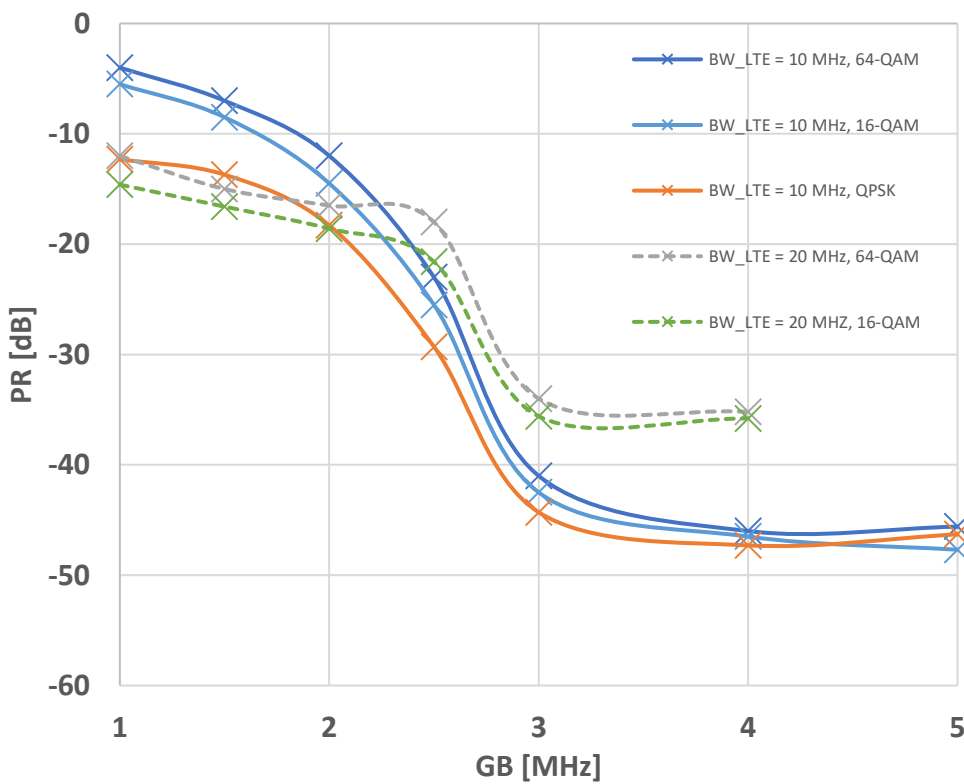
Na Obr. 7-1 je vidieť spektrum oboch signálov v čase, kedy dochádza k výpadku rušeného signálu LTE. Ten je nastavený na hodnotu $BW_{LTE} = 1,4$ MHz a veľkosť GB je nastavená na 1 MHz. Výkon rušiaceho signálu LoRa je dostatočne veľký k tomu, aby zabránil synchronizácii a správne príjmu signálu LTE, pričom taktiež dochádza k prekrytiu oboch spektier v okolí hodnoty 2,4 GHz.



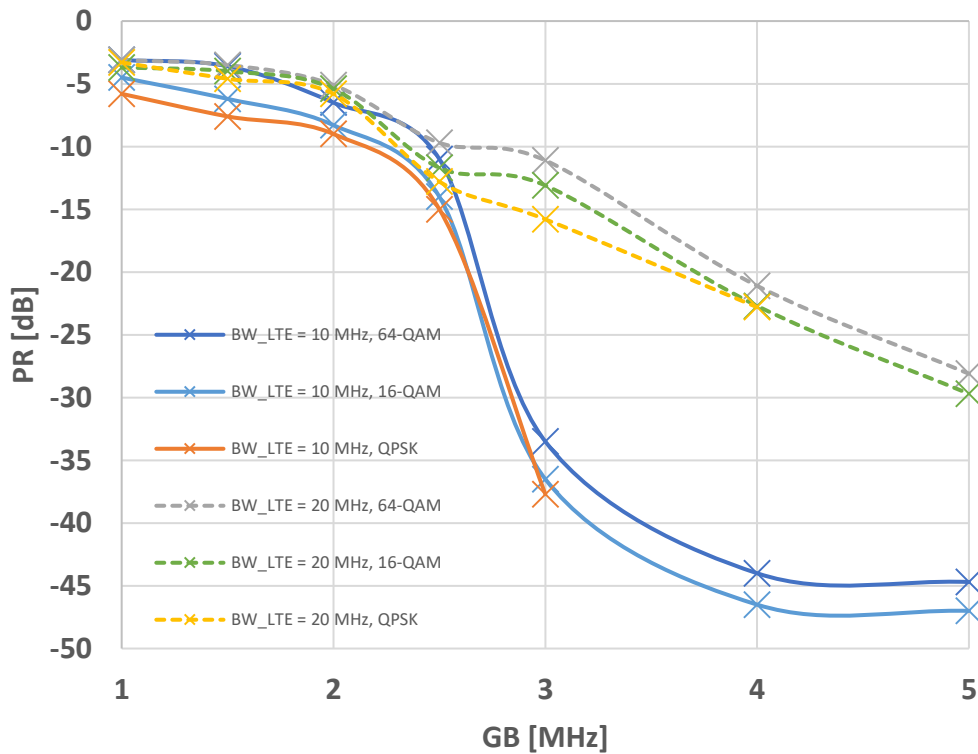
Obrázok 7-1: Spektrum signálov LTE a LoRa pre koexistenčný scenár s použitím $BW_{LTE} = 1,4$ MHz, $BW_{LoRa} = 125$ kHz a $SF_{LoRa} = 7$



Obrázok 7-2: Závislosť PR na GB pre $BW_{LTE} = 1,4$ a 5 MHz, $SF_{LoRa} = 7$, $BW_{LoRa} = 500$ kHz



Obrázok 7-3: Závislosť PR na GB pre $BW_{LTE} = 10$ a 20 MHz, $SF_{LoRa} = 7$, $BW_{LoRa} = 500$ kHz



Obrázok 7-4: Závislosť PR na GB pre $BW_{LTE} = 10$ a 20 MHz, $SF_{LoRa} = 7$, $BW_{LoRa} = 125$ kHz

Obr. 7-2 popisuje rozdiel v závislosti parametru PR na hodnote GB pri zmene BW_{LTE} (1,4 MHz; 5 MHz). Parametre signálu LoRa sú nastavené na hodnoty $SF_{LoRa} = 7$ a $BW_{LoRa} = 500$ kHz. Pre hodnotu $BW_{LTE} = 1,4$ MHz má ochranný pomer PR takmer lineárnu závislosť na GB s minimálnou fluktuáciou. Zmena modulácie nemá za následok výraznú zmenu hodnôt PR. Pozorovaná je menšia odolnosť voči rušeniu pri použití modulácie 64-QAM, čo odpovedá vyššej chybovosti pri použití tejto modulačnej schémy. Odolnosť sa zvýši použitím 16-QAM a ako najodolnejší variant sa javí modulácia QPSK. Nerušený príjem signálu LTE používajúci 64-QAM je stále zaručený pre $PR = -21,7$ dB pri hodnote $GB = 1$ MHz. Zvyšovaným frekvenčným rozostupu signálov je pozorované zvýšenie odolnosti LTE. Kritická hodnota nastáva pre $GB = 3$ MHz, kedy funkčnosť LTE je ešte zaručená pre hodnoty $PR = -36,9$ dB (64-QAM) a $-39,5$ dB (16-QAM/ QPSK). Pre hodnoty $BW_{LTE} = 5$ MHz sa systém LTE javí odolnejšie voči rovnakým parametrom rušiaceho signálu LoRa. K výpadku LTE dochádza pri $GB = 1,5$ MHz s hodnotou výkonu LoRa o 48 dB vyššou než rušený signál o modulácii 64-QAM. Následným zvýšením GB k výpadku LTE nedochádza. V tomto prípade kvôli výkonovým opatreniam hodnota PR dosahuje úrovne okolo -50 dB, ktorá označuje najnižšiu merateľnú hodnotu PR.

Obecne je možné z Obr. 7-2 konštatovať, že zvýšením šírky pásma signálu LTE sa zvýši jeho odolnosť voči rušeniu LoRa pri nezmenených parametroch rušiaceho signálu. Avšak tento fakt je obmedzený výberom úzkopásmového signálu LTE.

Obr. 7-3 popisuje rozdiel v závislosti parametru PR na hodnote GB pri zmene BW_{LTE} (10 MHz; 20 MHz). Parametre signálu LoRa sú nastavené na hodnoty $SF_{LoRa} = 7$ a $BW_{LoRa} = 500$ kHz. Zvyšovaním GB je pozorovaný odlišný priebeh hodnôt PR v porovnaní s obrázkom 7-2. Pre $BW_{LTE} = 10$ MHz a $GB = 1$ MHz má maximálny výkonový pomer oboch RF signálov potrebných k nerušenému príjmu LTE hodnotu -4 dB, resp. -5 dB a -12 dB (64-QAM; 16-QAM; QPSK). Tieto relatívne malé hodnoty PR poukazujú na nízku odolnosť signálu LTE voči rušeniu. Výrazná zmena tejto odolnosti nastáva posunom GB z 2 MHz na 3 MHz. Hodnota zmeny činí okolo -38 dB pre všetky modulácie. Zmenu je možné považovať za kritickú v rámci koexistenčného scenára. Zvýšenie šírky pásma LTE na hodnotu $BW_{LTE} = 20$ MHz sa u závislosti PR na GB prejavuje podobne, avšak s menšími rozdielmi v minimálnych a maximálnych hodnotách PR. Do hodnoty $GB = 2,5$ MHz sa zmena PR neprejavuje výrazne. Pokles PR činí približne +7 dB. Značná zmena v odolnosti voči rušeniu nastáva medzi hodnotami GB 2,5 MHz a 3 MHz. Pre moduláciu 64-QAM to znamená pokles PR na hodnotu -34 dB. U odolnejšej modulácie 16-QAM je príjem signálu LTE zaručený pre hodnoty výkonu LoRa o 1,5 dBm vyššie. Signál LTE s nastavenou moduláciou QPSK nezaznamenal výpadok v prijme pre tento koexistenčný scenár. Celkovo je možné konštatovať, že zvýšenie BW_{LTE} hodnoty z 10 MHz na 20 MHz je sprevádzané menšou odolnosťou voči rušeniu pri dostatočnom ochrannom pásme ($GB > 3$ MHz).

Obr. 7-4 poukazuje na rozdiel v závislosti parametru PR na hodnote GB pri zmene BW_{LTE} (10 MHz; 20 MHz). Rozdiel oproti Obr. 7-2 a 7-3 je v zmene hodnoty BW_{LoRa} na 125 kHz. Namerané priebehy pri $BW_{LTE} = 10$ MHz vykazujú podobný celkový priebeh zmeny hodnoty PR. Kriticky sa takisto javí zmena GB do 3 MHz. Zvýšením hodnoty BW_{LTE} na 20 MHz je zaznamenaný väčší vplyv na rušený signál pre hodnoty $GB > 2,5$ MHz. Výrazne zvýšenie odolnosti sa neprejaví zmenou GB na 3 MHz. Odolnosť napriek tomu takmer lineárne stúpa a pre maximálnu meranú hodnotu $GB = 5$ MHz má PR veľkosť -28,1 dB; -29,7 dB (64-QAM; 16-QAM). Použitím modulácie QPSK sa dosiahne vyššej odolnosti voči rušeniu a pri hodnotách $GB > 4$ MHz signál LoRa prestáva mať negatívny vplyv na príjem LTE. Pri uvažovanej hodnote $GB = 5$ MHz je rozdiel v PR pre obe hodnoty BW_{LTE} približne 17 dB. Z výsledkov celkovo vyplýva, že zvýšením GB nad kritickú hodnotu, signál s parametrom $BW_{LTE} = 10$ MHz dosiahne výrazne nižších hodnôt PR a tým aj väčšiu odolnosť voči rovnakému zdroju rušenia než za použitia $BW_{LTE} = 20$ MHz.

