



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 BEZDRÁTOVÝCH KOMUNIKAČNÍCH SYSTÉMŮ A LTE V PÁSMU ISM

COEXISTENCE OF WIRELESS COMMUNICATION SYSTEMS AND LTE IN THE ISM BAND

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Michal Mikláš

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Ladislav Polák, Ph.D.

BRNO 2017

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Elektronika a sdělovací technika**

Ústav radioelektroniky

Student: Michal Mikláš

ID: 154807

Ročník: 3

Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Koexistence bezdrátových komunikačních systémů a LTE v pásmu ISM

POKyny PRO VYPRACOVÁNÍ:

V teoretické části práce detailně prostudujte vlastnosti bezdrátových komunikačních systémů (IEEE 802.11x), provozovaných v radiofrekvenčním pásmu ISM, a LTE pro mobilní bezdrátové komunikační služby. Definujte společná frekvenční pásma, ve kterých tyto standardy mohou koexistovat. Navrhnete měřicí pracoviště a vhodnou metodiku na měření koexistence mezi uvažovanými systémy.

V experimentální části práce provedte podrobné měření, analýzu a rozbor kritických a nekritických koexistenčních scénářů mezi bezdrátovými systémy IEEE 802.11x a LTE a vyhodnoťte vliv koexistence na kvalitu poskytovaných služeb. Navrhnete laboratorní úlohu pro měření a monitorování koexistence mezi systémy IEEE 802.11x a LTE. Připravte vzorové vypracování navržené úlohy.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] 3GPP TS 36.101 V8.8.0 (2009-12). 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception (Release 8), Tech. Specification 3GPP, 2009.

[2] F. M. Abinader, and et. al. Enabling the coexistence of LTE and Wi-Fi in unlicensed bands. IEEE Commun. Magazine, vol. 52, no. 11, pp. 54-61, Nov 2014.

Termín zadání: 6.2.2017

Termín odevzdání: 30.5.2017

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

Konzultant:

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

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zaměřuje na definování, popis a měření koexistenčních scénářů, které mohou vzniknout v bezlicenčním frekvenčním pásmu ISM mezi bezdrátovými systémy LTE a WLAN (technologie IEEE 802.11xx). Na základě společných radiofrekvenčních pásem (RF) těchto systémů jsou definované různé koexistenční scénáře. Je zde navrhnutá vhodná měřicí metodika a měřicí pracoviště pro měření koexistenčních scénářů mezi systémy LTE a WLAN. Po ověření funkčnosti navrženého měřicího pracoviště bylo provedeno rozsáhlé měření dříve definovaných koexistenčních scénářů. Získané výsledky jsou detailně vyhodnocené.

KLÍČOVÁ SLOVA

LTE, WLAN, Wi-Fi, pásmo ISM, koexistence bezdrátových systémů, RF měření, EVM, ochranné pásmo

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with a definition, description and measurement of coexistence scenarios which can occur between LTE and WLAN (technology IEEE 802.11xx) wireless communication systems in the ISM band. Based on the common radio frequency (RF) bands, used by these systems, different coexistence scenarios are defined. Appropriate measurement testbed and method are proposed to measure coexistence between LTE and WLAN systems. Functionality of the proposed measurement testbed has been proved and extensive measurement of previously defined coexistence scenarios has been done. The obtained results are evaluated in details.

KEYWORDS

LTE, WLAN, Wi-Fi, ISM band, coexistence of wireless systems, EVM, RF measurement, guard band

MIKLÁŠ, M., *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.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci na téma Koexistence bezdrátových komunikačních systémů a LTE v pásmu ISM jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské 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 bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

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

OBSAH

Seznam obrázků	vi
Seznam tabulek	ix
Úvod	10
1 IEEE 802.11 Wi-Fi	11
1.1 Fyzická vrstva - WLAN.....	11
1.2 IEEE 802.11b.....	11
1.3 IEEE 802.11g.....	13
1.4 IEEE 802.11n.....	16
2 Systém LTE	17
2.1 Architektura sítě.....	17
2.2 Fyzická vrstva - LTE	18
2.2.1 Struktura rámce LTE	19
2.3 Rádiové kanály LTE	19
3 Koexistence mezi systémy LTE a WLAN	20
3.1 Koexistenční scénář vzájemně se nepřekrývajících spekter systémů LTE a WLAN	21
3.1.1 Koexistence LTE kanálu 40 a WLAN	21
3.1.2 Koexistence LTE kanálu 7 a WLAN	21
3.2 Koexistenční scénář vzájemně se překrývajících RF spekter LTE a WLAN	22
4 Laboratorní Pracoviště pro měření koexistence mezi LTE a WLAN	23
4.1 Použité přístroje	24
4.2 Objektivní měřené parametry	24
5 Popis měření koexistenčních scénářů	25
6 Měření vzájemné koexistence mezi LTE a Wi-fi 802.11b	28
6.1 Vyhodnocení měření vlivu Wi-Fi 802.11b na výkonnost LTE	28
7 Měření vzájemné koexistence mezi LTE a Wi-fi 802.11g	36

7.1	Vyhodnocení měření vlivu Wi-Fi 802.11g na výkonnost LTE	36
8	Měření vzájemné koexistence mezi LTE a Wi-fi 802.11n	43
8.1	Vyhodnocení měření vlivu Wi-Fi 802.11n na výkonnost LTE	43
9	Koexistence LTE a Wi-Fi 802.11b/g ve sdíleném RF kanále (Co-channel)	45
	Závěr	49
	Literatura	50
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	52
A	Návrh laboratorní úlohy	55
B	Vzorové vypracování laboratorní úlohy	67
C	Seznam naměřených grafů	74

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Uspořádání frekvenčních kanálů včetně jejich centrálních frekvencí v pásmu 2,4 GHz ISM (na základě [4]).	12
Obr. 2 Struktura rámce IEEE 802.11b s dlouhým PLCP (na základě [5]).	12
Obr. 3 Spektrální maska standardu IEEE 802.11b (na základě [4]).	13
Obr. 4 Blokové schéma vysílače IEEE 802.11b (na základě [7]).	13
Obr. 5 Struktura rámce IEEE 802.11g (na základě [5]).	14
Obr. 6 Spektrální maska standardu IEEE 802.11g (na základě [4]).	14
Obr. 7 Blokové schéma vysílače IEEE 802.11g s technikou OFDM (na základě [6]).	15
Obr. 8 Přenosové technologie používané v IEEE 802.11n a) SISO a b) MIMO.	16
Obr. 9 Spektrální maska standardu IEEE 802.11n (na základě [9]).	16
Obr. 10 Architektura sítě LTE (na základě [10]).	17
Obr. 11 Blokové schéma pro downlink v systému LTE (na základě [15]).	18
Obr. 12 Blokové schéma pro uplink v systému LTE (na základě [15]).	19
Obr. 13 Naznačení principu koexistence mezi LTE a WLAN (Wi-Fi).	20
Obr. 14 Koexistence LTE kanálu 40 a WLAN v ISM pásmu 2,4 GHz.	21
Obr. 15 Koexistence LTE kanálu 7 a WLAN v RF 2,4 GHz.	22
Obr. 16 Koexistence LTE kanálu 7 a WLAN v RF 2,4 GHz.	22
Obr. 17 Návrh měřicího pracoviště pro měření koexistence mobilního systému LTE a bezdrátového systému WLAN (na základě [19]).	23
Obr. 18 Zapojení měřicího pracoviště 1) Signálový Generátor R&S SMU 200, 2) Spektrální analyzátor R&S FSP3, 3) Signálový analyzátor R&S FSQ s modulem LTE, 4) Wilkinsonův výkonový slučovač.	27
Obr. 19 Spektrum signálů Wi-Fi 802.11b a LTE s $B_{LTE} = 1,4$ MHz ve 40 MHz kanále (Video Bandwidth (VBW) = 10 kHz, Resolution Bandwidth (RBW) = 300 kHz, SPAN = 50 MHz).	28
Obr. 20 Konstelační diagramy LTE signálu a) QPSK – bez rušení (referenční), b) QPSK – rušení systémem WLAN, c) 16QAM – bez rušení (referenční), d) 16QAM – rušení systémem WLAN, e) 64QAM – bez rušení (referenční), f) 64QAM – rušení systémem WLAN.	29
Obr. 21 Závislost parametru EVM signálu LTE s $B_{LTE} = 1,4$ MHz a modulací QPSK na C/I při různých GB (rušení Wi-Fi 802.11b s $R_{WLAN} = 1$ Mbps).	30
Obr. 22 Závislost parametru EVM signálu LTE s $B_{LTE} = 1,4$ MHz a modulací 16QAM na C/I při různých GB (rušení Wi-Fi 802.11b s $R_{WLAN} = 1$ Mbps).	30

Obr. 23 Závislost parametru EVM signálu LTE s $B_{LTE} = 1,4$ MHz a modulací 64QAM na C/I při různých GB (rušení Wi-Fi 802.11b s $R_{WLAN} = 1$ Mbps).....	30
Obr. 24 Závislost C/I na GB pro LTE s $B_{LTE} = 1,4$ MHz při koexistenci se signálem WLAN IEEE 802.11b s $R_{WLAN} = 1$ Mbps. Hodnoty poměrů C/I reprezentují situaci, kdy je ještě možné přijímat a zpracovat LTE signál. Po překročení této hodnoty signál LTE už vypadává a nelze jej synchronizovat.	31
Obr. 25 Závislost C/I na GB pro LTE s $B_{LTE} = 1,4$ MHz při koexistenci se signálem WLAN IEEE 802.11b s $R_{WLAN} = 11$ Mbps.	32
Obr. 26 Závislost C/I na GB pro LTE s $B_{LTE} = 5$ MHz při koexistenci se signálem WLAN IEEE 802.11b s $R_{WLAN} = 1$ Mbps.	32
Obr. 27 Závislost C/I na GB pro LTE s $B_{LTE} = 5$ MHz při koexistenci se signálem WLAN IEEE 802.11b s $R_{WLAN} = 11$ Mbps.	33
Obr. 28 Závislost C/I na GB pro LTE s $B_{LTE} = 10$ MHz při koexistenci se signálem WLAN IEEE 802.11b s $R_{WLAN} = 1$ Mbps.	34
Obr. 29 Závislost C/I na GB pro LTE s $B_{LTE} = 10$ MHz při koexistenci se signálem WLAN IEEE 802.11b s $R_{WLAN} = 11$ Mbps.	34
Obr. 30 Závislost C/I na GB pro LTE s $B_{LTE} = 20$ MHz při koexistenci se signálem WLAN IEEE 802.11b s $R_{WLAN} = 1$ Mbps.	35
Obr. 31 Závislost C/I na GB pro LTE s $B_{LTE} = 20$ MHz při koexistenci se signálem WLAN IEEE 802.11b s $R_{WLAN} = 11$ Mbps.	35
Obr. 32 Spektrum signálů Wi-Fi 802.11g a LTE s $B_{LTE} = 1,4$ MHz ve 40 MHz kanále VBW = 10 kHz, RBW = 300 kHz, SPAN = 50 MHz).	36
Obr. 33 Závislost parametru EVM signálu LTE s $B_{LTE} = 1,4$ MHz a modulací QPSK na C/I pro GB (rušení Wi-Fi 802.11g s $R_{WLAN} = 6$ Mbps).....	37
Obr. 34 Závislost parametru EVM signálu LTE s $B_{LTE} = 1,4$ MHz a modulací 16QAM na C/I pro GB (rušení Wi-Fi 802.11g s $R_{WLAN} = 6$ Mbps).....	37
Obr. 35 Závislost parametru EVM signálu LTE s $B_{LTE} = 1,4$ MHz a modulací 64QAM na C/I pro GB (rušení Wi-Fi 802.11g s $R_{WLAN} = 6$ Mbps).....	38
Obr. 36 Závislost C/I na GB pro LTE s $B_{LTE} = 1,4$ MHz při koexistenci se signálem WLAN IEEE 802.11g s $R_{WLAN} = 6$ Mbps. Hodnoty poměrů C/I reprezentují situaci, kdy je ještě možné přijímat a zpracovat LTE signál. Po překročení této hodnoty signál LTE už vypadává a nelze jej synchronizovat.	38
Obr. 37 Závislost C/I na GB pro LTE s $B_{LTE} = 1,4$ MHz při koexistenci se signálem WLAN IEEE 802.11g s $R_{WLAN} = 54$ Mbps.	39
Obr. 38 Závislost C/I na GB pro LTE s $B_{LTE} = 5$ MHz při koexistenci se signálem WLAN IEEE 802.11g s $R_{WLAN} = 6$ Mbps.	39
Obr. 39 Závislost C/I na GB pro LTE s $B_{LTE} = 5$ MHz při koexistenci se signálem WLAN IEEE 802.11g s $R_{WLAN} = 54$ Mbps.	40
Obr. 40 Závislost C/I na GB pro LTE s $B_{LTE} = 10$ MHz při koexistenci se signálem	

WLAN IEEE 802.11g s $R_{WLAN} = 6$ Mbps.	40
Obr. 41 Závislost C/I na GB pro LTE s $B_{LTE} = 10$ MHz při koexistenci se signálem WLAN IEEE 802.11g s $R_{WLAN} = 54$ Mbps.	41
Obr. 42 Závislost C/I na GB pro LTE s $B_{LTE} = 20$ MHz při koexistenci se signálem WLAN IEEE 802.11g s $R_{WLAN} = 6$ Mbps.	41
Obr. 43 Závislost C/I na GB pro LTE s $B_{LTE} = 20$ MHz při koexistenci se signálem WLAN IEEE 802.11g s $R_{WLAN} = 54$ Mbps.	42
Obr. 44 Závislost parametru EVM signálu LTE s $B_{LTE} = 1,4$ MHz a modulací QPSK na C/I pro GB (rušení Wi-Fi 802.11n s $R_{WLAN} = 13$ Mbps).....	44
Obr. 45 Závislost parametru EVM signálu LTE s $B_{LTE} = 5$ MHz a modulací QPSK na C/I pro GB (rušení Wi-Fi 802.11n s $R_{WLAN} = 13$ Mbps).....	44
Obr. 46 Závislost parametru EVM signálu LTE s $B_{LTE} = 10$ MHz a modulací QPSK na C/I pro GB (rušení Wi-Fi 802.11n s $R_{WLAN} = 13$ Mbps).....	44
Obr. 47 Závislost parametru EVM signálu LTE s $B_{LTE} = 1,4$ MHz s modulací QPSK na C/I rušeného Wi-Fi 802.11b/g.	46
Obr. 48 Závislost parametru EVM signálu LTE s $B_{LTE} = 1,4$ MHz s modulací 16QAM na C/I rušeného Wi-Fi 802.11b/g.	46
Obr. 49 Závislost parametru EVM signálu LTE s $B_{LTE} = 1,4$ MHz s modulací 64QAM na C/I rušeného Wi-Fi 802.11b/g.	46
Obr. 50 Závislost parametru EVM signálu LTE s $B_{LTE} = 5$ MHz s modulací QPSK na C/I rušeného Wi-Fi 802.11b/g.	47
Obr. 51 Závislost parametru EVM signálu LTE s $B_{LTE} = 5$ MHz s modulací 16QAM na C/I rušeného Wi-Fi 802.11b/g.	47
Obr. 52 Závislost parametru EVM signálu LTE s $B_{LTE} = 5$ MHz s modulací 64QAM na C/I rušeného Wi-Fi 802.11b/g.	47
Obr. 53 Závislost parametru EVM signálu LTE s $B_{LTE} = 10$ MHz s modulací QPSK na C/I rušeného Wi-Fi 802.11b/g.	48
Obr. 54 Závislost parametru EVM signálu LTE s $B_{LTE} = 10$ MHz s modulací 16QAM na C/I rušeného Wi-Fi 802.11b/g.	48
Obr. 55 Závislost parametru EVM signálu LTE s $B_{LTE} = 10$ MHz s modulací 64QAM na C/I rušeného Wi-Fi 802.11b/g.	48

SEZNAM TABULEK

Tab. 1	Systemové parametry pro signál LTE	26
Tab. 2	Porovnání fyzických vrstev W-Fi standardů 802.11 pro zvolené přenosové rychlosti.	26
Tab. 3	Systemové parametry pro WLAN IEEE 802.11b/g/n.	26

ÚVOD

Bezdrátové sítě Wireless Local Area Network (WLAN) se využívají pro přenos dat rádiovým prostředím mezi uživatelskými zařízeními. Pro přenos je využíváno bezlicenční frekvenční pásmo Industrial, Scientific and Medical (ISM). Systémy WLAN využívají pro přenos jeden ze standardů IEEE 802.11b/g/n, které se vyvíjely postupně několik let. Uvedené standardy se mezi sebou liší zejména v přenosových rychlostech a signálovém zpracování na fyzické vrstvě jako je rozprostření signálu, modulacích, a kmitočtových pásmech, ve kterých jsou provozovány.

V poslední dekádě se rychlost vývoje v mobilních komunikacích rapidně zvýšila, jeho posledním výsledkem je systém LTE, který vznikl na základech Universal Mobile Telecommunication System (UMTS). Tento systém je založen na ryze paketovém přenosu, využívající princip Internet Protocol (IP). Značnou výhodou oproti předešlým se stala větší spektrální účinnost a nižší odezva.

Dnešní bezdrátové zařízení (chytřé telefony, tablety, notebooky) podporují pro bezdrátovou komunikaci celou řadu standardů a systémů. Mobilní zařízení může komunikovat souběžně pomocí LTE, WLAN, Bluetooth apod. Některé z těchto systémů pro svůj provoz využívají pásmo ISM, nebo mohou být provozovány v blízkých radiofrekvenčních (RF) pásmech. Vlivem nedostatečného frekvenčního a výkonového odstupu mezi signály různých systémů může docházet ke vzájemným interferencím jak během přenosu rádiovým prostředím, tak mezi vstupními bloky pro příjem a zpracování signálů.

Tato práce se zaměřuje na definici, popis a měření koexistenčních scénářů, které mohou nastat mezi mobilním systémem LTE a bezdrátovými systémy WLAN v bezlicenčním pásmu ISM. RF pásma obou systémů spolu úzce sousedí a je třeba stanovit podmínky, do jaké míry se RF signály obou systémů vzájemně ovlivňují. Jsou definovány koexistenční scénáře, které mohou nastat.

První část se zabývá teoretickým rozborem bezdrátových systémů LTE a WLAN, zejména popisem jejich fyzické vrstvy. Ve druhé části jsou navrženy a definovány koexistenční scénáře spolu s návrhem měřicího pracoviště pro měření a vyhodnocení takových scénářů. Poslední část bakalářské práce prezentuje výsledky rozsáhlých laboratorních měření a jejich diskuze.

1 IEEE 802.11 WI-FI

V roce 1997 vznikla první specifikace pro standard bezdrátové sítě WLAN, označovaná podle Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) jako 802.11. Pro její provoz je využíváno bezlicenční pásmo ISM 2,4 GHz [1].

V průběhu času se specifikace začala rozšiřovat a vzniklo několik standardů tvořících základ pro tzv. Wireless Fidelity (Wi-Fi). Níže budou rozebrány pouze technologie a standardy, kterými se tato práce zabývá.

1.1 Fyzická vrstva - WLAN

Fyzická vrstva (Physical Layer (PHY)) zprostředkovává přenos dat mezi uživatelským zařízením a sítí. Provádí převod bitové informace na RF signál, který je následně přenášen přenosovým prostředím [1].

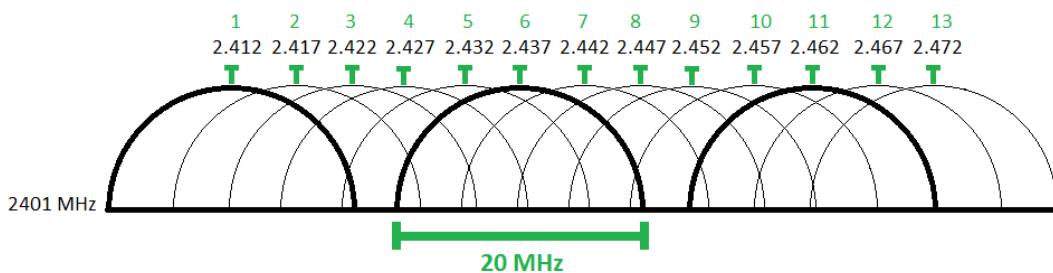
V prvním standardu byly specifikovány 3 přenosové mechanismy, jmenovitě: Frequency-Hopping Spread Spectrum (FHSS), Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS) a Infrared (IR) [1]. Později vznikl dodatek ke standardu, přinášející další vrstvy, jako jsou Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) a High—Rate Direct Sequence Spread Spectrum (HR/DSSS) [1]. V této práci jsou uvažovány pouze DSSS, OFDM a HR/DSSS.

Všechny výše popsané typy vrstev PHY používají techniku rozprostření spektra. Její funkce je založena na principu rozprostření signálu do širokého frekvenčního pásma na základě matematických funkcí [1]. Tím se docílí potlačení úzkopásmového rušivého signálu.

Fyzická vrstva WLAN se rozděluje na podvrstvu Physical Layer Convergence Procedure (PLCP) a Physical Medium Dependent (PMD). Přenos mezi podvrstvou spojové vrstvy Media Access Control (MAC) a samotným přenosovým médiem zprostředkovává podvrstva PLCP. Ta navíc doplňuje datové rámce, které jsou přenášeny z MAC o vlastní hlavičky. V závislosti na použité modulaci se volí různé formáty a typy hlaviček [2]. Podvrstva PMD se stará o rozprostírání, kódování, modulování a přenos rádiovým prostředím pomocí antény [2].

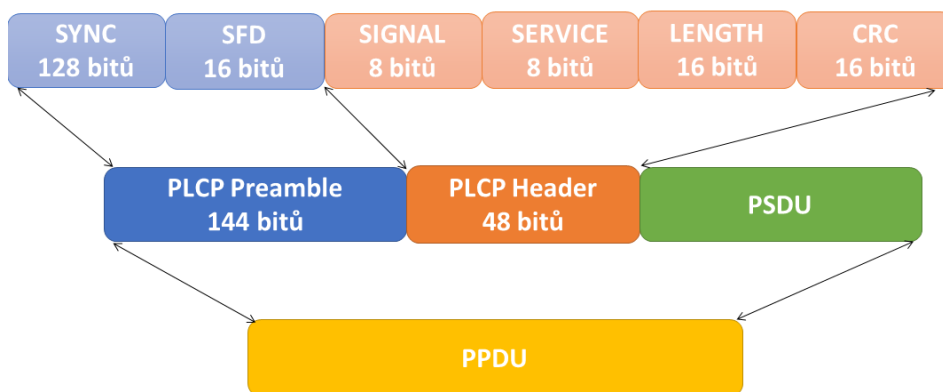
1.2 IEEE 802.11b

Standard IEEE 802.11b vznikl v roce 1999, na základech normy 802.11. Oproti původnímu standardu byla na fyzické vrstvě technika DSSS doplněna o HR/DSSS. Úprava vedla ke zvýšení maximální přenosové rychlosti z 2 Mbps na 11 Mbps. Jedná se o teoretickou rychlost, odpovídající přenosu na krátkou vzdálenost bez jakéhokoliv rušení. Standard je provozován v ISM 2,4 GHz, ve kterém je např. pro Českou republiku (ČR) vyčleněno 13 plnohodnotných kanálů s šířkou pásma 22 MHz (popř. 20 MHz) a vzájemným frekvenčním odstupem 5 MHz [3]. Jak lze vidět na Obr. 1, nedostatečný frekvenční odstup mezi kanály způsobuje jejich vzájemné překrývání. Aby se předcházelo vzájemnému rušení kanálů, lze použít pouze 3 plnohodnotné kanály s nosnými kmitočty 2412 MHz, 2437 MHz a 2462 MHz [1].



Obr. 1 Uspořádání frekvenčních kanálů včetně jejich centrálních frekvencí v pásmu 2,4 GHz ISM (na základě [4]).

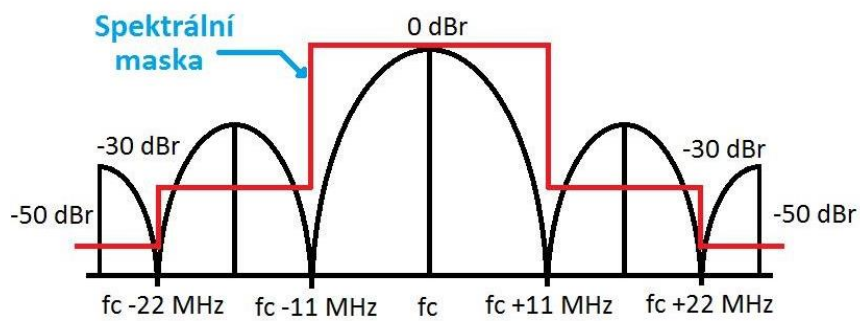
Uživatelská data jsou přenášena v tzv. rámcích, které jsou doplněny na PHY (PLCP) o řídicí informace. Na Obr. 2 je zobrazena struktura rámce tzv. Long - PLCP standardu IEEE 802.11b s přenosovou rychlostí 1 Mbps. První část PLCP je kvůli zpětné kompatibilitě vysílána pomocí Barkerovy sekvence s konstantní rychlostí 1 Mbps. Část PLCP Header obsahuje data potřebné pro správnou demulaci Physical Service Data Unit (PSDU) signálu [5]. Rámec PSDU obsahuje uživatelská data modulovaná v závislosti na zvolené přenosové rychlosti. Konkrétní popis všech bloků lze nalézt v [5].



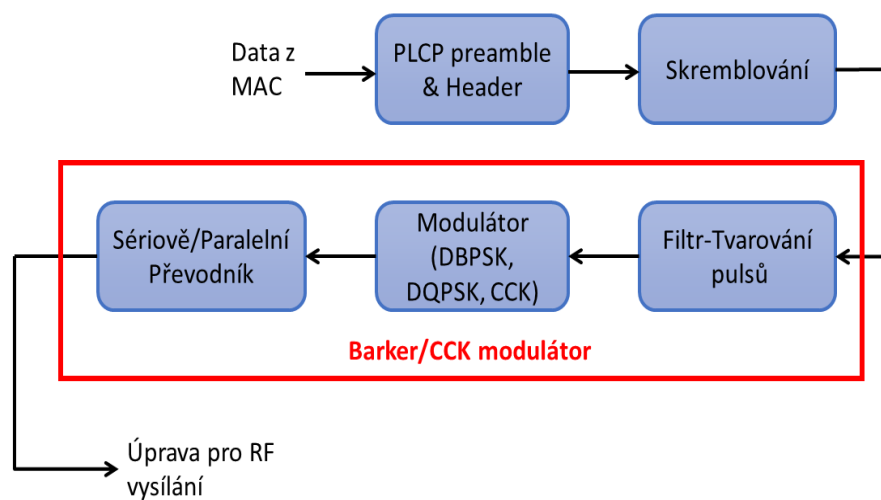
Obr. 2 Struktura rámce IEEE 802.11b s dlouhým PLCP (na základě [5]).

Nejnižší přenosová rychlost 1 Mbps odpovídá modulaci datového toku technikou Different Binary Phase Shift Keying (DBPSK) a následnému rozprostření do 22 MHz kanálu pomocí Barkerovy sekvence. Pro přenos s nejvyšší přenosovou rychlostí 11 Mbps je signál modulován technikou Differential Quadrature Phase Shift Keying (DQPSK) a následně rozprostřen pomocí Complementary Code Keying (CCK) [6].

Vysílací výkon je na jednotlivých kanálech omezen tzv. spektrální maskou. Díky ní se sníží vysílací výkon kanálu o 30 dB a 50 dB na frekvencích, vzdálených od centrální frekvence o 11 MHz a 22 MHz (viz. Obr. 3) [4]. Výsledkem je zabránění vzniku rušení a interferencí [1]. Blokové schéma vysílače standardu IEEE 802.11b je znázorněno na Obr. 4.



Obr. 3 Spektrální maska standardu IEEE 802.11b (na základě [4]).

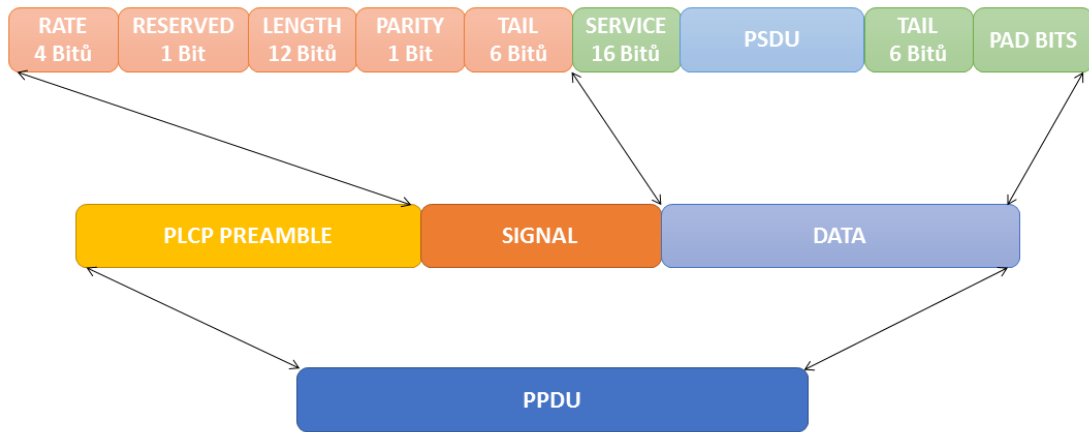


Obr. 4 Blokové schéma vysílače IEEE 802.11b (na základě [7]).

1.3 IEEE 802.11g

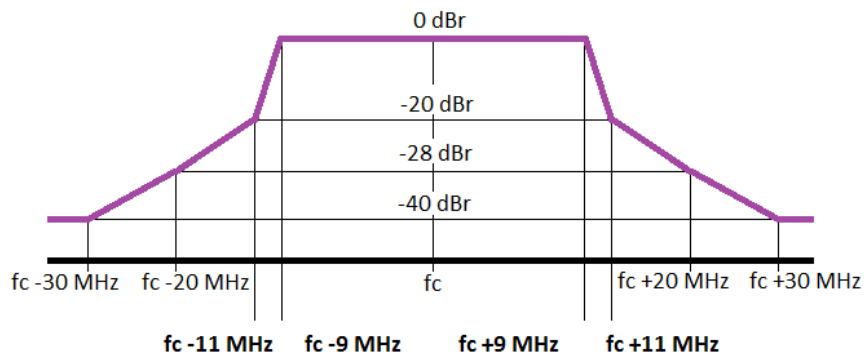
Specifikace pro standard IEEE 802.11g vyšla v roce 2003. Standard IEEE 802.11g vznikl rozšířením předchozího standardu IEEE 802.11b, zejména na fyzické vrstvě o technologii Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM). Standard je stejně jako IEEE 802.11b, se kterým je zpětně kompatibilní, provozován v pásmu ISM 2,4 GHz.

Uživatelská data jsou přenášena v rámcích, jejichž struktura je znázorněna na Obr. 5. Počáteční PLCP Preamble odpovídá stejné struktuře jako u IEEE 802.11b. Blok PLCP Signál se skládá z 24 bitů, které přenáší informace o rychlosti a počtu bytů přenášených v tomto rámci. V poslední části jsou přenášena uživatelská data modulovaná jednou z technik Binary Phase-Shift Keying (BPSK), Quadrature Phase Shift Keying (QPSK) nebo Quadrature Amplitude Modulation (16QAM a 64QAM). Rámec PSDU může mít délku až 2346 bytů. Díky OFDM a využití modulace 64QAM, vzrostla maximální teoretická přenosová rychlost na 54 Mbps. Další informace týkající se popisu rámců lze dohledat v [5].



Obr. 5 Struktura rámce IEEE 802.11g (na základě [5]).

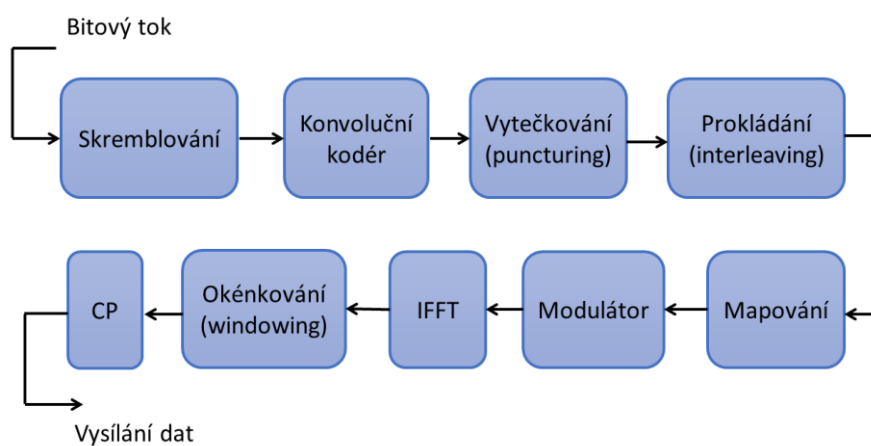
U tohoto standardu je vysílací výkon také omezen spektrální maskou, naznačenou na Obr. 6. Výsledkem je omezení vysílacího výkonu zejména na frekvencích vzdálených o 9 MHz a 11 MHz od nosné frekvence (f_c).



Obr. 6 Spektrální maska standardu IEEE 802.11g (na základě [4]).

Na Obr. 7 je naznačeno blokové schéma vysílače využívající OFDM. Technika OFDM používá pro přenos signálu několik subnosných na určitých frekvencích, v nichž je signál modulován různými typy modulací. Jednotlivé subnosné jsou vzájemně ortogonální a přenos probíhá paralelně. Bitový tok je vhodně upraven pomocí skramblování a konvolučního kodéru. Vytečkování je využito u některých přenosových rychlostí a umožňuje snížit kódový poměr konvolučního kodéru na $2/3$ a $3/4$ [6]. Po prokládání a mapování je bitový tok modulován jednou z modulací BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM.

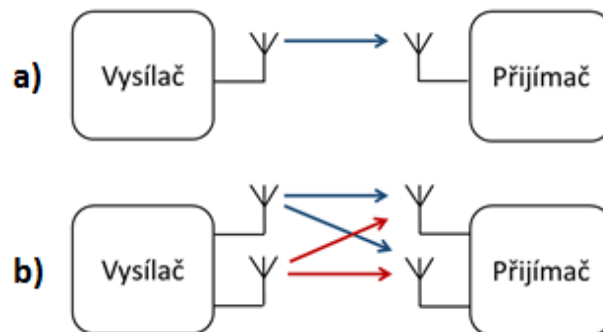
Pomocí rychlé inverzní Fourierovy transformace (Inverse Fast Fourier Transform (IFFT)) se převádí signál z kmitočtové do časové oblasti. Blok okénkování umožňuje snížit interference v přilehlých kanálech [6]. Z důvodu omezení tzv. intersymbolových interferencí (Inter Symbol Interference (ISI)) a tzv. interferenčního rušení (Inter Carrier Interference (ICI)) se do řetězce signálového zpracování vkládá tzv. cyklický prefix (Cyclic Prefix (CP)).



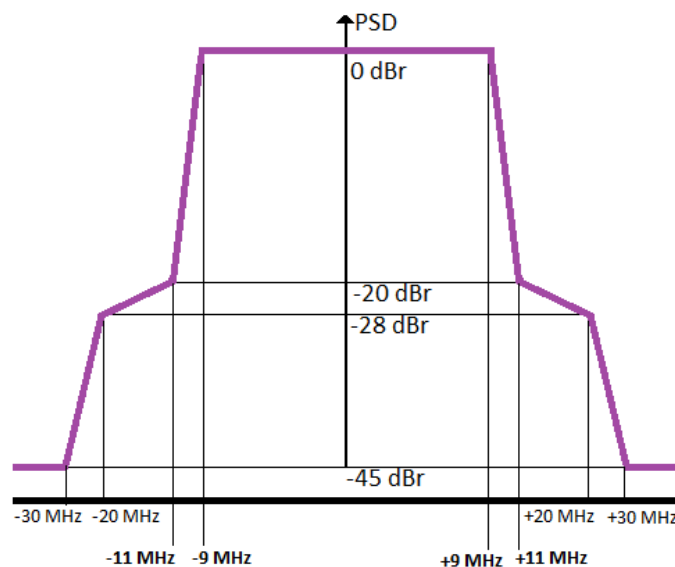
Obr. 7 Blokové schéma vysílače IEEE 802.11g s technikou OFDM (na základě [6]).

1.4 IEEE 802.11n

Technologie IEEE 802.11n oproti předešlým standardům (IEEE 802.11b/g), s kterými je kompatibilní, může navíc využívat techniku Multiple Input Multiple Output (MIMO). Technika MIMO používá pro přenos signálu několik antén na přijímací i vysílací straně. Srovnání MIMO je spolu s technikou Single-Input and Single-Output (SISO), která využívá jednu anténu na vysílací i přijímací straně naznačeno na Obr. 8. Standard dále umožňuje sloučení dvou sousedních kanálů do jednoho s výslednou šířkou kanálu 40 MHz. Maximální teoretická přenosová rychlost je závislá na mnoha faktorech, jako jsou šířka pásma přenosového kanálu, kódovém poměru, délce CP a počtu vysílacích a přijímacích antén [8]. Její teoretická hodnota však může dosahovat až 600 Mbps. Spektrální maska se může měnit v závislosti na počtu sdružených kanálů, pro 20 MHz kanál je její průběh naznačen na Obr. 9.



Obr. 8 Přenosové technologie používané v IEEE 802.11n a) SISO a b) MIMO.



Obr. 9 Spektrální maska standardu IEEE 802.11n (na základě [9]).

2 SYSTÉM LTE

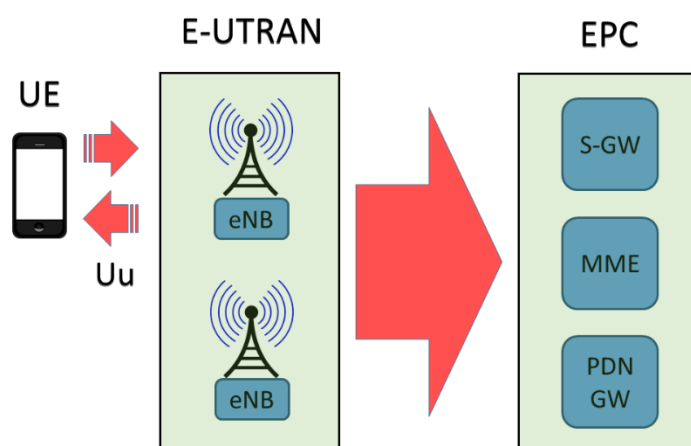
Systém LTE vznikl na základech systému UMTS. V roce 2000 byl na jeho samotném začátku v rámci projektu 3rd Generation Partnership Project (3GPP) systém UMTS. Ten procházel ročními úpravami označenými 3GPP Release. V roce 2008 tak vznikl systém s označením LTE odpovídající úpravě Release 8 [10]. Tato generace využívá ryze paketový přenos, založený na principu Internet Protocol (IP), což s sebou nese spoustu výhod, jako jsou větší spektrální účinnost a nižší odezva.

2.1 Architektura sítě

Architektura sítě LTE se skládá ze dvou základních bloků, jak je vidět na Obr. 10. Jako první část je z pohledu uživatele jeví blok s názvem E-UTRAN. Tento blok spojuje základnové stanice eNB zprostředkovávající přenos mezi uživatelským zařízením, nazývané jako User Equipment (UE), a paketovou sítí. Každá stanice eNB může zároveň obsluhovat několik uživatelských zařízení UE, avšak zařízení UE může obsluhovat pouze jedno eNB. Stanice také řídí přidělování frekvenčních kanálů. Přenos realizovaný rádiovým prostředím mezi základovou stanicí eNB a uživatelským zařízením UE je označován jako Uu [10].

