

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2022

David Sedláček



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

MODEL SDÍLENÉHO PŘENOSOVÉHO KANÁLU PRO BUDOUCÍ BEZDRÁTOVÉ KOMUNIKAČNÍ SYSTÉMY

MODEL OF A SHARED TRANSMISSION CHANNEL FOR FUTURE WIRELESS COMMUNICATION SYSTEMS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

David Sedláček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.

BRNO 2022

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Elektronika a komunikační technologie**

Ústav radioelektroniky

Student: David Sedláček

ID: 221347

Ročník: 3

Akademický rok: 2021/22

NÁZEV TÉMATU:

Model sdíleného přenosového kanálu pro budoucí bezdrátové komunikační systémy

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

V teoretické části práce detailně prostudujte vlastnosti moderních a budoucích bezdrátových komunikačních systémů a jejich koexistenci ve sdíleném přenosovém kanálu. Jedná se zejména o systémy digitálních televizních služeb (např. DVB-T/T2, NGH), standardy mobilních komunikací (např. GSM/UMTS/LTE/5G), bezdrátové komunikační služby (např. ZigBee, BT, WLAN, WPAN) a další. Navrhněte zjednodušený model reálného přenosového kanálu s proměnnými přenosovými parametry a vhodný kanálový kódér.

V experimentální části práce proveďte verifikaci modelu kanálu při simulované koexistenci různých bezdrátových služeb v Matlabu. Sledujte vliv vlastností a parametrů modelu na chybovost přenosu v závislosti na zvolených přenosových podmínkách. Správnost simulačního modelu se pokuste ověřit srovnáním s experimentálním laboratorním měřením přenosu např. ve standardu DVB-T2 a LTE.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] FISCHER, W. Digital Video and Audio Broadcasting Technology: A Practical Engineering Guide (Third Edition). Berlin: Springer, 2010.
- [2] PARSONS, J. D. The Mobile Radio Propagation Channel. New York: Wiley, 2000.
- [3] GÓMEZ-BARQUERO, D. et al. DVB-NGH: The Next Generation of Digital Broadcast Services to Handheld Devices in IEEE Transactions on Broadcasting, vol. 60, no. 2, pp. 246-257, June 2014.

Termín zadání: 11.2.2022

Termín odevzdání: 1.6.2022

Vedoucí práce: prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.

doc. Ing. Lucie Hudcová, Ph.D.
předseda rady studijního programu

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

Cieľom práce bolo študovať moderné a budúce bezdrôtové systémy a ich koexistenciu v zdieľanom prenosovom kanáli. Na základe získaných poznatkov bol realizovaný návrh zjednodušeného prenosového kanálu. Model bol vytvorený v Matlabe za použitia viacerých dostupných rozšírení. Správnosť modelu bola na koniec overená laboratórnym meraním.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

Bluetooth, IEEE 802.11, Wi-Fi, ZigBee, Digitálne televízne vysielanie, GSM, UMTS, LTE, 5G, koexistencia, interferencia, prenosový kanál

ABSTRACT

The main objective of the thesis was to study modern and upcoming wireless systems and their coexistence in a shared transmission channel. Based on the knowledge gained, the design of a simplified transmission channel was implemented. The model was created in Matlab using several available extensions. The correctness of the model was verified at the end by laboratory measurements.

KEYWORDS

Bluetooth, IEEE 802.11, Wi-Fi, ZigBee, Digital video broadcast, GSM, UMTS, LTE, 5G, coexistence, interference, transfer channel

DAVID, Sedláček. *Model zdieľaného prenosového kanálu pre budúce bezdrôtové komunikačné systémy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačných technológií, Ústav telekomunikácií, 2022, 69 s. Bakalárska práca. Vedúci práce: prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.

Vyhlásenie autora o pôvodnosti diela

Meno a priezvisko autora: Sedláček David
VUT ID autora: 221347
Typ práce: Bakalárska práca
Akademický rok: 2021/22
Téma závěrečné práce: Model zdieľaného prenosového kanálu pre budúce bezdrôtové komunikačné systémy

Vyhlasujem, že svoju záverečnú prácu som vypracoval samostatne pod vedením vedúcej/cého záverečnej práce, s využitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej záverečnej práce ďalej vyhlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto záverečnej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a/alebo majetkových a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona Českej republiky č. 121/2000 Sb., o práve autorskom, o právach súvisiacich s právom autorským a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon), v znení neskorších predpisov, vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníka Českej republiky č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora*

*Autor podpisuje iba v tlačenej verzii.

POĎAKOVANIE

Rád by som poďakoval hlavne môjmu vedúcemu semestrálnej práce pánovi prof. Ing. T. Kratochvílovi, Ph.D. za odborné vedenie, konzultácie a cenné rady k mojej práci.

Obsah

Úvod	19
1 Bezdrôtové komunikačné systémy	21
1.1 Bezdrôtové komunikačné služby	21
1.1.1 Bluetooth	21
1.1.2 IEEE 802.11 (Wi-Fi)	24
1.1.3 IEEE 802.15.4a (ZigBee)	26
1.2 Digitálne televízne služby	27
1.2.1 Digital Video Broadcasting – Satellite	27
1.2.2 Digital Video Broadcasting – Terrestrial	28
1.2.3 Digital Video Broadcasting – Handheld	29
1.3 Mobilné bezdrôtové služby	30
1.3.1 1. Generácia celulárnych systémov	30
1.3.2 2. Generácia celulárnych systémov (2G)	30
1.3.3 3. Generácia celulárnych systémov (3G)	32
1.3.4 4. Generácia celulárnych systémov (4G)	32
1.3.5 5. Generácia celulárnych systémov (5G)	33
2 Analýza koexistencie systémov	35
2.1 Koexistenčné scenáre pre mobilné systémy	35
2.1.1 Meranie koexistenčných scenárov 5G NR s LTE a IoT	35
2.1.2 Koexistenčné scenáre pre 5G NR a IEEE 802.11	36
2.1.3 Simulácia koexistenčných scenárov systémov LTE, UMTS a GSM	36
2.1.4 Meranie koexistenčných scenárov LTE s IEEE 802.11b/g	37
2.1.5 Meranie koexistenčných scenárov LTE s IEEE 802.11n	39
2.1.6 Meranie koexistenčných scenárov LTE a IEEE 802.11n v reálnom prenosovom prostredí	40
2.1.7 Meranie koexistenčných scenárov LTE s DVB-T2	42
2.2 Koexistenčné scenáre pre WLAN a WPAN	43
2.2.1 Meranie koexistenčných scenárov IEEE 802.11n/ac a LTE v reálnom prenosovom prostredí	43
2.2.2 Koexistencia IEEE 802.11 a Bluetooth	45
2.2.3 Simulácia koexistencie Bluetooth a IEEE 802.11b	46
3 Návrh modelu prenosového kanálu	49
3.1 Charakteristika základných prenosových kanálov	49