Kriticky sa odolnosť voči rušeniu prejavila u $BW_{LTE} = 5$ MHz pre ochranný pomer $GB = 1$ MHz. Hodnota PR je vypočítaná na -14,6 dB; -15,5 dB; -16,8 dB pre modulácie 64-QAM, 16-QAM a QPSK. Jedná sa o relatívne veľké hodnoty PR. Následným zvýšením GB nad 1 MHz sa nepreukázal vplyv rušiaceho signálu na výpadok LTE. Postupným zvyšovaním výkonu LoRa dochádzalo k zvyšovaniu hodnôt EVM, avšak limitné hodnoty pre jednotlivé modulácie nikdy neboli prekročené. Tento scenár nie je graficky zobrazený.

SF_{LoRa} = 7					
BW_{LoRa} = 500 kHz			BW_{LoRa} = 125 kHz		
BW_{LTE} [MHz]	Minimálna hodnota PR [dB]		BW_{LTE} [MHz]	Minimálna hodnota PR [dB]	
	GB = 1 MHz	GB = 5 MHz		GB = 1 MHz	GB = 5 MHz
1,4	-24,5	NA	1,4	NA	NA
5	-32,5	NA	5	-16,8	NA
10	-12,3	-47,7	10	-5,8	-47
20	-14,6	NA	20	-3,7	-29,7

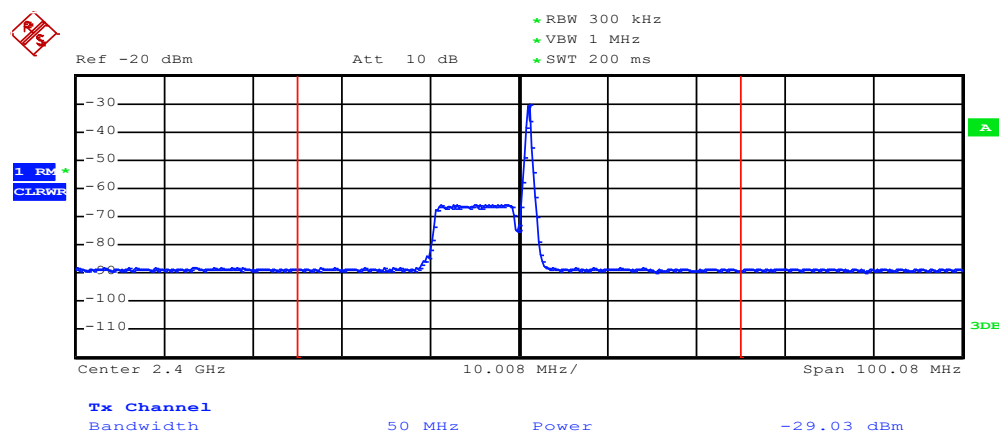
Tabuľka 6: Minimálne hodnoty PR pre koexistenčný scenár za použitia SF_{LoRa} = 7

Tabuľka 6 zobrazuje minimálne namerané hodnoty PR pre oba signály o vybraných parametroch. Hodnota Non-Available (NA) označuje prípad, kedy k výpadku signálu LTE nedošlo a to ani zvýšením hodnoty výkonu rušiaceho signálu LoRa na maximálnu nastaviteľnú úroveň. Viditeľná je najväčšia odolnosť voči rušeniu na strane LTE signálu o BW_{LTE} = 5 MHz. V závislosti na BW_{LoRa} je možné pozorovať najvýraznejší vplyv signálu LoRa na LTE pre BW_{LTE} = 10 MHz, resp. 20 MHz.

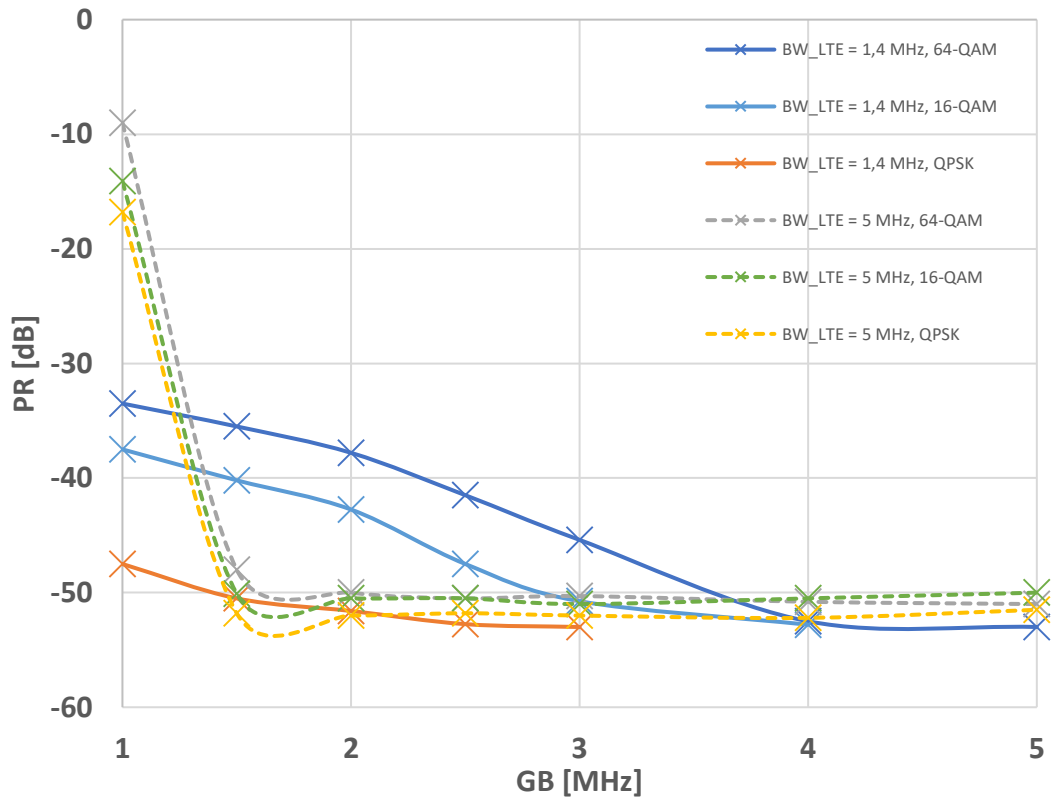
Úzkopásmové signály majú vo všeobecnosti menší vplyv na susedné signály. To zvyšuje odolnosť voči nožnej interferencii, ktorá sa po pridaní dostatočného ochranného pásma prejavuje až pri vysokých hodnotách výkonu rušiaceho signálu. Výhodou signálu LoRa je malá hodnota BW_{LoRa}. Jej zmena sa v kontexte širokopásmového signálu LTE prejaví v menšej miere ako pri použití úzkopásmovej voľby. Podľa nameraných výsledkov je možné zhodnotiť, že zvýšením GB nad 2,5 MHz parametre signálov strácajú mať vplyv na kvalitu rušeného signálu pre tento konkrétny koexistenčný scenár. Koexistencia je následne závislá prevažne len od hodnôt výkonov oboch signálov.

7.1.2 Koexistenčný scenár LTE a LoRa pri použití $SF_{LoRa} = 10$

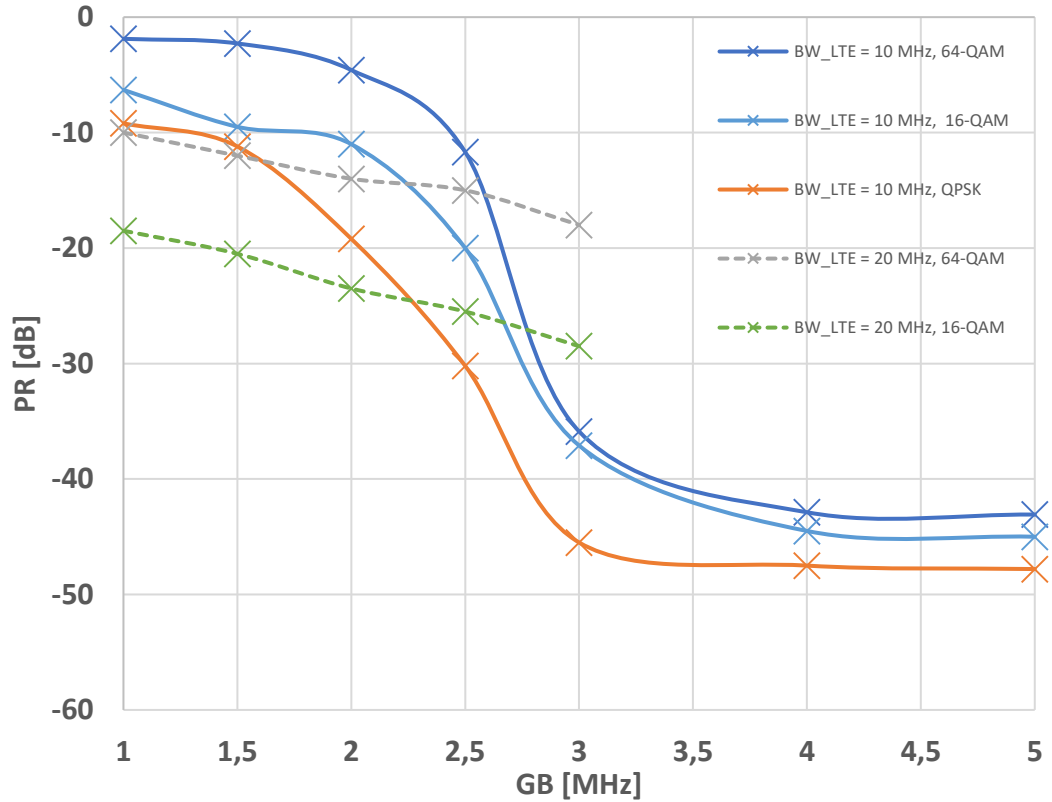
V tejto podkapitole sú prezentované výsledky z merania koexistencie medzi systémami LTE a LoRa pre konštantnú hodnotu parametra $SF_{LoRa} = 10$. Skúmaná je závislosť odolnosti systému LTE na rušenie systémom LoRa pre štyri rôzne hodnoty BW_{LTE} (1,4 MHz; 5 MHz; 10 MHz; 20 MHz) a dve rôzne hodnoty BW_{LoRa} (500 kHz; 125 kHz). Výsledky sú prezentované pri použití modulácií 64-QAM, 16-QAM a QPSK. Formát zobrazenia nameraných výsledkov je totožný ako v predchádzajúcej podkapitole. Na Obr. 7-5 je vidieť spektrum oboch signálov v čase, keď kvôli malej hodnote GB a vysokej hodnote výkonu signálu LoRa dochádza k čiastočnému prekrytiu oboch spektier a výraznému zhoršeniu príjmu signálu LTE.