Další částí, zajišťující veškeré řízení a služby nezbytnou pro celkový chod systému, je Evolved Packet Core (EPC). Oproti předchozím standardům se EPC (v UMTS označovaná jako Core Network (CN) [10]) zjednodušila díky absenci bloků pro komutovaný přenos. Propojení této části s částí E-UTRAN může být realizováno pomocí metalických kabelů, optických kabelů nebo mikrovlnných spojů [10].

Blok EPC obsahuje několik prvků. Prvek Mobility Management Entity (MME) se stará o ověřování totožnosti a chrání proti odposlechu výpočtem šifrovacího klíče a následným šifrováním. Samotný datový tok přes něj neprochází. V MME se také uchovává tzv. uživatelský profil uložený v Home Subscriber Server (HSS) [10].



Obr. 10 Architektura sítě LTE (na základě [10]).

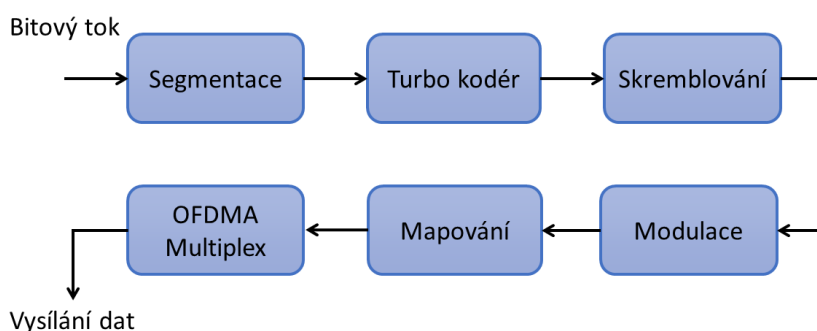
Prvky označované jako Serving Gateway (S-GW) a Packet Data Network Gateway (PDN-GW) tvoří brány, jimiž procházejí veškerá uživatelská data. Tyto brány jsou mezi sebou propojeny rozhraním S5/S8. Brána PDN-GW tvoří směrovač mezi EPC a paketovými sítěmi, jako je internet [10].

2.2 Fyzická vrstva - LTE

Fyzická vrstva LTE nese podle specifikace 3GPP označení L2. Lze ji rozdělit do čtyř hlavních částí: fyzické kanály a modulace, multiplexování a kanálové kódování, procedury fyzické vrstvy a měření ve fyzické vrstvě [11]. Níže je uveden základní popis signálového zpracování v uplinku (UL) a downlinku (DL) na fyzické vrstvě.

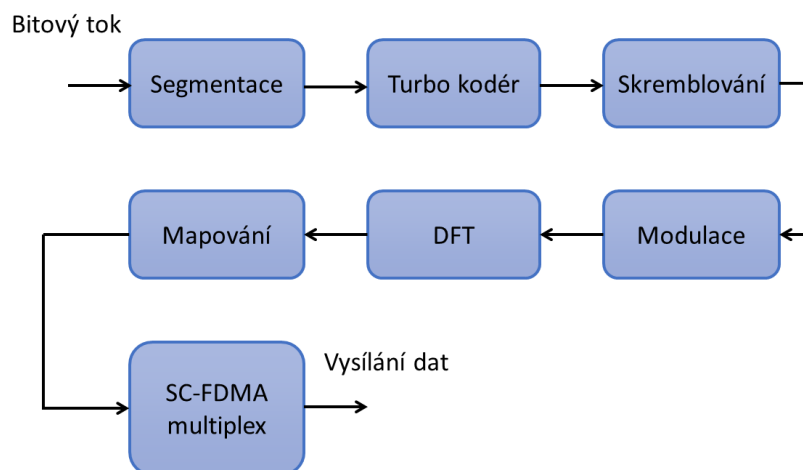
Downlink a Uplink (UL), kterým odpovídají blokové schémata Obr. 11 a Obr. 12, se liší v určitých blocích. Před prvním blokem s názvem segmentace, jež je pro obě schémata stejný, probíhá přiřazení kontrolních bitů, což má za následek zvýšení velikosti datového toku. Následně se datový tok kvůli překročení maximální velikosti upraví pomocí segmentací. Následkem toho vznikají kódové bloky. Upravené bloky posléze podstupují kanálové kódování, závislé na typu transportního kanálu. V systému LTE se pro transportní kanály využívá turbo kódování a konvoluční tzv. tail-biting kódování [11]. V obou případech se používá kódový poměr 1/3. Potom následuje skramblování, které probíhá pomocí sekvence generující se pro každý subrámeček zvlášť [12]. V neposlední řadě se signál s ohledem na indikátor kvality kanálu Channel Quality Indicator (CQI) moduluje jednou z technik QPSK, 16QAM nebo 64QAM [12].

V DL se používá systém Orthogonal Frequency-Division Multiple Access (OFDMA). Jedná se o systém využívající frekvenční dělení kanálu s vzájemně ortogonálními signály. Odstup mezi jednotlivými subnosnými je stanoven na 15 kHz [13]. Použití systému OFDMA se sebou nese spoustu výhod, jako je vyšší spektrální účinnost, odolnost signálu v únikových (tzv. fading) kanálech, škálovatelnost pásma, jednodušší implementace MIMO, koordinace subnosných apod. [10].



Obr. 11 Blokové schéma pro downlink v systému LTE (na základě [15]).

Uplink je založený na využití principu Single-Carrier Orthogonal Frequency-Division Multiple Access (SC-FDMA) viz. Obr. 12. Tento systém používá modulaci na jedné nosné. Oproti DL je zde použit blok diskretní Fourierové transformaci (Discrete Fourier Transform (DFT)), transformující signál určitého počtu nosných do kmitočtové oblasti [12]. Jedním z důvodů použití této modulace bylo zvýšení životnosti baterií



Obr. 12 Blokové schéma pro uplink v systému LTE (na základě [15]).

v přenosných mobilních zařízeních a snížení tzv. Peak-to-Average Power Ratio (PAPR) [15].

2.2.1 Struktura rámce LTE

Šířka pásma kanálu v systému LTE může být (1,4; 3; 5; 10; 15; 20) MHz.

Pro přenos se bitový tok rozděljuje do rámců. V závislosti na použitém přenosu se rozlišují dva typy rámců se stejnou dobou trvání 10 ms [13]. Ve frekvenčním duplexu Frequency Division Duplex (FDD) se rámec dělí na 10 subrámců s dobou trvání 1 ms, z nichž je každý rozdělen na dva sloty. Každý slot je pak v závislosti na délce CP definován 6 nebo 7 OFDM symboly [10].

Oproti tomu časový duplex Time Division Duplex (TDD) dělí bitový tok do rámců tvořenými dvěma půlrámci. Jeden půlrámec se skládá z pěti subrámců s délkou 1 ms, z nichž je pro přenos možné využít pouze čtyři. Z důvodu přenosu DL a UL ve stejném frekvenčním pásmu přenáší pátý subrámec informaci potřebnou pro přepínání mezi nimi [10].

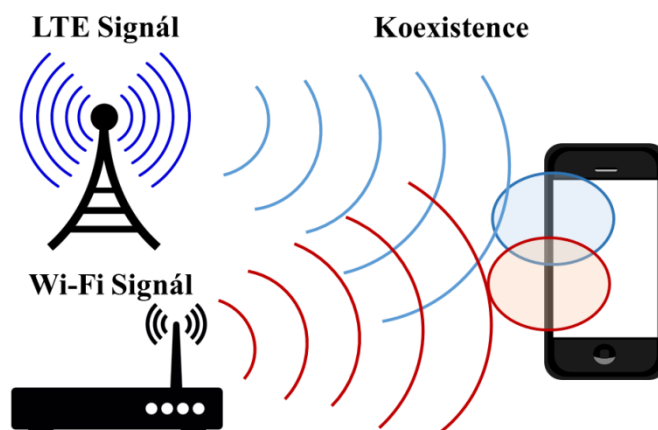
2.3 Rádiové kanály LTE

Pro systémy LTE bylo na Ženevské konferenci v roce 2007 přerozděleno a přiděleno několik frekvenčních pásem v oblasti Ultra High Frequency (UHF) a Super High Frequency (SHF), ve kterých byly alokovány frekvenční kanály [10]. V ČR se pro provoz používají frekvence 800 MHz, 900 MHz, 1800 MHz, 2100 MHz a 2600 MHz [17]. Jednotlivé frekvenční kanály se mohou lišit šířkou pásma a principem použití, kdy je ve dvou kanálech se vzájemným RF odstupem přenášén DL a UL, nebo DL i UL v jednom. Nesymetrická komunikace, kdy se v DL i UL využívá stejné frekvenční pásmo, odpovídá časovému duplexu TDD, jak už bylo naznačeno v Kapitole 2.2.1. Systém také podporuje symetrický přenos, kdy se využívá párování spekter a přenosy v DL a UL tak probíhají na různých předem definovaných frekvencích [13]. Tuto metodu využívá technika FDD. Lze využít také kombinovaný přenos [12].

3 KOEXISTENCE MEZI SYSTÉMY LTE A WLAN

V dnešní době se rapidně zvyšuje počet zařízení využívající různé technologie pro bezdrátovou komunikaci ve stejných nebo přilehlých frekvenčních pásmech. Následkem takové koexistence se pak mohou RF signály z jednotlivých systémů vzájemně rušit.

Tato práce je zaměřena na měření a vyhodnocení rušení signálu LTE způsobené signálem WLAN při jejich vzájemné koexistenci. Vzájemné ovlivňování signálů obou těchto systémů může nastat jak při šíření v rádiovém prostředí, tak mezi anténami jednotlivých zařízení obsahující funkční bloky pro příjem a zpracování těchto signálů [16]. Koexistence tak může vzniknout například za předpokladu, že se mobilní uživatelské zařízení UE nachází v buňce základnové stanice systému LTE (eNodeB) a zároveň v dosahu vysílače WLAN (poskytující Wi-Fi signál), jak je naznačeno na Obr. 13.



Obr. 13 Naznačení principu koexistence mezi LTE a WLAN (Wi-Fi).

Vyhodnocení koexistence se realizuje za pomoci RF signálů obou technologií vysílaných v blízkých nebo stejných RF frekvenčních pásmech. Při působení signálů na přilehlých nebo sub-harmonických frekvencích tak může docházet k situacím, kdy se signály vlivem interferencí zesílí nad rámec maxima, nebo naopak úplně vyruší [16].

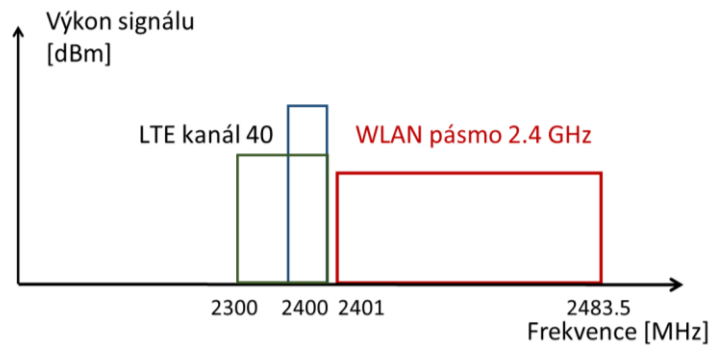
K možné koexistenci mezi systémy LTE a WLAN může dojít za předpokladu, budeme-li uvažovat RF pásma LTE, které přímo sousedí s ISM 2,4 GHz, avšak v ČR nejsou reálně využívány. Dále je potřeba uvažovat výkonové úrovně jednotlivých signálů. Zařízení pracující v pásmu ISM 2,4 GHz podléhají omezení vyzářeného výkonu vydaným Českým Telekomunikačním Úřadem (ČTÚ) odpovídající hodnotě 100 mW, popřípadě 20 dBm [17]. U systému LTE se UE zařízení rozdělují do několika výkonových úrovní, z nichž nejvyšší třída dosahuje výkonu 30 dBm a nejnižší 21 dBm [18].

3.1 Koexistenční scénář vzájemně se nepřekrývajících spekter systémů LTE a WLAN

V této podkapitole jsou definovány koexistenční scénáře, které mohou nastat při provozování služeb LTE a WLAN s malým vzájemným frekvenčním odstupem. Jsou zde uvažovány scénáře, kdy se RF spektra nepřekrývají. Reálně se tak dají uvažovat dva případy.

3.1.1 Koexistence LTE kanálu 40 a WLAN

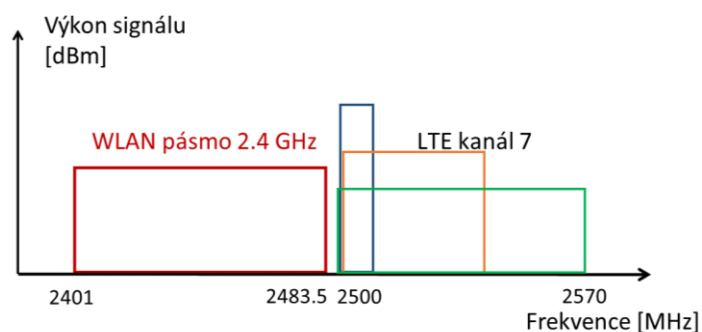
První koexistenční scénář je zobrazen na Obr. 14. Je zde vidět vzájemné frekvenční rozložení kanálu č. 40 systému LTE a systému WLAN v RF 2,4 GHz. Kanál č. 40 využívá pro přenos časový duplex TDD [10]. Minimální frekvenční odstup mezi RF spekter podle specifikací odpovídá hodnotě 1 MHz [16].



Obr. 14 Koexistence LTE kanálu 40 a WLAN v ISM pásmu 2,4 GHz.

3.1.2 Koexistence LTE kanálu 7 a WLAN

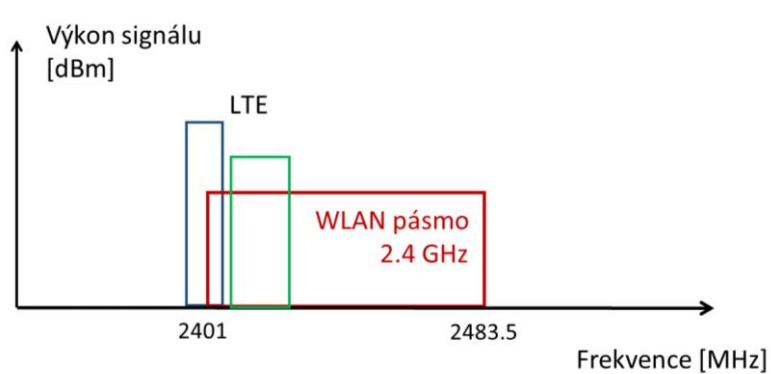
Možný koexistenční scénář mezi systémem LTE, který je provozován v kanále č. 7 a systémem WLAN je zobrazen na Obr. 15. Jak je vidět, takový scénář vzniká v horních mezích pásma ISM 2,4 GHz. LTE kanál č. 7 se vyznačuje symetrickým přenosem FDD. Přenos tak probíhá na dvou nezávislých frekvencích: 2620-2690 MHz (DL) a 2500-2570 MHz (UL). Pro vyhodnocení vzájemné koexistence mezi LTE a WLAN má proto smysl uvažovat pouze pásmo UL. Jak už bylo řečeno, systém LTE umožňuje měnit flexibilně šířku pásma na stanovené hodnoty (1,4; 3; 5; 10; 15; 20) MHz [10]. Šířka pásma kanálu WLAN se může nepatrně měnit v závislosti na použitých kanálech a na jejich počtu. Pro dosažení menšího frekvenčního odstupů lze u systému WLAN uvažovat i 14. kanál, který se dle specifikací používá pouze v Japonsku [1].



Obr. 15 Koexistence LTE kanálu 7 a WLAN v RF 2,4 GHz.

3.2 Koexistenční scénář vzájemně se překrývajících RF spekter LTE a WLAN

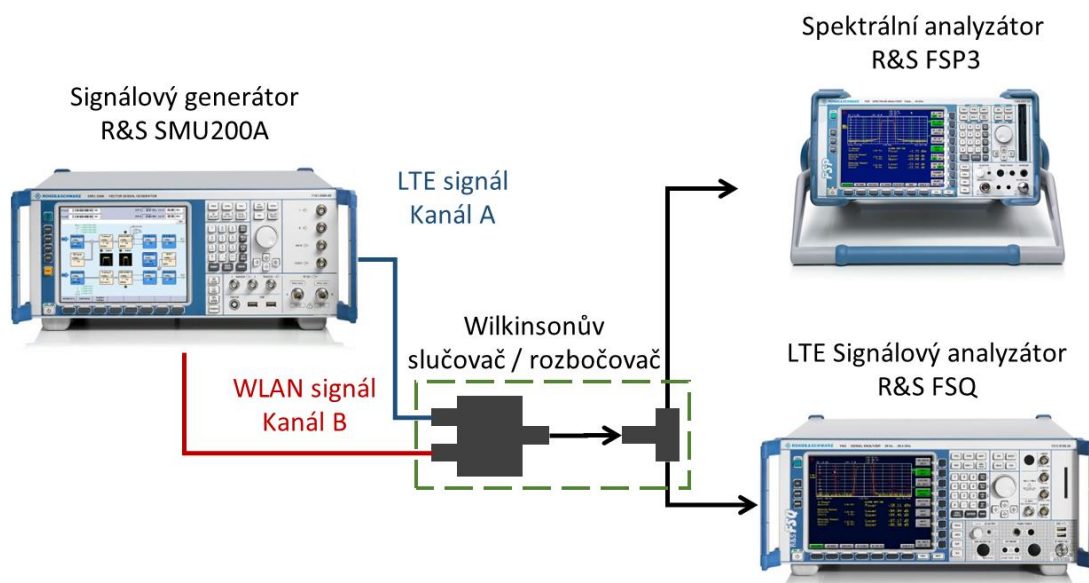
Koexistenční scénář vzájemného překrytí RF signálů LTE a WLAN v současné době nastává pouze v teoretické rovině. Ovšem je třeba dodat, že kvůli rozšiřování bezdrátových komunikačních systémů se postupně snížil počet nevyužitých frekvenčních pásem. S rozsáhlým vývojem mobilních komunikačních systémů se začínají vést debaty o páté generaci mobilních komunikací, označované jako 5G, která by přinesla mnoho inovací [19]. Jednou z nich by bylo využití pásma ISM, které doposud není mobilními komunikačními systémy využíváno. Následkem toho by se RF pásma LTE a WLAN vzájemně překrývaly [15]. Docházelo by tak k částečnému překrytí znázorněnému modře, nebo úplnému překrytí, které je naznačeno zeleně na Obr. 16.



Obr. 16 Koexistence LTE kanálu 7 a WLAN v RF 2,4 GHz.

4 LABORATORNÍ PRACOVNÍŠTĚ PRO MĚŘENÍ KOEXISTENCE MEZI LTE A WLAN

Pro měření vzájemné koexistence mezi systémy LTE a WLAN je navrženo měřicí pracoviště, jehož blokové schéma je zobrazeno na Obr. 17. Signály LTE a WLAN jsou generovány a modulovány signálovým generátorem Rohde & Schwarz (R&S) SMU200A. Konkrétní nastavení pak podléhá několika faktorům závislých na daných koexistenčních scénářích, popsanych v Kapitole 3. RF signál odpovídající specifikacím mobilního komunikačního systému LTE je vygenerován přístrojem R&S SMU200A v kanále A, v kanále B pak signál WLAN jako jeden z definovaných standardů IEEE 802.11b/g/n. Vytvořené signály pak z generátoru vstupují do Wilkinsonova slučovače. Z důvodu použití dvou analyzátorů je zapotřebí výsledný signál rozdělit pomocí rozbočovače. Signálovým analyzátozem R&S FSQ se hodnotí vliv rušení signálu WLAN na signál LTE. Pro měření výkonu v definovaném RF kanále, obsahující signály obou systémů a následnému zobrazení jejich RF spekter, je použit spektrální analyzátoz R&S FSP3.



Obr. 17 Návrh měřicího pracoviště pro měření koexistence mobilního systému LTE a bezdrátového systému WLAN (na základě [19]).

4.1 Použité přístroje

Signálový Generátor R&S SMU 200 – Tento generátor obsahuje dva nezávislé RF kanály. V kanále A může být generován signál do 6 GHz. Obdobně mohou být signály generovány i v kanále B, avšak pouze do 3 GHz. Oba kanály pak podporují standard LTE dle specifikace 3GPP Release 8 a jeho módy FDD a TDD. Taktéž lze generovat RF signál systému WLAN, používající jednu z technologií IEEE 802.11, které byly popsány v Kapitole 1.

Signálový analyzátor R&S FSQ s modulem LTE – Jedná se o přístroj, pomocí něhož lze zobrazit spektrum RF signálu v rozsahu 500 kHz – 5 GHz. Pomocí něj lze také vyhodnotit základní objektivní parametry signálu LTE.

Spektrální analyzátor R&S FSP3 – Spektrální analyzátor disponuje rozsahem 9 kHz - 3 GHz. Pomocí něj tak můžeme pozorovat RF spektra obou signálů. To je výhodné při nastavování šířky pásma kanálu systému LTE, tak během měření při vyhodnocení vzájemného frekvenčního odstupu.

4.2 Objektivní měřené parametry

Úroveň signálů – Jedná se o hodnotu udávající výkonovou úroveň signálu, která se nastavuje na generátoru. Její hodnota je kvůli zamezení možných útlumů kabelů odečítána na přijímací straně pomocí analyzátoru R&S FSP3. Hodnota se udává v dBm a úzce souvisí s kvalitou přijatého signálu.

Parametr C/I – Jedná se o poměr užitečného signálu „Carrier“ (C) vůči rušivému „Interference“ (I), vyjádřeného na vstupu přijímače. V některých literaturách je označován jako tzv. Protection Ratio (PR) [20]. Jelikož parametr udává podíl dvou výkonových hodnot, je použita jednotka dB.

Parametr EVM – Pro měření kvality digitálně modulovaného signálu se používá parametr Error Vector Magnitude (EVM). Vyjadřuje rozdíl mezi požadovanou a skutečnou tedy přijatou hodnotou symbolu. EVM se udává v procentech a platí, že čím je tato hodnota vyšší, tím více je signál rušen. Používá se pro měření kvality signálu u obou systémů. Pro každou modulaci je stanovena hranice, při jejímž překročení je přijatý signál značně degradovaný. Konkrétní mezní hodnoty umožňující měřit kvalitu příjmu LTE signálu, jsou 17,5% (QPSK), 12,5% (16QAM) a pro 8% (64QAM) [15], [17].

Guard Band (GB) – Jedná se tzv. ochranné pásmo, které vyjadřuje vzájemný RF odstup spekter mezi systémy LTE a WLAN. Hodnota GB se udává v jednotkách MHz a jeho velikost závisí na šířce pásma RF signálů a tím pádem i na kmitočtu nosné uvažovaných RF signálů.

5 POPIS MĚŘENÍ KOEXISTENČNÍCH SCÉNÁŘŮ

V této práci budou dále měřeny koexistenční scénáře, které byly definovány v Kapitole 3. Změna ve výkonnosti LTE, způsobena rušícím signálem WLAN, je monitorována a vyhodnocena přístrojem R&S FSQ, kde se vyhodnocuje objektivní parametr EVM. Veškeré koexistenční scénáře jsou měřeny v LTE kanálu č. 40 (2300 MHz až 2400 MHz). Kvůli zjednodušení popisu je pro šířku pásma LTE kanálu zavedena zkratka B_{LTE} . Jednotlivá měření jsou realizována postupně pro několik $B_{LTE} = (1,4; 5; 10; 20)$ MHz s různými modulacemi (QPSK, 16QAM, 64QAM) a s tzv. normálním CP. Pro LTE bylo vygenerováno 10 subrámců, které jsou děleny do zdrojových bloků tzv. Resource Block (RB). Během měření byl vždy nastaven maximální počet RB, který se liší v závislosti na B_{LTE} . Počáteční subrámec obsahuje v prvním RB fyzický kanál Physical Broadcast Channel (PBCH), určený pro identifikaci a přenos informace o buňce. Následuje kanál Physical Downlink Control Channel (PDCCH), který se v ostatních subrámcích opakuje. Přenáší informaci o alokování zdrojových bloků a spolu s PBCH používají neměnnou modulaci QPSK. Ostatní RB obsahují fyzické kanály Physical Downlink Shared Channel (PDSCH), vyhrazené pro přenos dat modulovaných jednou ze zmíněných modulací. Více informací je možné najít v [12].

Nosný kmitočet LTE je nastavován v závislosti na koexistenčních scénářích a uvažované šířce B_{LTE} a během měření se mění v závislosti na parametru GB (ochranné pásmo mezi RF kanály). Výkonová úroveň signálu LTE, v této práci označena jako C , je udržována na konstantní hodnotě. Nastavení tohoto parametru proběhlo ve 40 MHz RF kanále pomocí spektrálního analyzátoru R&S FSP. Při uvažovaném šumovém čísle $NF = 7$ dB, je minimální požadovaná výkonová úroveň signálu LTE na vstupu přijímače daná vztahem [19], [22], [20]:

$$P_{min} = 10\log(kTB_{LTE}) + NF + CNR_{min} , \quad (1)$$

kde k je Boltzmannova konstanta ($1,38 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$), T je teplota (290 K), B_{LTE} šířku pásma LTE kanálu a CNR_{min} vyjadřuje velikost odstupe užitečného nosného signálu vůči šumu. Výsledná minimální úroveň P_{min} pro kanál $B_{LTE} = 20$ MHz závisí na parametru CNR_{min} , jehož hodnota byla volena tak, aby bylo potlačeno rušení a možné úniky signálu, které by mohly nastat při přenosu reálným přenosovým prostředím. Za předpokladu, že $CNR_{min} = 40$ dB je výsledná minimální úroveň P_{min} pro $B_{LTE} = 20$ MHz rovna -84 dBm. Na základě výpočtu byla zvolena vyšší hodnota $P_{min} = -60$ dBm. Navýšení P_{min} oproti teoretickému výpočtu sebou nese zvýšení výkonnosti LTE z pohledu lepší odolnosti vůči rušení. Experimentálním měřením pak byla ověřena správnost nastavení, které bylo ponecháno pro všechny velikosti B_{LTE} . Systémové parametry LTE uvažované při měření, jsou zobrazeny v Tab. 1.

Tab. 1 Systémové parametry pro signál LTE

Parametr	Hodnota
Šířka pásma	1,4; 5; 10; 20 MHz
Provozní mód	FDD
Vysílací výkon	-60 dBm
Modulace	QPSK, 16QAM, 64QAM
Střední frekvence	(2380÷2395) MHz
Kódový poměr	1/3 (Turbo)
Ochranný interval (CP)	4,7μs
Počet RB bloků	6, 25, 50, 60

Signál Wi-Fi je generován jako jeden ze standardů IEEE 802.11b/g/n v prvním kanále (s nosnou na 2412 MHz) s šířkou pásma 20 MHz. Pro každý standard pak byly zvoleny dvě přenosové rychlosti dané použitou modulací (viz. Tab. 2). Kvůli zjednodušení popisu je přenosová rychlost WLAN značena jako R_{WLAN} . Přehled systémových parametrů IEEE 802.11b/g/n je v

Tab. 3. Výkonová úroveň signálu WLAN, definovaná jako I , podléhá nastavení při vypnutém C . Její počáteční hodnota byla experimentálně nastavena na hodnotu $I = -50$ dBm. Během měření je dle daného intervalu postupně zvyšována (odpovídá snižování poměru C/I). Maximální hodnota nastavená na generátoru R&S SMU 200 byla kvůli zamezení poškození přístrojů stanovena na $I = 8$ dBm (na přístroji R&S FSP3 odpovídá ve 40 MHz kanále hodnotě $I = -8$ dBm). Měření probíhalo při neměnném středním kmitočtu WLAN, kdy se postupně zvyšovala hodnota I a na jednotlivých GB se odečítala hodnota parametru EVM.

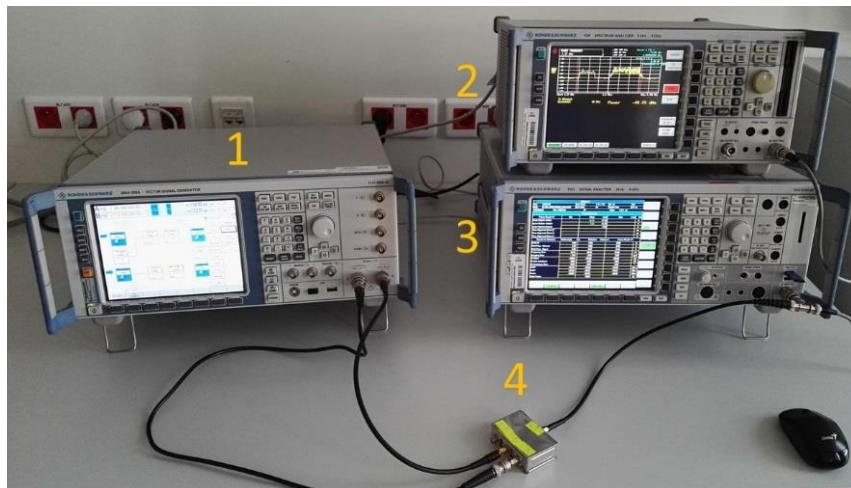
Tab. 2 Porovnání fyzických vrstev W-Fi standardů 802.11 pro zvolené přenosové rychlosti.

Standard	Modulační technika	Přenosová rychlost	Modulace
802.11b	Barkerova Sekvence	1 Mbps	DBPSK
	CCK	11 Mbps	DQPSK
802.11g	OFDM	6 Mbps	BPSK
	OFDM	54 Mbps	64QAM
802.11n	OFDM	13 Mbps	QPSK

Tab. 3 Systémové parametry pro WLAN IEEE 802.11b/g/n.

Parametr	Hodnota
Šířka kanálu	20 MHz
Vysílací výkon	(-50 ÷ -8) dBm
Střední frekvence	2412 MHz
Přenosová rychlost	(1; 11; 6; 54; 13) Mbps

Měření proběhlo na pracovišti zapojeném podle Obr. 17, jehož realizace a zapojení je prezentováno na Obr. 18.

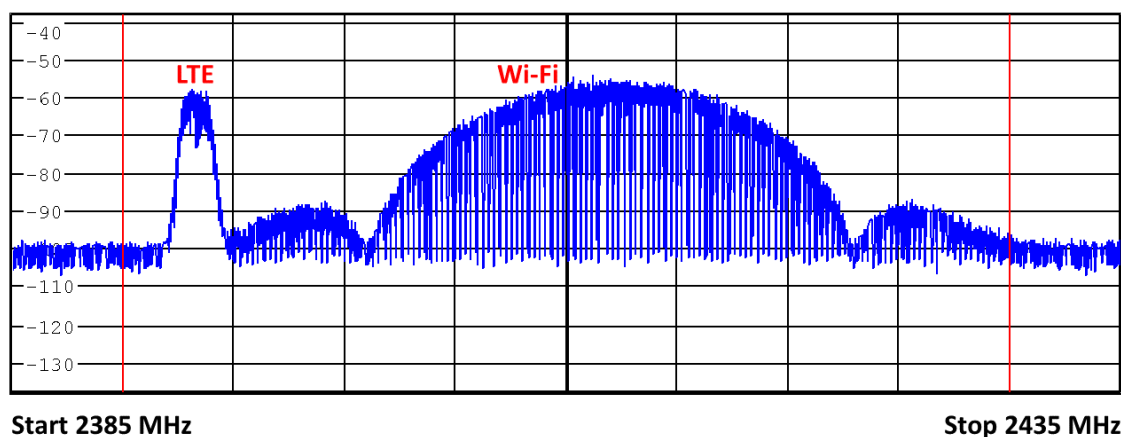


Obr. 18 Zapojení měřicího pracoviště 1) Signálový Generátor R&S SMU 200, 2) Spektrální analyzátor R&S FSP3, 3) Signálový analyzátor R&S FSQ s modulem LTE, 4) Wilkinsonův výkonový slučovač.

6 MĚŘENÍ VZÁJEMNÉ KOEXISTENCE MEZI LTE A WI-FI 802.11B

Tato kapitola se zabývá měřením koexistence z pohledu rušení LTE (provozovaném v kanálu č. 40) se signálem Wi-Fi, využívající technologii IEEE 802.11b. RF signál LTE je generován jako DL v módu FDD. V závislosti na koexistenčních scénářích byla spolu s nosným kmitočtem postupně zvyšována hodnota B_{LTE} od 1,4 MHz do 20 MHz. Pro vysílání datového toku dle standardu IEEE 802.11b byl dle koexistenčního scénáře zvolen 1. kanál s nosnou na frekvenci 2412 MHz, který zůstal po celou dobu měření neměnný.

Naznačení koexistenčních signálů WLAN (IEEE 802.11b) a LTE ve společném RF kanále lze vidět na Obr. 19.

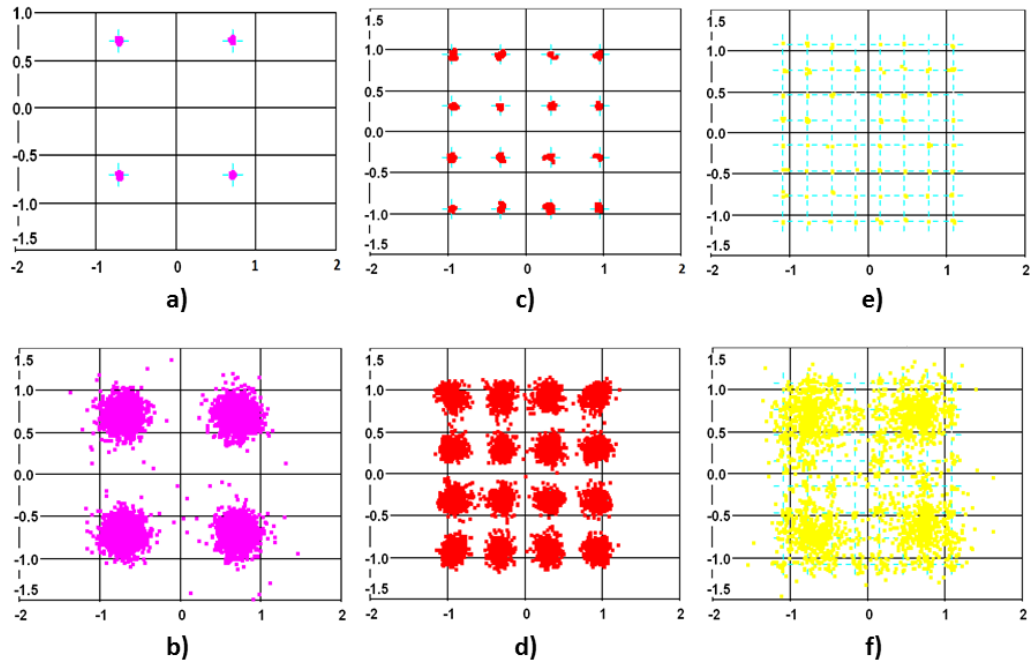


Obr. 19 Spektrum signálů Wi-Fi 802.11b a LTE s $B_{LTE} = 1,4$ MHz ve 40 MHz kanále (Video Bandwidth (VBW) = 10 kHz, Resolution Bandwidth (RBW) = 300 kHz, SPAN = 50 MHz).

6.1 Vyhodnocení měření vlivu Wi-Fi 802.11b na výkonnost LTE

V této části práce jsou zhodnoceny a popsány výsledky měření koexistence mezi LTE a WLAN, používající technologii IEEE 802.11b. Naměřené hodnoty jsou prezentovány jako závislost parametru GB na C/I . Pro názornost jsou zde prezentovány i závislosti EVM na C/I .

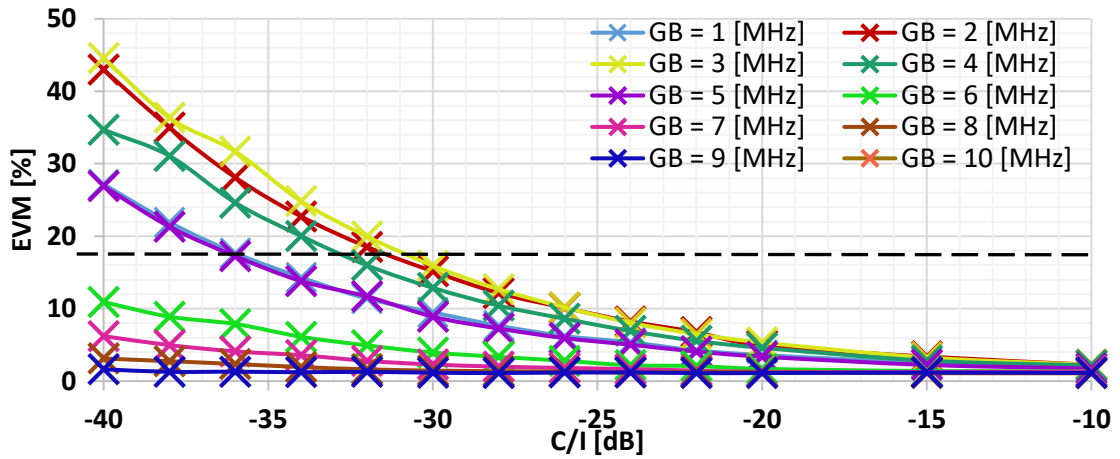
Podle teoretického předpokladu se zvyšujícím GB se zmenšuje vliv systému WLAN na LTE. Dále lze předpokládat, že s rostoucím výkonem WLAN se zhoršuje výkonnost systému LTE, zejména pak u vícestavových modulací. Rozdíl mezi rušeným a nerušeným LTE pro jednotlivé modulace QPSK, 16QAM a 64QAM je ve formě konstelačního diagramu naznačen na Obr. 20.



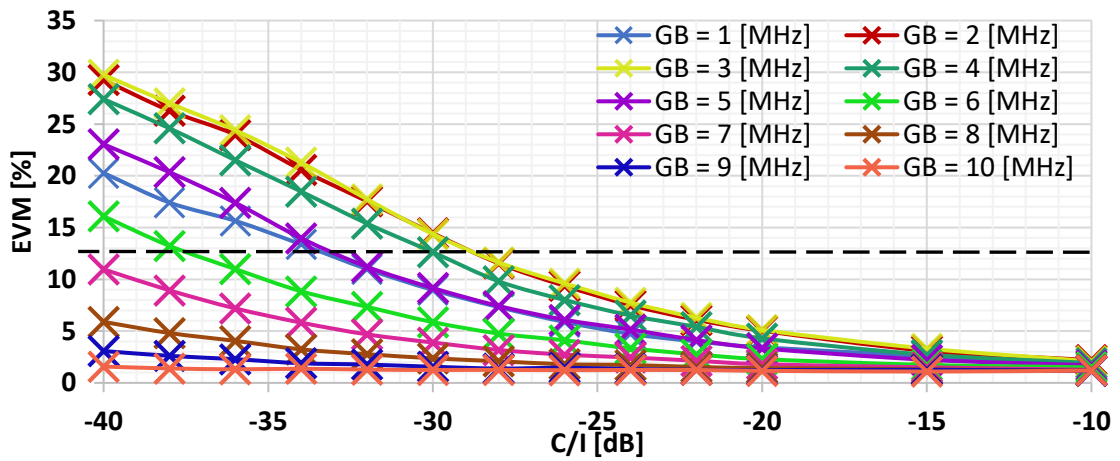
Obr. 20 Konstelační diagramy LTE signálu a) QPSK – bez rušení (referenční), b) QPSK – rušení systémem WLAN, c) 16QAM – bez rušení (referenční), d) 16QAM – rušení systémem WLAN, e) 64QAM – bez rušení (referenční), f) 64QAM – rušení systémem WLAN.