3.1.1	Gaussov kanál	49
3.1.2	Riceov kanál	49
3.1.3	Rayleighov kanál	50
3.2	Návrh prenosového modelu	50
3.3	Implementácia prenosového modelu v Matlabe	51
3.3.1	Generovanie užitočného signálu	52
3.3.2	Generovanie interferujúcich signálov	53
3.3.3	Model prenosového kanálu	55
3.3.4	Spracovanie signálu na prijímači	56
4	Overenie správnosti navrhnutého modelu	57
4.1	Konfigurácia meracieho pracoviska	57
4.2	Koexistenčný scenár LTE a IEEE 802.11n	58
4.3	Koexistenčný scenár LTE a Bluetooth	60
4.4	Zhrnutie dosiahnutých výsledkov	60
	Záver	65
	Literatúra	67

Zoznam obrázkov

2.1	Koexistencia 5G NR LTE a IoT	36
2.2	Konfigurácia meracieho pracoviska systémových parametrov pre koexistenčný scenár LTE a IEEE 802.11b/g	38
2.3	Koexistencia LTE a IEEE 802.11b	38
2.4	Koexistencia LTE a IEEE 802.11g	38
2.5	Blokový diagram meracieho pracoviska pre koexistenčný scenár LTE a IEEE 802.11n	39
2.6	Závislosť BER na CINR v LTE kanáli PDCCH a PCFICH	40
2.7	Diagram meracieho pracoviska pre koexistenčný scenár LTE a IEEE 802.11n/ac	41
2.8	Zmeraná charakteristika prenosového prostredia laboratória	41
2.9	Závislosť EVM na odstupe nosných kmitočtov LTE-DL a IEEE 802.11n	42
2.10	Závislosť EVM na odstupe nosných kmitočtov LTE-DL a IEEE 802.11n	42
2.11	Konfigurácia meracieho pracoviska pre koexistenčný scenár LTE a DVB-T2	43
2.12	Závislosť EVM na výkone LTE signálu pri šírke pásma kanálu	44
2.13	Požadované C/I pre správnu funkciu LTE-DL	44
2.14	Závislosť EVM na odstupe nosných kmitočtov IEEE 802.11n a LTE-DL	45
2.15	Závislosť EVM na odstupe nosných kmitočtov IEEE 802.11ac a LTE-DL	45
2.16	Závislosť PER na normovanej bitovej energii pre koexistenciu IEEE 802.11g a BT	46
2.17	Schéma modelu pre simuláciu koexistencie Bluetooth s IEEE 802.11b	47
2.18	Závislosť BER od normovanej energie na bit pri koexistencii Bluetooth s IEEE 802.11b	47
3.1	Všeobecný blokový diagram koexistenčného scenáru v prenosovom kanáli	50
3.2	Návrh blokového diagramu zjednodušeného modelu prenosového kanálu	51
3.3	Prenosová charakteristika ideálneho lineárneho zosilňovača	54
4.1	Blokový diagram meracieho pracoviska	57
4.2	Fotografia meracieho pracoviska	58
4.3	Nastavenie užitočného LTE s IEEE 802.11n rušením	59
4.4	Simulácia LTE 64QAM a IEEE 802.11n	60
4.5	Simulácia LTE QPSK a IEEE 802.11n	60
4.6	Nastavenie užitočného IEEE 802.11n s LTE rušením	61
4.7	Simulácia IEEE 802.11n 64QAM a LTE	61
4.8	Simulácia IEEE 802.11n QPSK a LTE	62
4.9	Nastavenie užitočného LTE s Bluetooth rušením	62

4.10 Simulácia LTE 64QAM a Bluetooth	63
--	----

Zoznam tabuliek

1.1	Bezdrôtové digitálne televízne služby	21
1.2	Bezdrôtové komunikačné služby	22
1.3	Mobilné komunikačné služby	22
1.4	Verzie Bluetooth	23
1.5	Charakteristika IEEE 802.11b/a/g	25
1.6	Charakteristika IEEE 802.11n/ac/ad/ax	26
4.1	Parametre LTE a IEEE 802.11n	58
4.2	Parametre Bluetooth	59

Úvod

Revolúcia v rozvoji počítačových komunikačných systémov začala ihneď s príchodom prvých počítačových zariadení. Komunikačný systém využíva systémy pravidiel, tzv. komunikačné protokoly, pre prenos informácií medzi dvoma alebo viacerými entitami komunikačného systému. Protokoly boli postupne formalizované v tzv. komunikačných štandardoch. Jedným z prvých široko dostupných a dodnes najdominantnejších káblových komunikačných štandardov bol Ethernet, štandardizovaný pod IEEE 802.3, ktorý umožnil počítačom komunikovať na krátke vzdialenosti v lokálnych sieťach – Local Area Networks (LAN). Limitácie Ethernetu, ako napríklad obmedzený dosah, pohyb a škálovateľnosť počtu pripojených zariadení, či kontinuálny nárast v dostupnosti mobilných terminálov, vytvorili silný trhový dopyt pre bezkáblové alternatívy. Štandardy pre širokopásmovú bezdrôtovú dátovú komunikáciu boli vyvinuté v súlade s týmito trhovými požiadavkami. Nachádzajú využitie v čoraz väčšom spektre aplikácií z priemyselných, vedeckých, vojenských aj zdravotníckych oblastí, kde nahrádzajú aj pôvodné káblové komunikácie za účelom zvýšenia konkurencieschopnosti, či ekonomickej produktivity. To potvrdzuje aj terajšia situácia, kedy pomocou bezdrôtových technológií možno komunikovať v reálnom čase cez celé kontinenty, a pomocou ktorých možno riadiť napr. inteligentné (smart) zariadenia v domácnosti, vozidlá a výrobné strediská.

Prvá časť práce je zameraná na predstavenie rôzne historicky významných, moderných aj budúcich prenosových technológií. Jedná sa hlavne o štandardy mobilných sietí GSM a LTE, štandardy pre digitálne televízne vysielanie DVB a krátkodosahové technológie WLAN a WPAN.

Druhá časť sa venuje problematike koexistencií spomínaných systémov v zdieľaných kmitočtových pásmach, pričom je pohľad zameraný na pásma ISM 2,4 GHz a 5 GHz ktoré sú čoraz viac presaturované. Preštudované sú rôzne koexistenčné scenáre a metódy analýzy týchto koexistencií, ako napríklad simulácia, testbed alebo priame meranie pomocou prenosového obvodu.

Posledná časť práce je zameraná na návrh a následnú implementáciu prenosového modelu kanálu v Matlabe. Návrh bol realizovaný na základe všeobecného modelu prenosového systému pre dva signály. Správnosť modelu je následne overená laboratórnym meraním vzájomného vplyvu koexistencie 2 systémov v prenosovom kanáli v pásme 2,4 GHz.