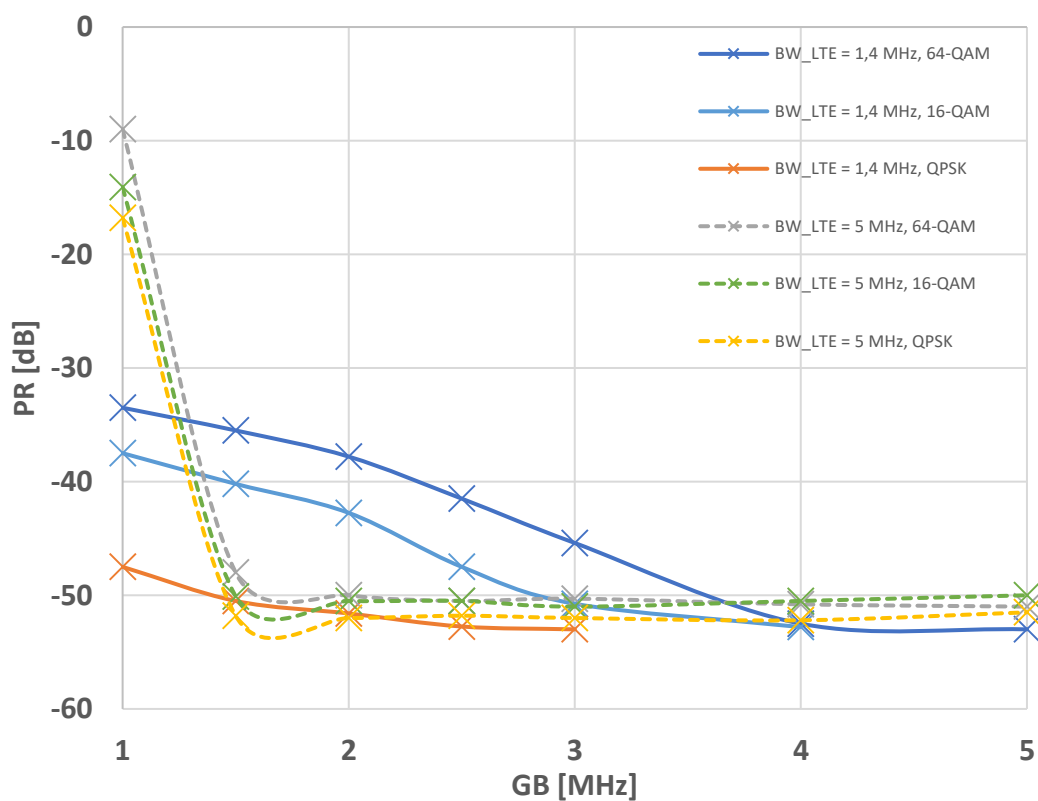
Obrázok 7-5: Spektrum signálov LTE a LoRa pre koexistenčný scenár s použitím $BW_{LTE} = 10$ MHz, $BW_{LoRa} = 125$ kHz a $SF_{LoRa} = 10$



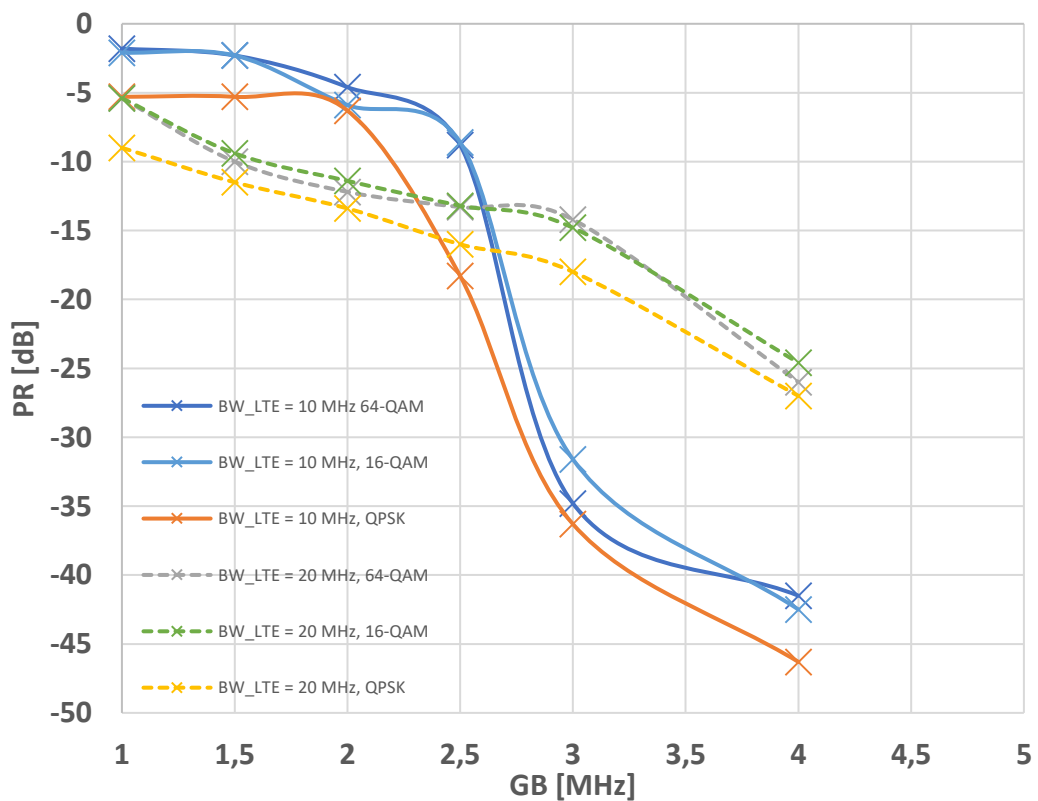
Obrázok 7-6: Závislosť PR na GB pre $BW_{LTE} = 1,4$ a 5 MHz, $SF_{LoRa} = 10$, $BW_{LoRa} = 500$ kHz



Obrázok 7-7: Závislosť PR na GB pre $BW_{LTE} = 10$ a 20 MHz, $SF_{LoRa} = 10$, $BW_{LoRa} = 500$ kHz



Obrázok 7-8: Závislosť PR na GB pre $BW_{LTE} = 1,4$ a 5 MHz, $SF_{LoRa} = 10$, $BW_{LoRa} = 125$ kHz



Obrázok 7-9: Závislosť PR na GB pre $BW_{LTE} = 10$ a 20 MHz, $SF_{LoRa} = 10$, $BW_{LoRa} = 125$ kHz

Obr. 7-6 zobrazuje závislosť parametru PR na GB pre hodnoty $BW_{LTE} = 1,4$ MHz a 5 MHz s nastavenou šírkou pásma $BW_{LoRa} = 500$ kHz. Odolnosť voči rušiacemu signálu sa u $BW_{LTE} = 1,4$ MHz so zvyšujúcou hodnotou GB postupne zvyšuje a hodnoty PR klesajú. Zväčšovaním hodnoty GB k výpadku príjmu signálu LTE postupne prestane dochádzať pre GB = 3 MHz (QPSK) a 4 MHz (16-QAM). Ochranný pomer PR dosahuje limitných hodnôt v blízkom okolí -50 dB. Predstavuje to zmenu oproti priebehom s hodnotou $SF_{LoRa} = 12$. Nastavením BW_{LTE} na 5 MHz sa opäť prejaví kritický scenár pri hodnote GB = 1 MHz. Signál LTE je málo odolný voči rušeniu a hodnota PR predstavuje len -9 dB; -14,5 dB; -16,8 dB (64-QAM; 16-QAM; QPSK). Posunom GB na 2 MHz sa odolnosť výrazne zvýši, čo je charakterizované zmenou hodnoty PR o približne +40 dB. Ďalším následným zvýšením GB nad 2 MHz k výpadku príjmu LTE nedochádza a hodnota PR dosahuje najnižších možných hodnôt v okolí -50 dB.

Obr. 7-7 ukazuje na priebeh závislosti PR na GB pri zmene BW_{LTE} na 10 MHz a 20 MHz. Pre $BW_{LTE} = 10$ MHz je možné pozorovať podobný priebeh ako na obrázku 7-3. Pozorovateľná zmena nastáva pri $BW_{LTE} = 20$ MHz. Rozdiel v použitej modulácii vplýva výraznejšie na odolnosť signálu LTE. Nastavením na moduláciu 64-QAM sa zvyšovaním GB lineárne znižuje hodnota PR, čo odpovedá postupným zvyšovaním hodnoty výkonu LoRa pri ktorej je ešte zaručený nerušený príjem signálu LTE. Kritický prestáva byť scenár u hodnôt GB = 3 MHz a viac. Pri jeho prekročení k výpadku signálu LTE následným zvyšovaním výkonu signálu LoRa nedochádza. Zmenou modulácie na 16-QAM je pozorovaný podobný priebeh, zatiaľ čo použitím QPSK sa kritická hranica hodnoty GB posunie na 1 MHz.

Na obr. 7-8 je zobrazený priebeh závislosti PR na GB pri zmene BW_{LoRa} z 500 kHz na 125 kHz v porovnaní s obrázkom 7-6. Ostatné parametre signálu ostávajú zmenené. Pre hodnoty s $BW_{LTE} = 1,4$ MHz nedochádza k výrazným zmenám a celkový priebeh je takmer totožný ako v prípade s nižšou hodnotou BW_{LoRa} . Zmenou hodnoty BW_{LTE} na 5 MHz je pozorovaný takmer nezmenený priebeh závislosti PR na GB v porovnaní s predchádzajúcim prípadom.

Závislosť PR na GB pre $BW_{LTE} = 10$ MHz a 20 MHz je zobrazená na obr. 7-9. Použitím hodnoty $BW_{LTE} = 20$ MHz sa dosiahne takmer lineárneho poklesu hodnoty PR so zvyšujúcou sa hodnotou GB. Signál s moduláciou QPSK je odolnejší na zvyšujúci sa výkon signálu LoRa než v prípade 16-QAM či 64-QAM. U všetkých modulácií dochádza pri zvýšení GB nad 4 MHz k stavu, že uvažovaný výkon rušiaceho signálu nie je dostačujúci k spôsobeniu straty synchronizácie a príjmu rušeného signálu LTE. S nastavenou hodnotou $BW_{LTE} = 10$ MHz sa PR takmer nemení do veľkosti GB = 2 MHz. Následným zvýšením ochranného pásma GB na 3 MHz je pre zachovanie kvality prijímaného signálu možné zvýšiť výkon LoRa o hodnotu takmer 30 dB. V tomto prípade je možné hovoriť o kritickom nastavení parametrov podieľajúcich sa na možnej koexistencii signálu LTE a LoRa. Pri väčšie hodnoty GB > 3 MHz sa rušený signál javí ako odolnejší voči rušeniu signálom LoRa než prípad s $BW_{LTE} = 20$ MHz.

SF _{LoRa} = 10					
BW _{LoRa} = 500 kHz			BW _{LoRa} = 125 kHz		
BW _{LTE} [MHz]	Minimálna hodnota PR [dB]		BW _{LTE} [MHz]	Minimálna hodnota PR [dB]	
	GB = 1 MHz	GB = 5 MHz		GB = 1 MHz	GB = 5 MHz
1,4	-47,5	-53	1,4	-50,7	-52,9
5	-9,2	-47,8	5	-5,3	-46,6
10	-16,8	-50,1	10	-14,5	-50
20	-18,5	NA	20	-9	NA

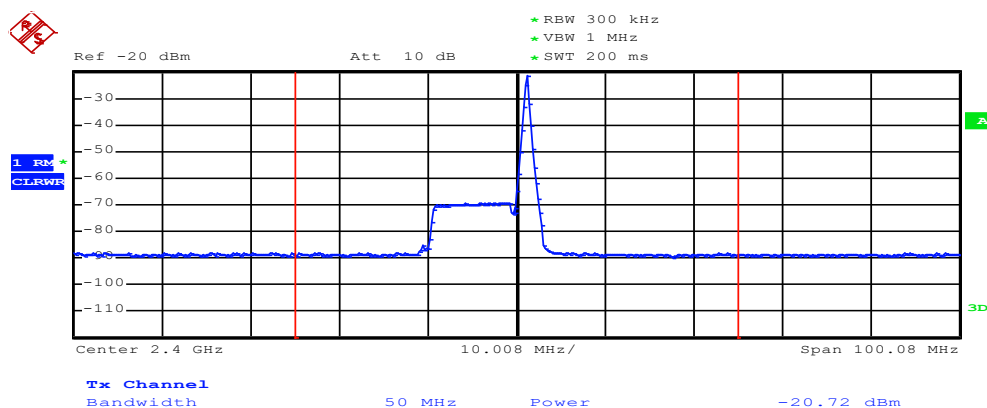
Tabuľka 7: Minimálne hodnoty PR pre koexistenčný scenár za použitia SF_{LoRa} = 10

Tabuľka 7 zobrazuje minimálne namerané hodnoty PR pre oba pozorované signály o vybraných parametroch. S nastavenou hodnotou SF_{LoRa} = 10 dosahuje najväčšej odolnosti úzkopásmový LTE signál o BW_{LTE} = 1,4 MHz, čo nepredstavuje zmenu oproti predošlému prípadom. Postupné zvyšovanie GB má najvýraznejší vplyv na príjem signálu o BW_{LTE} = 5 MHz, čo len potvrdzuje veľmi výrazný vplyv hodnoty tohto parametru na kvalitu príjmu LTE. Bez ohľadu na veľkosť BW_{LTE} či BW_{LoRa}, dosahujú hodnoty PR pre GB = 5 MHz limitných veľkostí okolo -50 dB. Opäť je možné podčiarknuť, že s dostatočnou veľkosťou GB parametre ako šírka pásma jedného či druhého signálu nemajú dominantný vplyv na možnú koexistenciu oboch signálov v ISM pásme 2,4 GHz.