Vliv systému WLAN na výkonnost LTE s modulací QPSK, 16QAM a 64QAM, jako závislost parametru EVM na poměru C/I je zobrazen na Obr. 21, Obr. 22 a Obr. 23. Čárkovane jsou vyznačeny mezní hodnoty EVM, nad jejichž hodnotu dochází k výpadku signálu LTE. Jednotlivé křivky vyjadřují různé velikosti ochranného pásma GB mezi RF spektry LTE a WLAN.

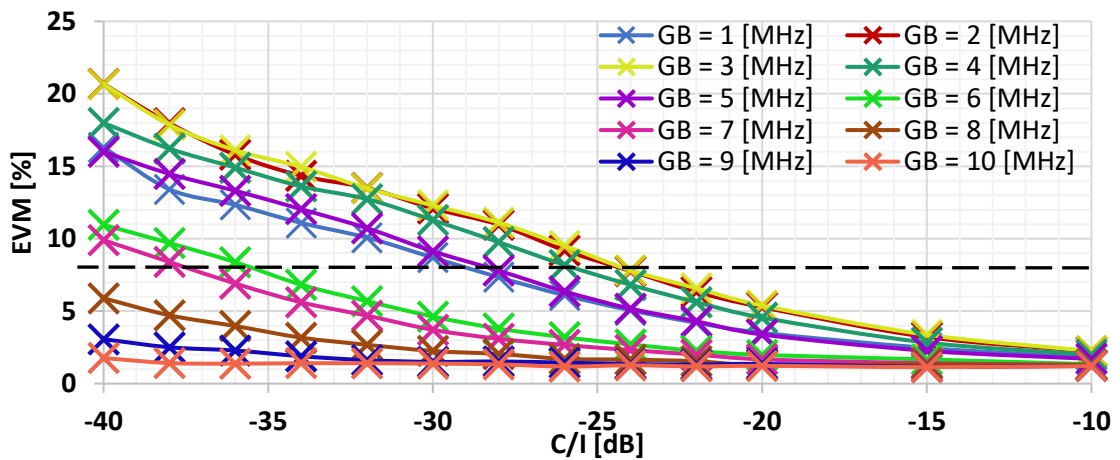
Z Obr. 21, Obr. 22 a Obr. 23 je jasné vidět, že s rostoucím rušícím výkonem signálu WLAN (I) se poměr C/I zmenšuje. Výsledné průběhy odpovídají teoretickému předpokladu, kdy se s rostoucím výkonem WLAN (I) zvyšuje chybovost přijatého signálu, zvláště u vícestavových modulací. Z uvedeného plyne, že 64QAM je náchylnější na rušení jak modulace QPSK. Při nejnižší hodnotě ochranného pásma ($GB = 1$ MHz) se výkonnost LTE systému, využívajícího modulaci QPSK, 16QAM a 64QAM, postupně snižuje do hodnot $C/I = -31$ dB, $C/I = -28$ dB a $C/I = -24$ dB. Po překročení těchto hodnot služby LTE vypadávají nebo nejsou měřitelné. Nárůst chybovosti EVM je závislý na použité modulaci, velikosti GB a poměru C/I . Zaručení bezchybného přenosu LTE signálu s QPSK, 16QAM a 64QAM lze dosáhnout vzájemným odstupem $GB = 6$ MHz, $GB = 7$ MHz, $GB = 8$ MHz. Je-li velikost ochranného pásma $GB = 1$ MHz, vykazuje LTE s modulací QPSK, 16QAM a 64QAM značnou odolnost vůči rušení způsobené systémem WLAN (IEEE 802.11b). Tento jev nastává pouze u LTE využívající kanál $B_{LTE} = 1,4$ MHz a může být zapříčiněn vzájemnou ortogonalitou vzniklou mezi subnosnými LTE a WLAN.



Obr. 21 Závislost parametru EVM signálu LTE s $B_{\text{LTE}} = 1,4$ MHz a modulací QPSK na C/I při různých GB (rušení Wi-Fi 802.11b s $R_{\text{WLAN}} = 1$ Mbps).



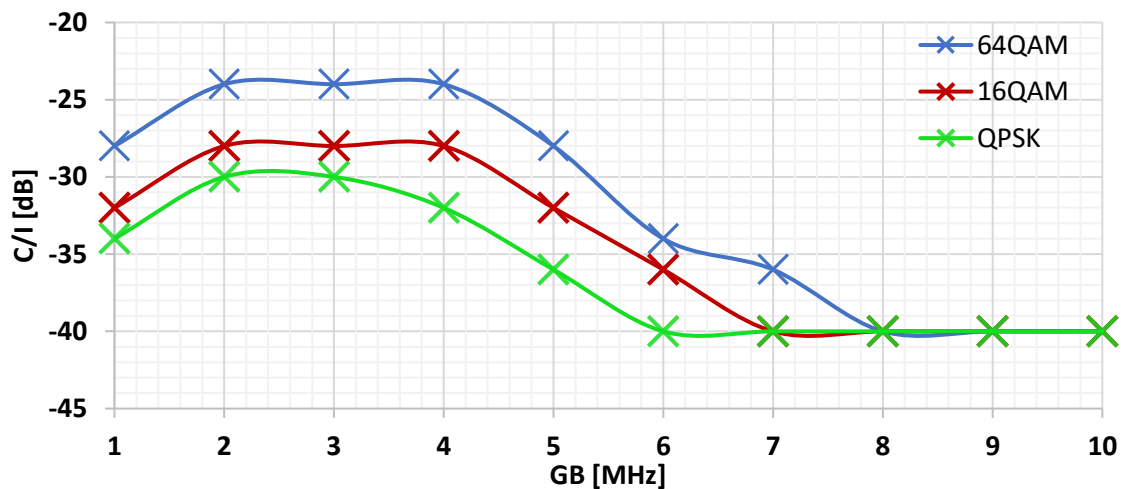
Obr. 22 Závislost parametru EVM signálu LTE s $B_{\text{LTE}} = 1,4$ MHz a modulací 16QAM na C/I při různých GB (rušení Wi-Fi 802.11b s $R_{\text{WLAN}} = 1$ Mbps).



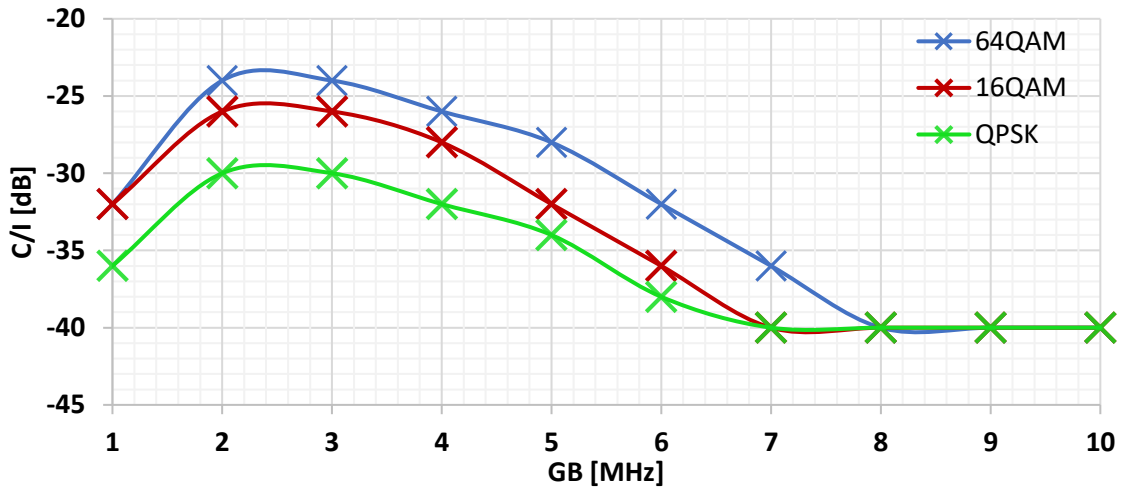
Obr. 23 Závislost parametru EVM signálu LTE s $B_{\text{LTE}} = 1,4$ MHz a modulací 64QAM na C/I při různých GB (rušení Wi-Fi 802.11b s $R_{\text{WLAN}} = 1$ Mbps).

Na dalších obrázcích (např. Obr. 24 a Obr. 25) jsou zobrazeny závislosti poměru C/I na GB , kde průběhy odpovídají situaci, kdy je LTE rušen maximální výkonovou úrovní WLAN, která nezpůsobí výpadky LTE a nedojde tak ke zhoršení kvality poskytovaných služeb. Po překročení této hodnoty signál LTE začne vypadávat a nelze jej synchronizovat. Tyto hodnoty byly stanoveny na základě naměřených výsledků. V grafech jsou prezentovány tři průběhy, které odpovídají použitým modulacím LTE (QPSK, 16QAM, 64QAM) pro konkrétní šířku pásma kanálu (B_{LTE}). Z těchto průběhů je jasně viditelný vliv ochranného pásma GB na kvalitu poskytovaných služeb LTE při vzájemné koexistenci s WLAN.

Na Obr. 24 a Obr. 25 jsou výše popsáním způsobem zobrazeny grafy, reflektující vliv WLAN (IEEE 802.11b) s přenosovou rychlostí $R_{WLAN} = 1$ Mbps a $R_{WLAN} = 11$ Mbps na výkonost LTE s šířkou pásma $B_{LTE} = 1,4$ MHz. Viditelným jevem je opět větší degradace signálu s modulací 64QAM oproti 16QAM a QPSK, který je patrný také pro další šířky pásma kanálu LTE ($B_{LTE} = 10$ MHz a $B_{LTE} = 20$ MHz), kromě $B_{LTE} = 5$ MHz. Navýšení přenosové rychlosti WLAN ($R_{WLAN} = 11$ Mbps) vede k nutnosti zvýšení ochranného pásma z $GB = 6$ MHz na $GB = 7$ MHz u QPSK, které zaručí bezchybný přenos LTE koexistujícího s WLAN při vzájemném poměru $C/I = -40$ dBm. Uvážíme-li odchylku způsobenou nepřesným odečítáním hodnot EVM, jsou výsledné průběhy degradace LTE s modulací 16QAM a 64QAM způsobené WLAN s $R_{WLAN} = 1$ Mbps a $R_{WLAN} = 11$ Mbps téměř shodné. Jinými slovy lze říci, že vliv WLAN na kvalitu poskytovaných služeb LTE ($B_{LTE} = 1,4$ MHz) s 16QAM, 64QAM se neliší v závislosti na hodnotě přenosové rychlosti WLAN (R_{WLAN}).

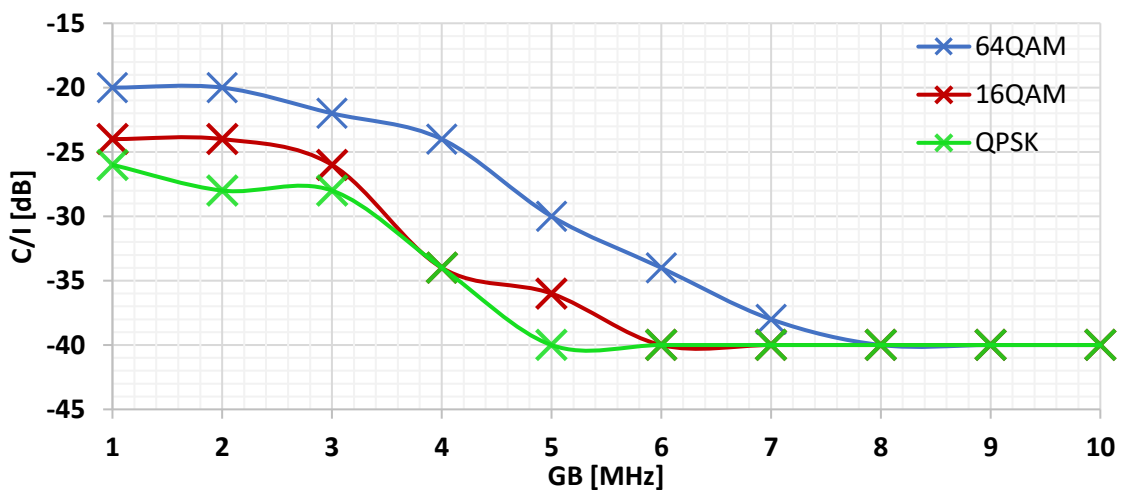


Obr. 24 Závislost C/I na GB pro LTE s $B_{LTE} = 1,4$ MHz při koexistenci se signálem WLAN IEEE 802.11b s $R_{WLAN} = 1$ Mbps. Hodnoty poměrů C/I reprezentují situaci, kdy je ještě možné přijímat a zpracovat LTE signál. Po překročení této hodnoty signál LTE už vypadává a nelze jej synchronizovat.

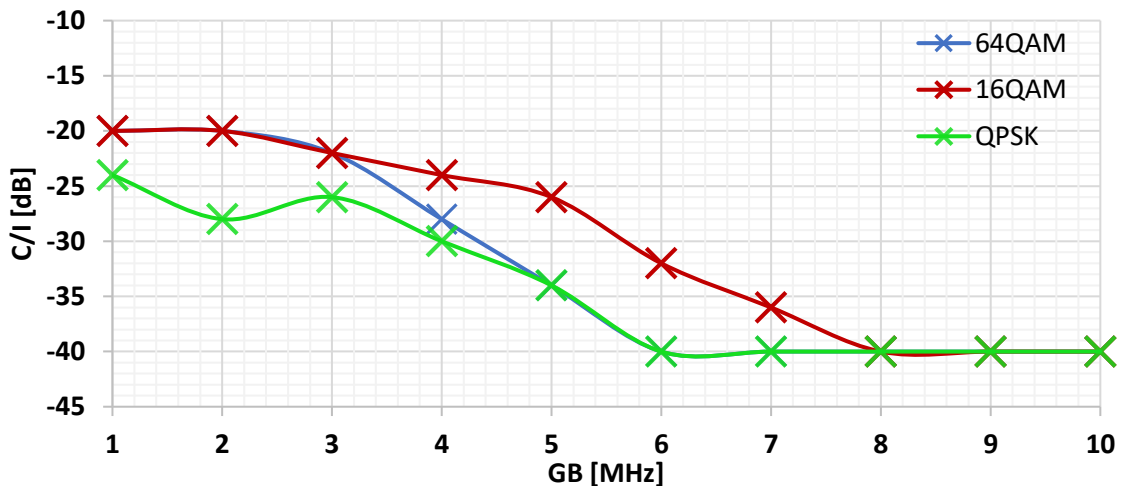


Obr. 25 Závislost C/I na GB pro LTE s $B_{LTE} = 1,4$ MHz při koexistenci se signálem WLAN IEEE 802.11b s $R_{WLAN} = 11$ Mbps.

Překvapivě rozdílný průběh trendu znázorňujícího zhoršení kvality poskytovaných služeb LTE způsobený vlivem signálu WLAN nastává při zvýšení šířky pásma LTE na $B_{LTE} = 5$ MHz, jak je to vidět na Obr. 26 a Obr. 27. Jako nejvíce náchylný na rušení způsobené WLAN s $R_{WLAN} = 11$ Mbps se zdá být LTE s 16QAM. Ten je ovlivněn WLAN do vzájemného odstupu $GB = 8$ MHz. Navýšení přenosové rychlosti WLAN ($R_{WLAN} = 11$ Mbps) vyžaduje pro udržení kvality poskytovaných služeb zvýšení ochranného pásma pro QPSK z $GB = 6$ MHz (rušení WLAN s $R_{WLAN} = 1$ Mbps) na $GB = 7$ MHz (pro WLAN s $R_{WLAN} = 11$ Mbps). Tímto opatřením se zaručí bezchybný přenos LTE s $B_{LTE} = 5$ MHz ($C = -60$ dBm) provozovaného v blízkém RF kane s WLAN ($I = -20$ dBm) při vzájemném poměru $C/I = -40$ dBm.



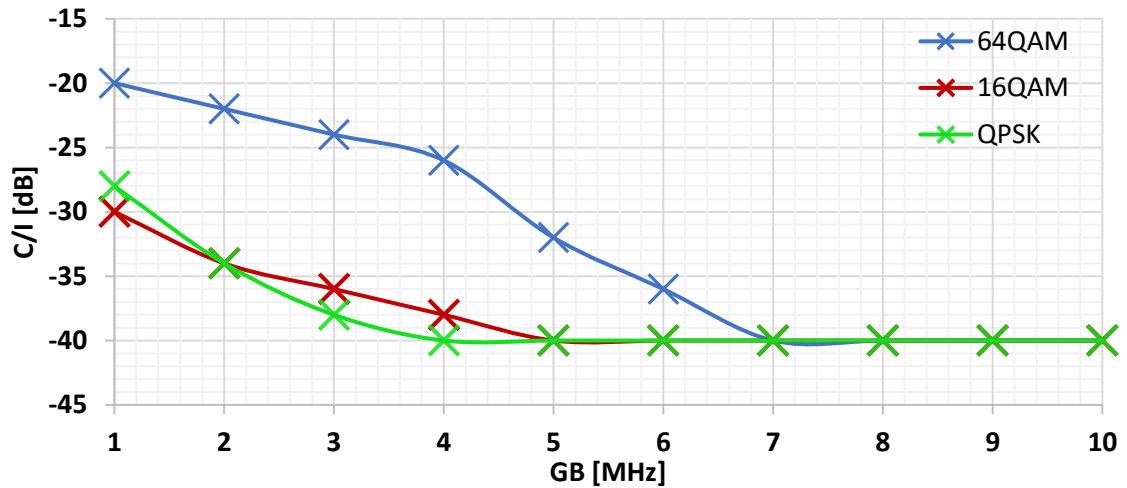
Obr. 26 Závislost C/I na GB pro LTE s $B_{LTE} = 5$ MHz při koexistenci se signálem WLAN IEEE 802.11b s $R_{WLAN} = 1$ Mbps.



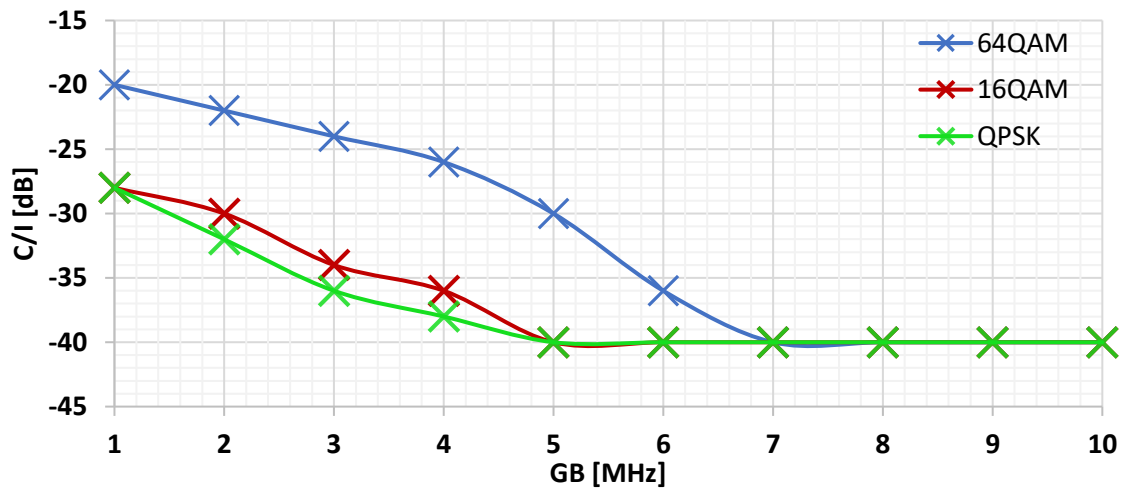
Obr. 27 Závislost C/I na GB pro LTE s $B_{LTE} = 5$ MHz při koexistenci se signálem WLAN IEEE 802.11b s $R_{WLAN} = 11$ Mbps.

Srovnáním předchozích průběhů vzájemné interference WLAN a LTE využívající $B_{LTE} = 1,4$ MHz a $B_{LTE} = 5$ MHz, jsou pro zamezení nežádoucích vlivů WLAN vedoucí k nedetekování LTE signálu, zapotřebí viditelně větší výkonové nároky (poměr C/I). Jinými slovy lze říci, že provoz LTE v kanále s šířkou pásma $B_{LTE} = 5$ MHz je vůči $B_{LTE} = 1,4$ MHz náchylnější na rušení systémem WLAN. Využívali-li LTE pro přenos kanál s šířkou pásma $B_{LTE} = 10$ MHz, snížila se v porovnání s $B_{LTE} = 5$ MHz nároky na výkon LTE, a tedy i na poměr C/I . Podobný jev je pozorovatelný i při měření propustnosti WLAN ovlivněné LTE, který je popsán v práci [23].

Na Obr. 28 a Obr. 29 jsou prezentované výsledky měření koexistence mezi LTE využívajícího kanál $B_{LTE} = 10$ MHz a IEEE 802.11b s $R_{WLAN} = 1$ Mbps a s $R_{WLAN} = 11$ Mbps. Nároky na poskytování LTE služeb při koexistenci s IEEE 802.11b jsou pro obě přenosové rychlosti WLAN ($R_{WLAN} = 1$ Mbps a $R_{WLAN} = 11$ Mbps) téměř shodné. Zvyšování úrovně výkonu WLAN má za následek poměrně značnou degradaci LTE s modulací 64QAM, v porovnání s QPSK a 16QAM. Zamezení vlivu WLAN na LTE s 64QAM je oproti ostatním modulacím, které vykazují shodné průběhy, náročnější z pohledu navýšení vzájemného poměru C/I a vzájemného odstupu GB . Zvýšení poměru C/I vypovídá o snížení vysílacího výkonu WLAN (I) vůči LTE. Při vysílání WLAN ($I = -20$ dBm) s menším vzájemným odstupem než $GB = 7$ MHz, vyžaduje LTE s modulací 64QAM kvůli udržení maximální přijatelné úrovně chybovosti snížení vysílacího výkonu WLAN, potažmo navýšení vysílacího výkonu LTE (který byl během měření konstantní). Jsou-li oba systémy provozovány se vzájemným odstupem $GB = 1$ MHz, je správná detekce LTE s 64QAM, 16QAM a QPSK zaručena při vzájemném poměru $C/I = -20$ dB, $C/I = -28$ dB a $C/I = -30$ dB.

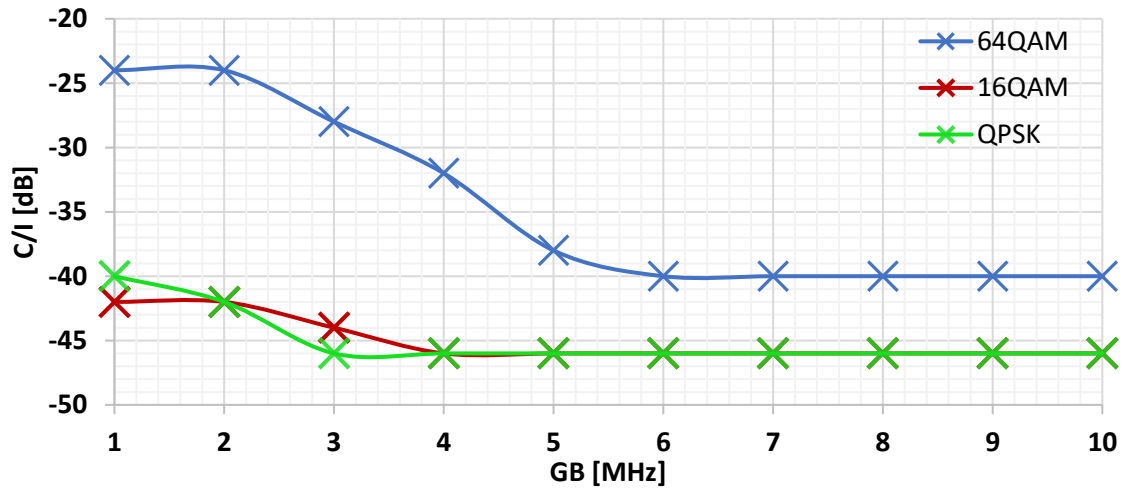


Obr. 28 Závislost C/I na GB pro LTE s $B_{LTE} = 10$ MHz při koexistenci se signálem WLAN IEEE 802.11b s $R_{WLAN} = 1$ Mbps.

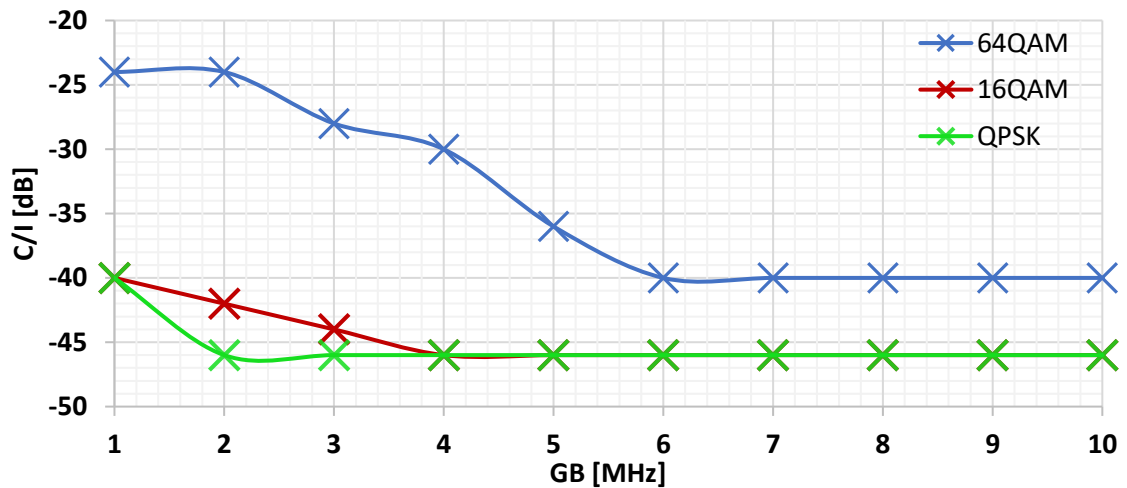


Obr. 29 Závislost C/I na GB pro LTE s $B_{LTE} = 10$ MHz při koexistenci se signálem WLAN IEEE 802.11b s $R_{WLAN} = 11$ Mbps.

Vliv WLAN s přenosovou rychlostí $R_{WLAN} = 1$ Mbps a $R_{WLAN} = 11$ Mbps na LTE s $B_{LTE} = 20$ MHz je zobrazen na Obr. 30 a Obr. 31. Kanál LTE byl naplněn pouze s 60 RB. Maximální hodnota WLAN byla pro měření velikosti degradace LTE s 64QAM kvůli špatné detekci signálu nastavena stejně jako v předchozích případech ($I = -20$ dBm). Jelikož vykazovaly signály LTE s 16QAM a QPSK dobrou odolnost vůči rušení (WLAN), byl u měření těchto modulací maximální výkon WLAN zvýšen na $I = -15$ dBm. Z těchto změn je patrné, že WLAN ovlivňuje nejvíce LTE signály s modulací 64QAM, jak tomu bylo i v předchozím případě ($B_{LTE} = 10$ MHz). Ochranným pásmem $GB = 6$ MHz lze předejít celkovému vlivu WLAN (s $R_{WLAN} = 1$ Mbps a $R_{WLAN} = 11$ Mbps) na kvalitu poskytovaných služeb LTE.



Obr. 30 Závislost C/I na GB pro LTE s $B_{LTE} = 20$ MHz při koexistenci se signálem WLAN IEEE 802.11b s $R_{WLAN} = 1$ Mbps.

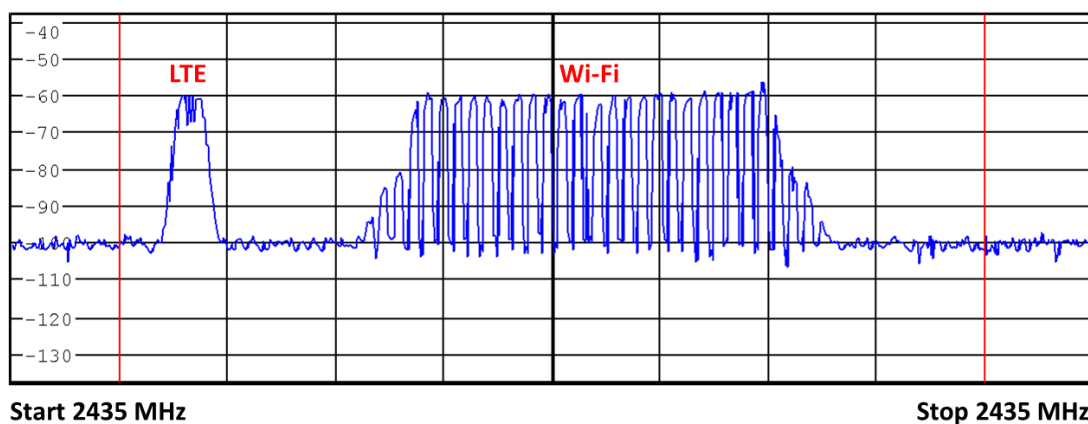


Obr. 31 Závislost C/I na GB pro LTE s $B_{LTE} = 20$ MHz při koexistenci se signálem WLAN IEEE 802.11b s $R_{WLAN} = 11$ Mbps.

Při porovnání s LTE kanálem $B_{LTE} = 10$ MHz vykazuje kanál s $B_{LTE} = 20$ MHz menší výkonové nároky pro dosažení přijatelné chybovosti. Jinými slovy lze říci, že s rostoucí šířkou pásma LTE kanálu se snižují nároky na vysílací výkon LTE (tedy lze využít nižší hodnoty C/I), které umožní bezchybné poskytování LTE služeb při koexistenci se systémem WLAN (IEEE 802.11b). Systém LTE s QPSK a 16QAM, využívající kanál $B_{LTE} = 20$ MHz, se vůči rušícímu WLAN (IEEE 802.11b) jeví ze všech uvedených velikostí LTE kanálů (1,4 MHz; 5 MHz a 10 MHz) jako nejodolnější. Tento jev může být způsoben rozdílným rozložením signálu do šířky pásma jednotlivých kanálů. Kanály jsou v systému LTE obsazeny z 90% [22]. Využívá-li tedy LTE kanál s $B_{LTE} = 5$ MHz, jsou uživatelská data reálně obsazena pouze v $B_{LTE_REALNÝ} = 4,5$ MHz, při použití $B_{LTE} = 20$ MHz je obsazeno pouze $B_{LTE_REALNÝ} = 18$ MHz [22]. Tato skutečnost může mít zásadní vliv na reálnou velikost GB a následně na výsledný průběh degradace LTE.

7 MĚŘENÍ VZÁJEMNÉ KOEXISTENCE MEZI LTE A WI-FI 802.11G

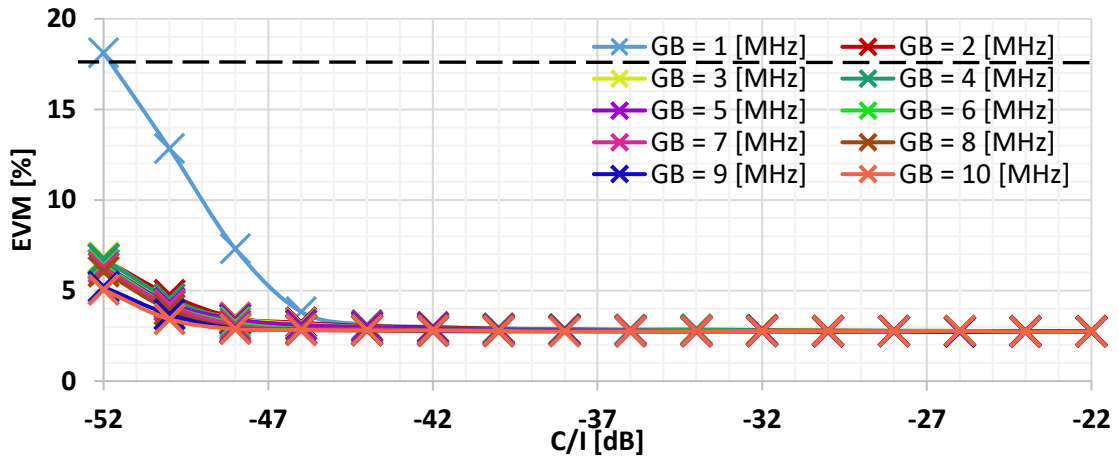
V této kapitole jsou zobrazeny a popsány výsledky z měření koexistence mezi LTE a Wi-Fi 802.11g s přenosovou rychlostí $R_{WLAN} = 6$ Mbps a $R_{WLAN} = 54$ Mbps. Naměřené hodnoty jsou tak jako v předchozí Kapitole 6 prezentovány jako závislost parametru C/I na GB . Pro názornost jsou zde opět uvedeny některé závislosti EVM na C/I . Standard IEEE 802.11g používá na fyzické vrstvě, oproti předchozímu (IEEE 802.11b), techniku OFDM. To znamená, že IEEE 802.11g při koexistenci s LTE může ovlivnit celkovou výkonnost systému LTE odlišným způsobem. Naznačení koexistenčních signálů WLAN (IEEE 802.11b) a LTE ve společném RF kanále lze vidět na Obr. 32.



Obr. 32 Spektrum signálů Wi-Fi 802.11g a LTE s $B_{LTE} = 1,4$ MHz ve 40 MHz kanále VBW = 10 kHz, RBW = 300 kHz, SPAN = 50 MHz).

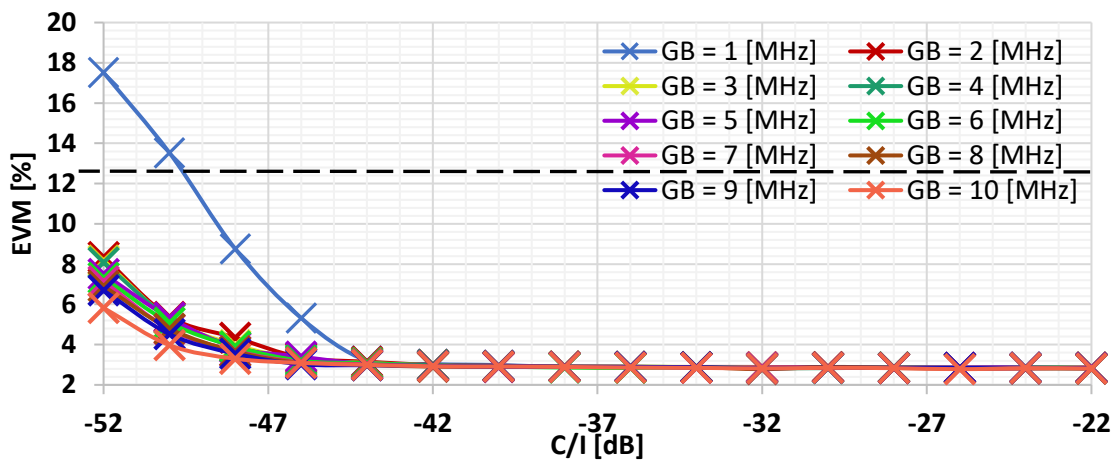
7.1 Vyhodnocení měření vlivu Wi-Fi 802.11g na výkonnost LTE

V této části jsou diskutovány výsledky měření vzájemné koexistence mezi LTE a Wi-Fi používající technologii IEEE 802.11g. Výkonová úroveň LTE byla nastavena jako v předchozích měřeních ($C = -60$ dBm). Oproti nastavení v předchozí kapitole, bylo v některých případech zapotřebí uvažovat vyšší vysílací výkon systému WLAN ($I = -8$ dBm), který vedl ke snížení poměru $C/I = -52$ dB. Důvod této změny je zřejmý při srovnání vlivu IEEE 802.11b (viz. Obr. 21) a IEEE 802.11g na LTE využívající kanál s šířkou pásma $B_{LTE} = 1,4$ MHz (viz. Obr. 33). Z uvedeného plyne, že v případě IEEE 802.11g dochází k menším interferencím způsobujících degradaci LTE. Jedním z důvodů může být důslednější zamezení výkonových úniků spektrální maskou (oproti IEEE 802.11b), nebo fakt, že oba systémy (LTE a WLAN) využívají technologii OFDM. Z naměřených hodnot je patrné splnění teoretických předpokladů, kdy se zvyšujícím ochranným pásmem GB se zmenšuje vliv systému WLAN na LTE a s rostoucím výkonem WLAN se zhoršuje výkonnost systému LTE, zejména pak u vícecestavových modulací.

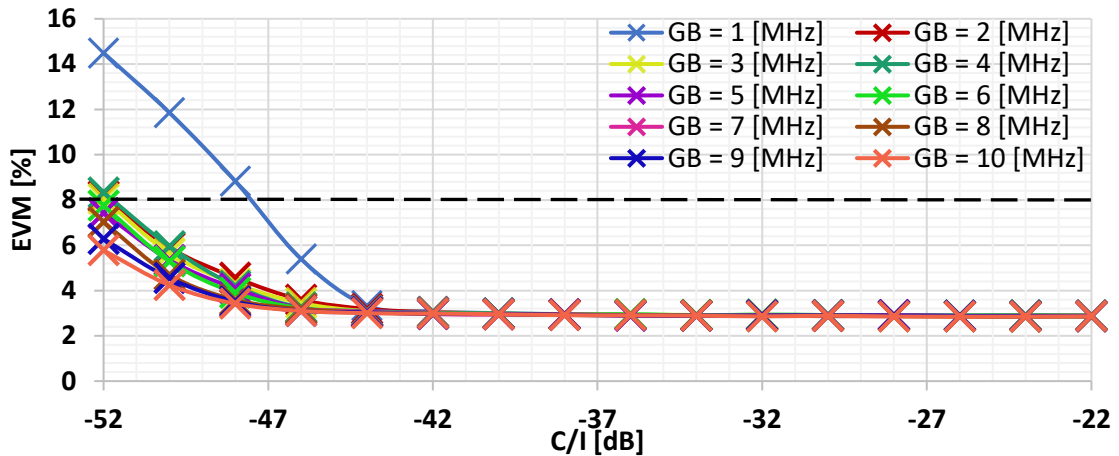


Obr. 33 Závislost parametru EVM signálu LTE s $B_{\text{LTE}} = 1,4$ MHz a modulací QPSK na C/I pro GB (rušení Wi-Fi 802.11g s $R_{\text{WLAN}} = 6$ Mbps).