1 Bezdrôtové komunikačné systémy

V dnešnej dobe sú dominantné dva typy bezdrôtových komunikačných technológií – optické a rádiové. Táto práca sa zameriava na rádiové komunikačné systémy, ktoré využívajú propagácie elektromagnetických rádiových vln v kmitočtovom spektre 30 Hz – 3000 GHz, šíriacich sa cez voľné prostredie, zvyčajne vzduch. [1]

Toto spektrum je už v dnešnej dobe považované za prírodné bohatstvo a je prísne regulované a pridelené štátom na základe vyhlášky vydanéj medzinárodnou telekomunikačnou úniou (ITU) [1][13].

Mnoho zariadení teda pracuje v bezlicenčných pásmach, ako napr. ISM 2,4 GHz, kde môže dochádzať k vzájomnému rušeniu z dôvodu ich obmedzenej kapacity. Má teda zmysel zaoberať sa koexistenciou systémov operujúcich v týchto pásmach a zároveň preštudovať možnosti využitia týchto pásiem inými systémami, pre možné budúce aplikácie. Základný prehľad preberaných je v tabuľkách 1.1, 1.3 a 1.2.

Bezdrôtové digitálne televízne služby								
Názov služby	Rok sprístupnenia	Frekvenčné pásmo [MHz]	Šírka pásma kanálu [MHz]	Max. dátový prenos [Mbit/s]	Zdrojové kódovanie	Kanálové kódovanie	Modulácie	Iné funkcie
DVB-T	1997	47-68, 87.5-862	6, 7, 8	32	MPEG-2, MPEG-4 AVC(H.264)	RS + CC	QPSK, 16QAM, 64QAM	OFDM
DVB-S	1995	950-2050	26-36	45	MPEG-2	RS + CC	QPSK	-
DVB-S2	2003	950-2050	26-36	74	MPEG-4 AVC(H.264)	LDPC + BCH	QPSK, 8PSK, 16APSK, 32APSK	-
DVB-H	2004	170-230, 470-862	5, 6, 7, 8	10	MPEG-2, MPEG-4 AVC(H.264)	RS + CC	QPSK, 16QAM, 64QAM	OFDM
DVB-SH	2007	470-862, 2170-2200	1.7, 5, 6, 7, 8	10	MPEG-2, MPEG-4 AVC(H.264)	RS + Turbo kódy	QPSK, 8PSK, 16QAM, 16APSK	OFDM, TDM
DVB-T2	2010	174-230, 470-862	1.7, 5, 6, 7, 8, 10	7-50	MPEG-2, MPEG-4 AVC(H.264)	LDPC + BCH	QPSK, 16QAM, 64 QAM, 256QAM	OFDM

Tab. 1.1: Základná charakteristika bezdrôtových digitálnych televíznych služieb.

1.1 Bezdrôtové komunikačné služby

1.1.1 Bluetooth

Bluetooth je bezdrôtová technológia s krátkym dosahom. Kľúčové výhody tejto technológie sú najmä robustnosť, vysoká miera zabezpečenia, nízke náklady na realizáciu a nízka spotreba energie. Viaceré vlastnosti základnej špecifikácie sú konfigurovateľné v závislosti od systémovej implementácie. Každé nové zariadenie musí byť

Bezdrôtové komunikačné služby									
	Typ siete	Názov štandardu	Rok sprístupnenia	Frekvenčné pásmo	Max. dátový prenos	Šírka kanálu	Kanálové kódovanie	Modulácia	Iné funkcie
Wi-Fi	WLAN	IEEE 802.11n	2009	5.15-5.35, 5.470-5.725 GHz	600 Mbit/s	20, 40 MHz	LDPC + CC	BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM	OFDM
		IEEE 802.11ac	2013	5.15-5.35, 5.470-5.725 GHz	7 Gbit/s	40, 80, 160 MHz	LDPC + CC	BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM	OFDM
ZigBee	LR-WPAN	IEEE 802.15.4a	2007	868.0 – 868.6, 2400 – 2483.5 MHz	250 kbit/s	2 MHz	CRC FCS	O-QPSK	DSSS, CSMA/CA
Bluetooth	WPAN	Bluetooth 5.0	2016	2400 – 2483.5 MHz	1 Mbit/s (BLE), 54 Mbit/s (BR)	1 MHz	HC, CRC	GFSK, $\pi/4$ -DPSK, SDPSK	FHSS, TDMA, FDMA

Tab. 1.2: Základná charakteristika bezdrôtových komunikačných služieb.

Mobilné bezdrôtové služby									
Generácia	Názov služby	Rok sprístupnenia	Frekvenčné pásmo	Šírka kanálu	Max. dátový prenos	Zdrojové kódovanie	Kanálové kódovanie	Modulácia	Iné funkcie
2G	GSM	1991	890-915, 935-960 MHz	200 kHz	9.6 kbit/s	RPE-LTP	CC	GMSK	FDMA, TDMA
(2.5G)	EDGE	2003	880-960, 1710-1780 MHz	200 kHz	59 kbit/s	RPE-LTP	CC	GMSK, 8PSK	FDMA, TDMA
3G	UMTS	2001	830-890, 890-960, 1920-2170 MHz	5 MHz	2.048 Mbit/s	AMR-WB/NB	Turbo kódy + CC	QPSK, BPSK	WCDMA
4G	LTE-A	2011	890-960, 1920-2170, 2500-2690 MHz	1.5, 3, 5, 10, 15, 20 MHz	3 Gbit/s	-	Turbo kódy + CC	QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM	OFDMA, FDMA
5G	NR	2018	890-960, 1920-2170, 2500-2690, 26500 - 29500 MHz	5 - 100 MHz	20 Gbit/s	-	LDPC + Polárne kódy	QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM	OFDMA

Tab. 1.3: Základná charakteristika mobilných bezdrôtových služieb.

schválené kvalifikačným testovacím strediskom – Bluetooth Qualification Test Facility (BQTF). [2]

Charakteristika verzií protokolu

Existuje viacero verzií Bluetooth protokolu, pričom je podmienkou, že novšia verzia je vždy kompatibilná so všetkými predchádzajúcimi verziami. Prvá verzia dostupná verejnosti, Bluetooth 1.0b, bola vydaná v decembri 1999. Do verzie 1.2 bola využívaná modulácia GFSK a maximálna prenosová rýchlosť kanálu 1 Mbit/s. Pre komunikáciu medzi terminálmi sa využíva časový duplex (TDD). Verzia 2.0 EDR umožňuje prenosové rýchlosti do 3 Mbit/s s využitím nových modulačných techník $\pi/4$ -DQPSK a 8-DPSK. Pre zníženie vzájomného rušenia v kmitočtovom pásme vyžíva systém prenos s rozprestretým spektrom s kmitočtovým skákaním nosnej vlny (FHSS). Sieť v ktorej komunikuje viacero zariadení (max. 8 v základnej verzii), bod do bodu alebo bod do viacero bodov, sa nazýva piconet, pričom každý pico-

net využíva vlastnú pseudonáhodnú sekvenciu pre FHSS. Základné verzie Bluetooth protokolov sú uvedené v 1.4. [2][3][7]

Verzia	Dodatočné Informácie
1.0b	Prvá verejne dostupná verzia štandardu. Modulácia GFSK.
1.2	Adaptívne frekvenčné skákanie s posudkom prenosového kanálu (AFH).
2.0	Režim EDR a modulácie pi/4-DQPSK a 8-DPSK.
2.1	Vyššia úspora energie a bezpečnostné vylepšenia.
3.0	Voliteľný vysokorýchlostný režim High-Speed s využitím Wi-Fi pre prenos dát a prenosová rýchlosť 24 Mbit/s.
4.0	Rozšírenie Bluetooth Low Energy (BLE) a šifrovanie AES-128. Dosah až do 100 m.
5.0	Prenosová rýchlosť 54 Mb/s a 2 Mbit/s až do 400 m.