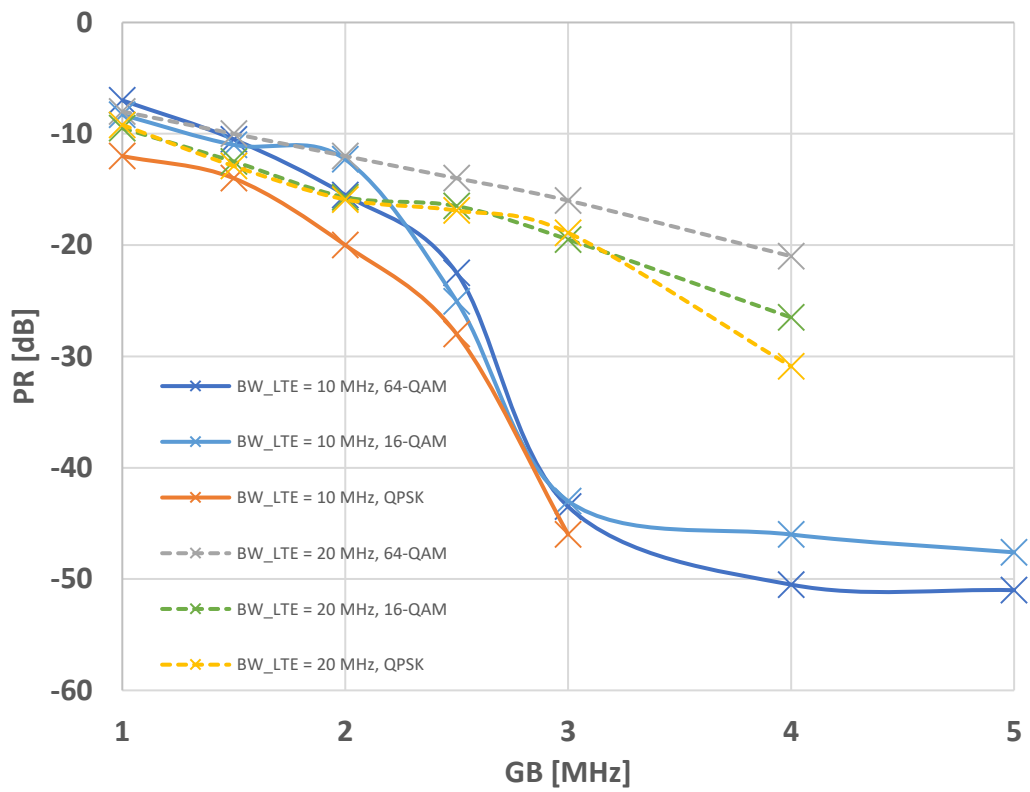
7.1.3 Koexistenčný scenár LTE a LoRa pri použití

SF_{LoRa} = 12

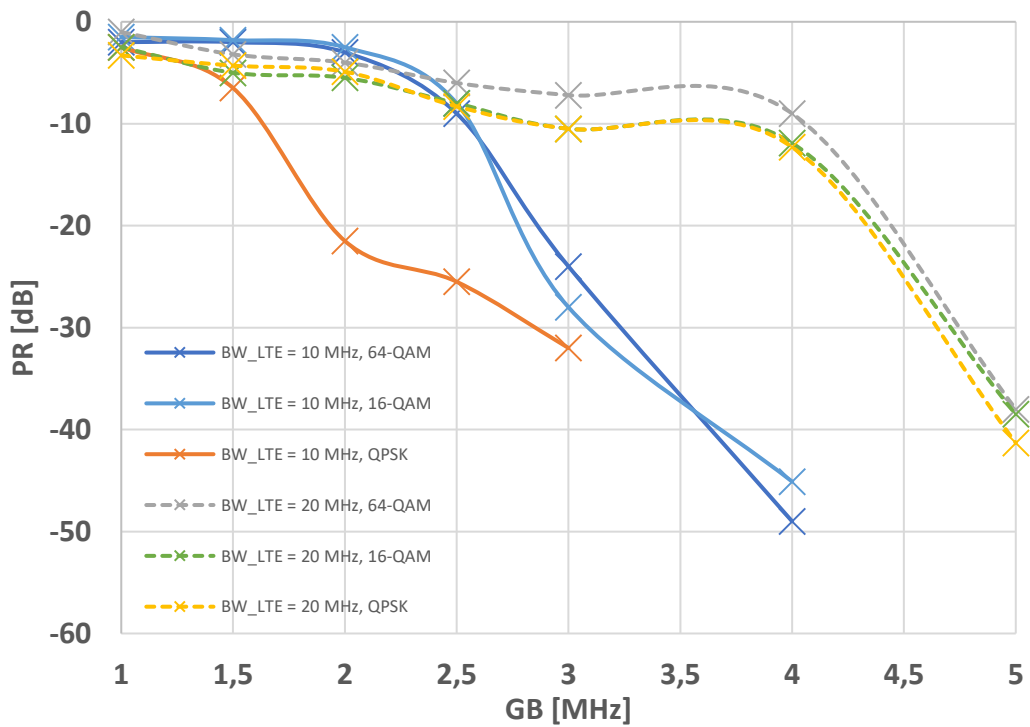
V tejto podkapitole sú prezentované výsledky z meraní koexistencie medzi systémami LTE a LoRa pri konštantnej hodnote parametra SF_{LoRa} = 12. Skúmaná je závislosť odolnosti systému LTE na rušenie systémom LoRa pre štyri rôzne hodnoty BW_{LTE} (1,4 MHz; 5 MHz; 10 MHz; 20 MHz) a dve rôzne hodnoty BW_{LoRa} (500 kHz; 125 kHz). Výsledky sú prezentované pri použití modulácií 64-QAM, 16-QAM a QPSK. Formát zobrazenia nameraných výsledkov je totožný ako v predchádzajúcich podkapitolách. Stav, kedy dochádza k výpadku LTE signálu je zobrazený na Obr. 7-10.



Obrázok 7-10: Spektrum signálov LTE a LoRa pre koexistenčný scenár s použitím BW_{LTE} = 10 MHz, BW_{LoRa} = 125 kHz a SF_{LoRa} = 12



Obrázok 7-11: Závislosť PR na GB pre $BW_{LTE} = 10$ a 20 MHz, $SF_{LoRa} = 12$, $BW_{LoRa} = 500$ kHz



Obrázok 7-12: Závislosť PR na GB pre $BW_{LTE} = 10$ a 20 MHz, $SF_{LoRa} = 12$, $BW_{LoRa} = 125$ kHz

Výraznú závislosť hodnoty PR na GB je možné sledovať pre koexistenčný scenár s veľkosťou $BW_{LTE} = 5$ MHz a uvažovaním $BW_{LoRa} = 500$ kHz. Hodnoty PR dosiahli pre $GB = 1$ MHz výsledkov -17 dB; $-25,5$ dB a $-30,5$ dB (64-QAM; 16-QAM; QPSK). Zvýšením GB k výpadku došlo už len pri najmenej odolnej viacstavovej modulácii 64-QAM s hodnotou PR = $-53,5$ dB. Zmenou BW_{LoRa} na 125 kHz sa kritický stav opäť prejaví pre hodnotu $GB = 1$ MHz. K strate príjmu rušeného LTE signálu došlo celkovo pri menších hodnotách výkonu LoRa. Kvôli malému počtu hodnôt PR nie je vyššie spomínaná závislosť zobrazená v grafickej podobe.

Obr. 7-11 zobrazuje závislosť parametru PR na GB pri nastavení BW_{LTE} na 10 MHz a 20 MHz spolu s $BW_{LoRa} = 500$ kHz. Vplyv zmeny BW_{LTE} je pozorovateľný najmä pri vyšších hodnotách GB. Zmena GB z 2 MHz na 3 MHz sa pre $BW_{LTE} = 10$ MHz javí ako kritická a je sprevádzaná zvýšením odolnosti na rušiaci signál. Hodnota PR zaznamenala pokles o $+26$ dB, $+30$ dB a $+28$ dB (64-QAM; 16-QAM; QPSK). Celkový priebeh závislosti má charakter ako v prípade $SF_{LoRa} = 7$. Pre moduláciu 64-QAM sa s hodnotami $GB > 4$ MHz dosiahlo limitnej veľkosti PR = -52 dB. Priebeh pre širokopásmový signál $BW_{LTE} = 20$ MHz má relatívne lineárny charakter pre hodnoty GB do 4 MHz s miernou fluktuáciou za použitia modulácie QPSK. Celkový trend poklesu nie je výrazný, pričom zmena GB z 1 MHz na 4 MHz odpovedá zníženiu PR len o $+13$ dB; $+17$ dB a $+21$ dB. Za kritický scenár je možné považovať hodnoty $GB > 4$ MHz, pri ktorých k výpadku signálu LTE postupným zvyšovaním výkonu LoRa nedochádza.

Obr. 7-12 zobrazuje závislosť parametru PR na GB pri nastavení BW_{LTE} na 10 MHz a 20 MHz spolu so znížením BW_{LoRa} na 125 kHz. Rozdielna hodnota BW_{LTE} nemá výrazný vplyv na hodnotu PR pri uvažovaní ochranného pásma GB do 1,5 MHz. Následným zvýšením hodnoty $GB > 1,5$ MHz dochádza k poklesu PR pre $BW_{LTE} = 10$ MHz s moduláciou QPSK. Modulácie 16-QAM a 64-QAM nasledujú pre hodnotu $GB > 2$ MHz. Zvýšenie odolnosti má následne značne lineárny charakter. Potvrďuje sa tým fakt, že viacstavové modulácie ako 64-QAM síce poskytujú väčšiu spektrálnu účinnosť, avšak navzdory zvýšeniu chybovosti. Odlišný priebeh vykazuje $BW_{LTE} = 20$ MHz. K výraznému poklesu PR o hodnotu $+30$ dB dochádza až po prekročení $GB = 4$ MHz. Dovtedy dochádza k poklesu PR o jednotky dB. Pri $GB = 5$ MHz je zvýšenie odolnosti sprevádzané poklesom PR o $+29$ dB; $+26$ dB a $+29$ dB (64-QAM; 16-QAM; QPSK).

Z Obrázkov 7-11 a 7-12 je možné pozorovať, že zmenou BW_{LTE} z 10 MHz na 20 MHz sa dosiahne zníženia odolnosti LTE signálu na rušenie LoRa nezávisle na použitej BW_{LoRa} . Platí to pre hodnoty $GB > 2,5$ MHz.