Rozdílný vliv IEEE 802.11g na LTE lze pozorovat na Obr. 33, Obr. 34 a Obr. 35. Uvedené obrázky prezentující závislosti vlivu rušení IEEE 802.11g s $R_{\text{WLAN}} = 6$ Mbps na LTE s $B_{\text{LTE}} = 1,4$ MHz pro několik velikostí ochranného pásma GB . Jednotlivé křivky vyjadřují různé velikosti ochranného pásma GB mezi RF spektry LTE a WLAN. Dle očekávání se modulace QPSK vůči rušení jeví nejodolnější. Prakticky k výpadku detekce LTE signálu s modulací QPSK a 16QAM dochází při vzájemném RF odstupu $GB = 1$ MHz, a to za předpokladu, že se výkonový poměr obou systémů rovná $C/I = -52$ dB a $C/I = -50$ dB (výkon WLAN (I) je o 8 dB a 10 dB vyšší než výkon LTE (C)). Je-li v systému LTE využívána modulace 64QAM, může při vzájemném výkonovém poměru $C/I = -52$ dB docházet k výpadkům LTE signálu při vzájemných odstupech od $GB = 1$ MHz do $GB = 4$ MHz. Pro udržení stejné kvality poskytovaných služeb LTE v případě rušení IEEE 802.11g není zapotřebí navýšení poměru C/I , jako v případě koexistence LTE s IEEE 802.11b. Při vzájemné koexistenci LTE a WLAN kdy dosahuje hodnota ochranného pásma nízkých hodnot ($GB = 1$ MHz), nevyžaduje LTE pro poskytování služeb vysoký poměr C/I . Jinými slovy lze říci, že v reálných podmínkách by signál LTE ($B_{\text{LTE}} = 1,4$ MHz) nevyžadoval o poznání vyšší vysílací výkon než WLAN.

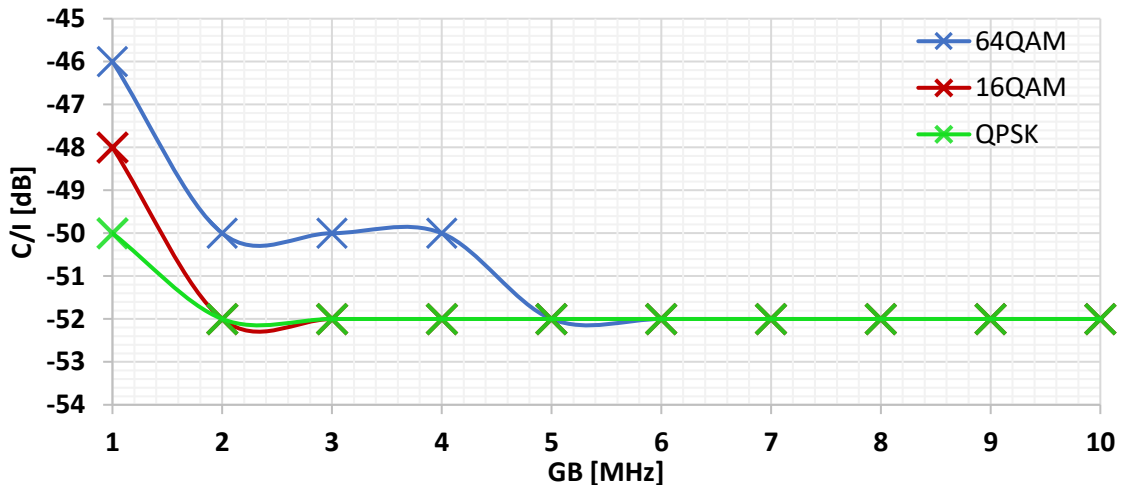


Obr. 34 Závislost parametru EVM signálu LTE s $B_{\text{LTE}} = 1,4$ MHz a modulací 16QAM na C/I pro GB (rušení Wi-Fi 802.11g s $R_{\text{WLAN}} = 6$ Mbps).

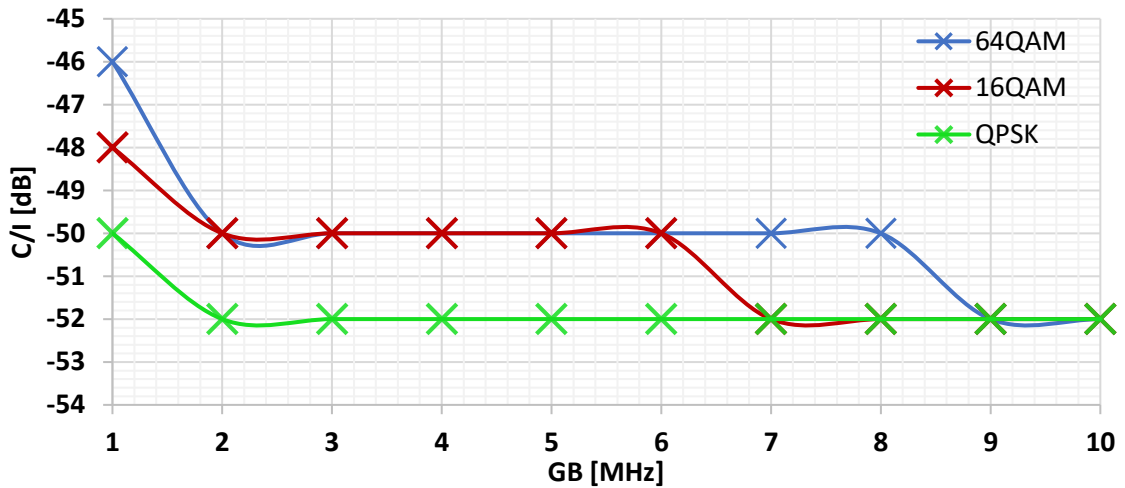


Obr. 35 Závislost parametru EVM signálu LTE s $B_{\text{LTE}} = 1,4$ MHz a modulací 64QAM na C/I pro GB (rušení Wi-Fi 802.11g s $R_{\text{WLAN}} = 6$ Mbps).

Na Obr. 36 a Obr. 37 jsou zobrazeny průběhy závislostí poměru C/I na velikosti ochranného pásma GB , odpovídající naměřeným výsledkům koexistence mezi LTE využívajícího kanál $B_{\text{LTE}} = 1,4$ MHz a IEEE 802.11g s $R_{\text{WLAN}} = 6$ Mbps a s $R_{\text{WLAN}} = 54$ Mbps. Výpadky detekce LTE způsobené WLAN se pro obě uvedené rychlosti projevují odlišně, zejména u vícestavových modulací. S větší přenosovou rychlostí standardu IEEE 802.11g ($R_{\text{WLAN}} = 54$ Mbps) vzrůstá degradace LTE signálu. Při vysílání WLAN ($I = -8$ dBm) s uvažovanou rychlostí $R_{\text{WLAN}} = 54$ Mbps na nosné frekvenci, která zapříčiní menší ochranné pásmo než $GB = 7$ MHz, vyžaduje LTE s modulací 16QAM poměr $C/I = -50$ dB. Obdobně je zapotřebí zvýšit výkon LTE s 64QAM (tedy zvýšit poměr C/I , při měření odpovídá snížení výkonu WLAN (I)) ovšem již při vzájemném odstupu $GB = 9$ MHz.

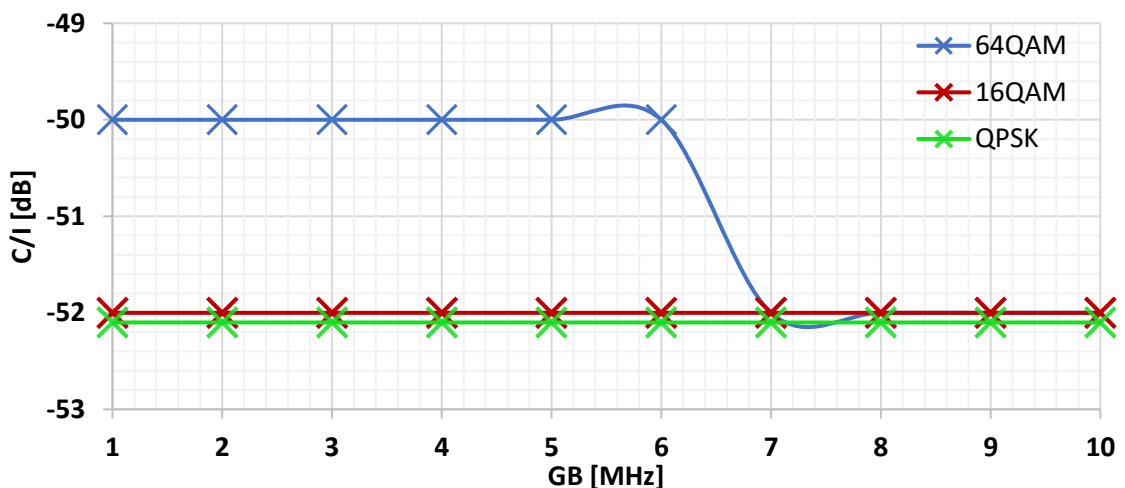


Obr. 36 Závislost C/I na GB pro LTE s $B_{\text{LTE}} = 1,4$ MHz při koexistenci se signálem WLAN IEEE 802.11g s $R_{\text{WLAN}} = 6$ Mbps. Hodnoty poměrů C/I reprezentují situaci, kdy je ještě možné přijímat a zpracovat LTE signál. Po překročení této hodnoty signál LTE už vypadává a nelze jej synchronizovat.

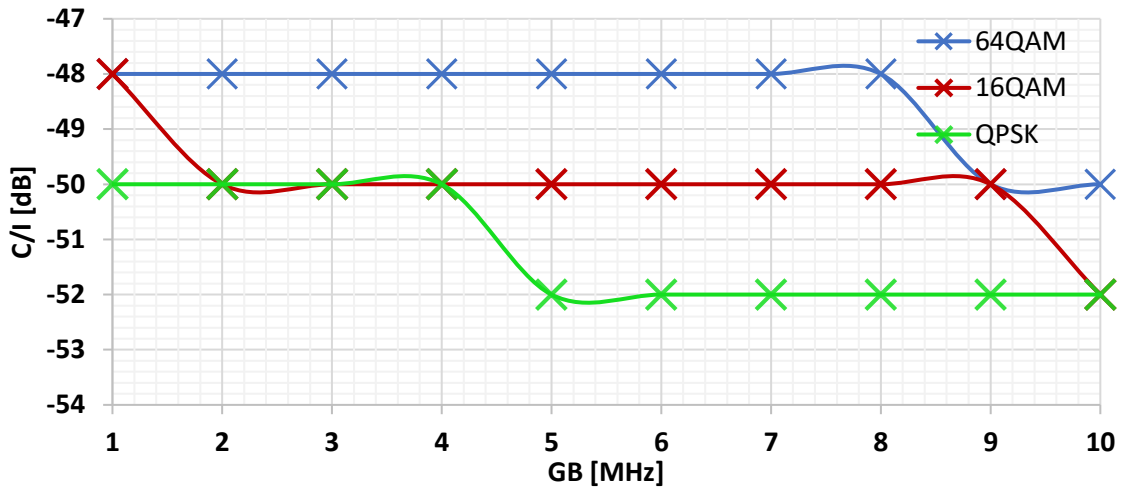


Obr. 37 Závislost C/I na GB pro LTE s $B_{LTE} = 1,4$ MHz při koexistenci se signálem WLAN IEEE 802.11g s $R_{WLAN} = 54$ Mbps.

Se zvýšením šířky pásma LTE kanálu na $B_{LTE} = 5$ MHz, nedochází u modulace QPSK a 16QAM vlivem koexistence s IEEE 802.11g s $R_{WLAN} = 6$ Mbps ke zhoršení kvality poskytovaných služeb ani při nejnižší hodnotě ochranného pásma (viz. Obr. 38). Avšak v případě modulace 64QAM využívané s menším vzájemným odstupem než $GB = 7$ MHz, je potřeba kvůli zamezení interferencí způsobených WLAN uvažovat $C/I = -50$ dB. Signál IEEE 802.11g s $R_{WLAN} = 54$ Mbps má v porovnání s rušením WLAN využívajícím nižší přenosovou rychlost mnohem větší vliv na degradaci, jak je vidět na Obr. 39. Je-li u LTE použita modulace QPSK, popřípadě 16QAM, lze případnému zhoršení kvality poskytovaných služeb předejít zvýšením ochranného pásma na $GB = 5$ MHz, popřípadě $GB = 10$ MHz. Tím se zcela omezí vliv WLAN na LTE. Systém LTE s $B_{LTE} = 5$ MHz může při dodržení těchto výše zmíněných odstupů GB koexistovat s WLAN (IEEE 802.11g), jsou-li jejich výkonové poměry rovny $C/I = -52$ dB.

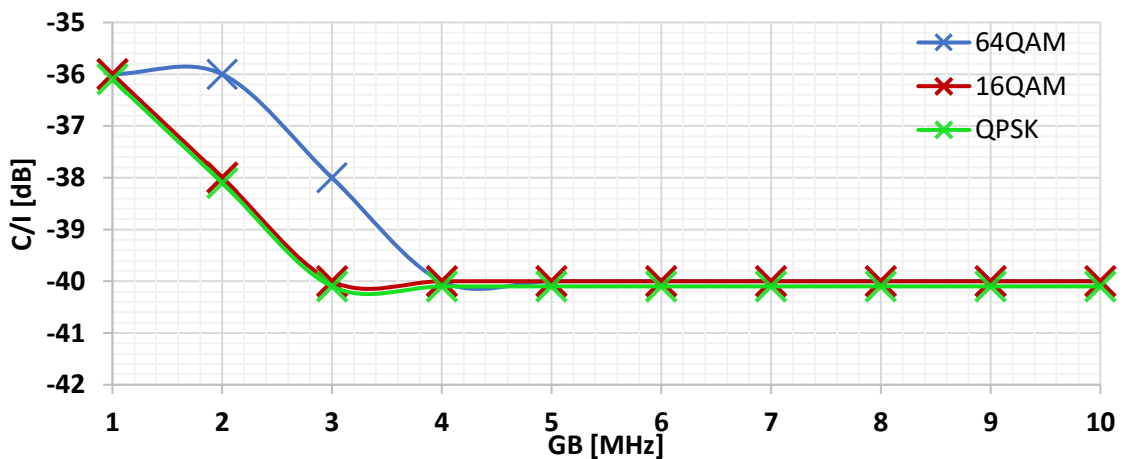


Obr. 38 Závislost C/I na GB pro LTE s $B_{LTE} = 5$ MHz při koexistenci se signálem WLAN IEEE 802.11g s $R_{WLAN} = 6$ Mbps.

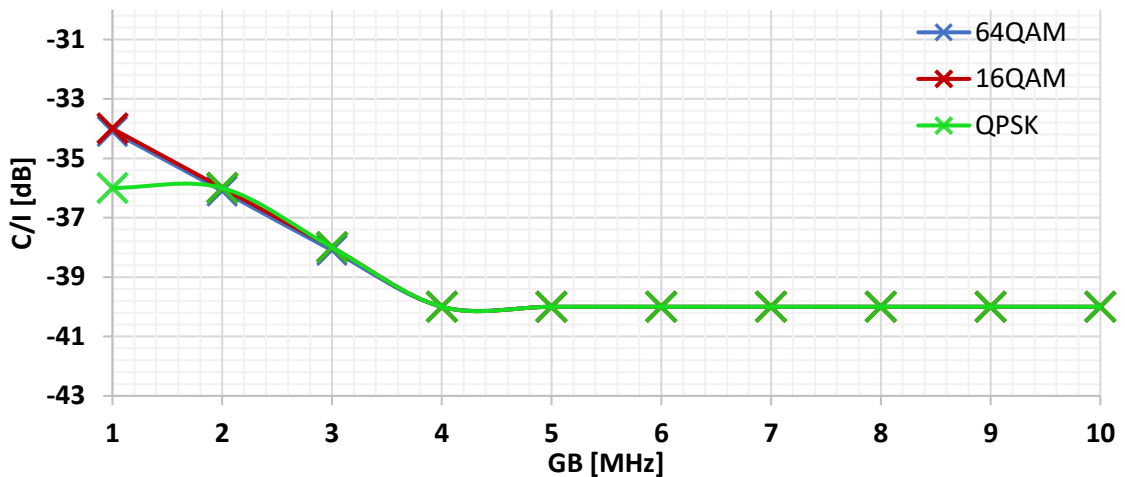


Obr. 39 Závislost C/I na GB pro LTE s $B_{LTE} = 5$ MHz při koexistenci se signálem WLAN IEEE 802.11g s $R_{WLAN} = 54$ Mbps.

V případě LTE kanálu s $B_{LTE} = 10$ MHz, nastává znatelný nárůst chybovosti vlivem degradace způsobené WLAN (IEEE 802.11g s $R_{WLAN} = 6$ Mbps a $R_{WLAN} = 54$ Mbps) (viz. Obr. 40 a Obr. 41). Kvůli výpadkům a špatné detekci LTE signálů způsobené vysokým maximálním výkonem WLAN ($I = -8$ dBm) bylo zapotřebí tuto hodnotu snížit ($I = -20$ dBm). Z obrázků (Obr. 40 a Obr. 41) lze určit, že kvůli omezení vlivu WLAN využívajícího IEEE 802.11g s $R_{WLAN} = 6$ Mbps a IEEE 802.11g s $R_{WLAN} = 54$ Mbps na výkonost LTE je zapotřebí udržovat vzájemný odstup $GB = 3$ MHz a $GB = 4$ MHz. V případě koexistence mezi LTE (64QAM) s $B_{LTE} = 10$ MHz a IEEE 802.11g s $R_{WLAN} = 6$ Mbps dochází vlivem interferencí ke značnému poklesu výkonosti LTE. V tomto případě je pro poskytování LTE služeb zapotřebí většího vzájemného poměru C/I , v porovnání s IEEE 802.11g s $R_{WLAN} = 54$ Mbps.

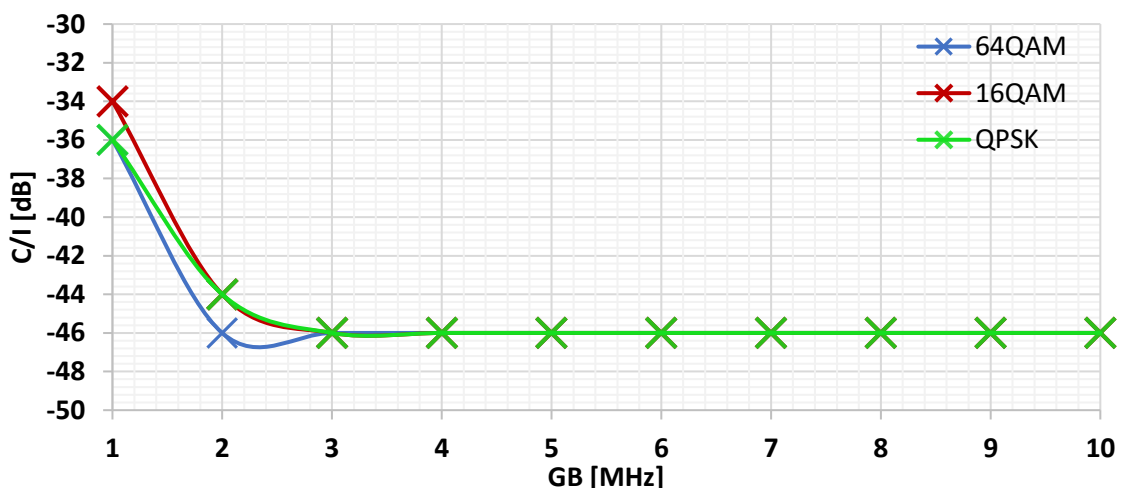


Obr. 40 Závislost C/I na GB pro LTE s $B_{LTE} = 10$ MHz při koexistenci se signálem WLAN IEEE 802.11g s $R_{WLAN} = 6$ Mbps.

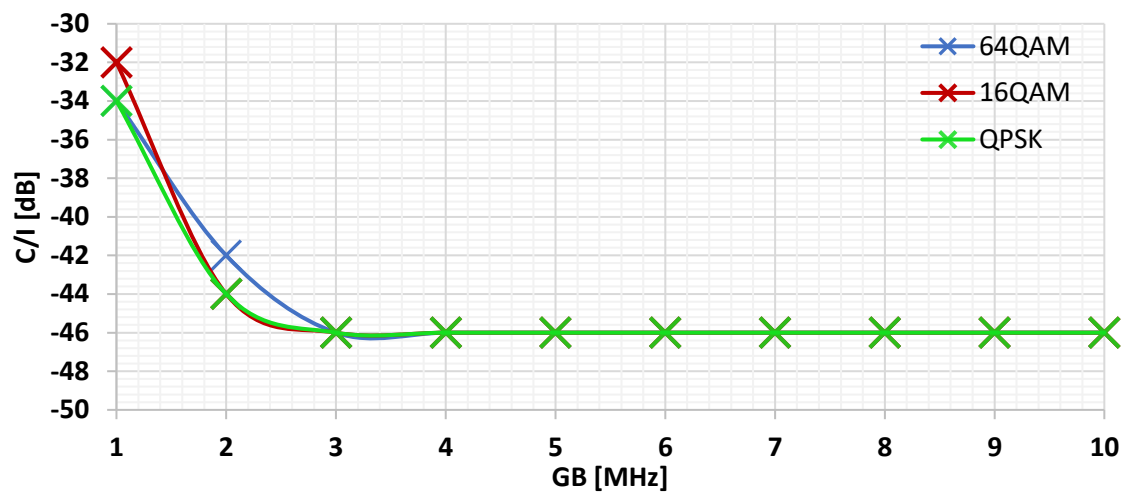


Obr. 41 Závislost C/I na GB pro LTE s $B_{LTE} = 10$ MHz při koexistenci se signálem WLAN IEEE 802.11g s $R_{WLAN} = 54$ Mbps.

Z výsledků měření vzájemné koexistence mezi LTE s kanálem $B_{LTE} = 20$ MHz a IEEE 802.11g s $R_{WLAN} = 6$ Mbps a $R_{WLAN} = 54$ Mbps je v porovnání s použitím $B_{LTE} = 10$ MHz patrný menší vliv na výkonost LTE. Následně byla kvůli značným výpadkům LTE snížena maximální výkonová úroveň WLAN na $I = -14$ dBm. Opět jsou viditelné rozdílné průběhy křivek způsobené odlišným vlivem WLAN, využívající IEEE 802.11g s $R_{WLAN} = 6$ Mbps a $R_{WLAN} = 54$ Mbps viz. Obr. 42 a Obr. 43. Největší vliv WLAN na výkonost LTE vzniká při používání systémů v blízkých RF pásmech, které odpovídají vzájemnému odstupu $GB = 1$ MHz. V tomto případě je kvůli zamezení výpadkům LTE vzniklých vzájemnou interferencí s IEEE 802.11g s $R_{WLAN} = 6$ Mbps, potřebné dosáhnout poměru $C/I = -34$ dB. Tato hodnota se při koexistenci LTE a IEEE 802.11g s $R_{WLAN} = 54$ Mbps pro modulace 16QAM a QPSK mírně liší, avšak uvažovaný poměr C/I i v tomto případě zaručí odolnost LTE. Vzájemný RF odstup $GB = 3$ MHz umožní systému LTE bezproblémové poskytování služeb.



Obr. 42 Závislost C/I na GB pro LTE s $B_{LTE} = 20$ MHz při koexistenci se signálem WLAN IEEE 802.11g s $R_{WLAN} = 6$ Mbps.



Obr. 43 Závislost C/I na GB pro LTE s $B_{\text{LTE}} = 20$ MHz při koexistenci se signálem WLAN IEEE 802.11g s $R_{\text{WLAN}} = 54$ Mbps.

8 MĚŘENÍ VZÁJEMNÉ KOEXISTENCE MEZI LTE A WI-FI 802.11N

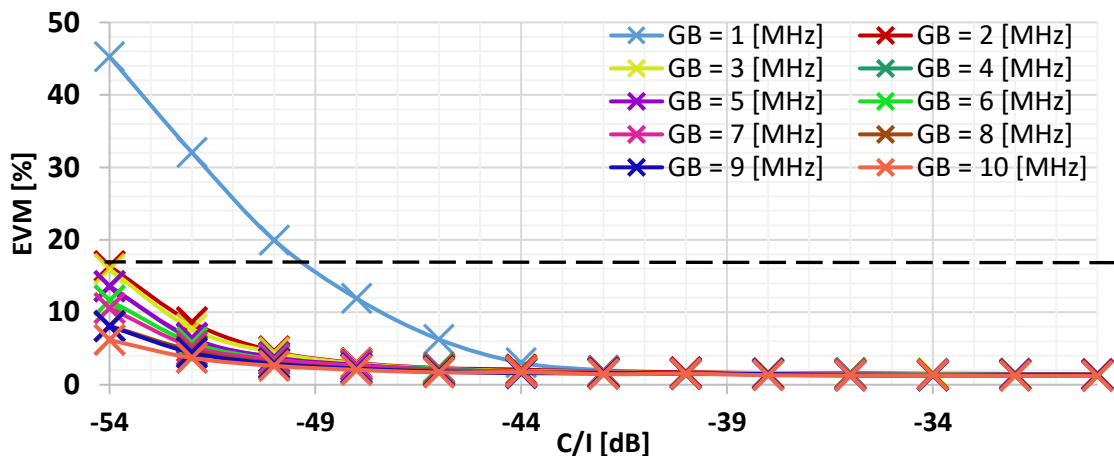
V této kapitole je pro ukázkou naznačena koexistence mezi LTE, generovaného jako DL v módu FDD a Wi-Fi, využívající technologii IEEE 802.11n. Jak už bylo naznačeno v Kapitole 1, standard IEEE 802.11n může pro přenos využít techniku MIMO nebo sloučení několika kanálů. V tomto měření je však uvažován přenos pomocí SISO v jednom 20 MHz kanále, vysílaném na nosné frekvenci 2412 MHz, která zůstala po celou dobu měření neměnná. Přenosová rychlost WLAN (IEEE 802.11n) byla zvolena na $R_{\text{WLAN}} = 13$ Mbps. Nastavený vysílací výkon LTE zde zůstal stejný jako v předchozích kapitolách ($C = -60$ dBm) S ohledem na detekci EVM signálu LTE využívajícího kanály $B_{\text{LTE}} = 1,4$ MHz a $B_{\text{LTE}} = 5$ MHz, byl výkon WLAN nastaven na hodnotu $I = -16$ dBm (vzájemný poměr $C/I = -54$ dB). U větší šířky pásma LTE kanálu ($B_{\text{LTE}} = 10$ MHz) bylo zapotřebí výkon WLAN o 4 dB snížit ($I = -20$ dBm).

8.1 Vyhodnocení měření vlivu Wi-Fi 802.11n na výkonnost LTE

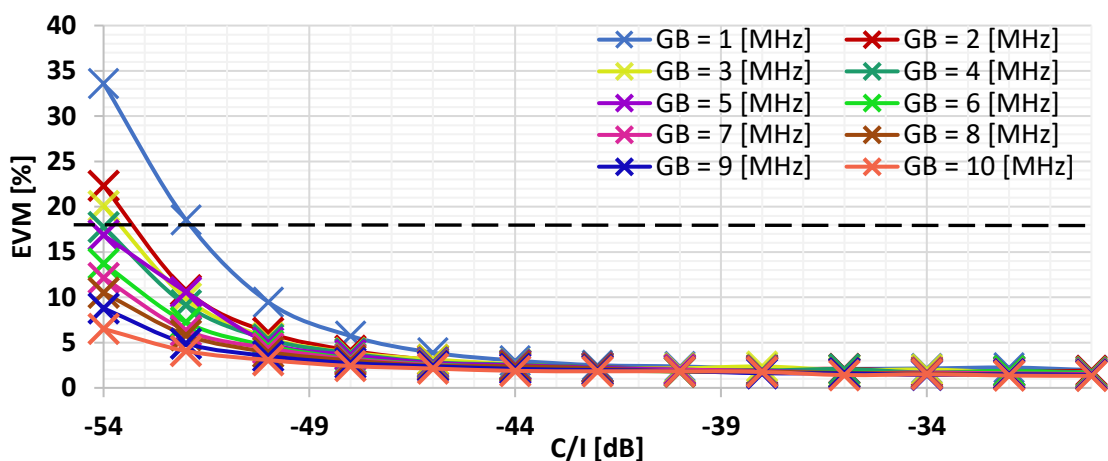
Výsledky měření koexistence mezi WLAN (IEEE 802.11n s $R_{\text{WLAN}} = 13$ Mbps) a LTE s kanálem $B_{\text{LTE}} = 1,4$ MHz naznačují malý vliv WLAN na LTE (viz. Obr. 44). Vlivem WLAN dochází k výpadkům LTE ($B_{\text{LTE}} = 1,4$ MHz s QPSK) pouze za předpokladu, že jsou oba systémy provozovány s menším vzájemným odstupem než $GB = 1$ MHz.

Zvýšení šířky pásma LTE kanálu na $B_{\text{LTE}} = 5$ MHz při koexistenci se signálem WLAN (IEEE 802.11n s $R_{\text{WLAN}} = 13$ Mbps) má za následek vrůst chybovosti LTE signálu, jak je naznačeno na Obr. 45. Není-li mezi systémy dodržen minimální vzájemný odstup $GB = 3$ MHz s poměrem $C/I = -52$ dB, není možné signál LTE správně detekovat a zpracovat.

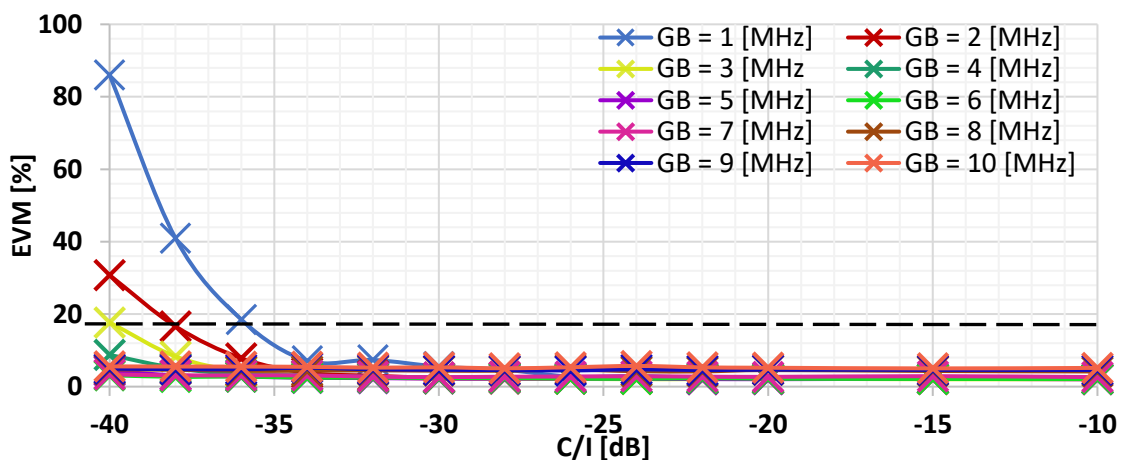
Trend dokazující vzrůst chybovosti LTE při využití větší šířky pásma kanálu ($B_{\text{LTE}} = 10$ MHz) vlivem koexistence s IEEE 802.11n (využívající $R_{\text{WLAN}} = 13$ Mbps) dokazuje také Obr. 46. Vliv WLAN na výkonnost LTE byl zde v porovnání s předchozími měřeními nejvyšší. Proto byl vysílací výkon WLAN omezen. Na Obr. 46 dochází k výpadkům LTE signálu pouze při $GB = 1$ MHz a $GB = 2$ MHz, ovšem s narůstajícím trendem křivek lze předpokládat, že se snížením $C/I = -54$ dB by docházelo ke vzniku interferencí i ve větších ochranných pásmech GB .



Obr. 44 Závislost parametru EVM signálu LTE s $B_{LTE} = 1,4$ MHz a modulací QPSK na C/I pro GB (rušení Wi-Fi 802.11n s $R_{WLAN} = 13$ Mbps).



Obr. 45 Závislost parametru EVM signálu LTE s $B_{LTE} = 5$ MHz a modulací QPSK na C/I pro GB (rušení Wi-Fi 802.11n s $R_{WLAN} = 13$ Mbps).



Obr. 46 Závislost parametru EVM signálu LTE s $B_{LTE} = 10$ MHz a modulací QPSK na C/I pro GB (rušení Wi-Fi 802.11n s $R_{WLAN} = 13$ Mbps).

9 KOEXISTENCE LTE A WI-FI 802.11B/G VE SDÍLENÉM RF KANÁLE (CO-CHANNEL)

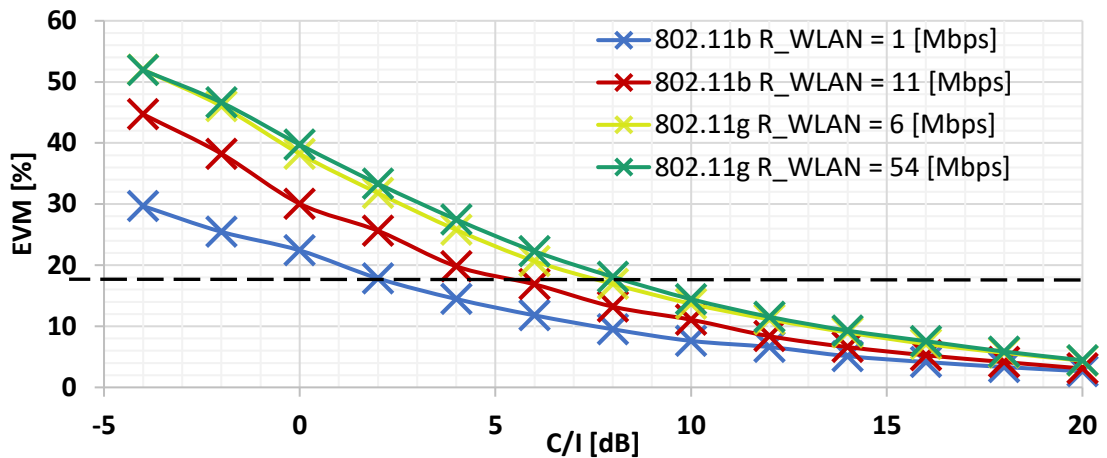
Tato část se zabývá měřením koexistence LTE a WLAN ve společném RF kanále, tzv. co-channel. Jak už bylo popsáno v Kapitole 3, LTE systém má v ISM pásmu přiděleny kmitočty, ovšem jejich využití zatím není reálné. V blízké budoucnosti s příchodem nové generace mobilního systému (5G) k této situaci může dojít. Vzájemné překrývání RF kanálů může vést ke značným interferencím a výpadkům LTE signálu, které by mohly během provozu obou systémů nastat. Oproti předchozím kapitolám jsou výsledky koexistence mezi konkrétním kanálem LTE a IEEE 802.11b/g zobrazeny v jednom grafu. Nastavený vysílací výkon LTE zde zůstal stejný jako v předchozích kapitolách ($C = -60$ dBm). Rozsah nastavovaného výkonu WLAN byl kvůli velkým degradacím LTE snížen na ($I = -80 \div -56$) dBm.

Vliv WLAN na LTE využívajícího kanál $B_{LTE} = 1,4$ MHz s modulacemi QPSK, 16QAM a 64QAM lze vidět na Obr. 47, Obr. 48 a Obr. 49. Také v případě celkového překrytí se zvyšujícím GB dochází ke zmenšení vlivu WLAN na kvalitu poskytovaných služeb LTE. Naopak s rostoucím výkonem WLAN se výkonost LTE zhoršuje, zejména pak u vícestavových modulací. Největší vliv na kvalitu poskytovaných služeb LTE (QPSK, 16QAM, 64QAM) má v tomto případě WLAN využívající standard IEEE 802.11g ($R_{WLAN} = 6$ Mbps a $R_{WLAN} = 54$ Mbps).

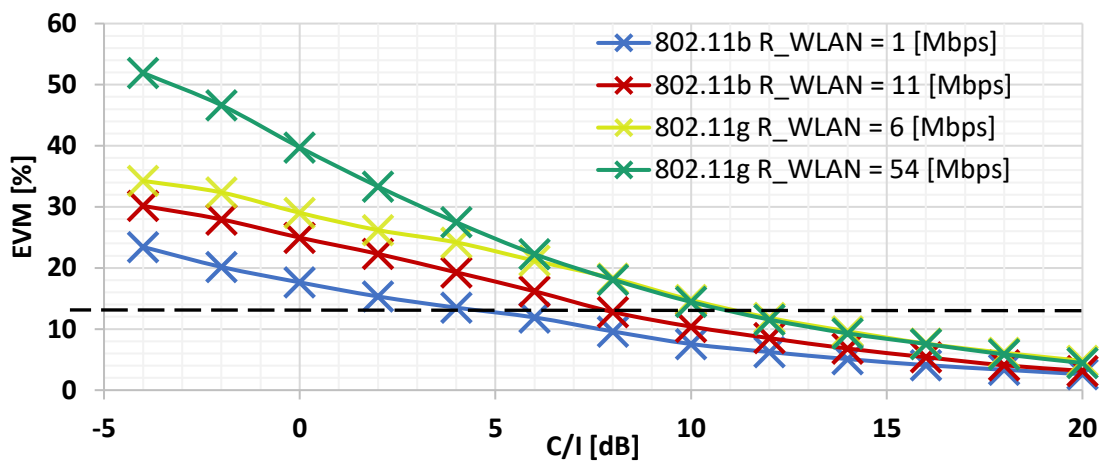
Při zvýšení šířky pásma kanálu LTE na $B_{LTE} = 5$ MHz se jako nejvíce rušící signál z uvedených Wi-Fi standardů jeví IEEE 802.11b ($R_{WLAN} = 1$ Mbps a $R_{WLAN} = 11$ Mbps), který způsobuje největší degradaci LTE viz. Obr. 50, Obr. 51 a Obr. 52.

Vzájemná koexistence WLAN a LTE s $B_{LTE} = 10$ MHz (QPSK, 16QAM, 64QAM) ve sdíleném RF kanále je zobrazena na Obr. 53, Obr. 54 a Obr. 55. Průběh degradace způsobený WLAN je srovnatelný s předchozím případem $B_{LTE} = 5$ MHz.

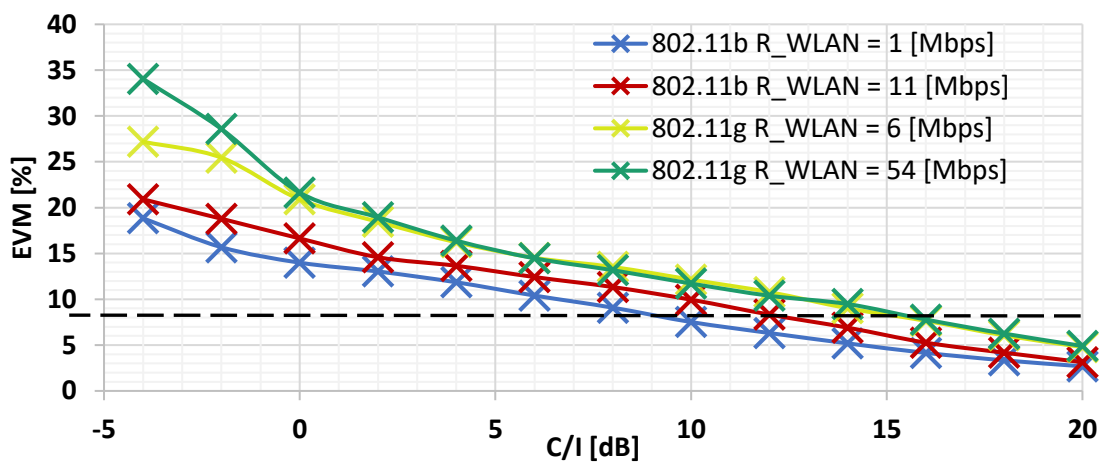
Pro poskytování LTE služeb s modulací QPSK, 16QAM a 64QAM ve společném RF kanále s WLAN je z naměřených výsledků potřeba zajistit minimální vzájemný poměr $C/I = 10$ dB, $C/I = 12$ dB, $C/I = 18$ dB.