Tab. 1.4: Verzie Bluetooth protokolov. [2][3]

Štandard definuje tri výkonové triedy. Zariadenia triedy 1 využívajú vysielacích výkonov do 100 mW a je určená najmä pre USB karty s dosahom do 100 m. Trieda 2 využíva vysielacích výkonov do 2,5 mW a trieda 3, využívaná hlavne mobilnými zariadeniami, využíva vysielacie výkony do 1 mW s dosahom do 10 m. [2] [7]

Bluetooth 5.0 Basic Rate (BR)

Ponúka dodatočné rozšírenia, ako napr. EDR, Alternate Media Access Control (MAC) a iné rozšírenia fyzickej vrstvy (PHY). Zariadenia pracujú v bezlicenčnom pásme ISM 2,4 GHz, konkrétne kmitočty 2400 – 2483,5 MHz. Využíva sa adaptívne frekvenčné skákanie (AFH) pre efektívnejšie potlačenie vzájomného rušenia v prenosovom kanáli, kedy zariadenie typu master (referent hodinového signálu) v piconete vykonáva posudok rušenia vo všetkých 79 kanáloch napríklad pomocou RSSI. Informácia o dostupných kanáloch je potom rozoslaná všetkým zariadeniam typu slave (synchronizácia podľa referenta). Systém podporuje synchronne aj asynchronne prepojenie. Pre zvýšenie odolnosti proti rušeniu sa využíva kanálového kódovania FEC a CRC. [3]

Bluetooth 5.0 Low Energy (LE)

Low Energy je adaptácia základného systému Bluetooth vyvinutá najmä pre účely IoT, kedy sa kladú podstatne menšie nároky na prenesený dátový objem, no väčšie nároky na energetickú spotrebu. Jednotlivé BLE zariadenia môžu slúžiť ako vysielateľ bez akejkoľvek dodatočnej interakcie s koncovým zariadením. Technológia bola pôvodne vyvíjaná firmou Nokia pod názvom Wibree. [2]

Podobne ako BR/EDR využíva AFH, no zároveň má výrazne odlišnú konfiguráciu vrstvy PHY s ohľadom na rozdiely v modulácií, kódovaní a v dosiahnuteľných dátových rýchlostiach. LE dosahuje prenosových rýchlostí 0,5 – 1 Mbit/s a 2 Mbit/s bez kódovania FEC. Využívajú sa metódy mnohonásobného prístupu – frekvenčný multiplex (FDMA) a časový multiplex (TDMA). FDMA využíva 40 informačných kanálov, pričom tri sú vyhradené ako primárne, pre spojenie zariadení. TDMA navyše využíva pre duplexný prenos preddefinované časové intervaly, pričom je potrebná synchronizácia s master zariadením v piconete. [3][2]

1.1.2 IEEE 802.11 (Wi-Fi)

Aliancia Wi-Fi definuje Wi-Fi zariadenia ako produkty využívajúce WLAN technológiu ľubovoľného štandardu z pracovnej skupiny IEEE 802.11. Vývoj prebieha od roku 1990, kedy bola vytvorená pracovná skupina pod týmto štandardom. Hlavné príčiny jej vzniku boli najmä požiadavky na „bezdrôtový Ethernet“ a alokácia pásma ISM 2.4 GHz pre nelicencované zariadenia v roku 1986. Prenos informácie je podobne ako pri Ethernete rýdzo paketový, využívajúci IP protokol na sieťovej vrstve ISO modelu. Linková vrstva bola prevzatá z ISO modelu Ethernetu bez značných úprav. Jednotlivé rozšírenia sa líšia najmä úpravami na vrstve PHY a sú identifikované jedným(x) alebo dvoma písmenami(xx) za názvom štandardu(IEEE 802.11xx).

IEEE 802.11b/g/a

Zariadenia pod rozšírením IEEE 802.11b boli prvýkrát uvedené na trh v roku 1999. Rozšírenie využívalo moduláciu s rozprestretím pomocou priamej sekvencie (DSSS) pomocou DBPSK alebo DQPSK a umožňovalo prenosové rýchlosti 1-11 Mbit/s a zariadenia pracovali vo frekvenčnom pásme ISM 2,4 GHz s limitovaným vysielačím výkonom do 100 mW. Jednou z veľkých nevýhod bola nízka odolnosť voči rušeniu ostatnými zariadeniami. [4][2]

Rozšírenie IEEE 802.11g využívalo rovnaké pásme ako IEEE 802.11b spolu so spätnou kompatibilitou. Prenosové rýchlosti sa navýšili až na 54 Mbit/s na úkor značne komplexnejšej vrstvy PHY, ktorá využívala voliteľnú zložitú, no robustnú prenosovú metódu OFDM s vnútornou moduláciou BPSK až 64-QAM. Nevýhodou bola opäť v celku nízka odolnosť voči rušeniu a značne obmedzené využitie prenosového kanálu. [4]

Rozšírenie 802.11a využívalo novo prístupné frekvenčné spektrum pre WLAN siete v pásme 5 GHz a prenosovú metódu OFDM (rovnako ako IEEE 802.11g) s prenosovými rýchlosťami podobnými IEEE 802.11g. Absencia mnohých rušivých zariadení a väčší počet prístupných kanálov v tomto pásme poskytujú väčšiu mieru spoľahlivosti. Vzhľadom však na menší dosah, jeho veľmi komplexnú konfiguráciu z

dôvodu spätnej kompatibility (dual-band/tri-mode) a vysokú cenu hardvéru sa toto rozšírenie nikdy neujalo. [2][4]

Základné parametre rozšírení sú zhrnuté v tabuľke 1.5.