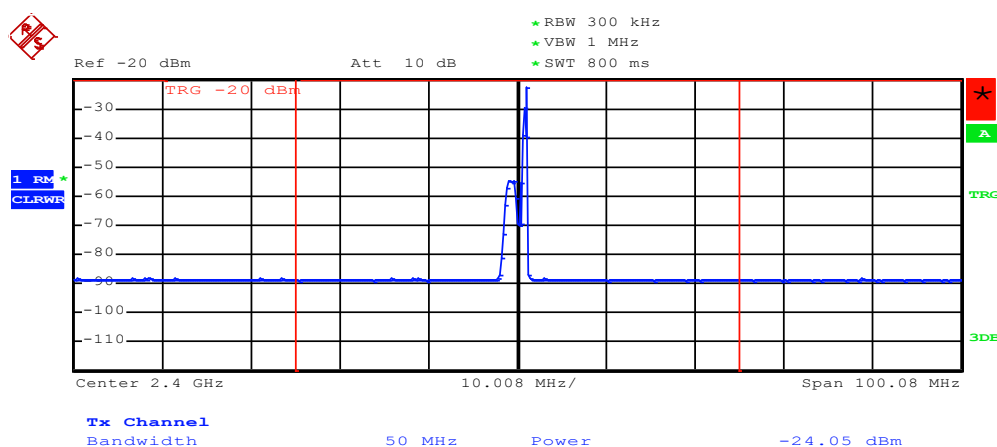
SF _{LoRa} = 12					
BW _{LoRa} = 500 kHz			BW _{LoRa} = 125 kHz		
BW _{LTE} [MHz]	Minimálna hodnota PR [dB]		BW _{LTE} [MHz]	Minimálna hodnota PR [dB]	
	GB = 1 MHz	GB = 5 MHz		GB = 1 MHz	GB = 5 MHz
1,4	NA	NA	1,4	NA	NA
5	-30,5	NA	5	-12	NA
10	-12	-51	10	-2,5	-46,7
20	-9,5	NA	20	-3,3	-41,3

Tabuľka 8: Minimálne hodnoty PR pre koexistenčný scenár za použitia SF_{LoRa} = 12

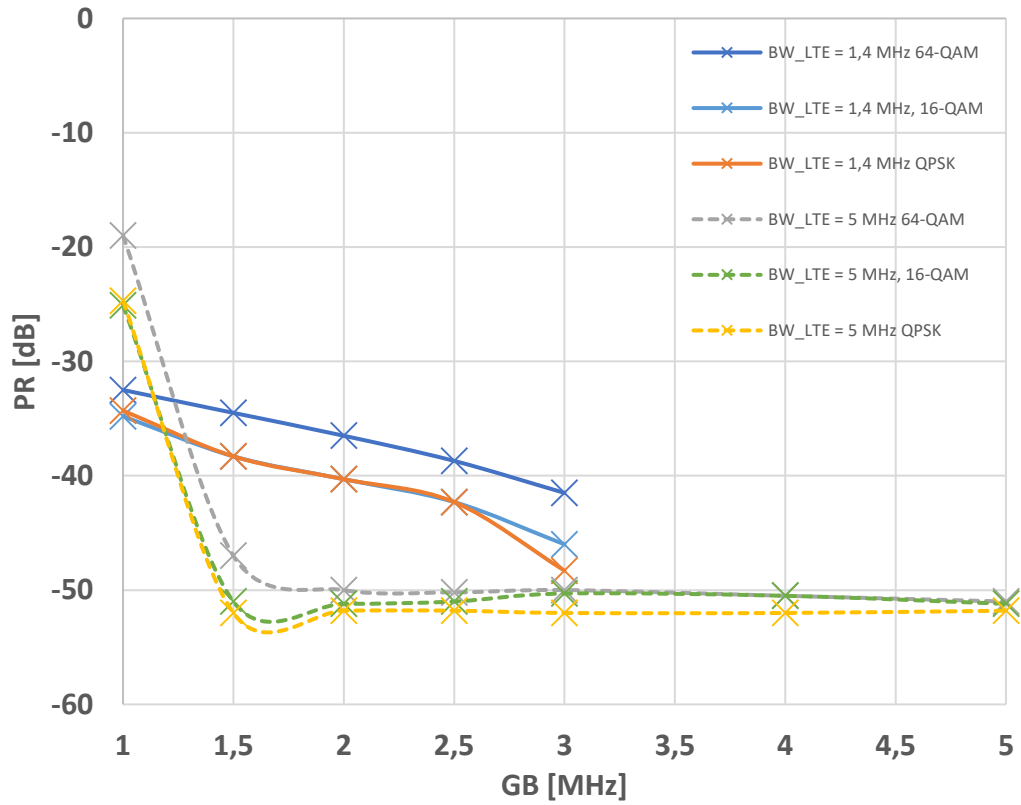
Tabuľka 8 zobrazuje minimálne namerané hodnoty PR pre oba signály o vybraných parametroch. Viditeľná je najväčšia odolnosť voči rušeniu na strane úzkopásmového LTE signálu o BW_{LTE} = 1,4 MHz. Postupným zvyšovaním BW_{LTE} hodnoty PR stúpajú, čo odpovedá postupným poklesom odolnosti voči rušiacemu signálu. Celkovo je viditeľný značný účinok veľkosti ochranného pásma GB. Dostatočným nastavením GB je možné do veľkej miery potlačiť vplyv parametrov BW_{LTE} a BW_{LoRa}, ktorý je popri hodnote výkonu LoRa druhým faktorom výrazne ovplyvňujúci koexistenciu oboch systémov.

7.1.4 Koexistenčný scenár LTE a LoRa pri použití GFSK_{LoRa}

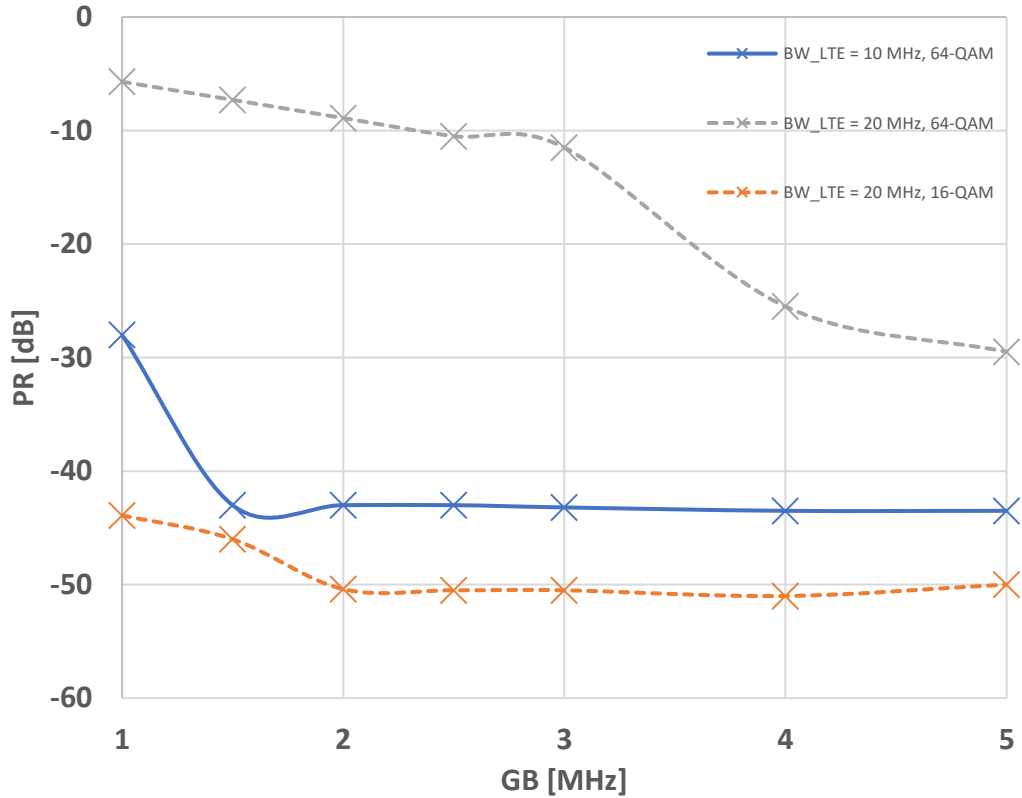
V tejto podkapitole je zobrazená závislosť PR na GB pre špeciálny prípad signálu LoRa s moduláciou GFSK_{LoRa} o dátovej rýchlosti 50 kbps. Nastavené hodnoty BW_{LTE} a modulácie LTE signálu sú totožné ako v predchádzajúcich podkapitolách. Použitím modulácie GFSK_{LoRa} nie je možná zmena parametru BW_{LoRa}. Meranie sa preto zaoberá len závislosťou PR na GB z pohľadu zmeny hodnoty BW_{LTE}. Obr. 7-13 zachytáva spektrum oboch signálov v čase, kedy pre nízku hodnotu GB (1 MHz) a vysokú hodnotu výkonu LoRa dochádza k výpadku príjmu signálu LTE.



Obrázok 7-13: Spektrum signálov LTE a LoRa pre koexistenčný scenár s použitím BW_{LTE} = 1,4 MHz a GFSK_{LoRa}



Obrázok 7-14: Závislosť PR na GB pre $BW_{LTE} = 1,4$ a 5 MHz a $GFSK_{LoRa}$



Obrázok 7-15: Závislosť PR na GB pre $BW_{LTE} = 10$ a 20 MHz, $GFSK_{LoRa}$

Odolnosť signálu LTE voči rušeniu signálom LoRa s moduláciou GFSK_{LoRa} sa výrazne mení v závislosti na použitej BW_{LTE} . Nastavením BW_{LTE} na 1,4 MHz je pozorovaný lineárny pokles hodnoty PR pri zvyšovaní GB. Kritický scenár nastáva pri hodnote GB = 3 MHz. K zamedzeniu výpadku rušeného signálu je potrebná hodnota PR väčšia než -41,5 dB; -46 dB a -48,3 dB (64-QAM; 16-QAM a QPSK). Zvýšením hodnoty GB nad 3 MHz je rušený signál odolný voči signálu LoRa v celom rozsahu uvažovaných PR hodnôt. Zmenou nastavenia BW_{LTE} na 5 MHz sa kritický scenár prejaví pri zadaní GB = 1 MHz (QPSK) a 1,5 MHz (64-QAM). Jedná sa o podobný prípad ako na obrázku 7-6 či 7-8, kedy pre väčšie hodnoty GB je veľkosť PR nastavená na limitnú hodnotu v okolí -50 dB. Vyššie popísaný scenár je zobrazený na obr. 7-14.

Diametrálne odlišný priebeh závislosti PR na GB je pozorovaný pri zmene BW_{LTE} na 10 MHz a 20 MHz, zobrazený na obr. 7-15. Chýbajúce priebehy pre použitú moduláciu QPSK odkazujú na vysokú mieru odolnosti voči rušeniu. S nastaveným parametrom $BW_{LTE} = 10$ MHz sa pri použití menej odolnej modulácie 64-QAM pozoruje značná zmena v hodnotách PR pri zmene GB z 1 MHz na 1,5 MHz. Konkrétne sa jedná o pokles z hodnoty -28 dB na -43 dB. S ďalším zvyšovaním GB sa zmena PR neprejavuje. Nastavením BW_{LTE} na 20 MHz sa pri hodnote GB = 1 MHz dosiahne výsledku PR = -5,7 dB (64-QAM) a -43,9 dB (16-QAM). Pozorovaný je najväčší rozdiel v hodnotách PR pri zmene modulácie. Pri nastavenej modulácii 64-QAM sa zvyšovaním GB hodnota PR mierne znižuje a pre maximálnu hodnotu GB = 5 MHz dosahuje PR hodnoty -29,5 dB. Výberom modulácie 16-QAM je zmena hodnoty PR ovplyvnená celkovou vyššou odolnosťou voči rušeniu. Pre najnižšiu hodnotu GB = 1 MHz dosahuje PR hodnoty len -44 dB, ktorá následne pozvoľne poklesne na limitných -50 dB. Zmenou modulácie na QPSK sa ani v jednom prípade nepreukázal vplyv signálu LoRa na príjem signálu LTE. Pri uvažovaní modulácie 64-QAM, rušený signál s parametrom $BW_{LTE} = 20$ MHz dosahuje výrazne vyšších hodnôt PR oproti $BW_{LTE} = 10$ MHz, čo poukazuje na menšiu odolnosť voči zvyšujúcej sa hodnote výkonu signálu LoRa v konfigurácii s moduláciou GFSK.