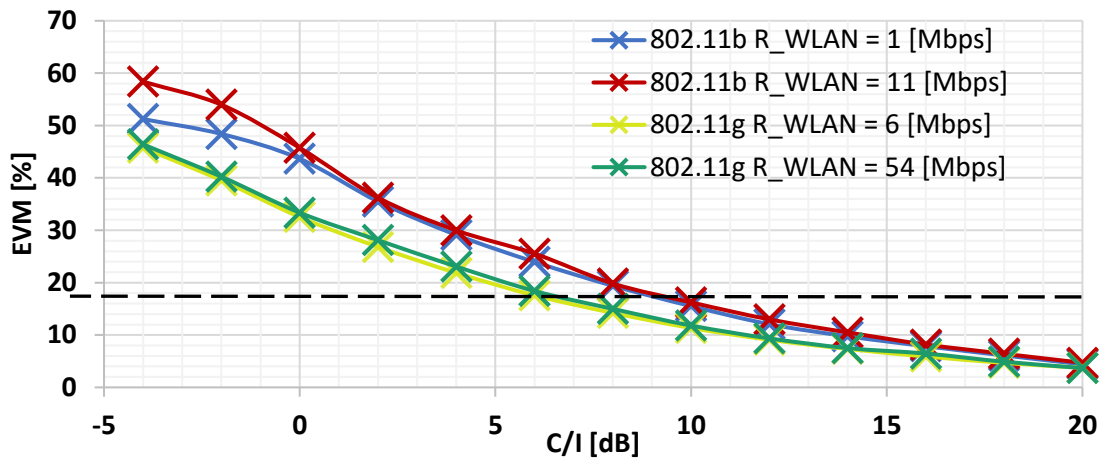
Obr. 47 Závislost parametru EVM signálu LTE s $B_{LTE} = 1,4$ MHz s modulací QPSK na C/I rušeného Wi-Fi 802.11b/g.



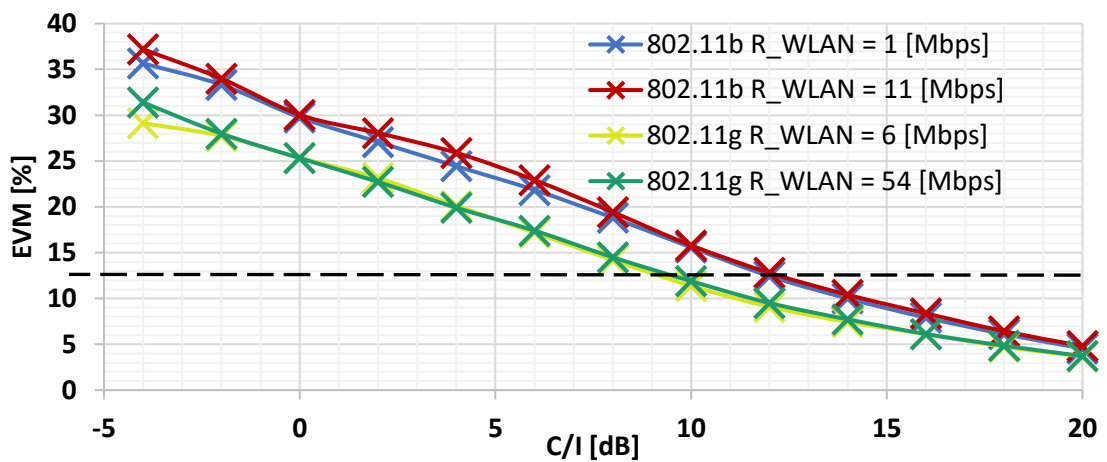
Obr. 48 Závislost parametru EVM signálu LTE s $B_{LTE} = 1,4$ MHz s modulací 16QAM na C/I rušeného Wi-Fi 802.11b/g.



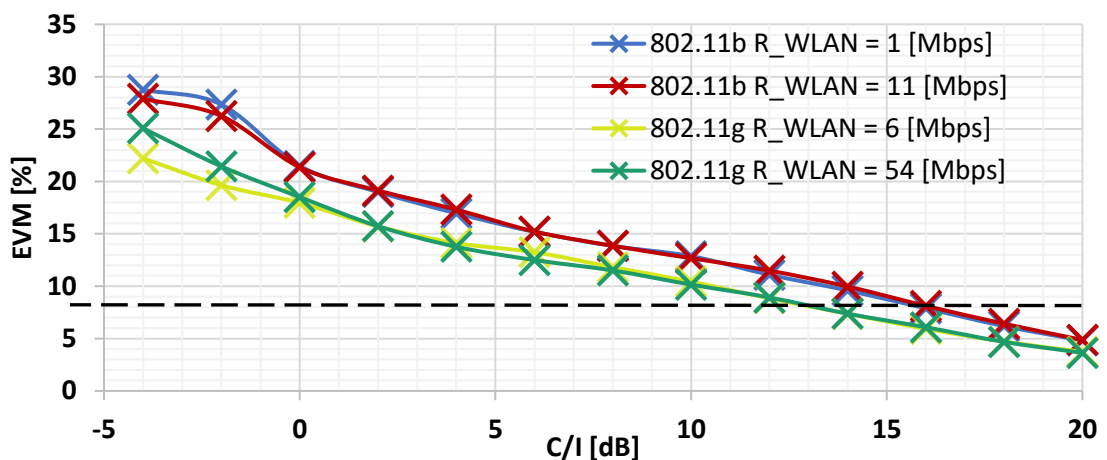
Obr. 49 Závislost parametru EVM signálu LTE s $B_{LTE} = 1,4$ MHz s modulací 64QAM na C/I rušeného Wi-Fi 802.11b/g.



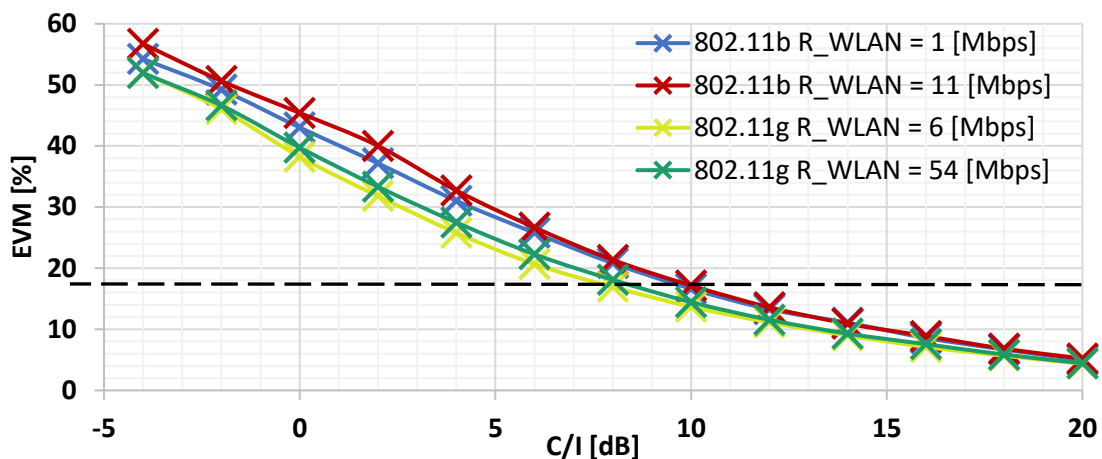
Obr. 50 Závislost parametru EVM signálu LTE s $B_{LTE} = 5$ MHz s modulací QPSK na C/I rušeného Wi-Fi 802.11b/g.



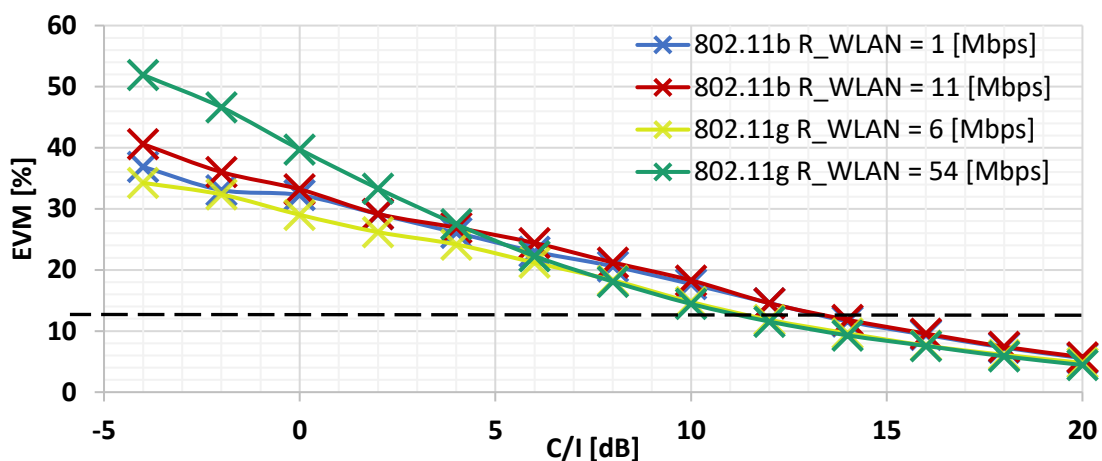
Obr. 51 Závislost parametru EVM signálu LTE s $B_{LTE} = 5$ MHz s modulací 16QAM na C/I rušeného Wi-Fi 802.11b/g.



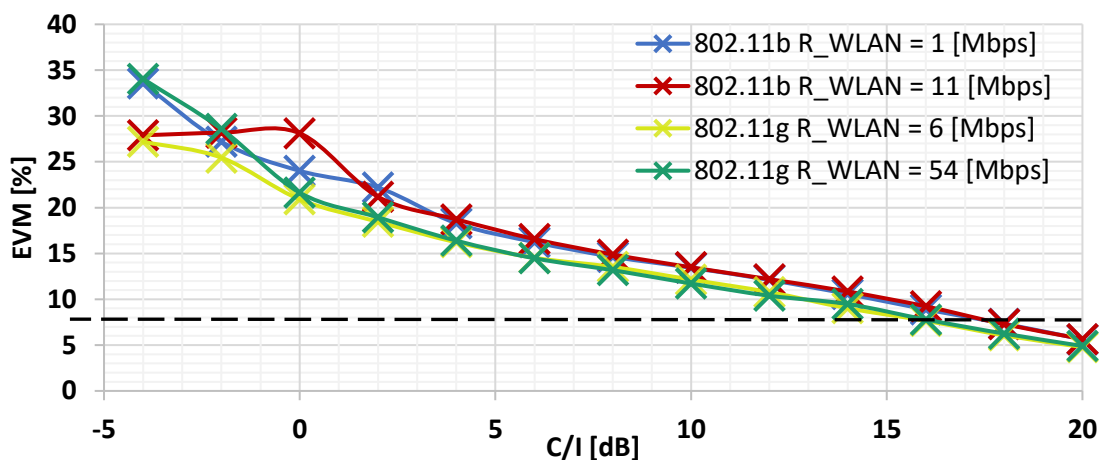
Obr. 52 Závislost parametru EVM signálu LTE s $B_{LTE} = 5$ MHz s modulací 64QAM na C/I rušeného Wi-Fi 802.11b/g.



Obr. 53 Závislost parametru EVM signálu LTE s $B_{LTE} = 10$ MHz s modulací QPSK na C/I rušeného Wi-Fi 802.11b/g.



Obr. 54 Závislost parametru EVM signálu LTE s $B_{LTE} = 10$ MHz s modulací 16QAM na C/I rušeného Wi-Fi 802.11b/g.



Obr. 55 Závislost parametru EVM signálu LTE s $B_{LTE} = 10$ MHz s modulací 64QAM na C/I rušeného Wi-Fi 802.11b/g.

ZÁVĚR

V této práci byly popsány bezdrátové komunikační systémy WLAN a LTE. Popis systémů byl zaměřen zejména na jejich fyzickou vrstvu a frekvenční pásma, ve kterých jsou využívány. Na základě teoretického rozboru byla definována společná frekvenční pásma, ve kterých tyto standardy mohou koexistovat. Vznikly tak dva scénáře, pro vzájemně se nepřekrývající kanály RF spekter a jeden speciální, kdy LTE využívá část pásma ISM a dojde tak k vzájemnému RF překrytí (tzv. co-Chanel).

Pro měření vzájemné koexistence bylo navrženo a realizováno měřicí pracoviště. Zde byl zjišťován vliv jednotlivých standardů WLAN (IEEE 802.11b/g/n) na výkonnost LTE. Z výsledků je patrné naplnění teoretických předpokladů vzájemného rušení systémů v závislosti na vysílacím výkonu a velikosti vzájemného odstupu GB . Dále je z výsledků pozorovatelný rozdílný vliv WLAN využívajícího různé standardy (IEEE 802.11b/g/n), na kvalitu poskytovaných služeb LTE.

Část práce byla prezentována formou článku v soutěži EEICT 2017 viz. [24].

Součástí práce je také návrh laboratorní úlohy, která je doložena v příloze, včetně jejího vzorového vypracování. V příloze se také nachází další grafy, které byly zpracovány z naměřených údajů.

LITERATURA

- [1] ZANDL, P. *Bezdrátové sítě Wifi praktický průvodce*. 1. edice. Brno: Computer Press, 2003, 204 s. ISBN 80-7226-632-2.
- [2] S.GAST, M. *802.11 Wireless Networks*. 1st ed. United States of America: O'Reilly, 2002, 672 p. ISBN 0-596-00183-5.
- [3] DOLEŽAL, J. *Minimalizace vlivu rušení na bezdrátovou síť*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2008. 85 s. Diplomová práce. Vedoucí práce doc. Ing. Vladislav Škorpil CSc.
- [4] YI-SHENG, S., SZU-LIN, S., JUNG-SHIAN, L. Joint Topology-Transparent Scheduling and QoS Routing in Ad Hoc Networks. In: *IEEE Vehicular Technology Transactions*. vol. 63, issue 1. IEEE, 2013, s. 372-389, ISSN 0018-9545. DOI: 10.1109/TVT.2013.2274806.
- [5] Rohde & Schwarz; IEEE 802.11 (a/b/g) Digital standard for R&S@Signal Generator [online], [citované 18.4.2017]. Dostupné https://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_manuals/gb_1/s/digital_standards_for_signal_generators/RS_SigGen_IEEE_80211a_b_g_Operating_en_17.pdf.
- [6] MIKULKA, J. *Koexistence mobilních komunikačních systémů WLAN a Bluetooth Brno*: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2008. 85 s. Doktorská práce. Vedoucí práce prof. Ing. Stanislav Hanus, CSc.
- [7] 802.11b Standard. RF Wireless World [online]. 2012 [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://www.rfwireless-world.com/Articles/802.11b-1999.html>.
- [8] VÁGNER, A. *Reálná propustnost zařízení pracujících na standardu 802.11n*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav telekomunikací, 2011. 62 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce Ing. Petr Münster.
- [9] STANLEY, W.K, N., SZYMANSKI, T.H. Interference measurements in an 802.11n Wireless Mesh Network testbed. In: *Electrical & Computer Engineering (CCECE)*. IEEE Canadian Conference on, 2012, p. 1-6. ISBN: 978-1-4673-1433-6. DOI: 10.1109/CCECE.2012.6334846.
- [10] 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.
- [11] OPLETAL, P. *Rádiové rozhraní systému LTE (E-UTRAN)*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2009. 50 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce prof. Ing. Stanislav Hanus, CSc.
- [12] NAVRÁTIL, P. *Modely systému LTE: Multiplex v systému LTE*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2003. 72 s. Diplomová práce. Vedoucí práce prof. Ing. Stanislav Hanus, CSc.
- [13] ETSI TS 136 201: LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Long Term Evolution (LTE) physical layer; General description (3GPP TS 36.201 version 8.3.0 Release 8). 4. Sophia Antipolis Cedex - FRANCE: 3gpp, 2009.

- [14] SÝKORA, J. *Teorie digitální komunikace: skripta*. 1. Vydání. V Praze: České Vysoké Učení Technické, 2002. 325 s. ISBN 80-01-02478-4.
- [15] PLAISNER, D. *Koexistence stávajících a nových generací zemské digitální televize a mobilních bezdrátových komunikačních služeb*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2015. 76 s., 24 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce Ing. Ladislav Polák, Ph.D.
- [16] HU, Z., SUSITAIVAL, R., CHEN, Z., FU, I., DAYAL, P., KUMAR BAGHEL, S. Interference Avoidance for In-Device Coexistence in 3GPP LTE-Advanced Challenges and Solution. In: *IEEE Communications Magazine*. vol. 50, issue 11. IEEE, 2012, s. 60-67. ISSN 0163-6804. DOI: 10.1109/MCOM.2012.6353683.
- [17] *ERC Recommendation: Relating to the use of Short Range Devices (SRD)*. 4 t. ed. Tromsø: ELECTRONIC COMMUNICATIONS COMMITTEE, 1997.
- [18] 3GPP TS 36.101: 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception (Release 8). 12 th ed. Valbonne -FRANCE: 3GPP, 2009.
- [19] MILOS, J., POLAK, L., SLANINA, M., T, KRATOCHVIL, T. Measurement Setup for Evaluation the Coexistence between LTE Downlink and WLAN Networks. In: *2016 10th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP)*. Brno: IEEE, 2016, p. 1-4. ISBN: 978-1-5090-2526-8. DOI: 10.1109/CSNDSP.2016.7573936. 73936.
- [20] MARTÍNEZ-PINZÓN, G., CARDONA, N., GARCIA-PARDO, C., FORNES-LEAL, A., RIBADENEIRA-RAMIREZ, J. Spectrum Sharing for LTE-A and DTT: Field Trials of an Indoor LTE-A Femtocell in DVB-T2 service area. In: *IEEE Transactions on Broadcasting*. vol. 62, issue 3. IEEE, 2016, p. 552 - 561. ISSN: 1557-9611. DOI: 10.1109/TBC.2016.2582338.
- [21] Report ITU-R BT.2265: Guidelines for the assessment of interference into the broadcasting service. 11. Geneva: ITU, 2012.
- [22] FUENTES, M., GARCIA-PARDO, C., GARRO, E., GOMEZ-BARQUERO, D., CARDONA, N. Coexistence of digital terrestrial television and next generation cellular networks in the 700 MHz band. In: *IEEE Wireless Communications*. vol. 21, issue 6. IEEE, 2014, p. 63 – 69. ISSN: 1536-1284. DOI: 10.1109/MWC.2014.7000973.
- [23] YUBING, J., CHAO-FANG, S., BHUVANA, K. Coexistence of Wi-Fi and LAA-LTE: Experimental Evaluation, Analysis and Insights. In: *International Conference on Communication Workshop (ICCW)*. IEEE, 2015, p. 2325 - 2331. ISBN: 978-1-4673-6305-1. DOI: 10.1109/ICCW.2015.7247528.
- [24] MIKLÁŠ, M., Coexistence of LTE and WLAN in the ISM Band. In: *Proceedings of the 23rd Conference STUDENT EEICT 2017*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017, s. 34-36. ISBN 978-80-214-5496-5.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

3GPP	3rd Generation Partnership Project
BPSK	Binary phase-shift keying
C	Carrier
C/I	Carrier to Interference
CCK	Complementary Code Keying
CN	Core Network
CNR	Carrier-to-Noise Ratio
CP	Cyclic Prefix
CQI	Channel Quality Indicator
ČR	Česká Republika
ČTÚ	Český Telekomunikační Úřad
DBPSK	Different Binary Phase-Shift Keying
DFT	Discrete Fourier Transform
DL	Downlink
DQPSK	Differential Quadrature Phase Shift Keying
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
EPC	Evolved Packet Core
EVM	Error Vector Magnitude
FDD	Frequency Division Multiplex
FHSS	Frequency-Hopping Spread Spectrum
GB	Guard Band
HR/DSSS	High—Rate Direct Sequence Spread Spectrum
HSS	Home Subscriber Server
I	Interference
ICI	Inter Carrier Interference
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
IP	Internet Protocol
IR	Infrared
ISI	Inter Symbol Interference
ISM	Industrial, Scientific and Medical

LTE	Long Term Evolution
MAC	Media Access Control
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MME	Mobility Management Entity
NF	Noise Figure
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency-Division Multiple Access
PARP	Peak-to-Average Power Ratio
PBCH	Physical Broad Channel
PDCCH	Physical Downlink Control Channel
PDN-GW	Packet Data Network Gateway
PDSCH	Physical Downlink Shared Channel
PHY	Physical Layer
PLCP	Physical Layer Convergence Procedure
PMD	Physical Medium Dependent
PR	Protection Ratio
PSDU	Physical Service Data Unit
QAM	Quadrature amplitude modulation
QPSK	Quadrature phase-shift keying
R&S	Rohde & Schwarz
RB	Resource Blocks
RBW	Resolution Bandwidth
RF	Radio Frequency
S/N	Signal-to-Noise Ratio
SC-FDMA	Single-carrier Orthogonal Frequency-Division Multiple Access
S-GW	Serving Gateway
SHF	Super High Frequency
SISO	Single Input Single Output
TDD	Time Division Multiplex
UE	User Equipment
UHF	Ultra High Frequency
UL	Uplink
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
VBW	Video Bandwidth

Wi-Fi
WLAN

Wireless Fidelity
Wireless Local Area Network

A NÁVRH LABORATORNÍ ÚLOHY

Systemy mobilních komunikací (MSMK, LSMK)

Laboratorní úloha

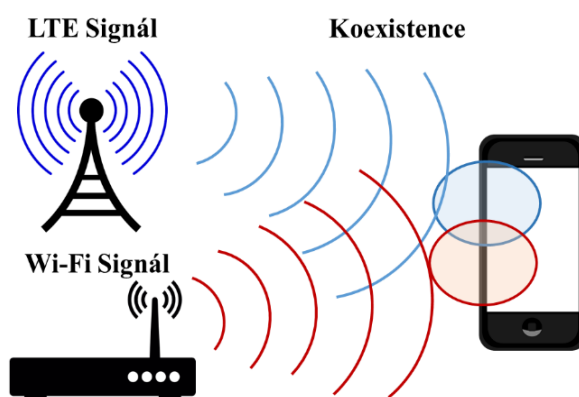
Měření koexistence mezi bezdrátovými komunikačními systémy LTE a IEEE 802.11

Cílem laboratorní úlohy je prověřit možnou koexistenci mezi bezdrátovými komunikačními systémy LTE a WLAN (technologie IEEE 802.11b/g), které mohou být provozovány ve společném frekvenčním pásmu ISM. V rámci měření budou pro tyto systémy definovány tzv. koexistenční scénáře. Během měření tak student získá základní znalosti o tom, jak různé koexistenční scénáře mezi systémy LTE a WLAN mohou ovlivnit kvalitu poskytovaných mobilních služeb.

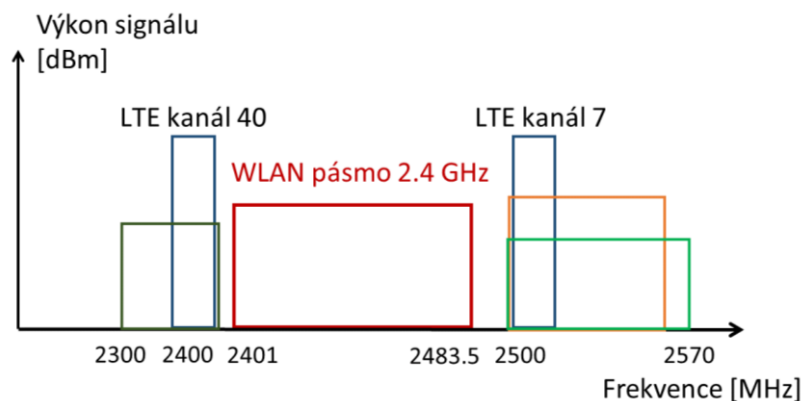
Teoretický úvod

V dnešní době se rapidně zvyšuje počet zařízení, využívající různé technologie pro bezdrátovou komunikaci ve stejných nebo přilehlých radiofrekvenčních (RF) pásmech. Následkem toho pak může docházet k vzájemnému rušení mezi jednotlivými bezdrátovými systémy. Tato laboratorní úloha má za úkol nastínit problematiku koexistence mezi mobilním bezdrátovým systémem Long Term Evolution (LTE) [1] a bezdrátovými systémy IEEE 802.11 zahrnujícími lokální bezdrátové sítě Wireless Local Area Network (WLAN) [2].

S koexistencí je úzce spjato vzájemné ovlivňování různých RF signálů, které mohou nastat jak při šíření v rádiovém prostředí, tak mezi anténami jednotlivých zařízení obsahující funkční bloky pro příjem a zpracování signálů. Koexistence tak může vzniknout například za předpokladu, že se mobilní uživatelské zařízení tzv. User Equipment (UE) nachází v buňce základnové stanice systému LTE (eNodeB) a zároveň v dosahu vysílače Wireless Fidelity (Wi-Fi), jak je naznačeno na Obr. 1.



Obrázek 1 Možný koexistenční scénář mezi LTE a Wi-Fi (WLAN - IEEE 802.11).



Obrázek 2 Koexistenční scénáře vzájemně se nepřekrývajících spekter LTE a WLAN.

V závislosti na vzájemném ovlivňování RF spekter uvažovaných signálů lze definovat několik koexistenčních scénářů. Pro vzájemně nepřekrývající RF spektra LTE a WLAN v Industrial, Scientific and Medical (ISM) pásmu jsou definovány dva scénáře tak, jak jsou zobrazeny na Obr. 2. První koexistenční scénář vzniká mezi LTE a WLAN, když je LTE provozován v kanále č. 40. Druhý pak vzniká v horních mezích ISM pásma 2,4 GHz, kde WLAN sdílí RF pásmo s LTE, provozovaném v kanále č. 7. Frekvenční odstup RF spekter se nazývá ochranné pásmo, označované jako *GB* (Guard Band). Velikost *GB* se udává v jednotkách MHz a závisí na šířce pásma RF signálů LTE a WLAN a tím pádem i na hodnotě nosného kmitočtu obou signálů. Nejmenší frekvenční odstup $GB = 1$ MHz vzniká mezi LTE kanálem č.40 a WLAN vysílajícím v 1. kanálu s nosnou frekvencí 2412 MHz a standardní šířkou pásma 20 MHz.

Větší *GB* mezi LTE a WLAN vzniká při použití LTE kanálu č. 7, kde mohou být použity dva nezávislé frekvenční rozsahy (Frequency Division Duplex (FDD)): 2620-2690 MHz pro Downlink (DL) a 2500-2570 MHz pro Uplink (UL). Systém LTE umožňuje zvolit šířku pásma RF signálu flexibilně, a to mezi velikostmi 1,4; 3;5;10; 15; a 20 MHz. Menšího *GB* lze prakticky dosáhnout při uvažování 14. kanálu WLAN (2482 MHz), který se využívá např. v Japonsku [2].

Koexistenční scénář částečného nebo celkového spektrálního překrytí (tzv. Full or Partial Overlapping scenario) LTE a WLAN [3] může zatím nastat pouze teoreticky. Ovšem je třeba dodat, že kvůli rozšiřování bezdrátových systémů se postupně snížil počet nevyužitých frekvenčních RF pásem a s příchodem nové páté generace mobilních sítí (5G) by mohla být pro poskytování LTE služeb využita také výraznější část ISM [3].

Tato laboratorní úloha je zaměřena na monitorování změny výkonosti systému LTE způsobeného jeho koexistencí se signálem WLAN. Velikost degradace signálu LTE udává parametr určující kvalitu digitálně modulovaného signálu Error Vector Magnitude (EVM). EVM vyjadřuje vektor chyby vztažený k určitému bodu konstelačního diagramu. Udává se v procentech a platí, že čím je tato hodnota vyšší, tím více se signál liší od požadované hodnoty. Pro každou modulaci je určena mezní hodnota, při jejímž překročení dojde k úplné degradaci signálu. Konkrétní mezní hodnoty umožňující měřit a vyhodnotit kvalitu příjmu LTE signálu jsou 17,5% (pro modulaci QPSK), 12,5% (pro modulaci 16QAM) a pro 8% (pro modulaci 64QAM). Výsledný průběh degradace LTE signálu způsobený WLAN může být pro různé modulace rozdílný.

Z teoretických předpokladů lze odvodit, že při vzájemné koexistenci systémů WLAN a LTE, dochází u vícestavových modulací k větší degradaci signálu. V této úloze budeme uvažovat pro LTE signál s šířkou pásma (označovanou jako B_{LTE}) 1,4 MHz a 10 MHz pouze modulaci QPSK. Obdobným způsobem můžou vzniknout odlišnosti při použití různých WLAN standardů (IEEE 802.11b/g) s různými přenosovými rychlostmi (v této práci označovanými jako R_{WLAN}), jak je to naznačeno v Tab.1. Výsledný průběh rušení WLAN na signál LTE je pak závislý nejen na vzájemném GB mezi systémy, ale i na poměru výkonových složek C/I (Carrier-to-Interference), kde C a I jsou výkonové hodnoty signálu LTE a WLAN. Příklad výpočtu poměru C/I , pro LTE signál ($C = -60$ dBm) a WLAN ($I = -50$ dBm) je:

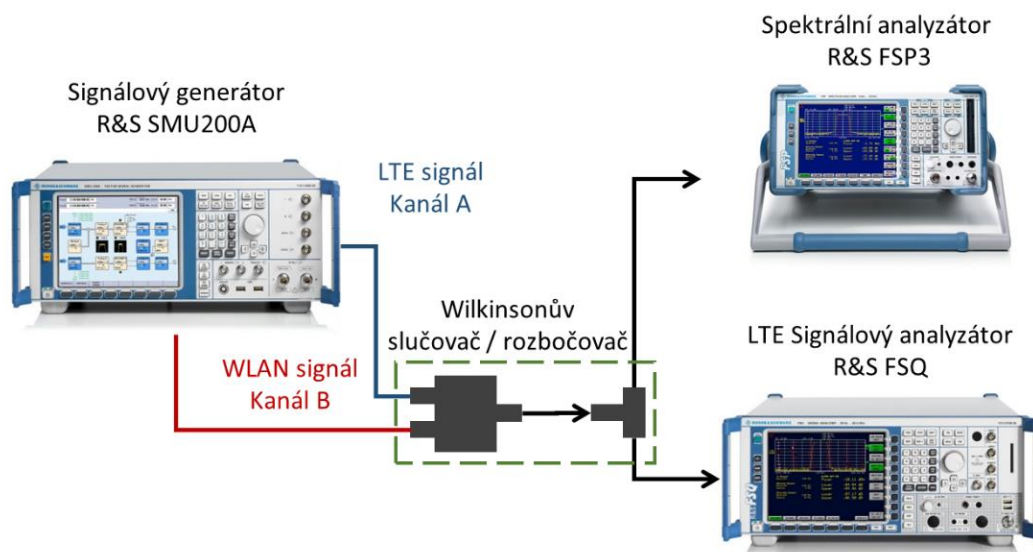
$$C/I = -60 \text{ [dBm]} - (-50) \text{ [dBm]} = -10 \text{ [dB]} \quad (1)$$

Obecné zapojení laboratorního pracoviště pro měření koexistence mezi LTE a WLAN je zobrazeno na Obr. 3. Kompletní RF signály LTE a WLAN jsou vytvořené signálovým generátorem Rohde & Schwarz (R&S) SMU200A, na jeho dvou výstupech (A a B). Na výstup A je vygenerován a namodulován signál LTE složený z několika subrámců. Ty se skládají ze zdrojových bloků (Resource Block (RB)), jejichž maximální počet závisí na šířce pásma (B_{LTE}) LTE signálu. Počáteční subrámeček obsahuje v prvním RB fyzický kanál Physical Broadcast Channel (PBCH), určený pro identifikaci a přenos informace o buňce. Následuje kanál Physical Downlink Control Channel (PDCCH), opakující se ve všech subrámcích. Přenáší informaci o alokování zdrojových bloků a spolu s PBCH používají neměnnou modulaci QPSK [12]. Ostatní RB obsahují fyzické kanály Physical Downlink Shared Channel (PDSCH), vyhrazené pro přenos uživatelských dat, pro nichž lze nastavit modulaci QPSK, 16QAM a 64QAM. V kanále B je generován a modulován signál IEEE 802.11 b/g.

Standard	Modulační technika	Přenosová rychlost	Modulace
IEEE 802.11b	Barkerova Sekvence	1 Mbps	DBPSK
IEEE 802.11g	OFDM	6 Mbps	BPSK

Tabulka 1 Fyzicky vrstvy pro Wi-Fi 802.11b/g s naznačenými přenosovými rychlostmi.

Oba signály jsou sloučeny pomocí Wilkinsonova výkonového slučovače. Kvůli vyhodnocování objektivních parametrů jsou použity dva analyzátory. Signál je tedy rozbočen do dvou shodných větví. Pomocí spektrálního analyzátoru R&S FSP3 jsou zobrazeny RF spektra a měřen výkon v definovaných RF kanálech obsahujících signály obou systémů. Výstupem měření je pak např. závislost parametru EVM na poměru C/I .



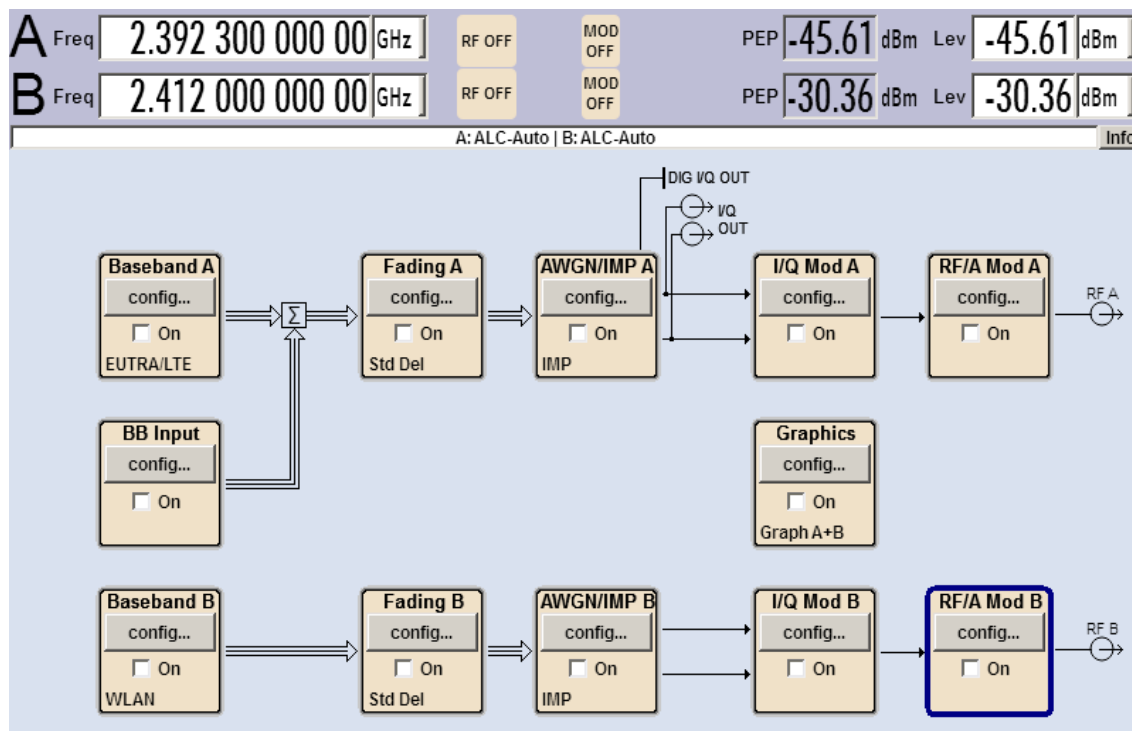
Obrázek 3 Laboratorní pracoviště pro měření koexistence mezi LTE a WLAN.

Zadání a postup měření

1. Seznamte se s obsluhou analyzátorů R&S FSQ, R&S FSP3 a generátoru R&S SMU200A.
2. Podle Obr. 3 realizujte zapojení měřícího pracoviště na proměření koexistence mezi systémy LTE a WLAN.
3. Změřte koexistenci mezi WLAN standardem IEEE 802.11b s $R_{WLAN} = 1$ Mbps a systémem LTE pomocí parametru EVM (přístrojem R&S FSQ) vyjadřujícího kvalitu digitálně modulovaného signálu LTE. Analyzátor R&S FSQ zobrazuje tabulku s EVM pro několik modulací (QPSK, 16QAM, 64QAM) s vyznačenými mezními hodnotami. Při správném nastavení (vypnutém WLAN) je konkrétní hodnota EVM zobrazována na display zeleně, červeně pak při překročení hranice EVM vlivem chybné detekce LTE signálu, způsobené např. rušením WLAN. Hodnota EVM se velmi rychle mění, proto při každém měření odečítejte minimálně dvě hodnoty (nejvyšší a nejnižší hodnotu) a jejich aritmetickým průměrem vyjádřete výslednou složku EVM pro konkrétní poměr C/I . Pro LTE nastavte kanál s šířkou $B_{LTE} = 1,4$ MHz s maximálním počtem RB v 10 subrámcích. V každém RB nastavte modulaci QPSK. Počáteční nosný kmitočet LTE signálu nastavte na hodnotu 2400,3 MHz, která tvoří s WLAN (pro $B_{LTE} = 1,4$ MHz) vzájemný odstup $GB = 1$ MHz. Tímto způsobem změřte parametr EVM v závislosti na snižujícím se poměru C/I i pro další hodnoty GB , jmenovitě: $GB = 3$ MHz, $GB = 5$ MHz, $GB = 7$ MHz a $GB = 9$ MHz, které nastavíte přeladěním nosného kmitočtu LTE (2398,3 MHz, 2396,3 MHz, 2394,3 MHz, 2392,3 MHz). Jednotlivé hodnoty si zaznačte přehledně do tabulky.

Postup nastavení přístrojů:

Nastavení dvoukanálového generátoru R&S SMU200A: pro generování LTE a WLAN signálů. Na Obr. 4 je zobrazen grafický panel R&S SMU200A, pomocí něj lze přehledně nastavit generování a modulování signálů obou systémů, včetně jejich nosných frekvencí a výkonových úrovní.



Obrázek 4 Grafické okno pro nastavení a vygenerování LTE a WLAN RF signálu v přístroji R&S SMU200A.

a) Nastavení kanálu A – LTE

V kanále A nastavíme pro LTE počáteční frekvenci 2 400,3 MHz. Výkonovou úroveň LTE nastavte pomocí R&S SMU200A tak, aby se výsledná hodnota odečítaná na spektrálním analyzátoru R&S FSP3 v nastaveném 40 MHz kanále rovnala $C = -60$ dBm. Tato hodnota je pro všechna měření stejná, proto ji během měření kontrolujte a udržujte po celou dobu měření. Pro LTE signál nastavte šířku kanálu 1,4 MHz. Kanál bude tvořen 10 subrámcí. Jeden subrámeček se skládá z RB, jejichž maximální počet závisí na šířce kanálu. Každý subrámeček tedy naplníte RB s jednotnou modulací QPSK.