Rok Vydania	Štandard	Frekvenčné pásmo	Šírka kanálu	Modulácia	Max. prenosová rýchlosť
1999	802.11b	2,4 GHz	20 MHz	DSSS	11 Mbit/s
1999	802.11a	5 GHz	20 MHz	OFDM	54 Mbit/s
2003	802.11g	2,4 GHz	20 MHz	DSSS, OFDM	54 Mbit/s

Tab. 1.5: Štandardy IEEE 802.11b/g/a. [4]

IEEE 802.11n (Wi-Fi 4)

Rozšírenie opäť výrazne navyšuje dosah, spoľahlivosť aj priepustnosť. Zariadenia pracujú v 2,4 GHz aj vo voliteľnom 5 GHz pásme. Využíva sa modulácia OFDM s 56 sub-nosnými a vnútornou moduláciou BPSK, QPSK, 16-QAM a 64-QAM v závislosti od podmienok prenosového prostredia [2]. Vrstva PHY je značne rozšírená o pokročilé modulačné techniky a signálové spracovanie, čo umožňuje implementáciu diverzitého príjmu pomocou viacerých antén – Multiple-Input Multiple-Output (MIMO). Kanálové kódovanie je realizované pomocou konvolučných kódov alebo pomocou Low-Density Parity Check (LDPC). [4][2]

Šírka kanálu je voliteľná medzi 20 alebo 40 MHz. Prevádzka v 40 MHz pásme umožňuje takmer dvojnásobné navýšenie prenosových rýchlostí. Veľkosť paketového záhlavia bola zredukovaná implementáciou agregácie rámcov na linkovej vrstve. Dĺžka ochranného intervalu (GI) bola skrátená z 0,8 na 0,4 μ m a bol zavedený kódovací pomer 5/6 pre vhodné prenosové podmienky. K dispozícii je aj mnoho nových Quality of Service (QoS) mechanizmov, ktoré umožňujú pri prenose preferovať predom určený typ informácie nad inými, a voliteľný režim s nastavovaním modulačnej a kódovacej schémy (MCS) pomocou spätnej väzby. [4][2]

Aj keď rozšírenie poskytuje mnoho PHY modifikácií umožňujúcich dodatočné zvýšenie prenosových rýchlostí, je ich technická implementácia veľmi zložitá. PHY vrstva pracuje v konfigurácii High Throughput (HT) a maximálna prenosová rýchlosť sa pohybuje do 600 Mbit/s. [2]

IEEE 802.11ac (Wi-Fi 5)

IEEE 802.11ac je priamym nástupcom IEEE 802.11n a zjednodušuje implementáciu rozšírených modifikácií pre zvýšenie prenosových rýchlostí. Je to prvé rozšírenie, ktorého zariadenia pracujú v konfigurácii Very High Throughput (VHT) vrstvy PHY.

Umožňuje koexistenciu dvoch nové šírky kanálu sú 80 MHz, 80+80 MHz, kedy dva kanály pracujú v rozdielnych častiach kmitočtového pásma, a 160 MHz. Pre veľmi dobré prenosové podmienky je dostupná modulácia 256-QAM. [4][2]

Novinkou je aj voliteľné smerovanie signálu (Beamforming), pre koncentráciu signálovej energie smerom ku užívateľskému zariadeniu. Maximálne prenosová rýchlosť sa pohybuje do 7 Gbit/s. [2]

IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6)

Rozšírenie je nástupcom IEEE 802.11ac s názvom PHY konfigurácie High-Efficiency (HE). Rozšírenie sa zameriava najmä na zvýšenie celkovej priepustnosti kanálu a v porovnaní s jeho predchodcami navyšuje prenosové rýchlosti len minimálne. 4-krát vyššia priepustnosť je dosiahnutá najmä implementáciou novej modulačnej metódy OFDMA, využívanej pôvodne v mobilných celulárnych sieťach. Pracuje vo frekvenčných pásmach 2,4 GHz, 5 GHz a 6 GHz. Pre značne nadštandardné prenosové podmienky s moduláciou 1024-QAM sa prenosové rýchlosti pohybujú do 9,6 Gbit/s. [5]

Základné parametre významných rozšírení IEEE 802.11 sú zhrnuté v 1.6.

Rok vydania	Štandard	Frekvenčné pásmo	Šírka kanálu	Modulácia	Diverzitný príjem	Max. prenosová rýchlosť
2009	802.11n	2,4 GHz, 5GHz	20 MHz, 40 MHz	OFDM	MIMO (max. 4x4)	600 Mbit/s
2013	802.11ac	5 GHz	40 MHz, 80 MHz, 160 MHz	OFDM	MIMO, MU-MIMO (max. 8x8)	6,93 Gbit/s
2012	802.11ad	2,4 GHz, 5 GHz, 60 GHz	160 MHz, 2,16 GHz	OFDM	MIMO, MU-MIMO	6,757 Gbit/s
2021	802.11ax	2,4 GHz, 5 GHz, 6 GHz	40 MHz, 80 MHz, 160 MHz	OFDM, OFDMA	MIMO, MU-MIMO	9,608 Gbit/s

Tab. 1.6: Štandardy IEEE 802.11n/ac/ad/ax. [5][4][2]

1.1.3 IEEE 802.15.4a (ZigBee)

ZigBee je jeden z prvých komerčne úspešných štandardov zameriavajúcich sa energeticky efektívne nízko-objemové dátové prenosy zo senzorov, do spínačov a iných často batériou napájaných zariadení. Technológia je v dnešnej dobe pomerne zastaralá a je nahradzovaná štandardmi ako napr. LoRaWAN, Sigfox a NB-IoT. Hlavnými prednosťami tejto technológie boli: vysoká miera spoľahlivosti, nízke implementačné náklady, nízka spotreba a vysoká miera bezpečnosti. Technológia bola navyše typu open source a umožňovala široké spektrum modifikácií. [9]

Štandard pracuje v bezlicenčnom frekvenčnom pásme 2,4 GHz s prenosovou rýchlosťou do 25 kbit/s. Prenos je realizovaný cez polovičný duplex. Dokopy sa využíva

16 kanálov, pričom šírka jedného kanálu je 2 MHz. Štandard využíva modulačnú metódu DS-SS s robustnou moduláciou O-QPSK. Spoľahlivosť prenosu je zabezpečená prostredníctvom stochastickej metódy CSMA-CA, kedy zariadenia najprv kontrolujú obsadenosť prenosového kanálu. Kanálové kódovanie využíva cyklické kódovanie CRC typu Frame Checksum (FCS). Využíva sietí typu ad-hoc, kedy sú zariadenia vzájomne prepojené a môžu byť vzájomne využité ako smerovače. Pre zabezpečenie sa využíva šifrovania AES-128. [9]

1.2 Digitálne televízne služby

1.2.1 Digital Video Broadcasting – Satellite

DVB-Satellite je štandard pre digitálne televízne vysielanie s orbitálnym šírením. Každý komunikačný satelit je umiestnený na tzv. geostacionárnej obežnej dráhe (GSO), približne 36000 km nad povrchom zeme. Sú umiestnené tak, aby ich stredná hodnota uhlovej rýchlosti (stredný pohyb) presne zodpovedala uhlovej rýchlosti rotácie zeme. Satelity sú rozmiestnené na rôznych zemepisných dĺžkach.