Porovnaním nameraných hodnôt PR s hodnotami pri použití $SF_{LoRa} = 7$ a 12 je viditeľný značný rozdiel v použitej modulácii u signálu LTE. Zmena v použití 64-QAM či QPSK je výrazná pre všetky veľkosti BW_{LTE} okrem 1,4 MHz. S nastavenou hodnotou $BW_{LTE} = 10$ MHz je pozorovaná väčšia odolnosť voči rušeniu ako pri použití $SF_{LoRa} = 7$ či 12. Výberom širokopásmového LTE signálu o $BW_{LTE} = 20$ MHz je pozorovaná podobná závislosť PR na GB ako pri rušení signálom LoRa o $SF_{LoRa} = 7$ či 12.

8. ZÁVĚR

V práci boli popísané bezdrôtové komunikačné systémy LTE a LoRa z pohľadu ich architektúry, využitia vo frekvenčných pásmach a fyzickej vrstvy. Na základe teoretických poznatkov bolo definované spoločné frekvenčné pásmo, v ktorom tieto systémy môžu koexistovať.

Súčasťou práce bol návrh meracieho pracoviska v priestoroch mobilných a bezdrôtových komunikácií na UREL. Navrhnuté pracovisko podporuje ručné a takisto automatizované meranie koexistencie skúmaných systémov. Meracie prístroje komunikujú s PC prostredníctvom siete LAN a sú ovládané pomocou programu MATLAB R2018a. Vytvorené bolo grafické užívateľské rozhranie v prostredí App Designer k jednoduchšiemu meraniu koexistenčných scenárov.

Vybraná bola vhodná metodika pre meranie a vyhodnotenie koexistencie uvažovaných systémov. Za rušený signál bol vždy považovaný LTE o nemennej hodnote výkonu. V závislosti na stanovenom ochrannom pásme GB bol meraný výkonový pomer oboch signálov, pri ktorom bola ešte dodržaná synchronizácia a funkčnosť signálu LTE.

Merania prebehli pre vybrané hodnoty BW_{LTE} , všetky hodnoty parametru SF_{LoRa} doplnené použitím modulácie $GFSK_{LoRa}$ a hraničné hodnoty BW_{LoRa} . Z výsledkov je viditeľný vplyv vybraných parametrov oboch signálov, výkonu rušiacoho signálu a taktiež veľkosť ochranného pásma GB na správny príjem LTE signálu. Popis kritických a nekritických prípadov jednotlivých koexistenčných scenárov je súčasťou analýzy nameraných výsledkov. Najodolnejšie sa javí signál LTE s hodnotou $BW_{LTE} = 5$ MHz pre široké spektrum nastavených parametrov rušiacoho signálu LoRa. Zvýšenie hodnoty BW_{LoRa} je všeobecne sprevádzané poklesom odolnosti signálu LTE.

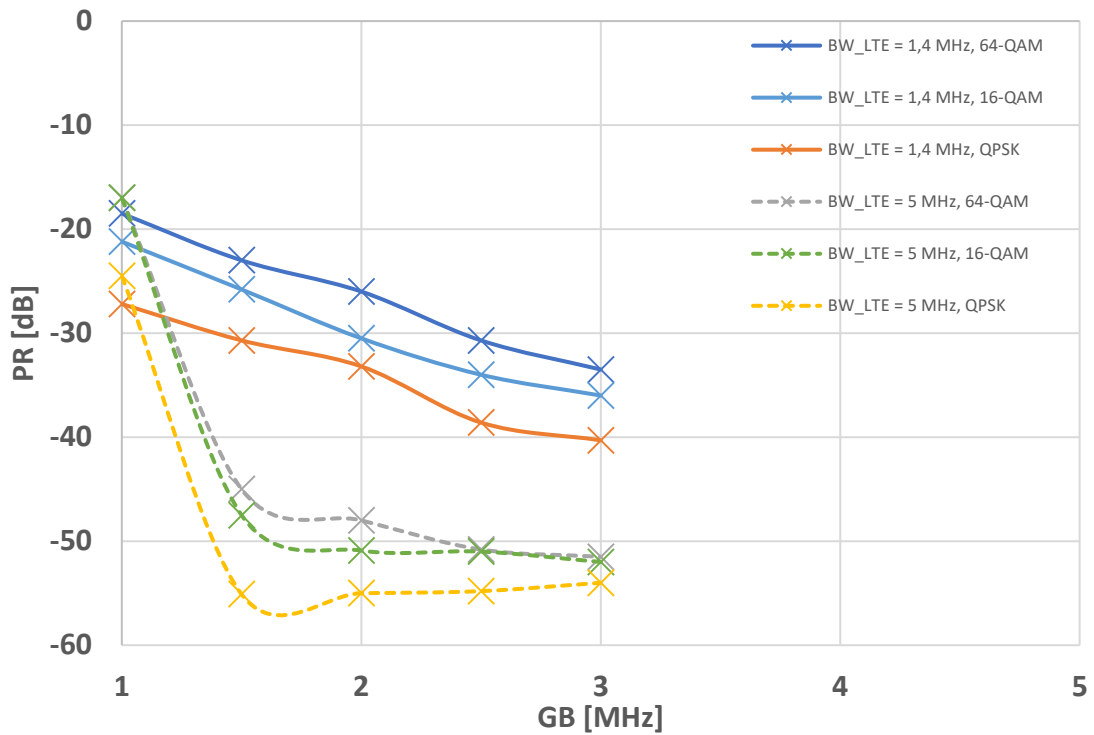
Časť práce bola prezentovaná na súťaži EEICT 2019, viz. [25].

Literatura

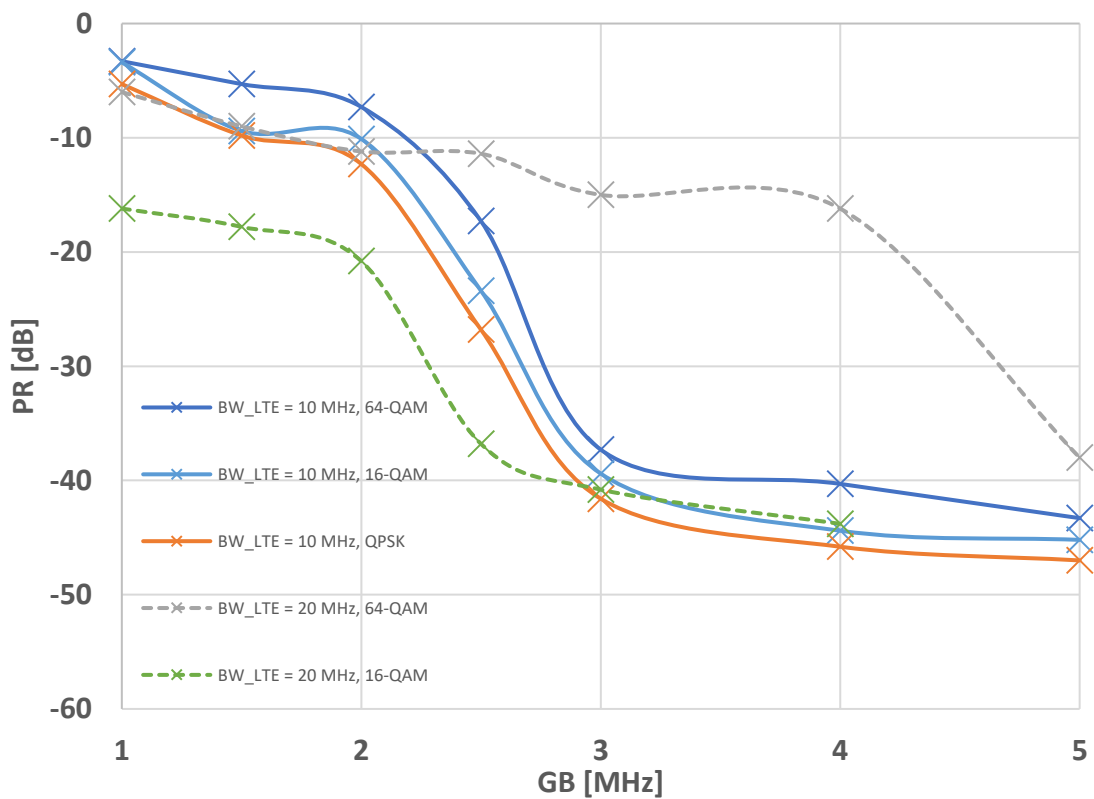
- [1] LoRaWAN™ 1.1 Specification [online]. 2017 [cit. 2018-11-15]. Dostupné z <https://lora-alliance.org/resource-hub/lorawantm-specification-v11>
- [2] SX1280/1281 Long Range, Long Power 2,4 GHz Transceiver with Ranging Capability Datasheet [online]. 2018-5, [cit. 2018-12-1]. Dostupné z <https://www.semtech.com/products/wireless-rf/24-ghz-transceivers/sx1280>
- [3] Augustin, Aloÿs & Yi, Jiazi & Clausen, Thomas Heide & Townsley, William. (2016). A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things. *Sensors*. 16. 1466. 10.3390/s16091466.
- [4] Semtech: What is LoRa [online], [cit. 2018-12-1]. Dostupné z <https://www.semtech.com/lora/what-is-lora>
- [5] Introduction to Chirp Spread Spectrum (CSS) Technology [online]. 2003-11 [cit. 2018-12-1]. Dostupné z <http://ieee802.org>
- [6] LoRa™ Modulation Basics [online]. 2015-5 [cit. 2018-12-1]. Dostupné z <https://www.semtech.com/uploads/documents/an1200.22.pdf>
- [7] Data Rate and Spreading Factor [online]. 2018 [cit. 2019-5-1]. Dostupné z https://docs.exploratory.engineering/lora/dr_sf/
- [8] ETSI, ERM TG28. "Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Short Range Devices (SRD); Radio equipment to be used in the 25 MHz to 1 000 MHz frequency range with power levels ranging up to 500 mW." European harmonized standard EN 300.220: v2
- [9] PROKOPEC, Jan. *Systémy mobilních komunikací: sítě pro mobilní datové služby*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2012. ISBN 978-80-214-4498-0.
- [10] R. Bachl, P. Gunreben, S. Das, and S. Tatesh, "The Long Term Evolution Towards a New 3GPP Air Interface Standard," *Bell Labs Technical Journal*, vol. 11, no. 4, pp. 25–51, 2007.
- [11] Alcatel-Lucent. The LTE Network architecture: a comprehensive tutorial. A technical overview. Strategic white paper [online]. 2009 [cit. 2018-12-1]. Dostupné z http://www.cse.unt.edu/~rdantu/FALL_2013_WIRELESS_NETWORKS/LTE_Alcatel_White_Paper.pdf
- [12] The Evolved Packet Core [online]. 2018 [cit. 2018-12-1]. Dostupné z <http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/100-the-evolved-packet-core>
- [13] Packet Core inside of an EPS (Basic Architecture of the EPS) [online]. 2013-7-3 [cit. 2018-12-3]. Dostupné z <https://awanetwork.blogspot.com/2013/07/packet-core-inside-of-eps-basic.html>