Baseband A config EUTRA/LTE – nastavte podle Obr. 5:

Duplexing – FDD

Link direction – Downlink (OFDMA)

Sequence Length – 1 Frames

General Settings – nastavte šířku pásma kanálu:

Channel Bandwidth – 1,4 MHz

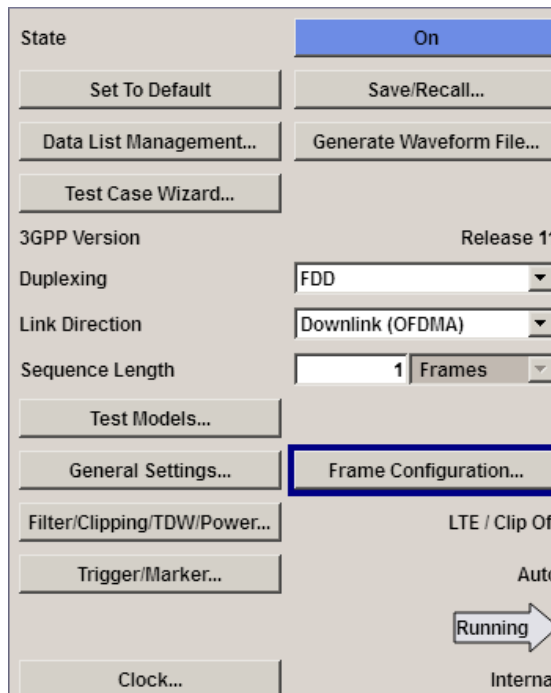
Frame Configuration – okno je na Obr. 6, zde nastavte:

No. of Configurable Subframes – 10 subrámečků

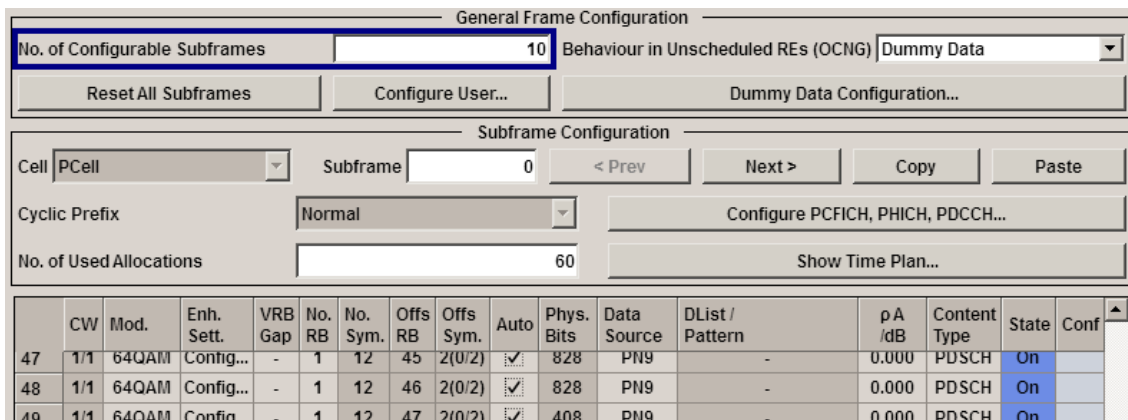
No. of Used Allocations – nastavíme na maximální počet (proměnný se šířkou kanálu)

Modulace – ve sloupečku nastavte požadovanou modulaci

Pomocí tlačítek *Copy* a *Paste* vložte nastavený počet RB do všech subrámců (0-9).



Obrázek 5 Okno Baseband a config EUTRA/LTE pro nastavení systémových parametrů LTE.



Obrázek 6 Nastavení LTE rámce.

b) Nastavení kanálu B - Wi-Fi 802.11b

Jako rušící signál nastavte na R&S SMU200A v kanále B signál 802.11b s $R_{WLAN} = 1$ Mbps vysílaný v 1. kanále WLAN (2412 MHz). Nosnou frekvenci WLAN nastavujte pro kanál B v pravém horním rohu. Počáteční výkonovou úroveň WLAN (I) nastavte (obdobně jako při nastavení LTE) pomocí spektrálního analyzátoru R&S FSP3 ve 40 MHz kanále na hodnotu -50 dBm (při nastavování musí být výstup A vypnutý). Během měření ji s 2 dB krokem postupně zvyšujte, dokud nedojde k úplnému výpadku LTE, který znemožní detekci hodnoty EVM. **Nepřesáhněte při nastavování na generátoru R&S SMU 200 výkonovou hodnotu $I = 8$ dBm (u signálu WLAN).**

Baseband B config WLAN: nastavení základních parametrů pro Wi-Fi viz. Obr. 7.

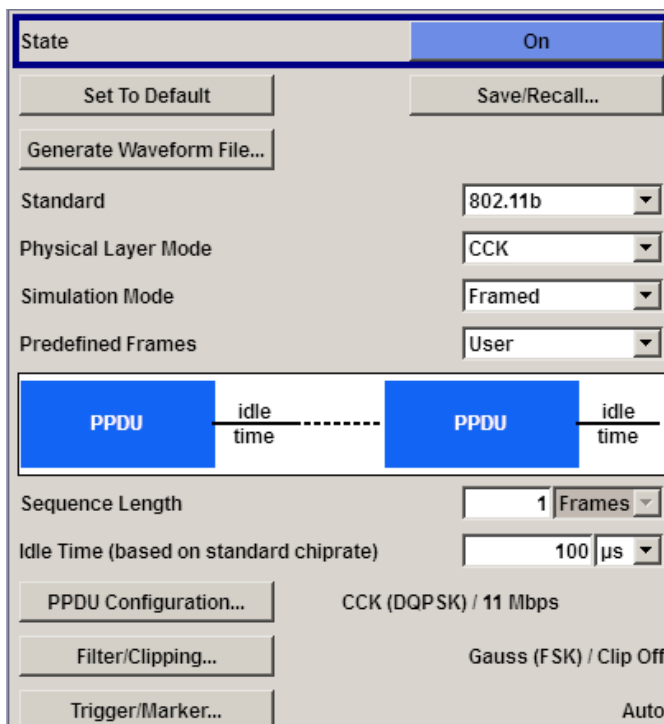
Standard – 802.11b

Phys. Layer Mode – CCK

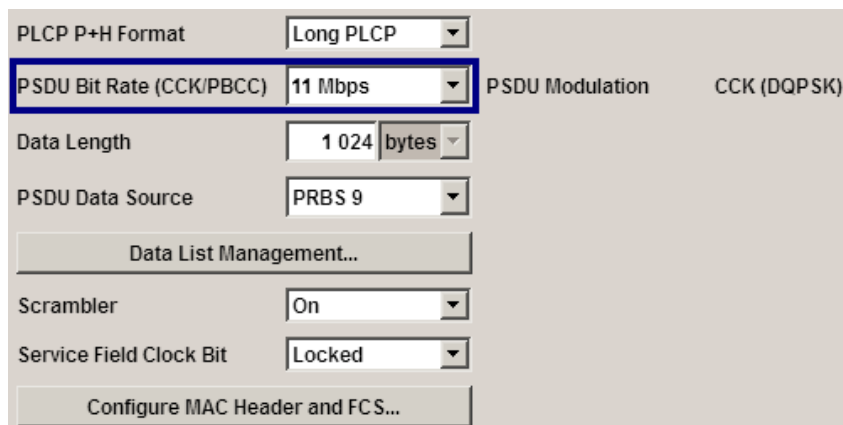
(Nastavení odpovídá hodnotám v Tab.1)

PPDU Configuration – ***grafické*** okno pro volbu přenosové rychlosti WLAN je zobrazeno na Obr. 8.

PSDU Bit Rate – nastavte $R_{WLAN} = 1$ Mbps



Obrázek 7 Okno Baseband B config WLAN pro nastavení systémových parametrů Wi-Fi.



Obrázek 8 Okno pro nastavení přenosové rychlosti Wi-Fi.

Nastavení spektrálního analyzátoru R&S FSP3: je potřeba nastavit pro zobrazení RF spekter LTE a WLAN. Na přístroji také nastavíte 40 MHz kanál, který je využíván pro vzájemné porovnání a odečítání výkonových složek LTE a WLAN.

FREQ

– Tlačítkem nastavte střední frekvenci kanálu na 2410 MHz (volíme v závislosti na měřeném scénáři a šířce LTE kanálu, pro který by měla po celou dobu měření zůstat neměnná).

SWEEP

– Z nabídky pomocí tlačítka:

SWEEPTIME MANUAL – 200 ms

BW

– Zvolíme softkey:

RES BW MANUAL – 300 kHz
VIDEO BW MANUAL – 10 kHz

AMPT

– Kontrola nastavení atenuátoru na 0 dB

MEAS

– Nastavení kanálu pro měření výkonu:

CHAN PWR ACP => CP/ACP CONFIG
CHANNEL BANDWIDTH – nastavte požadovanou šířku měřeného kanálu na 40 MHz

SPAN

– Zvolíme softkey:

SPAN MANUAL – 50 MHz

Nastavení signálového analyzátoru R&S FSQ: Přístroj zobrazuje měřenou složku EVM signálu LTE. Zelená hodnota značí správnou detekci LTE, která je udržována pod hranicí chybovosti. Červeně je pak naznačena hodnota, která je vlivem značné degradace rušena a překročila tak mezní hranici chybovosti.

Pro měření LTE signálu volíme tlačítko:

EUTRA/LTE

Nastavení parametrů LTE signálu: **SET- GEN**

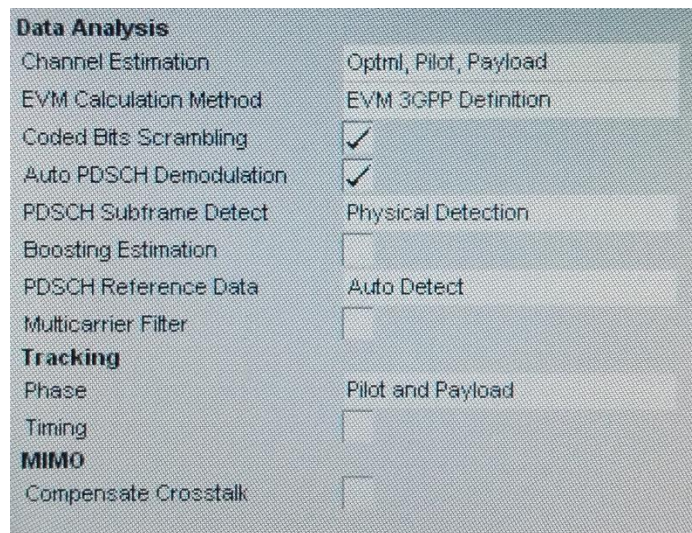
Standard – zvolte 3GPP LTE FDD Downlink

Frequency – počáteční frekvenci nosného kmitočtu LTE nastavte na 2400,3 MHz (**nezapomeňte měnit při každém přeladění nosného kmitočtu LTE signálu – změna GB**)

Channel Bandwidth BW – hodnotu šířky kanálu LTE zvolte 1,4 MHz

Nastavení detekce a demodulace v záložce: **SET – DEMOD (DL Demod):**

Nastavte podle Obr. 9.



Obrázek 9 Grafické okno pro nastavení demodulace LTE signálu na analyzátoru R&S FSQ.

- Postup měření, popsany v bodě 3., zopakujete tentokrát pro signál LTE využívající kanál $B_{LTE} = 10$ MHz (nezapomeňte naplnit kanál LTE potřebným počtem RB) a obdobným způsobem změřte vliv rušení WLAN využívající opět IEEE 802.11b s $R_{WLAN} = 1$ Mbps (u Wi-Fi není potřeba měnit nastavení z předchozího bodu). Střední kmitočet měřicího kanálu 40 MHz (ve kterém odečítáte výkonové složky v RF spektru obou signálů) nastavte na přístroji R&S FSP3 na hodnotu 2405 MHz. Nosný kmitočet LTE nastavujte postupně na hodnoty 2396 MHz ($GB = 1$ MHz), 2394 MHz ($GB = 3$ MHz), 2391 MHz ($GB = 5$ MHz), 2390 MHz ($GB = 7$ MHz), 2388 MHz ($GB = 9$ MHz). Naměřené výsledky si přehledně zaznamenejte do tabulky.

5. Nastavení systémových parametrů LTE ponechte stejné jako v předchozím bodě (tedy včetně šířky pásma kanálu $B_{\text{LTE}} = 10$ MHz). Pro signál WLAN nastavte tentokrát standard IEEE 802.11g s $R_{\text{WLAN}} = 6$ Mbps. Obdobným způsobem jako v přechozích bodech změřte závislosti C/I na EVM pro jednotlivé GB . Jelikož je použita stejná šířka pásma kanálu LTE ($B_{\text{LTE}} = 10$ MHz) jako v bodě 4., jednotlivé velikosti GB se shodují také. Naměřené výsledky si přehledně zaznamenejte do tabulky.
6. Z naměřených hodnot, které jste si zaznamenali do tabulek, sestrojte grafy závislosti EVM na C/I , kde budou jednotlivé průběhy značit hodnotu odstupe GB . Každý graf tak bude zobrazovat křivku pro $GB = 1$ MHz, $GB = 3$ MHz, $GB = 5$ MHz, $GB = 7$ MHz, $GB = 9$ MHz. Na základě naměřených výsledků vyberte pro každý GB takové hodnoty C/I (často nazývané jako tzv. Protection Ratio (PR)), při kterých je ještě možné přijímat a zpracovat LTE signál (odpovídá nejvyšší dosažené hodnotě EVM, která nepřesáhne hranici chybovosti). Po překročení této hodnoty dochází k výpadkům LTE signálu a nelze jej synchronizovat. Tyto hodnoty vynesete do dalších grafů jako závislost C/I na GB . Detailně vyhodnoťte a okomentujte získané průběhy.

Poznámky k měření

1. Před samotným měřením si zkontrolujte správnost zapojení laboratorního pracoviště. Po nastavení přístrojů a jejich spuštění bez zapnutého rušení WLAN (vypnutý kanál B), by neměla hodnota složky EVM přesáhnout hranici chybovosti. Pokud ano, zkontrolujte dotažení všech konektorů.
2. Průběžně na spektrálním analyzátoru R&S FSP3 kontrolujte spektra obou signálů, aby nepřesáhly hranice vymezeného 40 MHz kanálu (hranice jsou vymezeny červeně).

Použité měřicí přístroje

- Signálový Generátor R&S SMU 200
- Signálový analyzátor R&S FSQ s modulem LTE
- Spektrální analyzátor R&S FSP3
- Wilkinsonův slučovač
- Rozbočovač

Závěr

Do závěru každý student uvede své individuální hodnocení měření a potvrdí jej svým podpisem. Je třeba podrobně komentovat každý bod měření, všechny výsledky a každou měřenou charakteristiku. Individuální závěr by měl také uvádět důležité technické a odborné poznatky z měření.

Kontrolní otázky

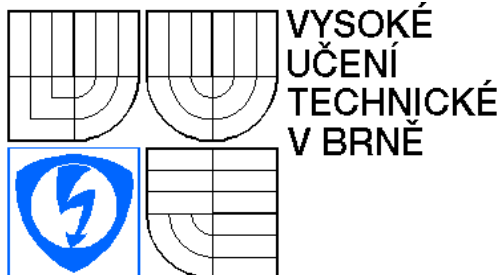
1. Co vyjadřuje parametr EVM a jaká je jeho mezní hodnota pro modulace QPSK?
2. Co znamená v oblasti koexistence parametr Guard Band a jak se vypočítá jeho hodnota?
3. Co vyjadřuje parametr C/I , jak lze určit a jakou má jednotku?

Použitá a doporučená literatura

- [1] HANUS, S. *Nové technologie mobilních komunikací pro integrovanou výuku VUT a VŠB-TUO: Systém LTE* [online]. Vyd. 1. V Brně: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2013. 100 s. ISBN 978-80-214-4824-7.
- [2] ZANDL, P. *Bezdrátové sítě Wifi praktický průvodce*. 1st ed. Brno: Computer Press, 2003, 204 s. ISBN 80-7226-632-2.
- [3] PLAISNER, D. *Koexistence stávajících a nových generací zemské digitální televize a mobilních bezdrátových komunikačních služeb*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2015. 76 s., 23 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce Ing. Ladislav Polák, Ph.D.
- [4] MILOS, J., POLAK, L., SLANINA, M., T, KRATOCHVIL, T. Measurement Setup for Evaluation the Coexistence between LTE Downlink and WLAN Networks. In: *2016 10th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP)*. Brno: IEEE, 2016, s. 1-4. ISBN: 978-1-5090-2526-8. DOI: 10.1109/CSNDSP.2016.7573936. 73936.
- [5] NAVRÁTIL, P. *Modely systému LTE: Multiplex v systému LTE*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2003. 72 s. Diplomová práce. Vedoucí práce prof. Ing. Stanislav Hanus, CSc.

**B VZOROVÉ
LABORATORNÍ ÚLOHY**

VYPRACOVÁNÍ



VYSOKÉ
UČENÍ
TECHNICKÉ
V BRNĚ

MĚŘENÍ KOEXISTENCE MEZI
BEZDRÁTOVÝMI
KOMUNIKAČNÍMI SYSTÉMY
LTE A IEEE 802.11

Vzorové vypracování protokolu

Vypracování:

- 1) V prvním bodě jsme se seznámili s přístroji a jejich ovládním.
- 2) Následně jsme realizovali kompletní zapojení laboratorního pracoviště.
Zde jsme měli změřit koexistenci mezi WLAN využívající standard IEEE 802.11b s přenosovou rychlostí, označovanou jako $R_{WLAN} = 1$ Mbps a LTE s šířkou pásma kanálu, označovanou jako $B_{LTE} = 1,4$ MHz. Před samotným měřením bylo zapotřebí nastavit dle postupu popsaného v tomto bodě všechny měřicí přístroje. Měření probíhalo pro několik zvolených hodnot GB, při kterých jsme postupně snižovali poměr C/I (tedy zvyšovali hodnotu výkonu WLAN při neměnném výkonu LTE). Výsledná složka EVM, která reflektuje vliv systému WLAN na LTE byla vyjádřena jako aritmetický průměr dvou odečtených hodnot. Naměřené hodnoty jsou naznačeny v Tab.1.
- 3) Stejným způsobem jsme změřili vzájemnou koexistenci mezi a LTE s $B_{LTE} = 10$ MHz a WLAN využívající standard IEEE 802.11b s $R_{WLAN} = 1$ Mbps. Hodnoty jsou zobrazeny v Tab. 2.
- 4) Nyní jsme zjišťovali vliv WLAN, který využívá IEEE 802.11g s $R_{WLAN} = 6$ Mbps na LTE. Hodnoty jsou naznačeny v Tab.3.

Tab. 1 Naměřené hodnoty při vzájemné koexistenci WLAN (IEEE 802.11b s $R_{WLAN} = 1$ Mbps) a LTE s $B_{LTE} = 1,4$ MHz a modulací QPSK.

	$f_{stř}$ [MHz]	2400,3	2398,3	2396,3	2394,3	2392,3
	GB [MHz]	1	3	5	7	9
C/I [dB]	P_c [dBm]	ϕ_{EVM} [%]	ϕ_{EVM} [%]	ϕ_{EVM} [%]	ϕ_{EVM} [%]	ϕ_{EVM} [%]
-10	-50	2,035	2,2355	1,73	1,36	1,08
-15	-45	2,55	3,255	2,235	1,39	1,095
-20	-40	3,595	5,33	3,37	1,685	1,205
-22	-38	4,235	6,49	4,075	2,075	1,275
-24	-36	5,355	8,055	5,02	2,19	1,175
-26	-34	6,215	10,18	5,93	2,795	1,295
-28	-32	7,645	12,68	7,255	3,35	1,36
-30	-30	9,48	15,915	8,89	3,94	1,45
-32	-28	11,39	19,96	11,685	4,93	1,615
-34	-26	14,3	24,82	13,8	6,115	1,935
-36	-24	17,65	31,68	17,235	7,88	2,36
-38	-22	21,91	36,35	21,305	8,89	2,745
-40	-20	27,155	44,59	26,885	10,905	3,12

Tab. 2 Naměřené hodnoty při vzájemné koexistenci WLAN (IEEE 802.11b s $R_{WLAN} = 1$ Mbps) a LTE s $B_{LTE} = 10$ MHz a modulací QPSK.

	$f_{stř}$ [MHz]	2396	2394	2392	2390	2388
	GB [MHz]	1	3	5	7	9
C/I [dB]	P_c [dBm]	ϕ_{EVM} [%]	ϕ_{EVM} [%]	ϕ_{EVM} [%]	ϕ_{EVM} [%]	ϕ_{EVM} [%]
-10	-50	4,07	3,635	3,065	3,04	3,025
-15	-45	5,465	4,595	3,335	3,065	3,03
-20	-40	8,075	6,585	4,005	3,175	3,045
-22	-38	9,775	7,715	4,425	3,295	3,05
-24	-36	11,885	8,51	4,98	3,39	3,06
-26	-34	14,47	9,33	5,295	3,605	3,04
-28	-32	16,805	10,03	5,7	3,895	3,07
-30	-30	18,84	11,055	6,38	4,29	3,115
-32	-28	20,09	12,7	7,175	4,835	3,175
-34	-26	22,955	13,91	8,56	5,465	3,26
-36	-24	24,615	13,93	10,055	5,79	3,355
-38	-22	25,575	15,515	11,285	5,92	3,49
-40	-20	26	18,605	12,655	6,195	3,725

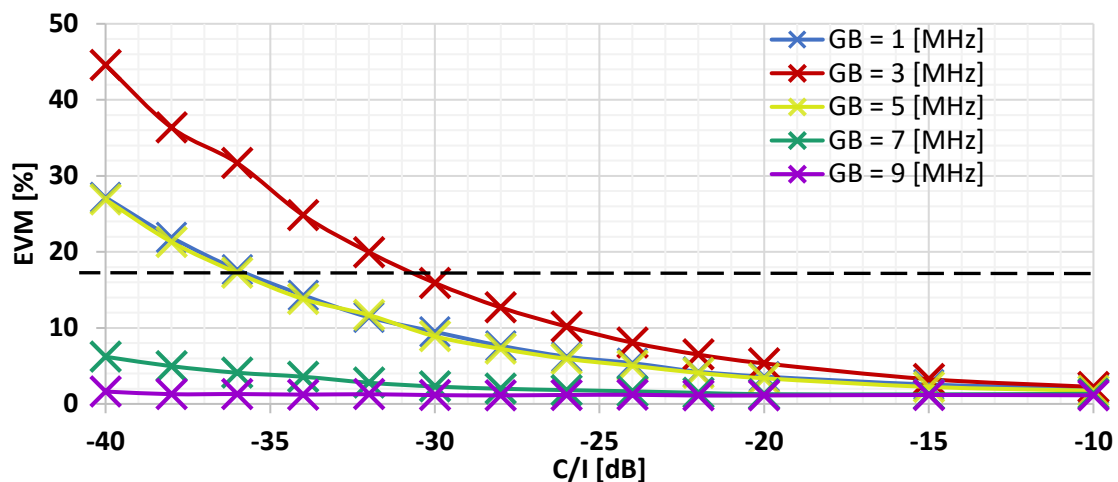
Tab. 3 Naměřené hodnoty při vzájemné koexistenci WLAN (IEEE 802.11g s $R_{WLAN} = 6$ Mbps) a LTE s $B_{LTE} = 10$ MHz a modulací QPSK.

	$f_{stř}$ [MHz]	2396	2394	2392	2390	2388
	GB [MHz]	1	3	5	7	9
C/I [dB]	P_c [dBm]	ϕ_{EVM} [%]	ϕ_{EVM} [%]	ϕ_{EVM} [%]	ϕ_{EVM} [%]	ϕ_{EVM} [%]
-10	-50	3,075	3,06	3,085	3,1	3,055
-15	-45	3,105	3,07	3,065	3,08	3,06
-20	-40	3,115	3,085	3,115	3,11	3,075
-22	-38	3,145	3,09	3,1	3,095	3,065
-24	-36	3,15	3,105	3,115	3,11	3,08
-26	-34	3,185	3,095	3,12	3,13	3,09
-28	-32	3,33	3,105	3,065	3,14	3,105
-30	-30	3,355	3,13	3,13	3,155	3,12
-32	-28	3,48	3,18	3,175	3,195	3,175
-34	-26	4,14	3,235	3,2	3,215	3,195
-36	-24	8,825	3,335	3,235	3,28	3,235
-38	-22	22,55	4,415	3,32	3,355	3,315
-40	-20	42,57	11,59	3,485	3,465	3,425

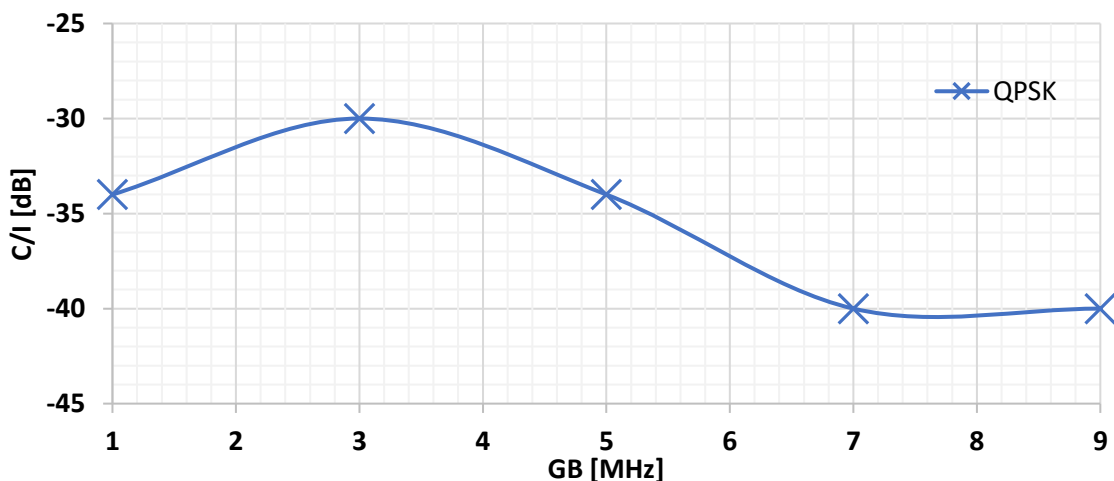
5)

Z naměřených hodnot, zapsaných do tabulek jsme sestrojili grafy. Na Obr.1 je zobrazen výsledný graf koexistence LTE s $B_{LTE} = 1,4$ a WLAN (IEEE 802.11b s $R_{WLAN} = 1$ Mbps). Čárkovaně jsou vyznačeny mezní hodnoty EVM, nad jejichž hodnotu dochází k výpadku signálu LTE. Jednotlivé křivky vyjadřují různé velikosti ochranného pásma GB mezi RF spektry LTE a WLAN.

Průběhy téměř odpovídají teoretickým předpokladům, kdy zvýšením GB dochází ke snížení vlivu systému WLAN na LTE. Při použití nejnižšího vzájemného odstupu $GB = 1$ MHz, se projevuje značná odolnost LTE vůči rušení. Tento jev může být zapříčiněn vzájemnou ortogonalitou vzniklou mezi subnosnými LTE a WLAN. Dále lze pozorovat, že s rostoucím výkonem WLAN se zhoršuje výkonnost systému LTE. Na základě naměřených výsledků byly zvoleny hodnoty odpovídající C/I , při kterých je ještě možné přijímat a zpracovat LTE signál (odpovídá nejvyšší dosažené hodnotě EVM, která nepřesáhne hranici chybovosti). Tyto hodnoty jsou prezentovány graficky na Obr. 2. Opět je pozorovatelná jistá odolnost LTE při $GB = 1$ MHz. Se zvyšujícím GB však dochází ke značnému poklesu vlivu WLAN na LTE. Při $GB = 7$ MHz tak u LTE kvůli vlivu WLAN nedochází k výpadkům poskytovaných služeb.

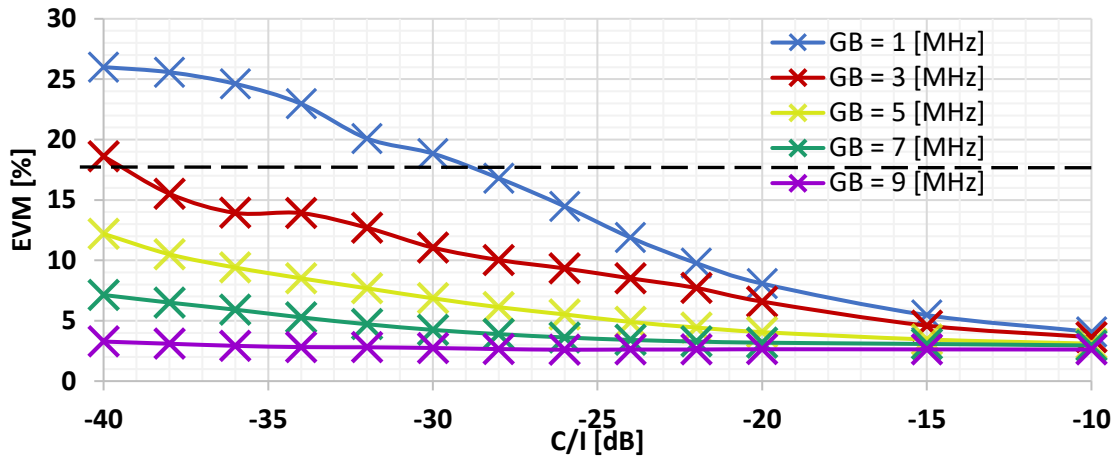


Obr. 1 Graf závislosti parametru EVM signálu LTE s $B_{\text{LTE}} = 1,4$ MHz (QPSK) na C/I při různých GB (rušení Wi-Fi 802.11b s $R_{\text{WLAN}} = 1$ Mbps).

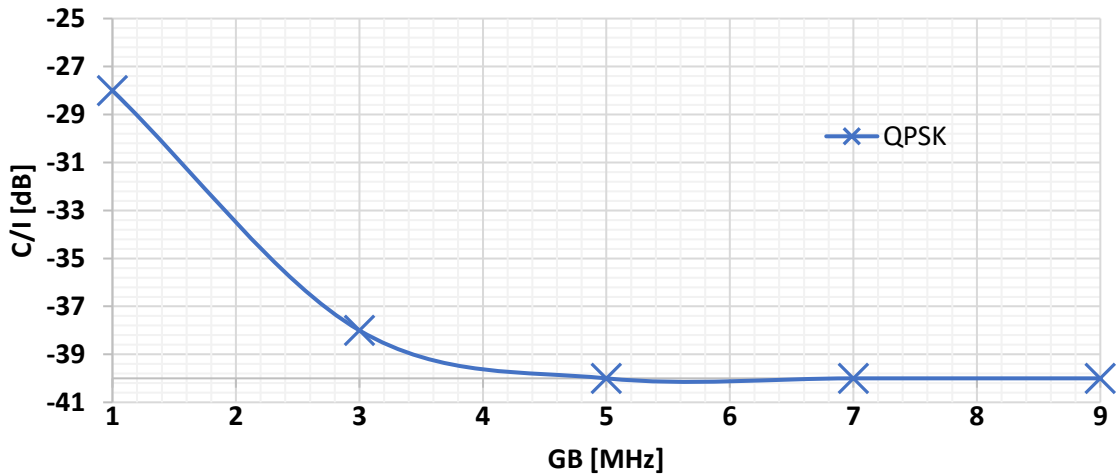


Obr. 2 Závislost C/I na GB pro LTE s $B_{\text{LTE}} = 1,4$ MHz při koexistenci se signálem WLAN IEEE 802.11b s $R_{\text{WLAN}} = 1$ Mbps. Hodnoty poměrů C/I reprezentují situaci, kdy je ještě možné přijímat a zpracovat LTE signál. Po překročení této hodnoty signál LTE už vypadává a nelze jej synchronizovat.

Koexistence WLAN (IEEE 802.11b s $R_{\text{WLAN}} = 1$ Mbps) a LTE s navýšenou šířkou pásma ($B_{\text{LTE}} = 10$ MHz) je prezentována na Obr. 3. Opět jsou vyznačeny čárkovaně mezní hodnoty EVM, při jejichž překročení dochází k výpadku signálu LTE. Oproti předchozímu případu (tedy kdy využíval LTE kanál s menší šířkou pásma), lze vidět větší odolnost systému LTE vůči rušení. V systému LTE podle výsledků dochází k výpadkům poskytovaných služeb vlivem koexistence s WLAN pouze při vzájemném odstupu menším než $GB = 3$ MHz a to včetně. Z naměřených výsledků byly zvoleny nejnižší hodnoty C/I , při kterých nepřekročí hodnota složky EVM signálu LTE mezní hranici chybovosti. Tyto hodnoty byly v závislosti na GB vyneseny do grafu viz. Obr. 4. Z grafu plyne, že pro zabezpečení signálu LTE před vlivem signálu WLAN je zapotřebí dodržet minimální vzájemný odstup $GB = 5$ MHz.

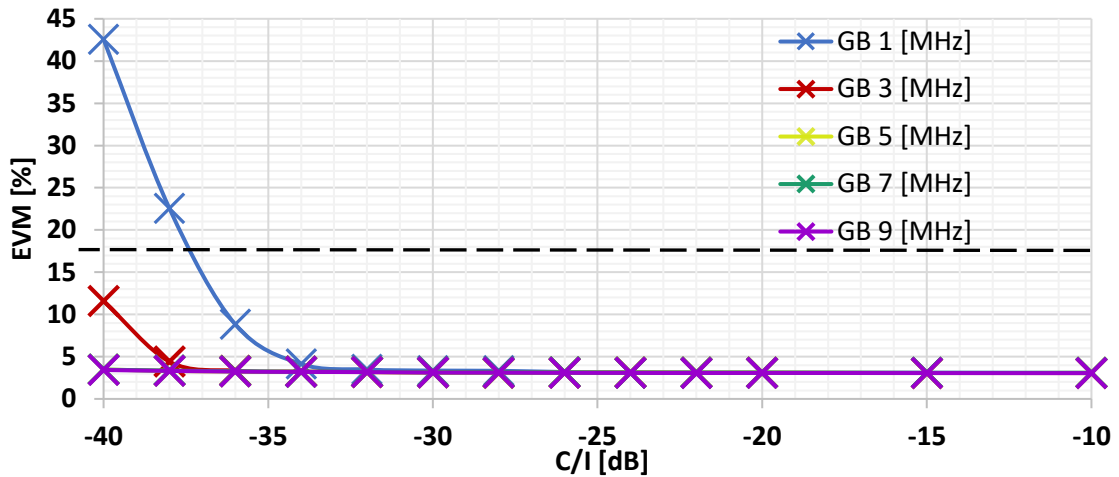


Obr. 3 Graf závislosti parametru EVM signálu LTE s $B_{\text{LTE}} = 10$ MHz (QPSK) na C/I při různých GB (rušení Wi-Fi 802.11b s $R_{\text{WLAN}} = 1$ Mbps).

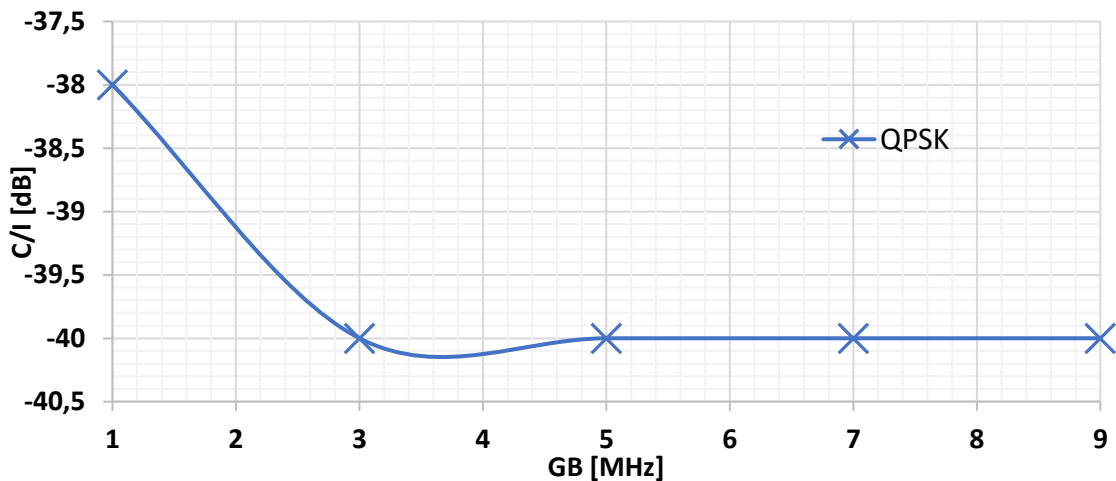


Obr. 4 Závislost C/I na GB pro LTE s $B_{\text{LTE}} = 10$ MHz při koexistenci se signálem WLAN IEEE 802.11b s $R_{\text{WLAN}} = 1$ Mbps. Hodnoty poměrů C/I reprezentují situaci, kdy je ještě možné přijímat a zpracovat LTE signál. Po překročení této hodnoty signál LTE už vypadává a nelze jej synchronizovat.

Poslední případ vzájemné koexistence, kdy byla šířka pásma kanálu LTE ponechána ($B_{\text{LTE}} = 10$ MHz) a pro WLAN byla použita specifikace IEEE 802.11g s $R_{\text{WLAN}} = 6$ Mbps je naznačen na Obr. 5. Lze pozorovat značnou odolnost LTE vůči WLAN. Prakticky dochází k výpadkům LTE, které vznikají vlivem interferencí s WLAN pouze při vzájemném RF odstupu systémů $GB = 1$ MHz. Na Obr. 6 je pak opět naznačen graf závislosti C/I na GB, který byl vytvořen z naměřených výsledků stejným způsobem jako v předchozích případech. V porovnání s předchozím případem, je jasně vidět, že vliv signálu WLAN na signál LTE je při vzájemném odstupu $GB = 3$ MHz již nulový.



Obr. 5 Graf závislosti parametru EVM signálu LTE s $B_{\text{LTE}} = 10$ MHz (QPSK) na C/I při různých GB (rušení Wi-Fi 802.11g s $R_{\text{WLAN}} = 6$ Mbps).

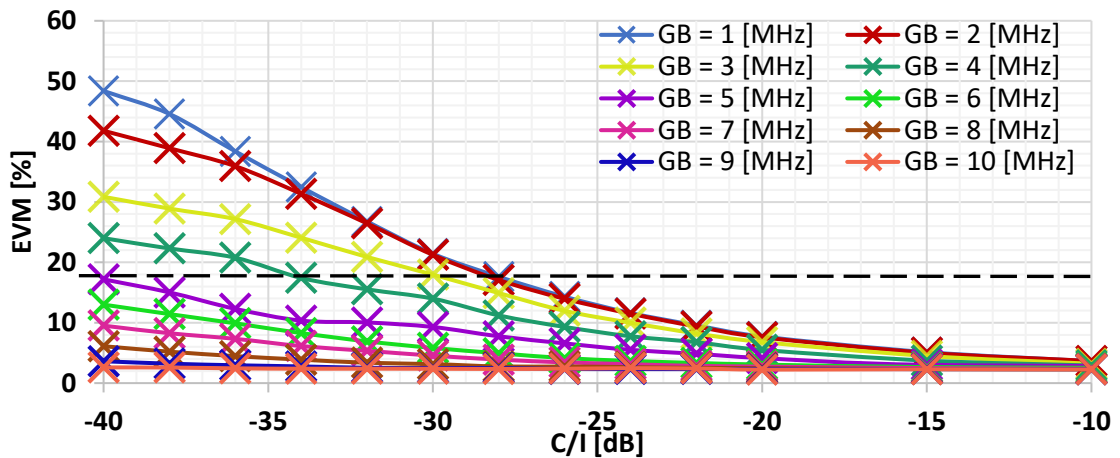


Obr. 6 Závislost C/I na GB pro LTE s $B_{\text{LTE}} = 10$ MHz při koexistenci se signálem WLAN IEEE 802.11g s $R_{\text{WLAN}} = 6$ Mbps. Hodnoty poměrů C/I reprezentují situaci, kdy je ještě možné přijímat a zpracovat LTE signál. Po překročení této hodnoty signál LTE už vypadává a nelze jej synchronizovat.