DVB-S (1. generácia)

Šírka kanálu sa pohybuje medzi 26 až 36 MHz. Využíva robustnú modulačnú metódu QPSK vzhľadom na nízky výkon prijímaného signálu z dôvodu vysokého voľno-priestorového útlmu až do 205 dB. Satelitný transpondér navyše obsahuje nelineárny zosilňovač, tzv. Traveling Wave tube Amplifier (TWA), pričom efektívna kompenzácia nelinearity je nerealizovateľná z energetických dôvodov. Signál je teda značne skreslený a dátová informácia nemôže byť obsiahnutá v amplitúde modulačného signálu. [6]

Pri zdrojovom kódovaní sa využíva kompresie pomocou kodeku MPEG-2. Kanálové kódovanie je realizované prostredníctvom konvolučných mriežkových a blokových Reed-Solomonových kódov (RS) s kódovým pomerom 1/2, 2/3, 3/4, 5/6 alebo 7/8. Maximálna dosiahnuteľná prenosová rýchlosť je 55 Mbit/s. [6]

DVB-S2 (2. generácia)

Štandard definuje nové metódy pre priame vysielanie aj profesionálne aplikácie. Šírka kanálu je rovnaká ako pri DVB-S. Štandard je však rozšírený o nové modulačné metódy - 8PSK pre priame vysielanie a 16APSK, 32APSK pre profesionálne účely. Systém zaručuje spätnú kompatibilitu s DVB-S s kombinovanou multiplexáciou prenosových tokov oboch štandardov. Prenos sa potom člení na vysoko-prioritný prenosový tok DVB-S a nízko-prioritný tok DVB-S2. [6]

Zdrojové kódovanie je realizované prostredníctvom kodeku MPEG-4 AVC. Kanálové kódovanie využíva blokových Bose-Chaudhuri-Hocquenghem kódov (BCH) a LDPC kódovania. Efektívnosť prenosu sa v porovnaní s DVB-S zvýšila o 30%. Systém má rámcovú štruktúru, kedy je kódovanie realizované mimo vrstvy PHY. Kódové pomery sú 1/4 až 9/10 a maximálna prenosová rýchlosť je 74 Mbit/s. [6]

1.2.2 Digital Video Broadcasting – Terrestrial

DVB-Terrestrial je štandard pre digitálne televízne vysielanie s terestriálnym (pozemným) šírením. Uplatnenie nachádza na miestach s nízkym alebo nulovým satelitným pokrytím, miestach s politickým, kapitálovým či iným geografickým obmedzeniami, pre regionálne či mestské vysielanie a pre príjem signálu na prenosných zariadeniach.

DVB-T (1. generácia)

Dostupné šírky kanálu sú 6 MHz, 7 MHz a 8 MHz. Pre zvýšenie odolnosti voči viaccestnému šíreniu, vedúcemu k frekvenčne a pozíčne selektívnemu slabnutiu signálu sa využíva modulačná metóda Coded Orthogonal Division Multiplex (COFDM). K dispozícii sú dva riadiace režimy: 2K (2046 sub-nosných) s vyššou odolnosťou proti medzi-symbolovým a medzi-nosným interferenciám a 8K (8192 sub-nosných). Sub-nosné sú delené v režime 2K po intervaloch širokých 4 kHz a v režime 8K po intervaloch širokých 1 kHz. Symboly majú dĺžku 250 μ s (režim 2K) alebo 1 ms (režim 8K) s ochranným intervalom v rozsahu 1/4 až 1/32 symbolovej dĺžky. COFDM pracuje s vnútornými moduláciami QPSK, 16QAM alebo 64QAM. [6]

Pre zdrojové kódovanie je využívaná kompresia pomocou kodekov MPEG-2 alebo MPEG-4 AVC. Kanálové kódovanie pracuje na podobnom princípe ako DVB-S pomocou konvolučných mriežkových a blokových RS kódov s kódovacím pomerom v rozsahu 1/2 až 7/8. Štandard umožňuje aj hierarchické kódovanie. Primárny prenosový tok označený ako vysoko-prioritný využíva robustnú moduláciu a kódovanie pre prenos najdôležitejších informácií. Sekundárny prenosový tok označený ako nízko-prioritný využíva rovnaké kódovanie s nižším kódovým pomerom a menej robustnú moduláciu (napr. 64QAM). V závislosti od prenosových podmienok je možné prepínať medzi primárnym + sekundárnym alebo len primárnym prenosovým tokom a tak dosiahnuť menšej chybovosti na úkor kvality. [6]

DVB-T2 (2. generácia)

Štandard bol vydaný v roku 2010, mnoho krajín bolo stále v procese implementácie DVB-T a preto sa do popredia dostáva až v posledných rokoch. Pracuje na podob-

nom princípe ako DVB-S2 a umožňuje vysielanie HDTV a neumožňuje kompatibilitu s pôvodným štandardom DVB-T. Jeho hlavnou prednosťou je značné navýšenie prenosových rýchlostí o 30 až 50% primárne pomocou nových konfigurácií modulácií a kódovania. K dispozícii je navyše šírka kanálu 1,7 MHz vhodná najmä pre prenosné zariadenia, ktoré potrebujú pracovať v relatívne úzkom frekvenčnom pásme. Využíva sa modulácia na princípe COFDM s vnútornou moduláciou QPSK, 16QAM, 64QAM alebo 256QAM. Konštruktívne diagramy sú uhlovo pootočené pre zabezpečenie vyššej robustnosti. K dispozícii sú nové aj pôvodné riadiace režimy 1K, 2K, 4K, 8K, 16K a 32K. Ochranný interval je prispôsobiteľný v pomere 1/4, 1/8, 1/16, 1/32, 1/128 a 19/256. Šírka kanálov je 1,7 MHz, 6 MHz, 7 MHz, 8 MHz a 10 MHz. [6]

Zdrojové kódovanie je realizované prostredníctvom rovnakých kompresných algoritmov ako pri DVB-T. Pri kanálovom kódovaní sa podobne ako pri DVB-S2 využívajú blokové kódy BCH a LDPC s kódovým pomerom 1/2, 3/5, 2/3, 3/4 a 5/6. Zmena parametrov je realizovateľná aj počas prevádzky. K dispozícii je až 255 vstupných prenosových tokov následne multiplexovaných do jedného toku. Štandard umožňuje aj diverzitný príjem formou Multiple-Input Single-Output (MISO). [6]