- [14] Modulační techniky v moderních bezdrátových sítích [online]. 2010-2-8 [cit. 2018-12-2]. Dostupné z <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2010020004>
- [15] HANUS, S. *Nové technologie mobilních komunikací pro integrovanou výuku VUT a VŠB TUO: Systém LTE*. 1. Vydání V Brně: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2013. 100 s. ISBN 978-80-214-4824-7.
- [16] ETSI TS 136 101 V14.3.0 (2017-04) - LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception (3GPP TS 36.101 version 15.3.0 Release 15)
- [17] 3GPP TS 36.211 V13.2.0 (2016-06) - 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation (Release 13)
- [18] LTE Guard Band Calculation [online]. 2016-9-2 [cit. 2018-12-2]. Dostupné z <https://arimas.com/lte-guard-band-calculation>
- [19] PLAISNER, D. *LTE-Advanced/WLAN testbed*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 72 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Miloš, Ph.D.
- [20] D. Michael, McKinley Kate, A. Remley, Maciej Mylinski, J. Stevenson Kenney, Dominique Schreurs, Bart Nauwelaers, "EVM Calculation for Broadband Modulated Signals", *Technical Report*, 2005.
- [21] Fuentes, Manuel & Garcia-Pardo, Concepcion & Garro, Eduardo & Gomez-Barquero, David & Cardona, Narcís. (2014). Coexistence of digital terrestrial television and next generation cellular networks in the 700 MHz band. *IEEE Wireless Communications*. 21. 63-69. 10.1109/MWC.2014.7000973
- [22] Coexistence Digital TV And LTE: Application note [online], [cit. 2018-12-2]. Dostupné z https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_application/application_notes/1ma176/1MA176_3e_coexistence_digital_TV_and_LTE.pdf
- [23] Rohde & Schwarz FPS-K10Sx (LTE Downlink) User Manual [online]. 2017-10-10 [cit. 2019-5-1]. Dostupné z https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_manuals/gb_1/f/fps_1/FPS_K10x_LTE_DL_UserManual_en_07.pdf
- [24] Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Base Station (BS) conformance testing [online], [cit. 2019-5-1]. Dostupné z https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136100_136199/136141/14.03.00_60/ts_136141v140300p.pdf
- [25] POTOČŇAK, M., Coexistence between LTE and LoRa systems in the 2.4 GHz ISM band. In: *Proceedings of the 25th Conference STUDENT EEICT 2019*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2019, s. 270-272. ISBN 978-80-214-5735-5.

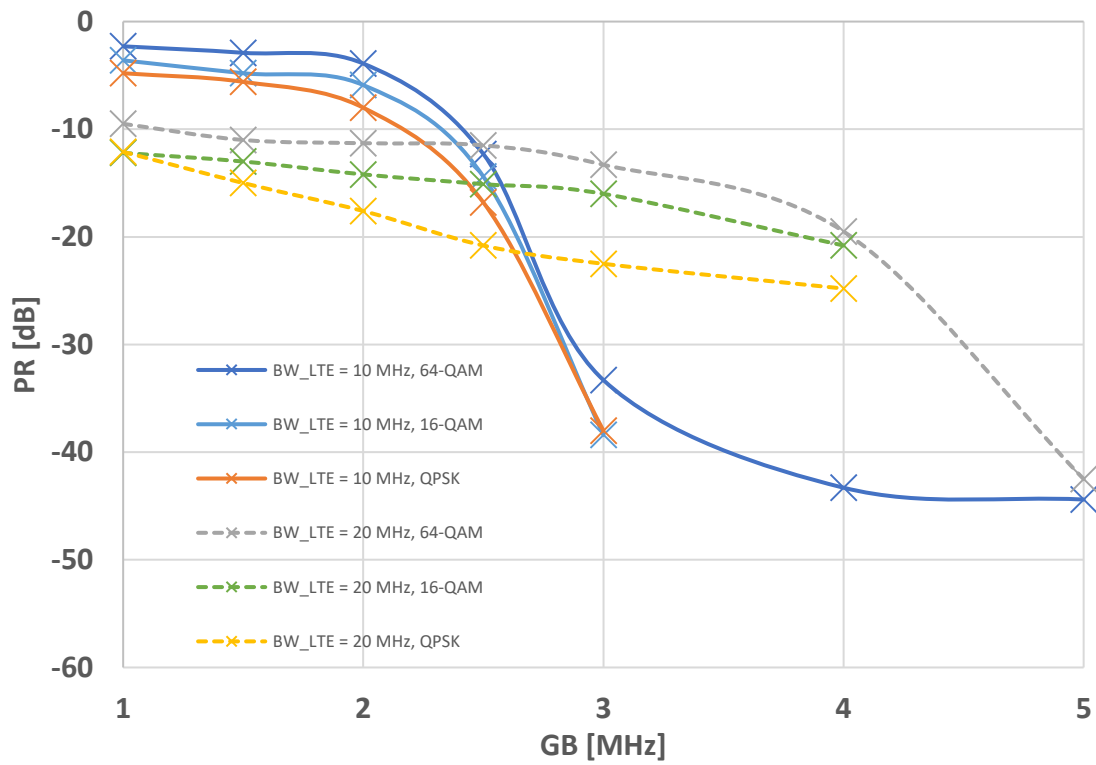
Příloha 1 - Zoznam nameraných grafov



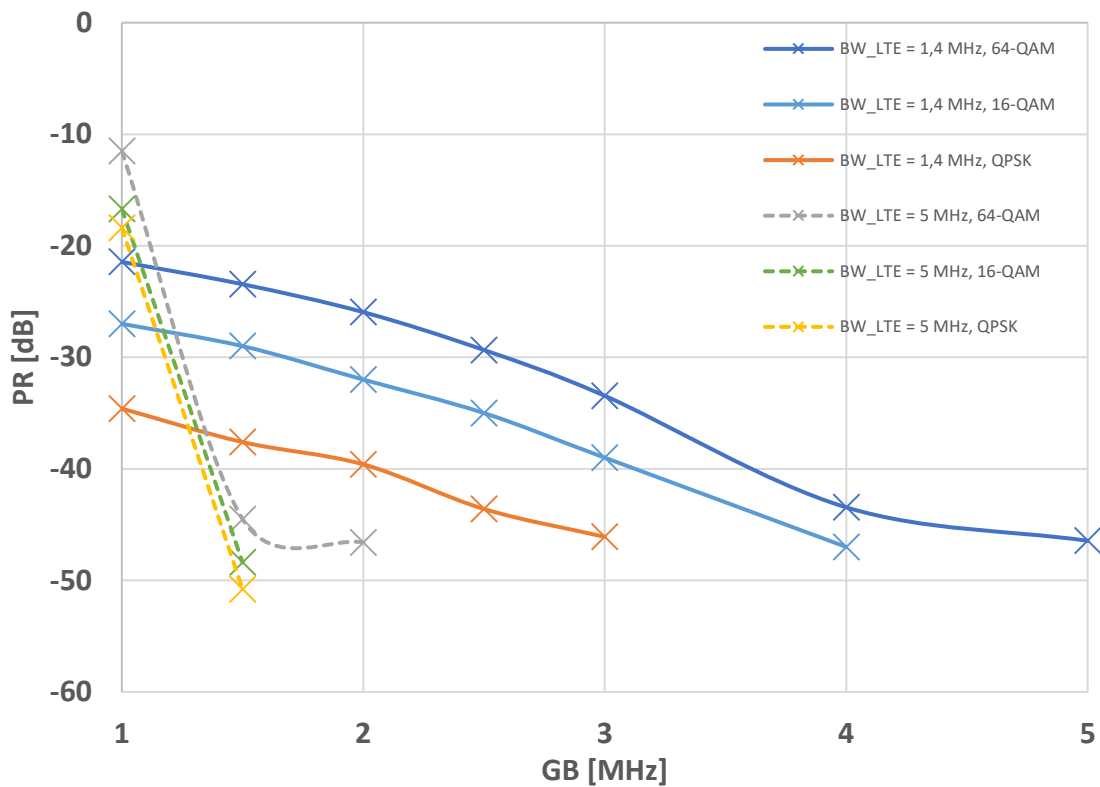
Obrázok P-1: Závislosť PR na GB pre $BW_{LTE} = 1,4$ a 5 MHz, $SF_{LoRa} = 8$, $BW_{LoRa} = 500$ kHz



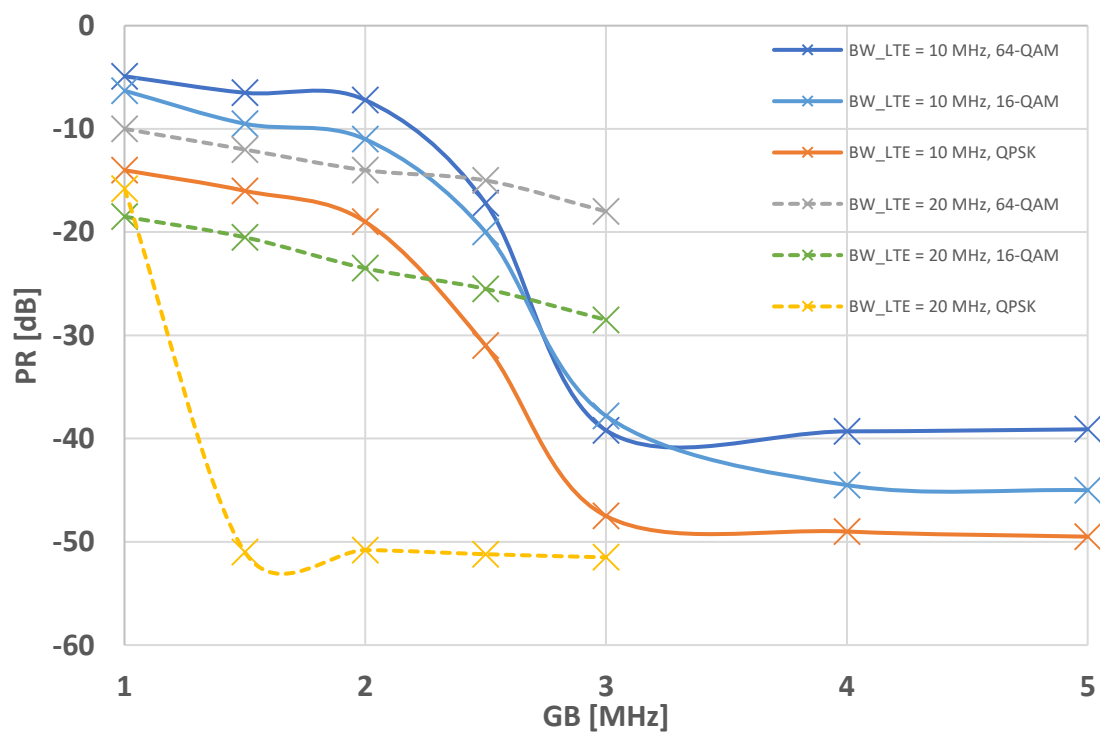
Obrázok P-2: Závislosť PR na GB pre $BW_{LTE} = 10$ a 20 MHz, $SF_{LoRa} = 8$, $BW_{LoRa} = 500$ kHz