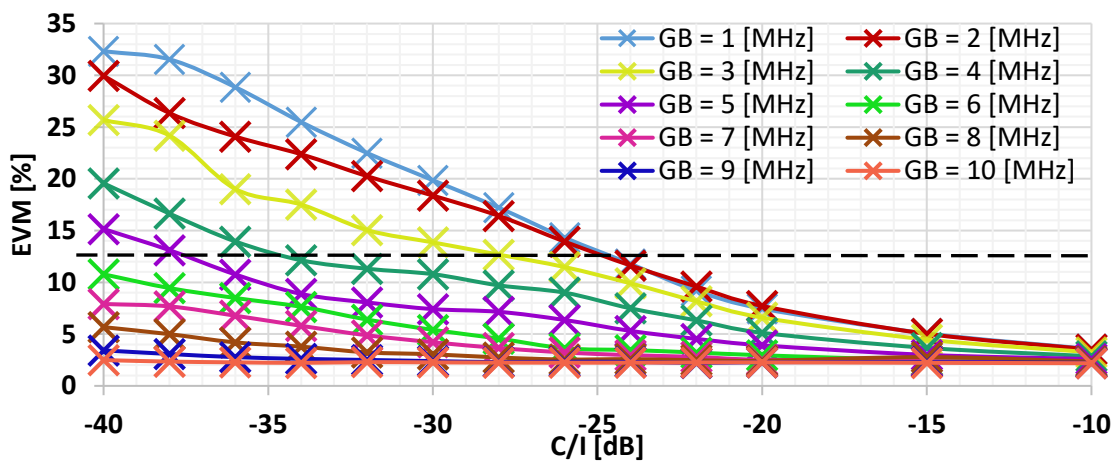
Závěr:

V laboratorní úloze jsme měřili koexistenci mezi mobilním systémem LTE a bezdrátovými komunikačními systémy WLAN. Postupně jsme změřili několik případů koexistence. Naměřené hodnoty jsme sepsali do tabulky a následně jsme z nich sestrojili grafy. Při vzájemném porovnání průběhů reflektujících výpadky signálu LTE způsobené signálem WLAN, jsou patrné rozdíly při použití různé šířky pásma LTE ($B_{\text{LTE}} = 1,4$ MHz, $B_{\text{LTE}} = 10$ MHz). Z výsledků je patrné, že při šířce pásma LTE kanálu $B_{\text{LTE}} = 10$ MHz dochází k většímu nárůstu zhoršení kvality poskytovaných služeb při koexistenci s WLAN využívající standard IEEE 802.11b.

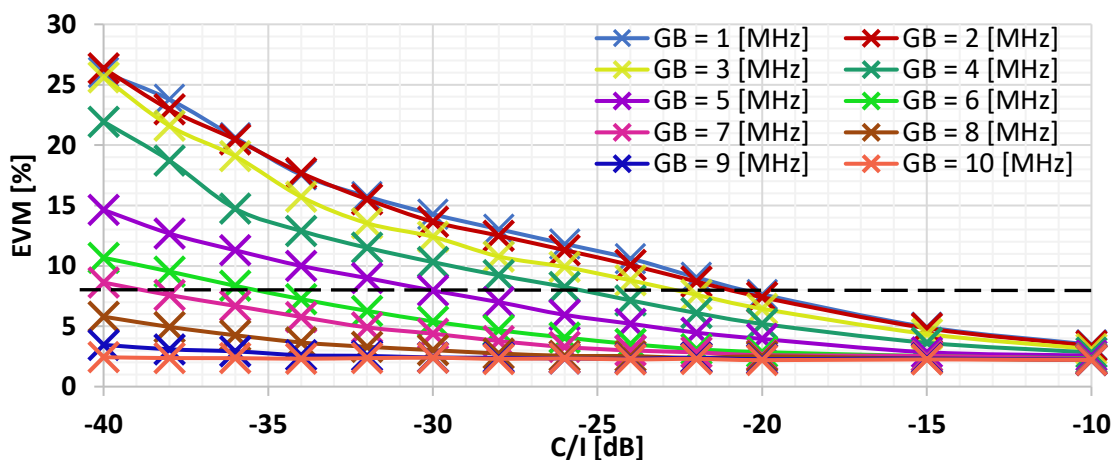
C SEZNAM NAMĚŘENÝCH GRAFŮ



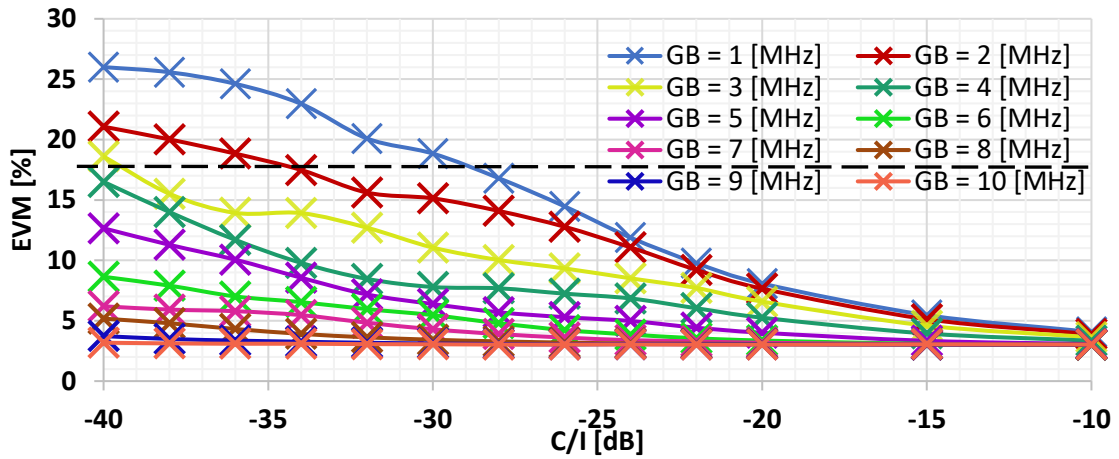
Obr. 1 Závislost parametru EVM signálu LTE s $B_{LTE} = 5$ MHz s modulací QPSK na C/I pro několik hodnot GB (rušení Wi-Fi 802.11b s $R_{WLAN} = 1$ Mbps).



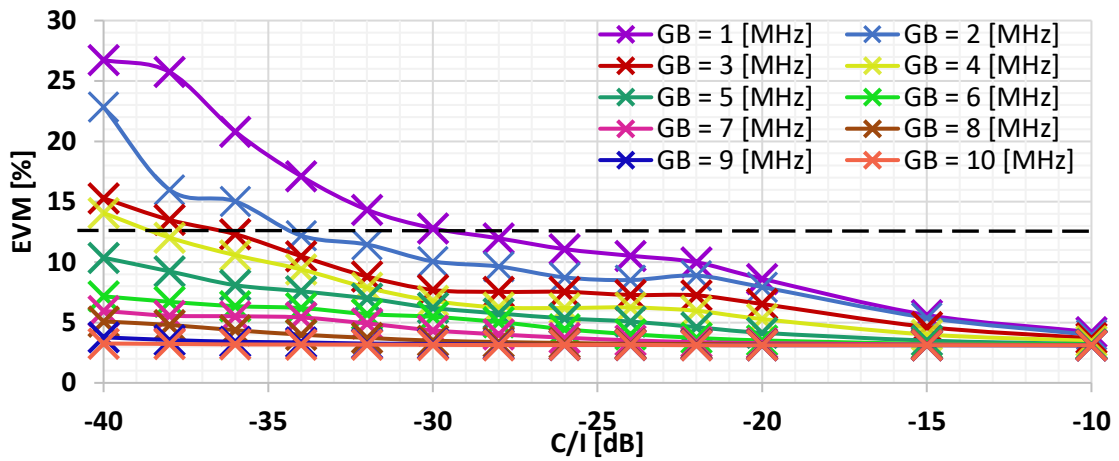
Obr. 2 Závislost parametru EVM signálu LTE s $B_{LTE} = 5$ MHz s modulací 16QAM na C/I pro několik hodnot GB (rušení Wi-Fi 802.11b s $R_{WLAN} = 1$ Mbps).



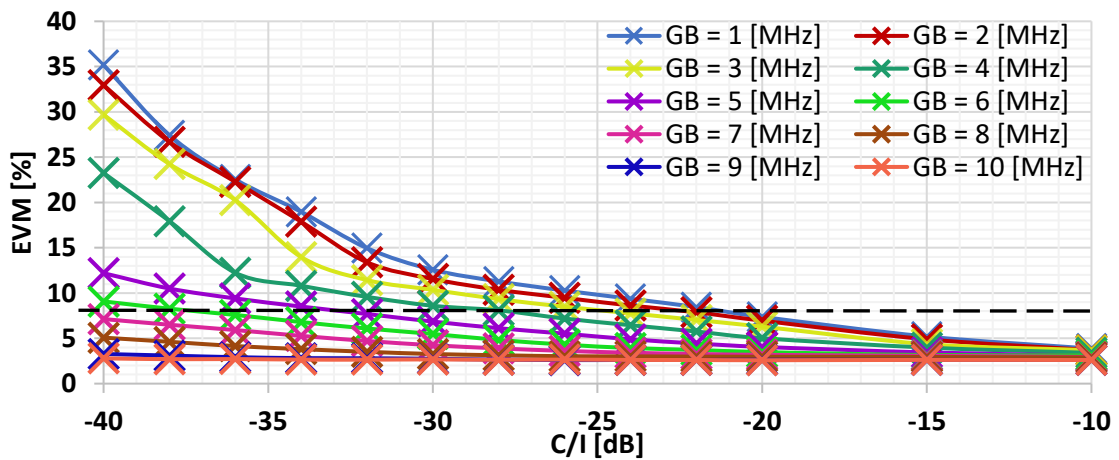
Obr. 3 Závislost parametru EVM signálu LTE s $B_{LTE} = 5$ MHz s modulací 64QAM na C/I pro několik hodnot GB (rušení Wi-Fi 802.11b s $R_{WLAN} = 1$ Mbps).



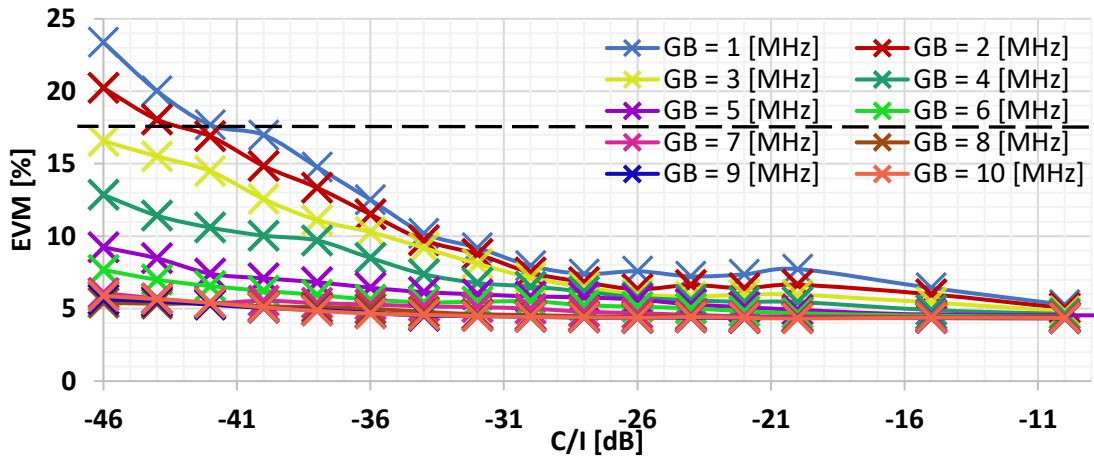
Obr. 4 Závislost parametru EVM signálu LTE s $B_{\text{LTE}} = 10$ MHz s modulací QPSK na C/I pro několik hodnot GB (rušení Wi-Fi 802.11b s $R_{\text{WLAN}} = 1$ Mbps).



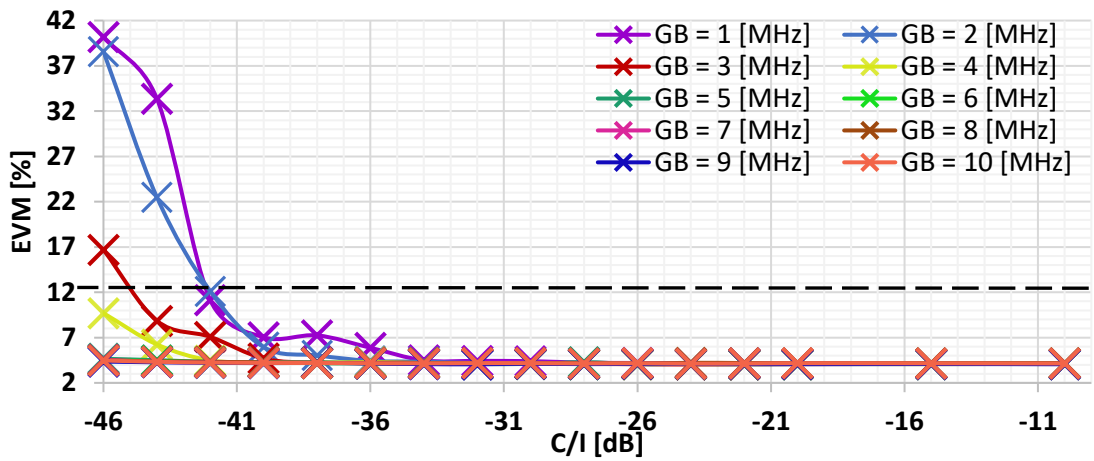
Obr. 5 Závislost parametru EVM signálu LTE s $B_{\text{LTE}} = 10$ MHz s modulací 16QAM na C/I pro několik hodnot GB (rušení Wi-Fi 802.11b s $R_{\text{WLAN}} = 1$ Mbps).



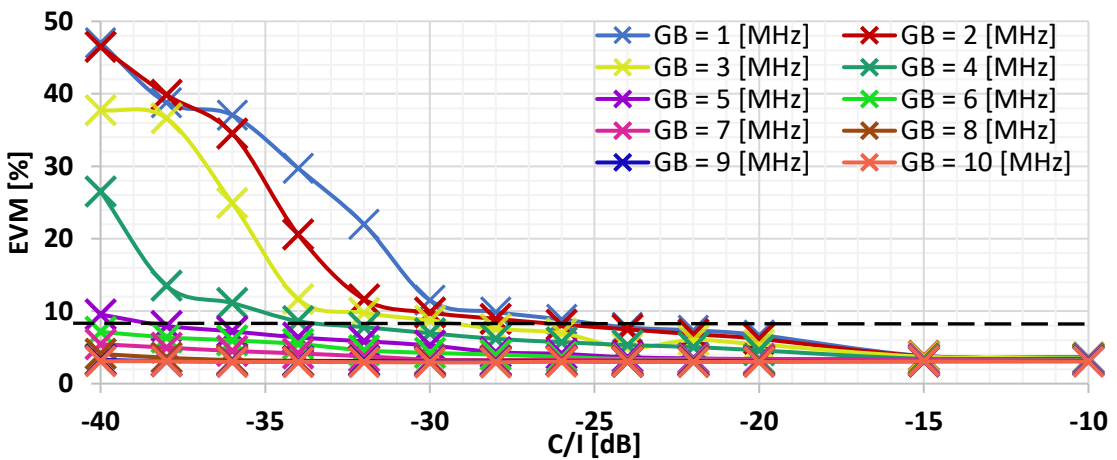
Obr. 6 Závislost parametru EVM signálu LTE s $B_{\text{LTE}} = 10$ MHz s modulací 64QAM na C/I pro několik hodnot GB (rušení Wi-Fi 802.11b s $R_{\text{WLAN}} = 1$ Mbps).



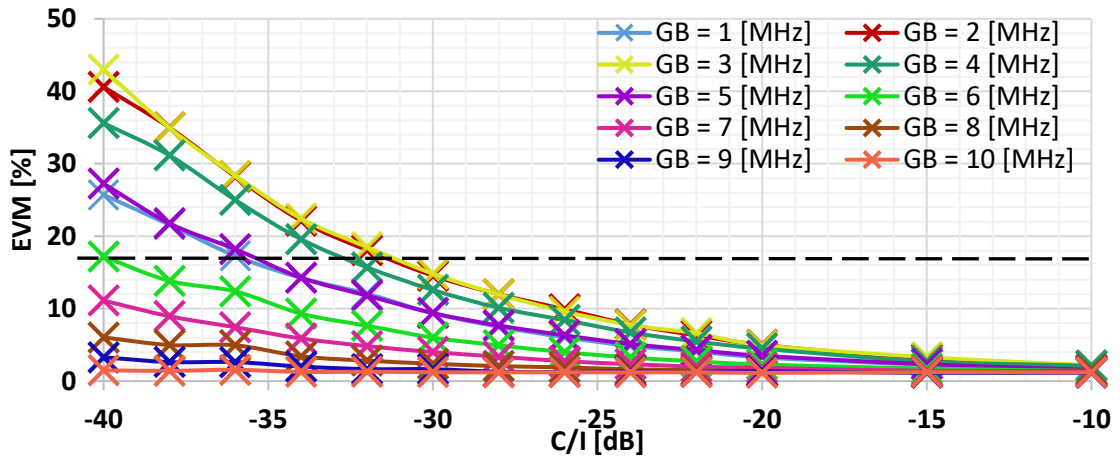
Obr. 7 Závislost parametru EVM signálu LTE s $B_{\text{LTE}} = 20$ MHz s modulací QPSK na C/I pro několik hodnot GB (rušení Wi-Fi 802.11b s $R_{\text{WLAN}} = 1$ Mbps).



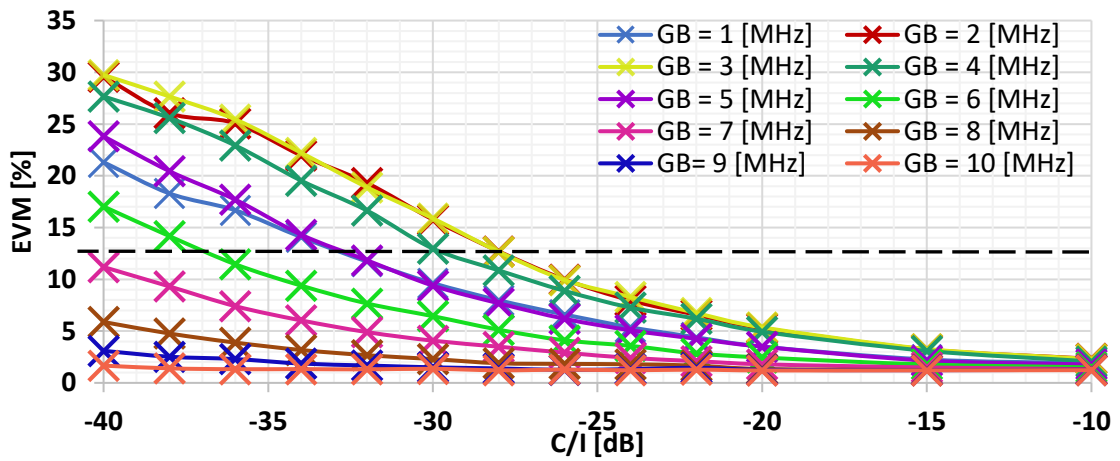
Obr. 8 Závislost parametru EVM signálu LTE s $B_{\text{LTE}} = 20$ MHz s modulací 16QAM na C/I pro několik hodnot GB (rušení Wi-Fi 802.11b s $R_{\text{WLAN}} = 1$ Mbps).



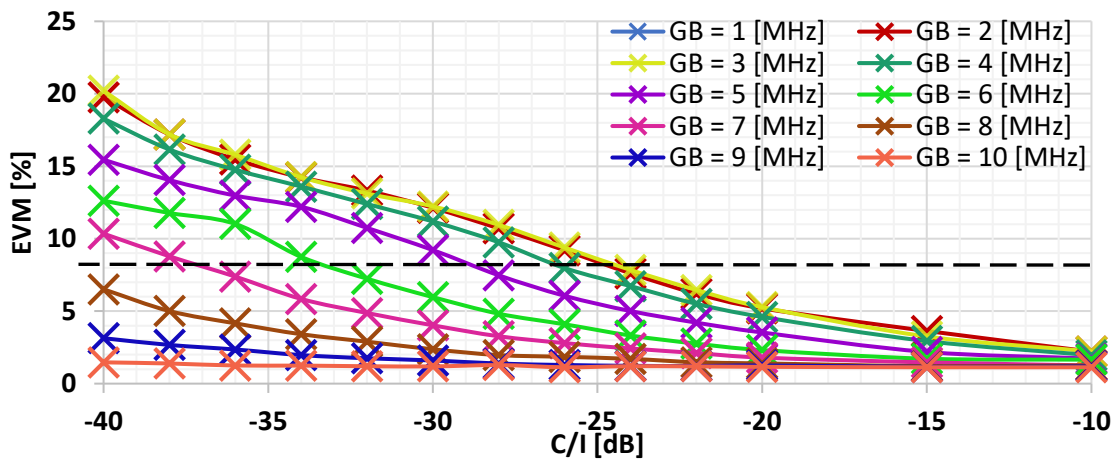
Obr. 9 Závislost parametru EVM signálu LTE s $B_{\text{LTE}} = 20$ MHz s modulací 64QAM na C/I pro několik hodnot GB (rušení Wi-Fi 802.11b s $R_{\text{WLAN}} = 1$ Mbps).



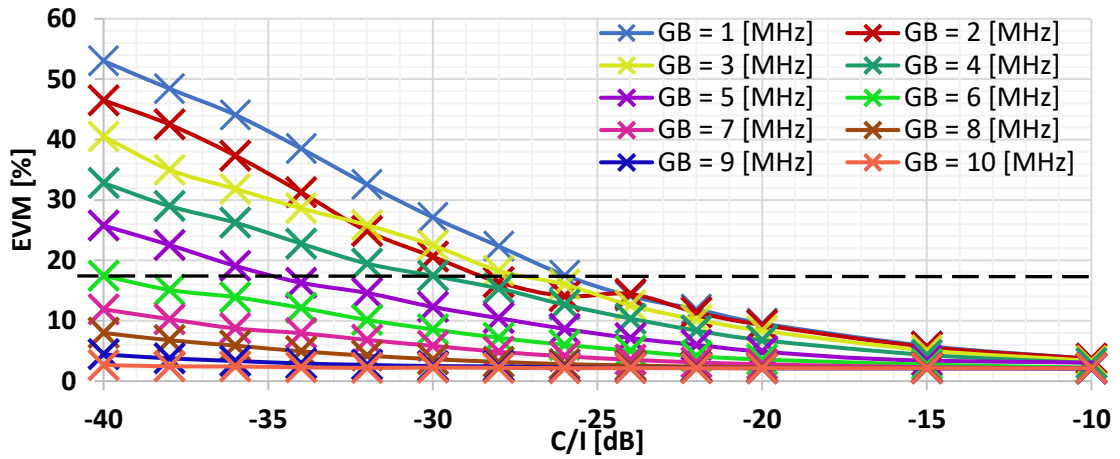
Obr. 10 Závislost parametru EVM signálu LTE s $B_{LTE} = 1,4$ MHz s modulací QPSK na C/I pro několik hodnot GB (rušení Wi-Fi 802.11b s $R_{WLAN} = 11$ Mbps).



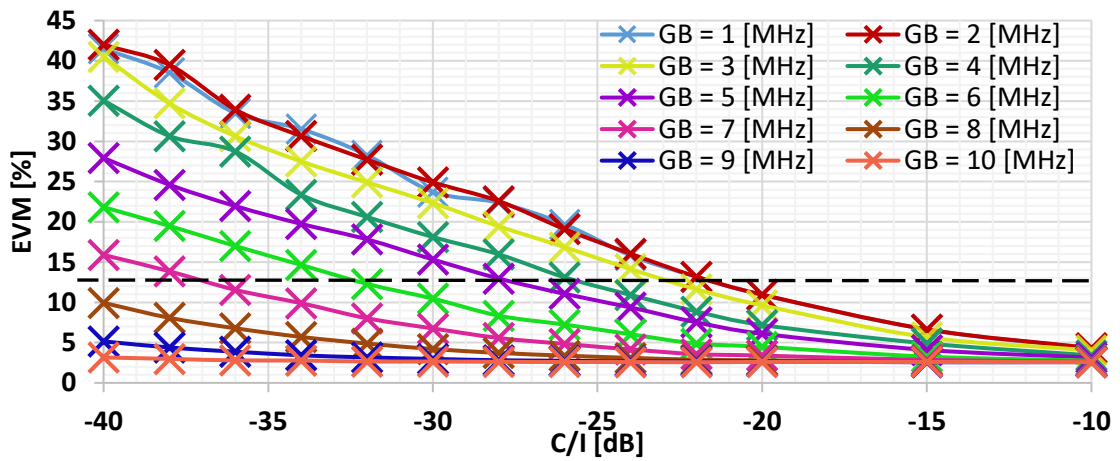
Obr. 11 Závislost parametru EVM signálu LTE s $B_{LTE} = 1,4$ MHz s modulací 16QAM na C/I pro několik hodnot GB (rušení Wi-Fi 802.11b s $R_{WLAN} = 11$ Mbps).



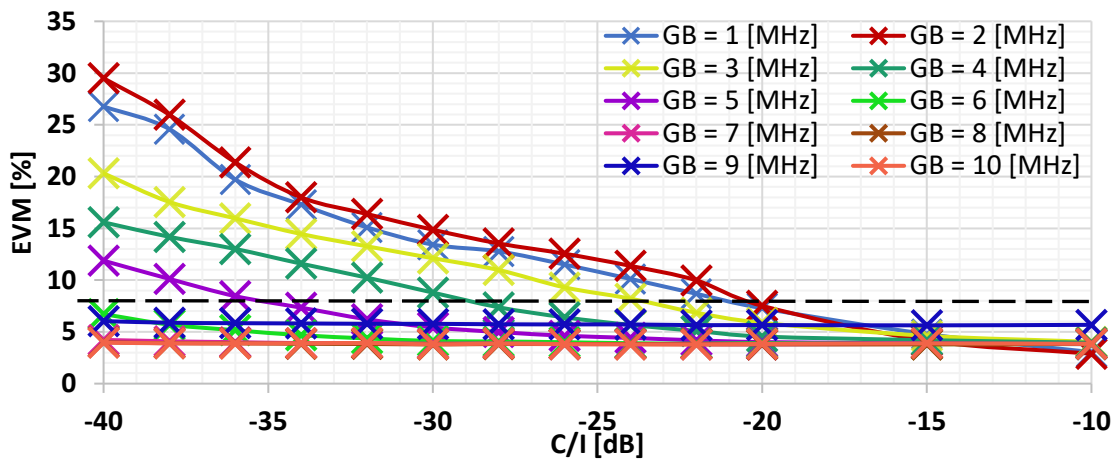
Obr. 12 Závislost parametru EVM signálu LTE s $B_{LTE} = 1,4$ MHz s modulací 64QAM na C/I pro několik hodnot GB (rušení Wi-Fi 802.11b s $R_{WLAN} = 11$ Mbps).



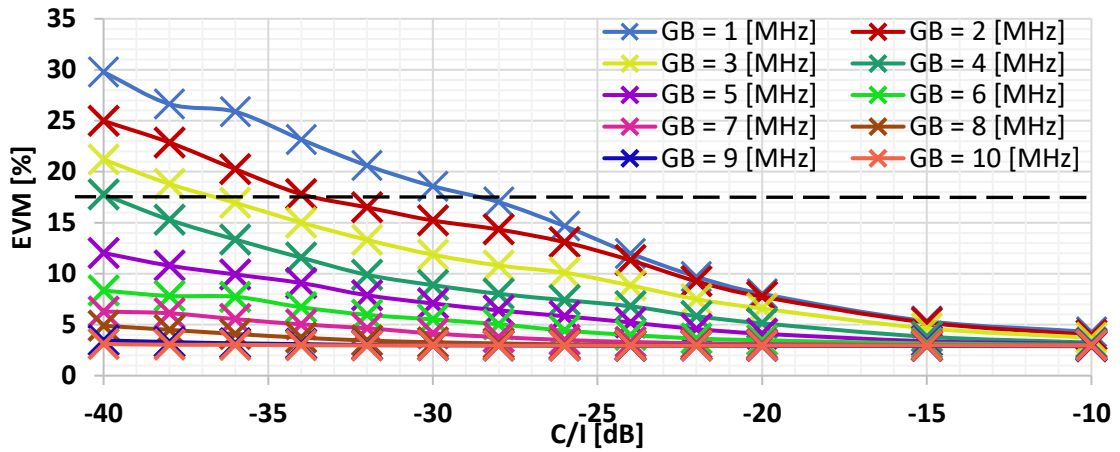
Obr. 13 Závislost parametru EVM signálu LTE s $B_{LTE} = 5$ MHz s modulací QPSK na C/I pro několik hodnot GB (rušení Wi-Fi 802.11b s $R_{WLAN} = 11$ Mbps).



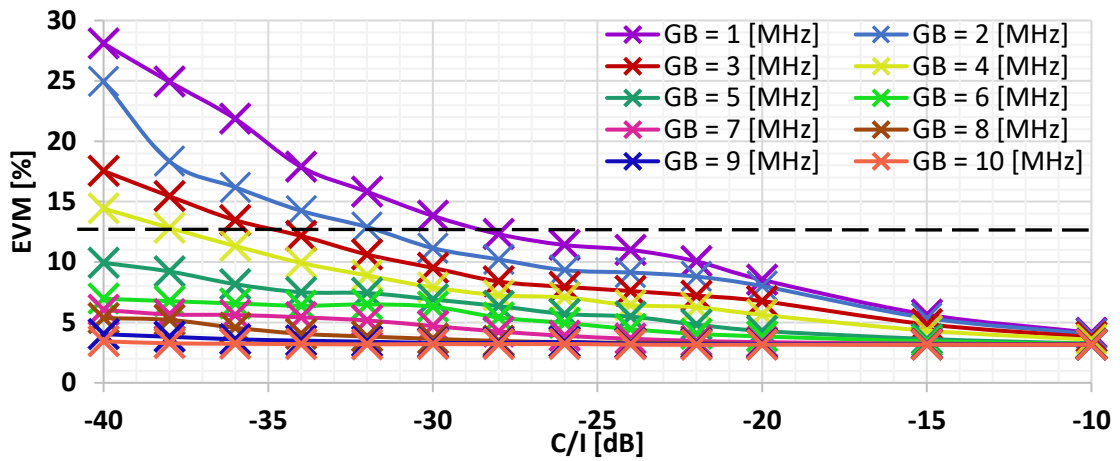
Obr. 14 Závislost parametru EVM signálu LTE s $B_{LTE} = 5$ MHz s modulací 16QAM na C/I pro několik hodnot GB (rušení Wi-Fi 802.11b s $R_{WLAN} = 11$ Mbps).



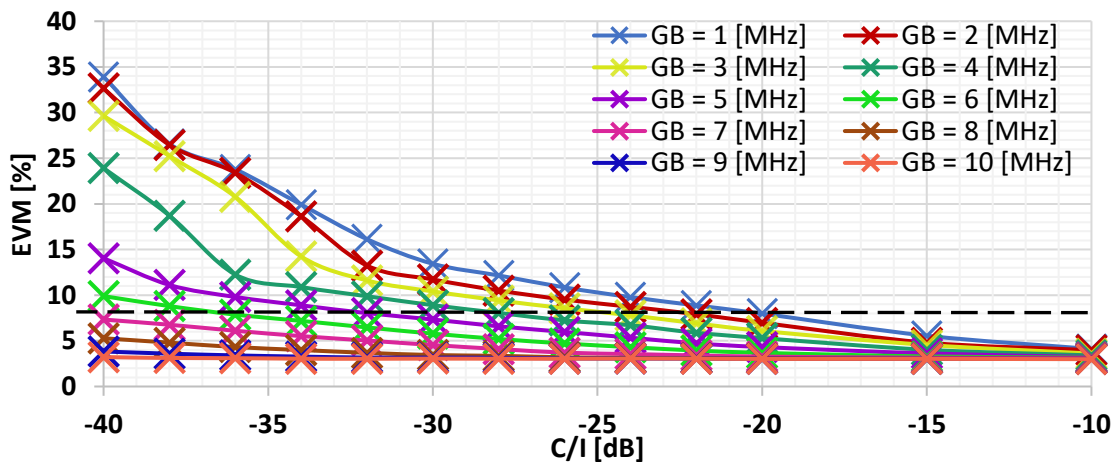
Obr. 15 Závislost parametru EVM signálu LTE s $B_{LTE} = 5$ MHz s modulací 64QAM na C/I pro několik hodnot GB (rušení Wi-Fi 802.11b s $R_{WLAN} = 11$ Mbps).



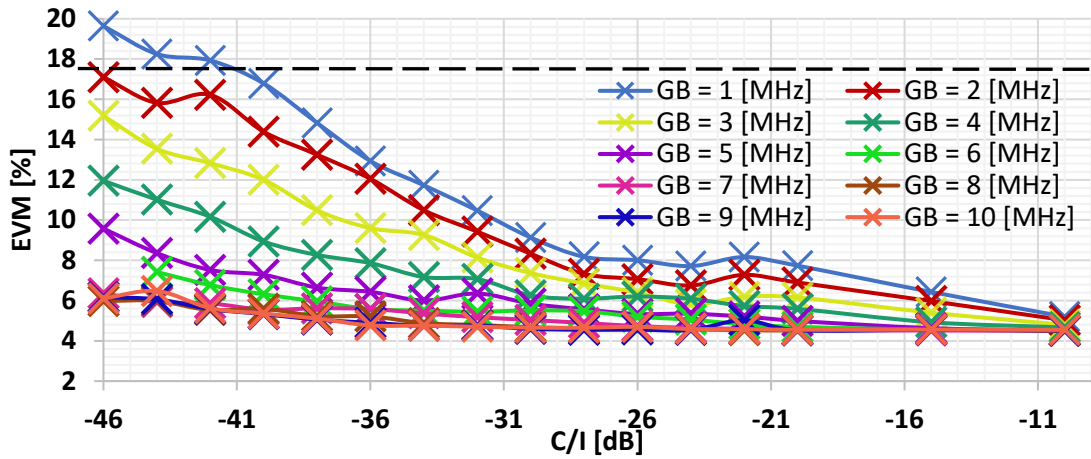
Obr. 16 Závislost parametru EVM signálu LTE s $B_{\text{LTE}} = 10$ MHz s modulací QPSK na C/I pro několik hodnot GB (rušení Wi-Fi 802.11b s $R_{\text{WLAN}} = 11$ Mbps).



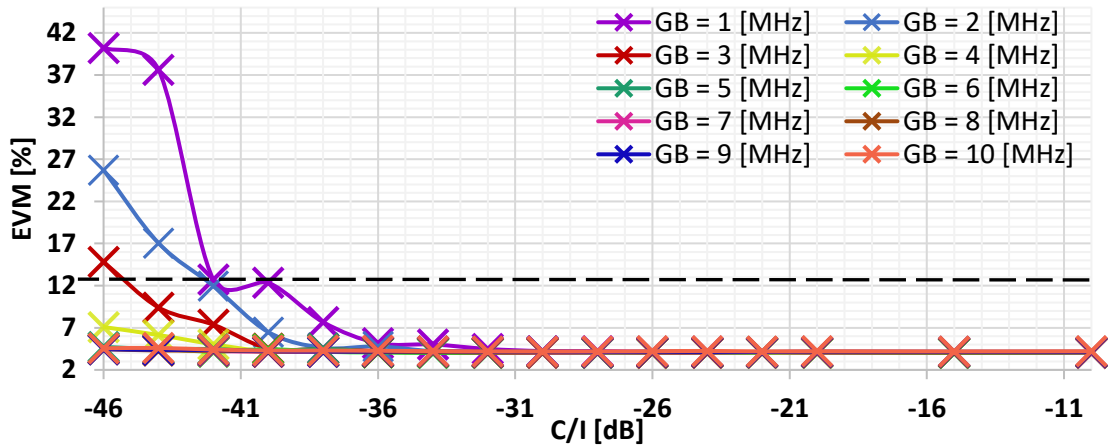
Obr. 17 Závislost parametru EVM signálu LTE s $B_{\text{LTE}} = 10$ MHz s modulací 16QAM na C/I pro několik hodnot GB (rušení Wi-Fi 802.11b s $R_{\text{WLAN}} = 11$ Mbps).



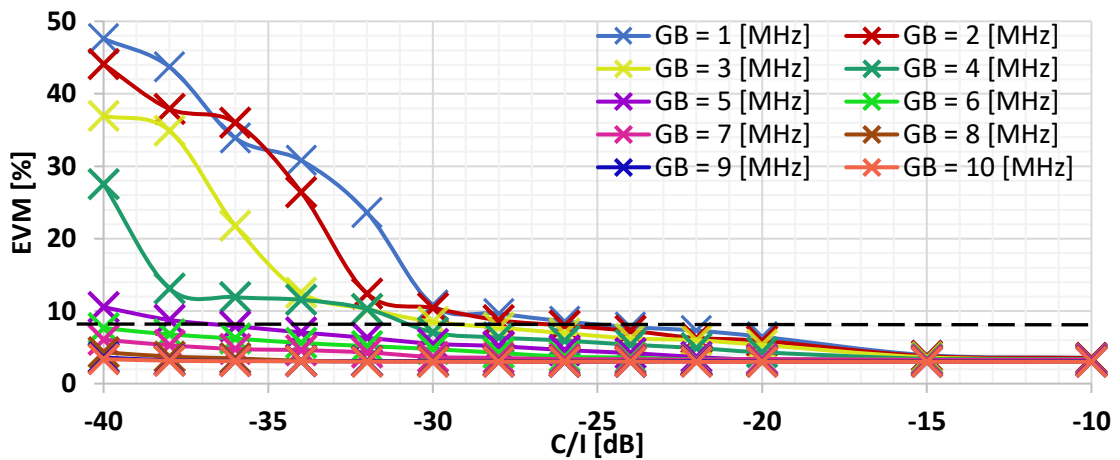
Obr. 18 Závislost parametru EVM signálu LTE s $B_{\text{LTE}} = 10$ MHz s modulací 64QAM na C/I pro několik hodnot GB (rušení Wi-Fi 802.11b s $R_{\text{WLAN}} = 11$ Mbps).



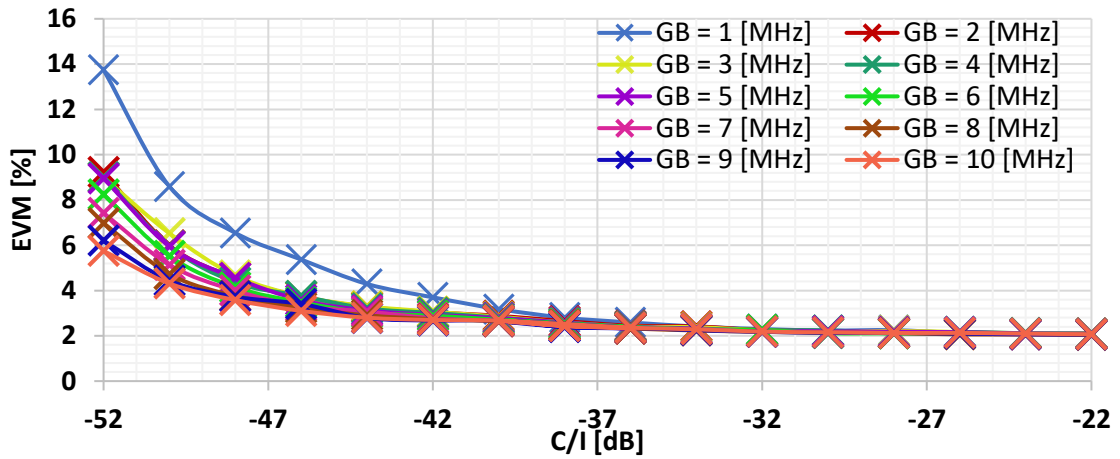
Obr. 19 Závislost parametru EVM signálu LTE s $B_{\text{LTE}} = 20$ MHz s modulací QPSK na C/I pro několik hodnot GB (rušení Wi-Fi 802.11b s $R_{\text{WLAN}} = 11$ Mbps).