1.2.3 Digital Video Broadcasting – Handheld

DVB-H, DVB-SH

Parametre štandardu DVB-H korešpondujú s DVB-T, kedy bola jeho PHY vrstva rozšírená o viaceré funkcie riadiace prevádzku v mobilnej sieti. Využíva sa modulácia COFDM s vnútornou moduláciou QPSK, 16-QAM a 64-QAM. Dostupný je radiaci režim 4K s odstupom sub-nosných približne 2kHz, zabezpečujúci primeranú veľkosť jedno-frekvenčnej prenosovej siete vhodnej aj pre mobilné zariadenia. V režime 4K je dĺžka trvania symbolu 500 μ s. Zdrojové kódovanie je realizované pomocou prispôbených kodekov MPEG-2 a MPEG-4 AVC. Pri kanálovom kódovaní sa opäť využíva konvolučných mriežkových kódov a blokových RS kódov. [6]

Štandard DVB-SH rozširuje možnosti mobilného televízneho príjmu prostredníctvom satelitného vysielania. Kombinujte prvky DVB-H spolu s DVB-S2 s upravenými technickými parametrami. Konvolučné kódovanie bolo nahradené turbo kódmi. Pozemný prenos je určený pre miesta s centralizovanou populáciou a satelitný prenos je určený pre prenos mimo týchto miest. [6]

1.3 Mobilné bezdrôtové služby

1.3.1 1. Generácia celulárnych systémov

V roku 1976 schválila rada World Allocation Radio Conference (WARC) priradenie frekvenčných pásiem 800 a 900 MHz pre prvé celulárne využitie. Prvé komerčne dostupné celulárne telefónne siete sa začali objavovať začiatkom 80-tych rokov minulého storočia. Boli založené na rôznych systémoch, ako napr. prvý systém Nippon Telephone and Telegraph (NTT), Nordic Mobile Telephone 900 (NMT) alebo Advanced Mobile Phone Service (AMPS). Pracovali s technológiou FDMA a využívali analógovú FM moduláciu. Všetky boli nahradené novšími generáciami celulárnych systémov. [7]

1.3.2 2. Generácia celulárnych systémov (2G)

Celulárne systémy 2. generácie boli široko nasadené v priebehu 90-tych rokov minulého storočia. V Európe sa jednalo najmä o svetovo prvý digitálny celulárny systém GSM, v Japonsku o systém PDC a v USA o systémy IS-54/136 a IS-95. Úlohou systému GSM bolo mimo navýšenia prenosových rýchlostí zároveň utvorenie štandardizovaného celoeurópskeho systému s možnosťou roamingu.

GSM – Global System for Mobile Communication

Systém pracuje v Európe vo frekvenčných pásmach 900 MHz a 1,8 GHz. Využíva dve metódy mnohonásobného prístupu TDMA a FDMA s odstupom nosných jednotlivých rádiových kanálov 200 kHz. Každý rádiový kanál je rozdelený do 8 časových intervalov, tzv. Time Slotov (TS), ktoré tvoria rámec TDMA. Dĺžka trvania jedného Time slotu je 577 μ s. Zdrojový kódér podporuje dva režimy: režim s plnou rýchlosťou – 1 kanál na TS (full rate) a režim s polovičnou rýchlosťou – 2 kanály na TS (half rate). Prenosová rýchlosť jedného kanálu je 12 kbit/s. Využíva sa modulácia GMSK s relatívnou šírkou pásma $b = 0,3$. [1][8]

Zdrojové kódovanie je realizované prostredníctvom regulárneho budenia s dlhodobou predikciou (kodek RPE-LTP) a pri kanálovom kódovaní sa využívajú konvolučné kódy s kódovým pomerom 1/2 [1].

Základná architektúra systému sa člení do sub-systémov základňových staníc (BSS), sieťového a prepojavacieho subsystému (NSS) a operačného subsystému (OSS). BSS vždy obsahuje jednu základňovú riadiacu jednotku BSC a jednu a viac základňových staníc BTS riadiacich prenos signálu od mobilných staníc MS. BSC riadi všetky základňové stanice BTS a prenos signálov do MSC. NSS sa skladá z viacerých mobilných rádiatelefonných ústrední MSC, ktoré zaisťujú všetky spínacie funkcie.

Súčasťou NSS sú registre uchovávajúce informácie o účastníkoch v okolí základných staníc VLR a registre uchovávajúce informácie o účastníkoch siete HLR. Pred zahájením komunikácie je totožnosť účastníka overená v centre autentickosti AuC využívajúcom registre HLR. Celé rádiové rozhranie je značené skratkou TRAN – Terrestrial Radio Access Network. [1][2]

OSS riadi prevádzku subsystémov BSS a NSS spolu s ich údržbou, monitoruje mobilné a základňové stanice, a čiastočne rieši aj tarifovanie [1].

Hovorové aj dátové signály sú prenášané prostredníctvom komutovaného prenosu. Dátový signál je v NSS smerovaný od MSC do jednotky IWU, ktorá určuje parametre a rýchlosť dátového prenosu. Tá sa obyčajne pohybuje do 9,6 kbit/s. [1]

MS sú rozdelené do viacerých výkonnostných tried, pričom každá trieda rozčleňuje nastavenie výkonu do viacerých úrovní s krokom 2 dB. Tým je umožnené radenie vysielacieho výkonu tak, aby základňová stanica prijímala signály zo všetkých okolitých mobilných staníc s približne rovnakým výkonom. [1][2]

GSM-HSCSD – High Speed Circuit Switched Data

Rozšírenie HSCSD umožňuje dosahovať vyšších prenosových rýchlostí pomocou čisto softvérovej aktualizácie. Bol sprístupnený nový spôsob kódovania, ktorý navýšil prenosové rýchlosti v jednom TS na 14,4 kbit/s. [8][1]

GSM-GPRS – General Packet Radio Service

Systém bol hardvérovo rozšírený pre umožnenie paketového prenosu dát pomocou sieťového protokolu IP s navýšenými prenosovými rýchlosťami až na 17 kbit/s na TS [8].

Dátový prenos je v BSS smerovaný do jednotky riadiacej pakety (PCU). PCU následne smeruje pakety do dátového uzlu SGSN v NSS, ktorý komunikuje s rádiovou časťou siete a externými dátovými sieťami prostredníctvom dátového uzlu GGSN. V závislosti od prenosových podmienok je možné voliť zo 4 kódovacích schém. [1][2]

GSM-EDGE – Enhanced Data rates for GSM Evolution

Na rádiovom rozhraní sa využíva dodatočná modulácia 8PSK, čo vyžadovalo hardvérovú aktualizáciu BTS. Dodatočné softvérové aktualizácie umožňujú voľby až z 9 kódovacích schém. Podpora systému EDGE musí byť zaistená aj v MS. [1][2]

Rozšírenie navyšuje prenosové rýchlosti pri komutovanom prenose dát na 38,4 kbit/s na TS a pri paketovom prenose dát na 59,2 kbit/s na TS [2].