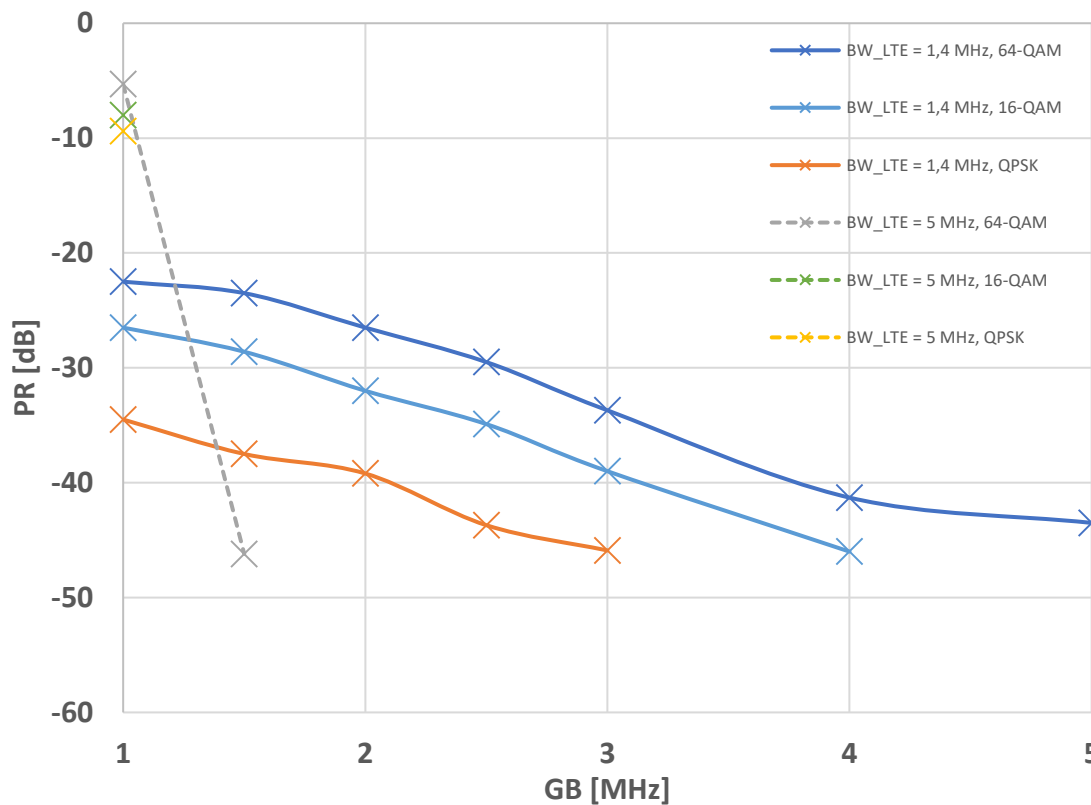
Obrázok P-3: Závislosť PR na GB pre $BW_{LTE} = 10$ a 20 MHz, $SF_{LoRa} = 8$, $BW_{LoRa} = 125$ kHz



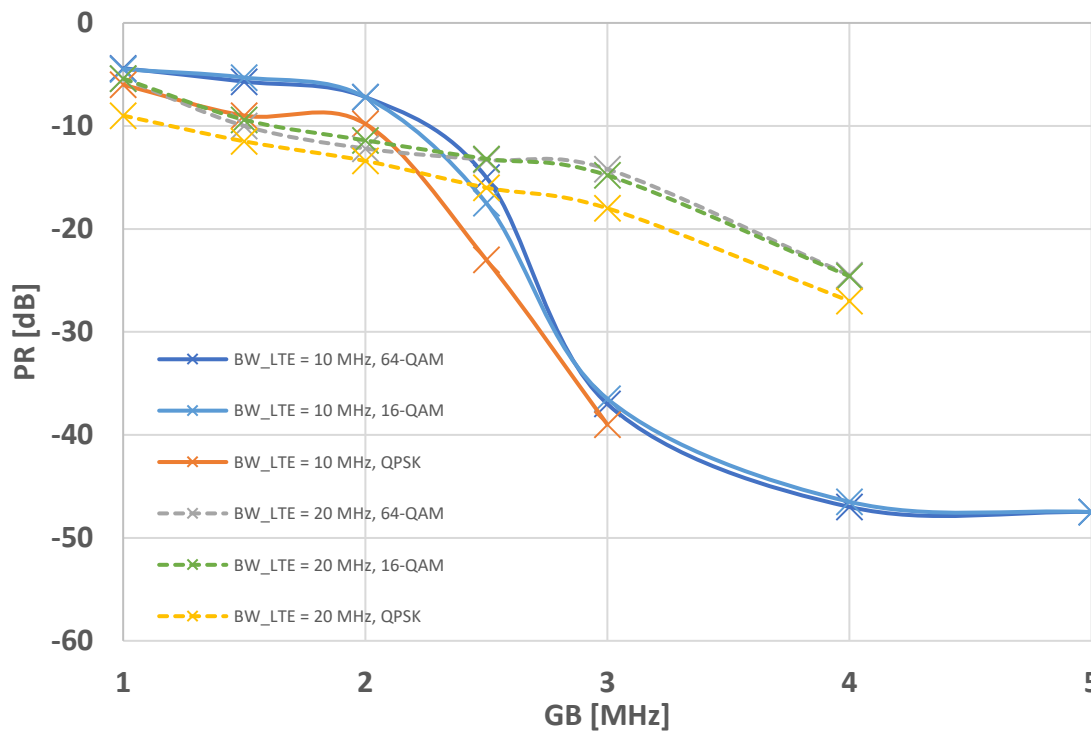
Obrázok P-4: Závislosť PR na GB pre $BW_{LTE} = 1,4$ a 5 MHz, $SF_{LoRa} = 9$, $BW_{LoRa} = 500$ kHz



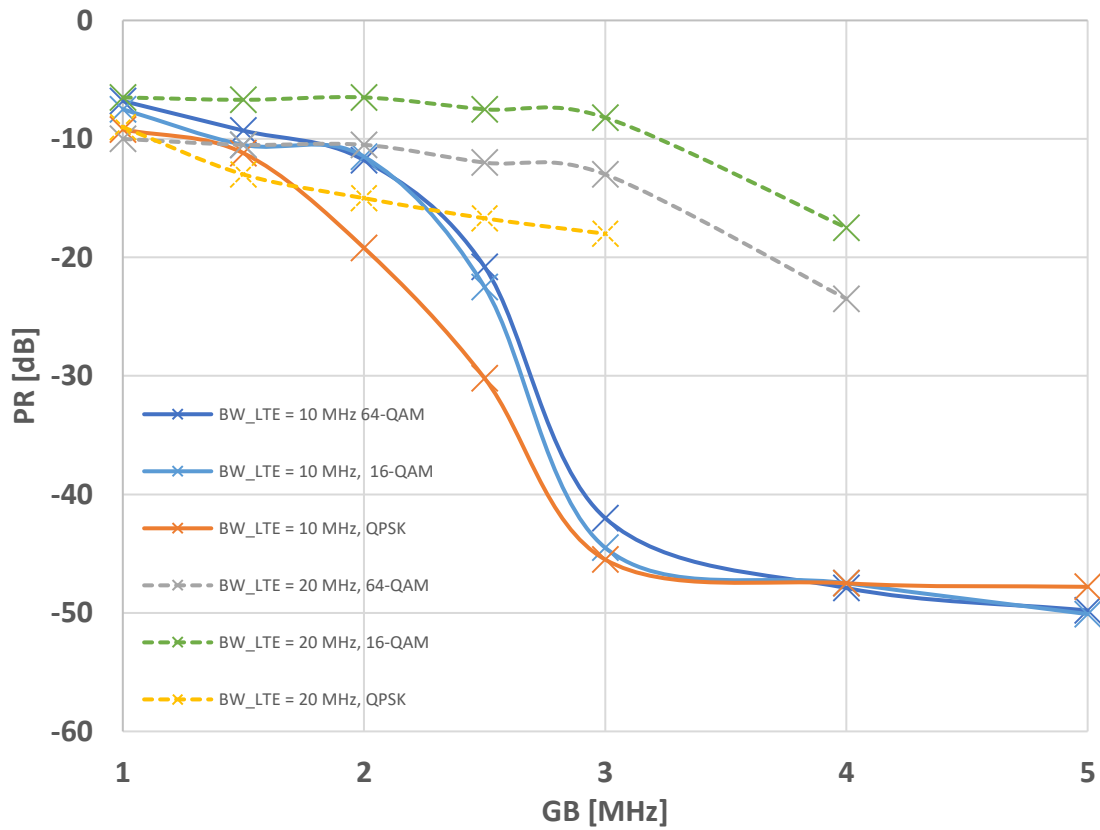
Obrázok P-5: Závislosť PR na GB pre $BW_{LTE} = 10$ a 20 MHz, $SF_{LoRa} = 9$, $BW_{LoRa} = 500$ kHz



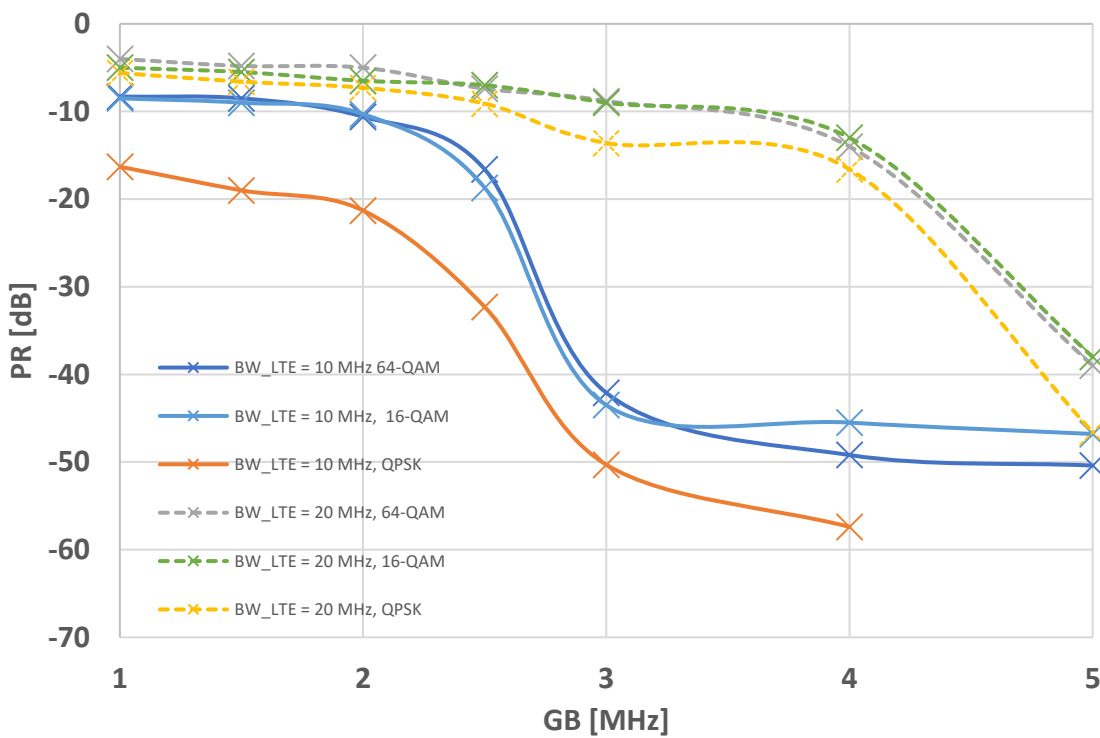
Obrázok P-6: Závislosť PR na GB pre $BW_{LTE} = 1,4$ a 5 MHz, $SF_{LoRa} = 9$, $BW_{LoRa} = 125$ kHz



Obrázok P-7: Závislosť PR na GB pre $BW_{LTE} = 10$ a 20 MHz, $SF_{LoRa} = 9$, $BW_{LoRa} = 125$ kHz



Obrázok P-8: Závislosť PR na GB pre $BW_{LTE} = 10$ a 20 MHz, $SF_{LoRa} = 11$, $BW_{LoRa} = 500$ kHz



Obrázok P-9: Závislosť PR na GB pre $BW_{LTE} = 10$ a 20 MHz, $SF_{LoRa} = 11$, $BW_{LoRa} = 125$ kHz