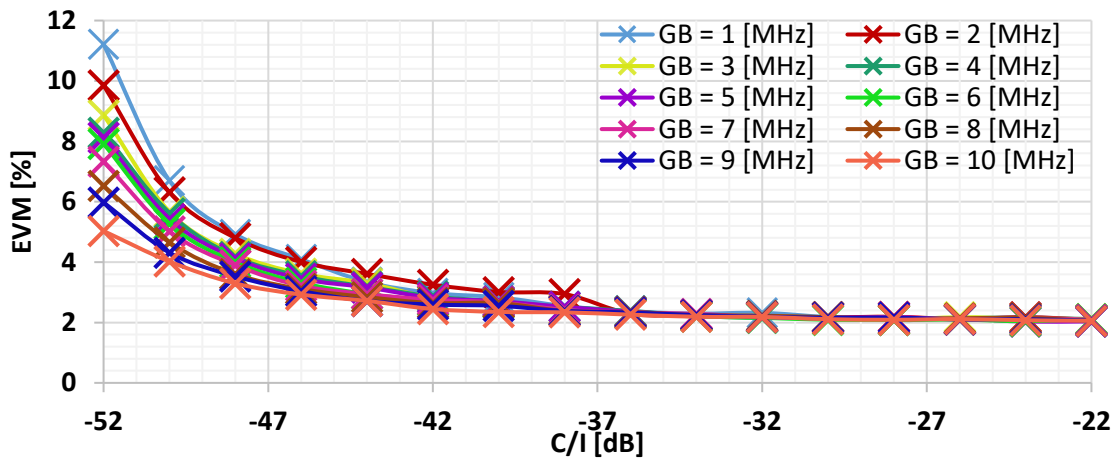
Obr. 20 Závislost parametru EVM signálu LTE s $B_{\text{LTE}} = 20$ MHz s modulací 16QAM na C/I pro několik hodnot GB (rušení Wi-Fi 802.11b s $R_{\text{WLAN}} = 11$ Mbps).



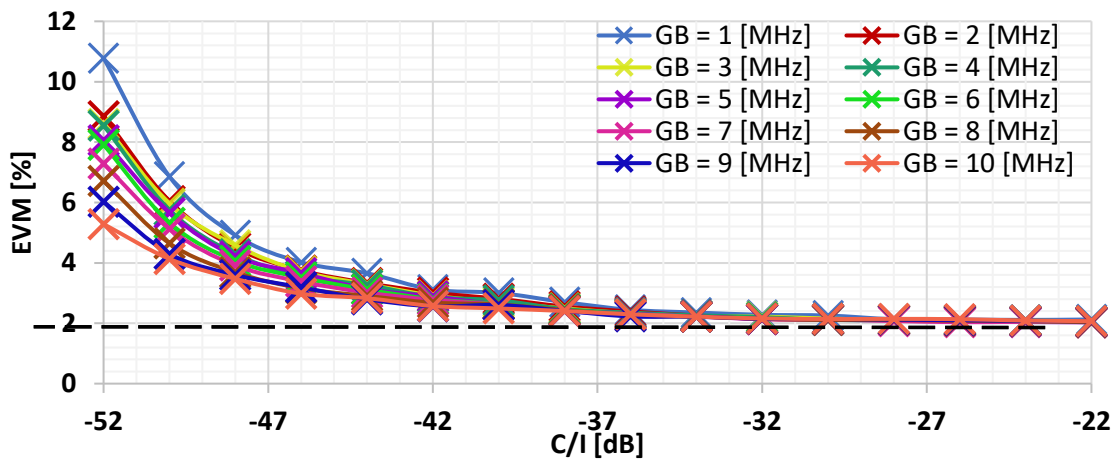
Obr. 20 Závislost parametru EVM signálu LTE s $B_{\text{LTE}} = 20$ MHz s modulací 64QAM na C/I pro několik hodnot GB (rušení Wi-Fi 802.11b s $R_{\text{WLAN}} = 11$ Mbps).



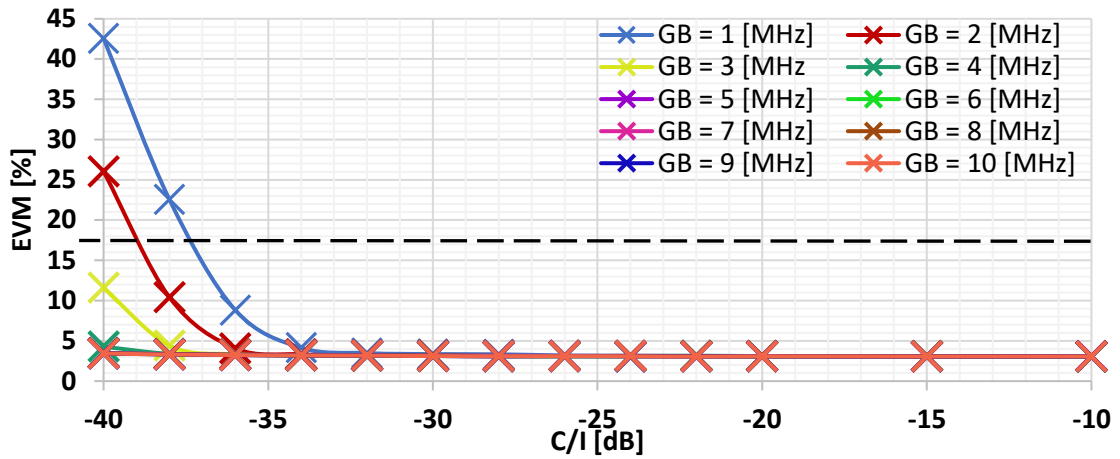
Obr. 21 Závislost parametru EVM signálu LTE s $B_{LTE} = 5$ MHz s modulací QPSK na C/I pro několik hodnot GB (rušení Wi-Fi 802.11g s $R_{WLAN} = 6$ Mbps).



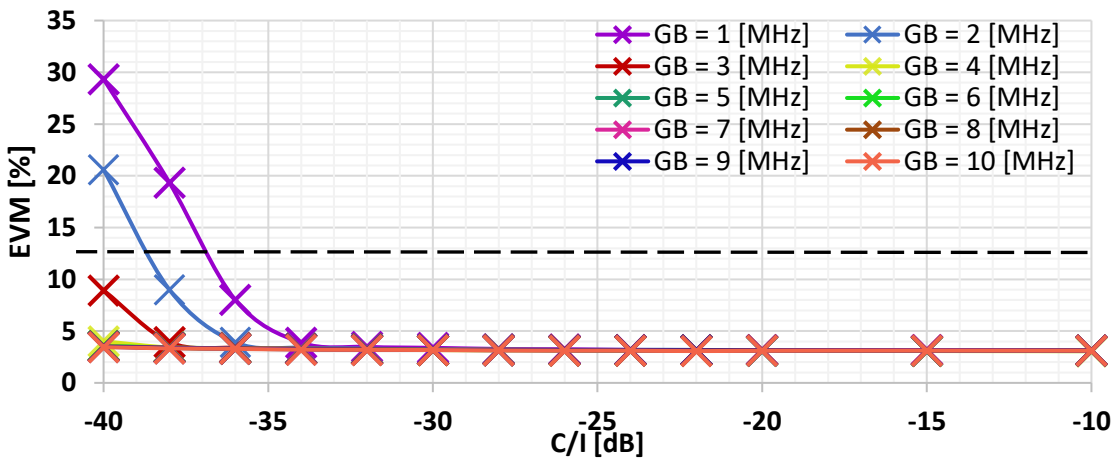
Obr. 22 Závislost parametru EVM signálu LTE s $B_{LTE} = 5$ MHz s modulací 16QAM na C/I pro několik hodnot GB (rušení Wi-Fi 802.11g s $R_{WLAN} = 6$ Mbps).



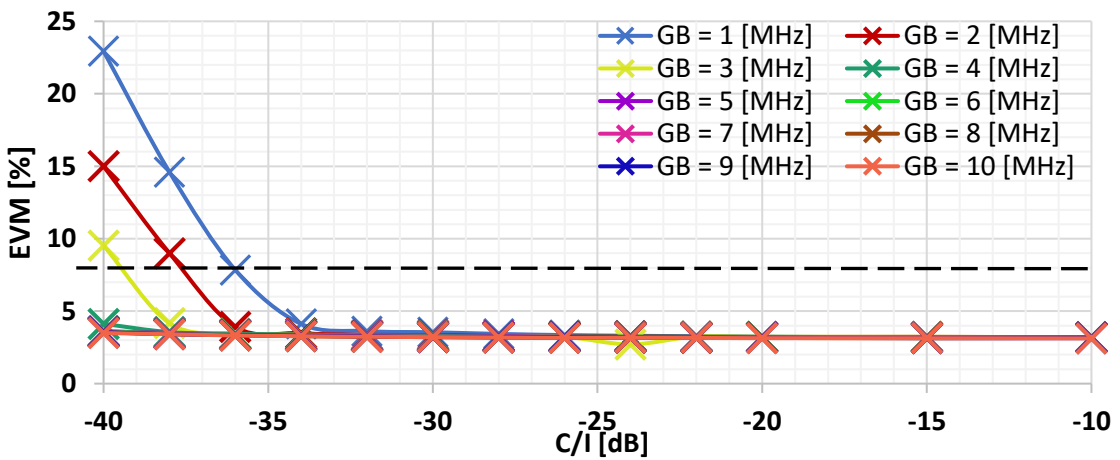
Obr. 23 Závislost parametru EVM signálu LTE s $B_{LTE} = 5$ MHz s modulací 64QAM na C/I pro několik hodnot GB (rušení Wi-Fi 802.11g s $R_{WLAN} = 6$ Mbps).



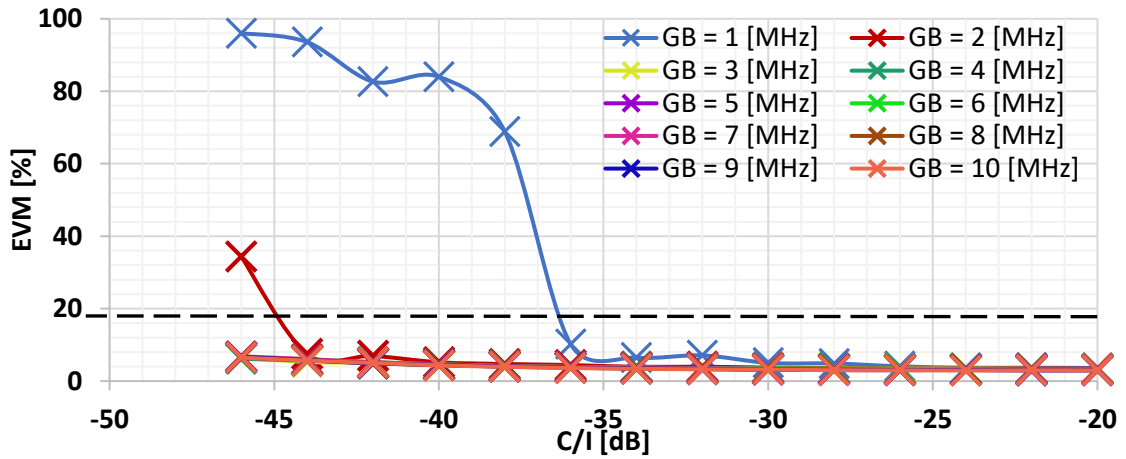
Obr. 24 Závislost parametru EVM signálu LTE s $B_{\text{LTE}} = 10$ MHz s modulací QPSK na C/I pro několik hodnot GB (rušení Wi-Fi 802.11g s $R_{\text{WLAN}} = 6$ Mbps).



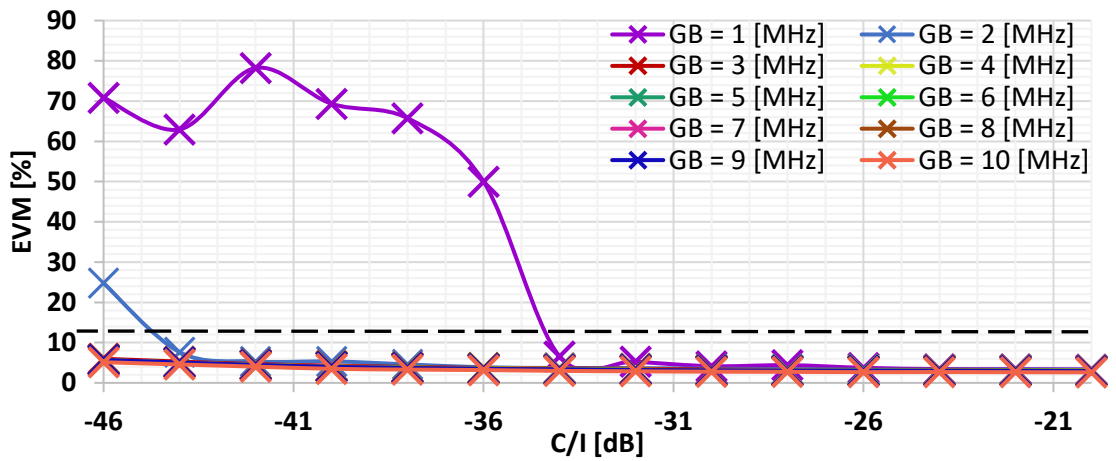
Obr. 25 Závislost parametru EVM signálu LTE s $B_{\text{LTE}} = 10$ MHz s modulací 16QAM na C/I pro několik hodnot GB (rušení Wi-Fi 802.11g s $R_{\text{WLAN}} = 6$ Mbps).



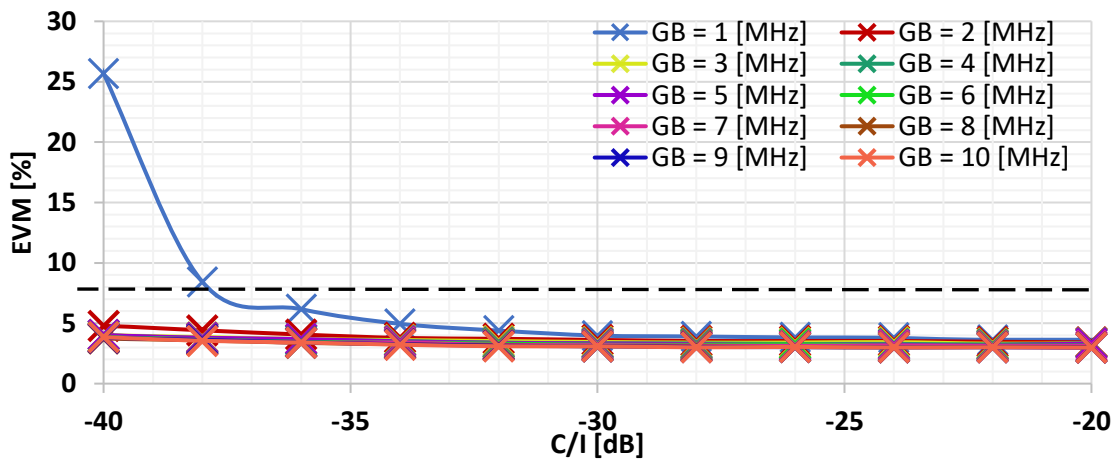
Obr. 26 Závislost parametru EVM signálu LTE s $B_{\text{LTE}} = 10$ MHz s modulací 64QAM na C/I pro několik hodnot GB (rušení Wi-Fi 802.11g s $R_{\text{WLAN}} = 6$ Mbps).



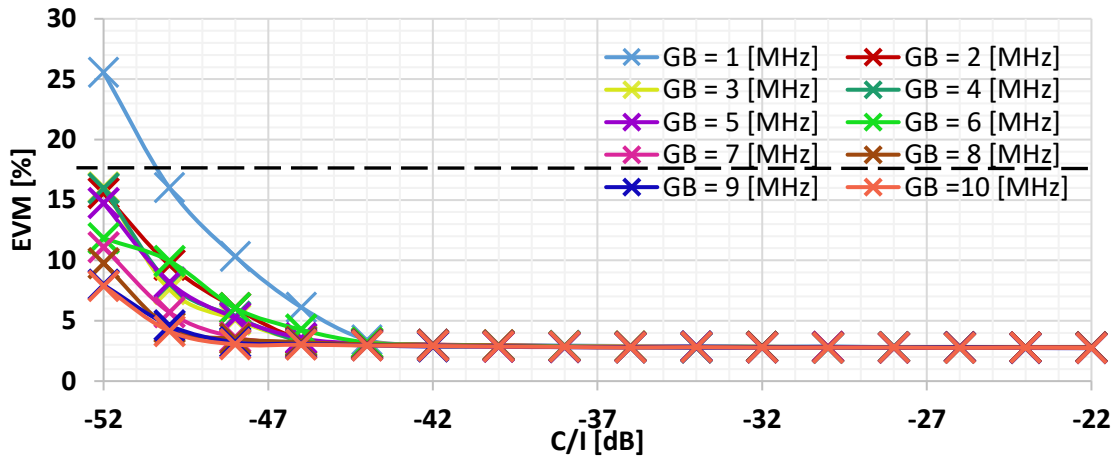
Obr. 27 Závislost parametru EVM signálu LTE s $B_{\text{LTE}} = 20$ MHz s modulací QPSK na C/I pro několik hodnot GB (rušení Wi-Fi 802.11g s $R_{\text{WLAN}} = 6$ Mbps).



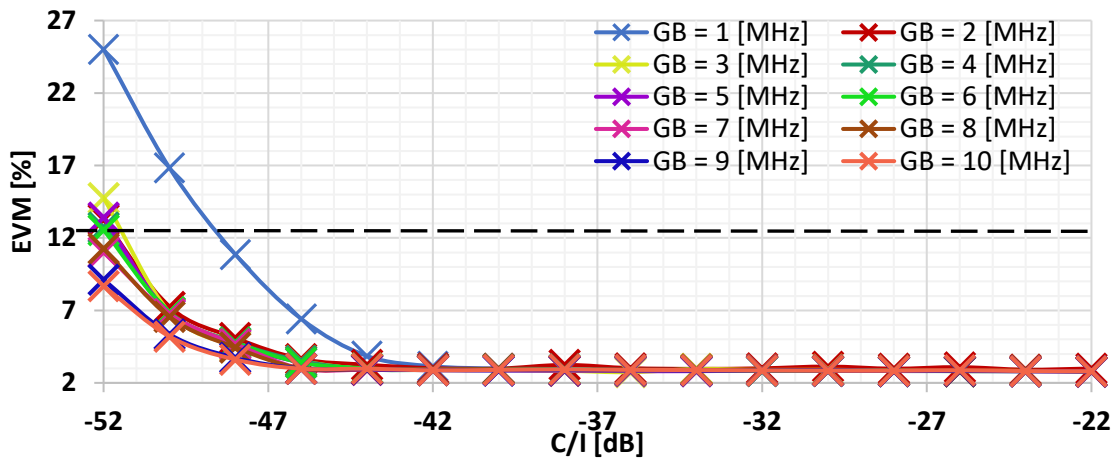
Obr. 28 Závislost parametru EVM signálu LTE s $B_{\text{LTE}} = 20$ MHz s modulací 16QAM na C/I pro několik hodnot GB (rušení Wi-Fi 802.11g s $R_{\text{WLAN}} = 6$ Mbps).



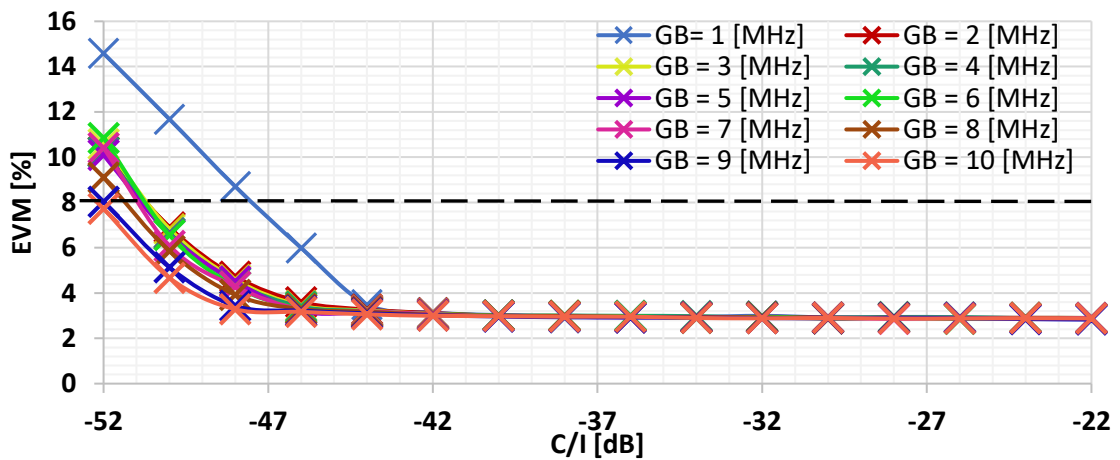
Obr. 29 Závislost parametru EVM signálu LTE s $B_{\text{LTE}} = 20$ MHz s modulací 64QAM na C/I pro několik hodnot GB (rušení Wi-Fi 802.11g s $R_{\text{WLAN}} = 6$ Mbps).



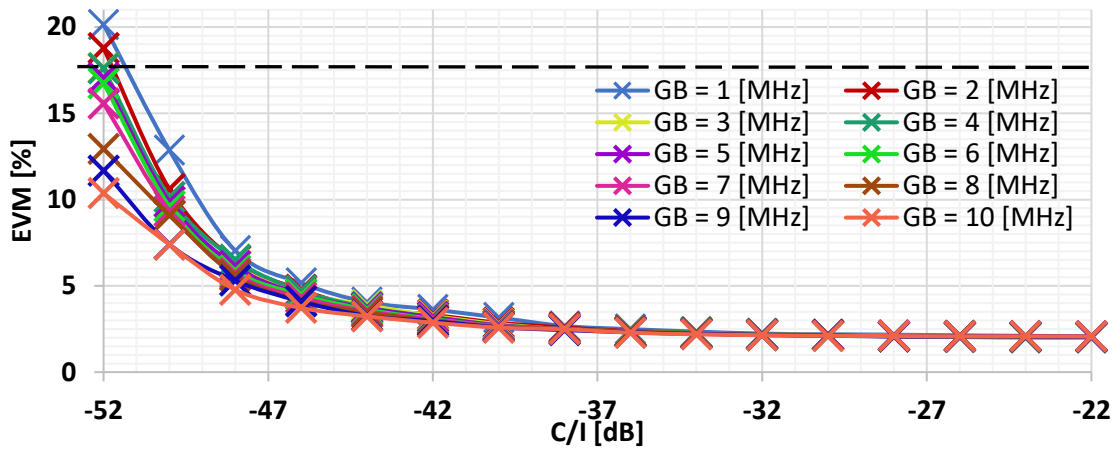
Obr. 30 Závislost parametru EVM signálu LTE s $B_{LTE} = 1,4$ MHz s modulací QPSK na C/I pro několik hodnot GB (rušení Wi-Fi 802.11g s $R_{WLAN} = 54$ Mbps).



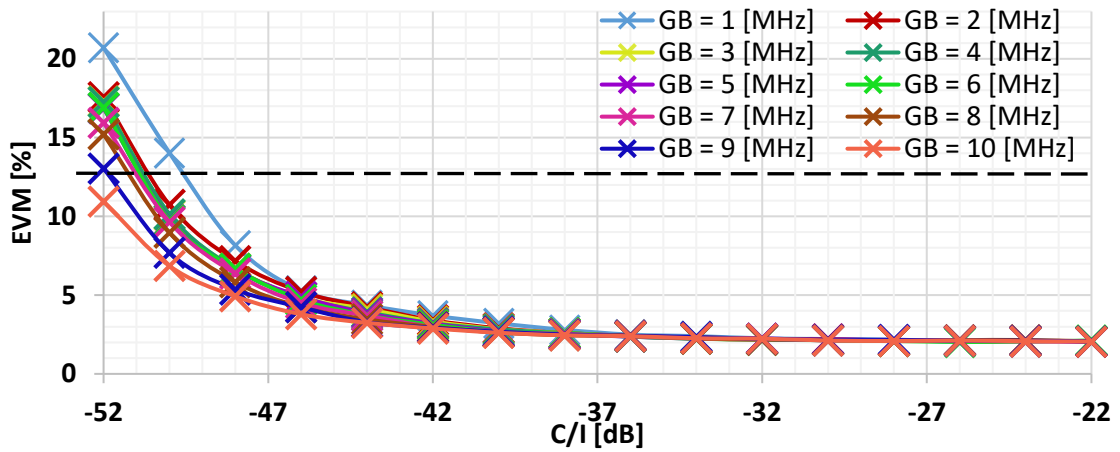
Obr. 31 Závislost parametru EVM signálu LTE s $B_{LTE} = 1,4$ MHz s modulací 16QAM na C/I pro několik hodnot GB (rušení Wi-Fi 802.11g s $R_{WLAN} = 54$ Mbps).



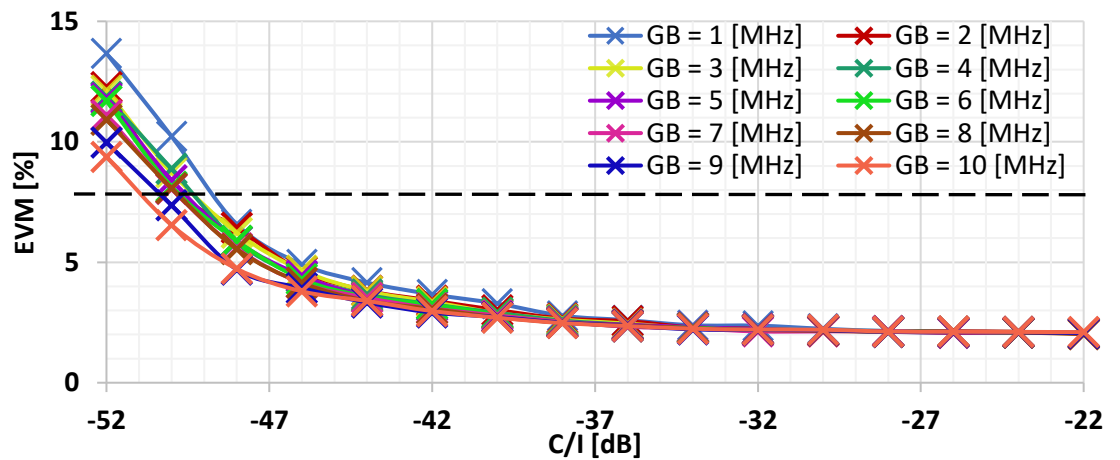
Obr. 32 Závislost parametru EVM signálu LTE s $B_{LTE} = 1,4$ MHz s modulací 64QAM na C/I pro několik hodnot GB (rušení Wi-Fi 802.11g s $R_{WLAN} = 54$ Mbps).



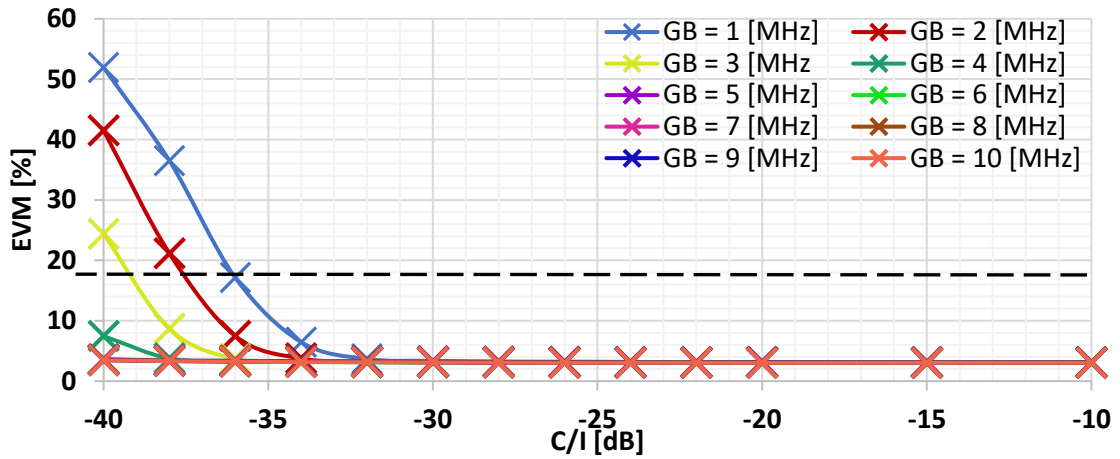
Obr. 33 Závislost parametru EVM signálu LTE s $B_{LTE} = 5$ MHz s modulací QPSK na C/I pro několik hodnot GB (rušení Wi-Fi 802.11g s $R_{WLAN} = 54$ Mbps).



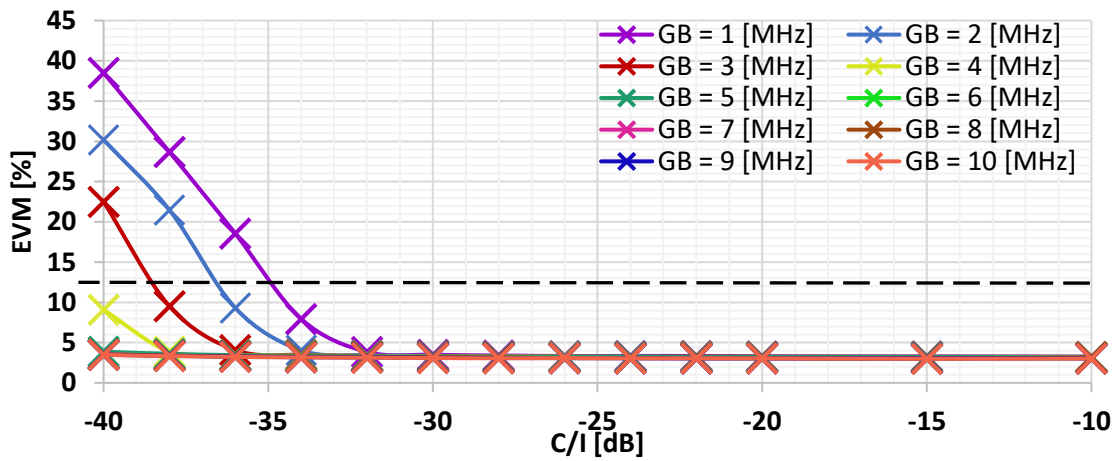
Obr. 34 Závislost parametru EVM signálu LTE s $B_{LTE} = 5$ MHz s modulací 16QAM na C/I pro několik hodnot GB (rušení Wi-Fi 802.11g s $R_{WLAN} = 54$ Mbps).



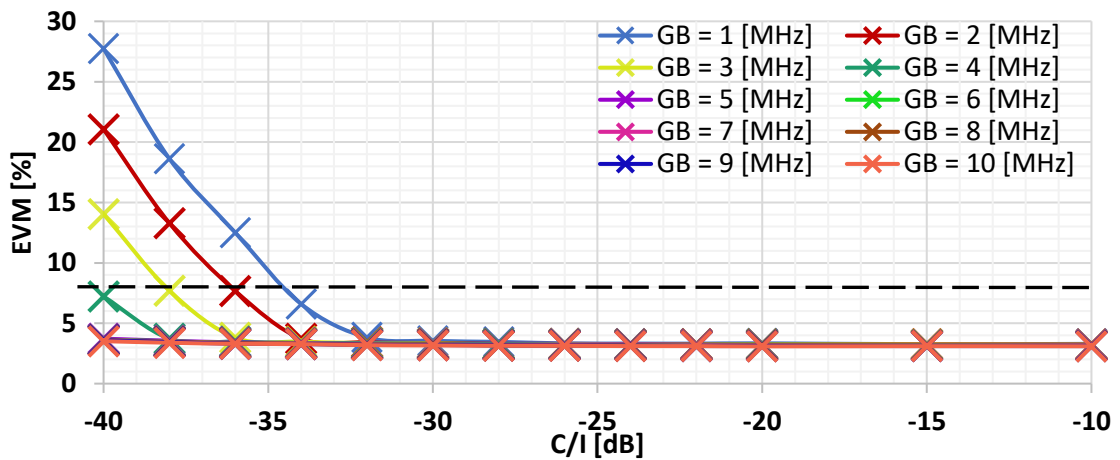
Obr. 35 Závislost parametru EVM signálu LTE s $B_{LTE} = 5$ MHz s modulací 64QAM na C/I pro několik hodnot GB (rušení Wi-Fi 802.11g s $R_{WLAN} = 54$ Mbps).



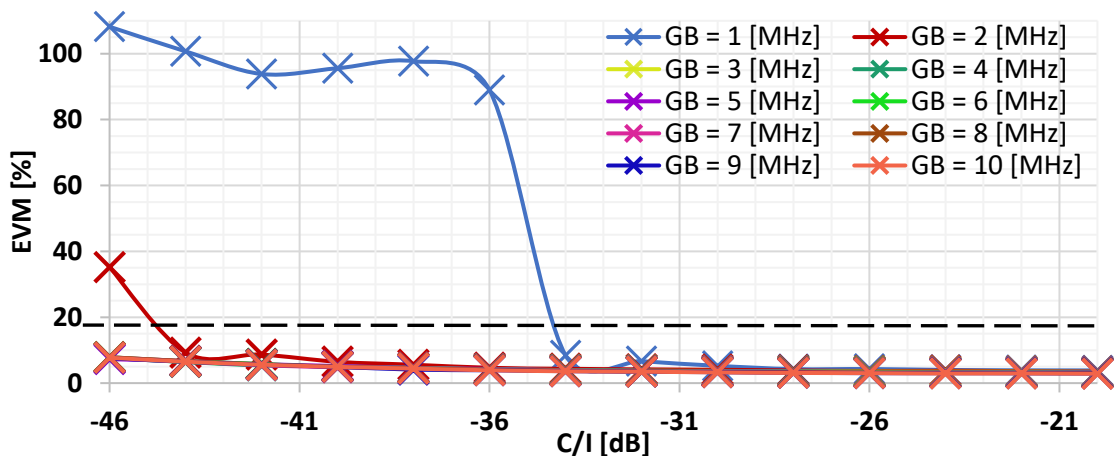
Obr. 36 Závislost parametru EVM signálu LTE s $B_{\text{LTE}} = 10$ MHz s modulací QPSK na C/I pro několik hodnot GB (rušení Wi-Fi 802.11g s $R_{\text{WLAN}} = 54$ Mbps).



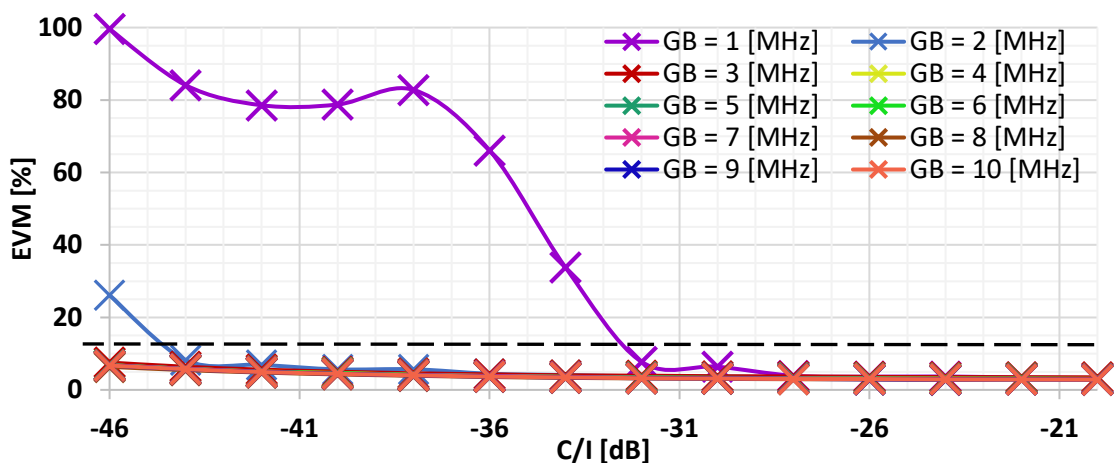
Obr. 37 Závislost parametru EVM signálu LTE s $B_{\text{LTE}} = 10$ MHz s modulací 16QAM na C/I pro několik hodnot GB (rušení Wi-Fi 802.11g s $R_{\text{WLAN}} = 54$ Mbps).



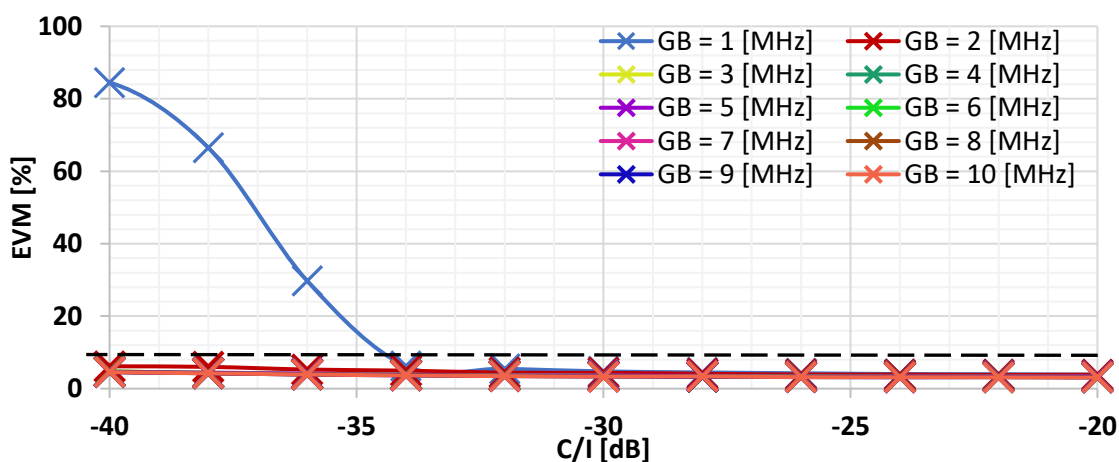
Obr. 38 Závislost parametru EVM signálu LTE s $B_{\text{LTE}} = 10$ MHz s modulací 64QAM na C/I pro několik hodnot GB (rušení Wi-Fi 802.11g s $R_{\text{WLAN}} = 54$ Mbps).



Obr. 39 Závislost parametru EVM signálu LTE s $B_{\text{LTE}} = 20$ MHz s modulací QPSK na C/I pro několik hodnot GB (rušení Wi-Fi 802.11g s $R_{\text{WLAN}} = 54$ Mbps).



Obr. 40 Závislost parametru EVM signálu LTE s $B_{\text{LTE}} = 20$ MHz s modulací 16QAM na C/I pro několik hodnot GB (rušení Wi-Fi 802.11g s $R_{\text{WLAN}} = 54$ Mbps).



Obr. 41 Závislost parametru EVM signálu LTE s $B_{\text{LTE}} = 20$ MHz s modulací 64QAM na C/I pro několik hodnot GB (rušení Wi-Fi 802.11g s $R_{\text{WLAN}} = 54$ Mbps).