1.3.3 3. Generácia celulárnych systémov (3G)

UMTS – Universal Mobile Telecommunication System (3GPP Rel.99 až Rel.7)

Systém stavia na základoch systému GSM, pričom je zaručená aj jeho spätná kompatibilita. Rádiová časť siete bola prestavaná a pod UMTS štandardmi je referovaná pod skratkou UTRAN – UMTS Terrestrial Radio Access Network. Metódy mnohonásobného prístupu TDMA a FDMA sú nahradené metódou WCDMA, kedy sú užívatelia v sieti delení pomocou rozprestierania a skramblovania signálu. Šírka kanálu sa tak niekoľkonásobne navýšila, čo malo za následok zvýšenie dátových rýchlostí až na 384 kbit/s. Využívané pásma v Európe sú 1920-1980 MHz a 2110-2170 MHz a šírka jedného kanálu je 5 MHz. Pri zdrojovom kódovaní sa využíva kodek AMR-WB/NB. [2]

3GPP Release 99 definuje v architektúre základňové stanice ako Node-Bs, základňové riadiace jednotky ako RNC a mobilné stanice ako užívateľské zariadenia (UE). Sub-Systém BSS bol nahradený sub-systémom RNS. Boli zavedené nové typy rozhraní medzi jednotlivými časťami UTRAN no samotné bloky vo vnútornej sieti CN (pôvodne NSS a OSS) prešli len malými hardvérovými úpravami. Členenie siete ostáva podobné ako pri GSM, no so softvérovými modifikáciami. [1][2]

3GPP Release 4 prináša možnosť prenosu hovorových signálov prostredníctvom komutovaného dátového prenosu pomocou internetového protokolu IP. To vyžadovalo značnú modifikáciu v rádiovnej časti rozhrania, ktorá bola rozšírená o viacero radiacích jednotiek a smerovačov. Rozšírenia 3GPP Release 5,6 a 7 zavádzajú nové funkcie zvyšujúce prenosové rýchlosti v smere uplink aj downlink. Je k dispozícii mnoho nových kódovacích schém, modulácia 64-QAM a možnosť realizácie diverziténeho príjmu MIMO. Prenosové rýchlosti sa pohybujú do 28 Mbit/s. [2]

1.3.4 4. Generácia celulárnych systémov (4G)

LTE – Long Term Evolution for UMTS

Limitácie systému UMTS, najmä z hľadiska škálovateľnosti šírky pásma, viedli podobne ako pri GSM k preskladaniu a rozšíreniu rádiovnej siete RNS a vnútornej siete CN. Systém LTE bol predstavený v rozšírení 3GPP Release 8 a jedná sa o prvý systém s rýdzo paketovým prenosom. Metóda WCDMA bola nahradená metódou OFDMA v downlinku a SC-FDMA v uplinku. Tieto metódy sú výrazne odolnejšie proti medzi-symbolovým interferenciám a využívajú moduláciu OFDM s vnútornými moduláciami QPSK, 16QAM a 64QAM. Šírka kanálu sa pohybuje od 1,25 do 20 MHz. Zaručená je aj podpora diverziténeho príjmu MIMO. Využíva sa jeden z 2 duplexných režimov: frekvenčný (FDD) alebo časový (TDD). Kanálové kódovanie je

realizované pomocou turbo kódov a cyklických kódov TBCC. Prenosové rýchlosti v smere downlink sa pohybujú do 100 Mbit/s a v smere uplink do 50 Mbit/s. [1][2]

Architektúra je opäť prevzatá od systémov GSM a UMTS so značnými modifikáciami, no systém zaručuje spätnú kompatibilitu. Množstvo sieťových smerovačov bolo zredukované pre zefektívnenie prenosu a zníženie latencie. Prístupová sieť sa nazýva EUTRAN, základňové stanice sa nazývajú eNode-Bs a čiastočne plnia funkcie chýbajúcej základňovej radiacej jednotky. Rozhrania medzi jednotlivými sieťovými prvkami boli taktiež aktualizované. Vnútorňa sieť EPC obsahuje hlavný riadiaci prvok MME, serverovú databázu profilov užívateľov HSS, brány S-GW a P-GW riadiace prístup do externých paketových sietí a prvok PCRF riadiaci prístup k internetu. [1][2]

Účel rozšírení 3GPP Release 9+ je najmä navyšovať prenosové rýchlosti a priepustnosť kanálu. V posledných rokoch sa však začína do popredia dostávať aj využitie LTE technológií v oblasti vysoko energeticky-efektívnych zariadení internetu vecí (IoT). Vznikajú nové štandardy, napr. LTE-CatM a NB-IoT, ktorých vývoj je nezáväzný od vývoja LTE. [2]

Rozšírenie 3GPP Release 14, známe pod názvom LTE-Advanced Pro umožňuje prenosové rýchlosti až do 3 Gbit/s pre downlink a 500 Mbit/s. Sprístupňuje aj novú modulačnú metódu 256-QAM pri vhodných prenosových podmienkach. Agregáciou frekvenčných pásiem je možné šírku pásma navýšiť až na 100 MHz. [8]

1.3.5 5. Generácia celulárnych systémov (5G)

Systémy 3GPP Release 15+ sú najnovšie a najvyspelejšie komerčne dostupné systémy. Vývoj je postavený na základoch technológií LTE-A, LTE-A Pro a nových Wi-Fi štandardoch. Požiadavky pre budúce 5G systémy sú rôznorodé a v mnohých smeroch kontradiktívne. Z jednej strany aplikačného spektra možno hovoriť o požiadavkách pre Machine-to-Machine komunikáciu vyžadujúcu len veľmi úzku šírku pásma, nízke vysielacie výkony a takmer nulovú spotrebu v nečinnom režime. Z druhej strany aplikačného spektra možno hovoriť o požiadavkách pre Vehicle-to-Vehicle komunikáciu pre autonómnu dopravu, kedy je vyžadovaná extrémne malá latencia pre bezpečnú prevádzku. Časté aplikačné požiadavky sú: vysoká miera spoľahlivosti, prenosové rýchlosti do 10 Gbit/s, široká miera implementácie pre zariadenia IoT, minimálna latencia, navýšená kapacita prenosového kanálu a vysoká energetická efektivita. [2]

3GPP 5G NR

3GPP rieši kontradiktívnosť požiadaviek návrhom veľmi flexibilného rádiového rozhrania pracujúcom vo rozdelených časových a frekvenčných oblastiach, a ktoré môže

byť nakonfigurované podľa aplikačných potrieb. Toho sa dá docieľiť pomocou návrhových princípov, ako sú:

- Štíhlosť – limituje sa miera nepretržitého vysielania pre energetickú efektivitu,
- Vyhradenie prenosových kanálov – nie je potrebné aby zariadenia vedeli, ako sa prenášajú dáta v iných častiach pásma,
- Flexibilné časovanie relácií – nastaviteľná miera časovania spätnej väzby pomocou ACK,
- Škálovateľný odstup sub-nosných – vyššie rozostupy sub-nosných OFDM pre aplikácie vo vyšších kmitočtových pásmach,
- Kvalitnejšie oddelenie OFDM kanálov,
- Agregácia slotov – priradenie celých rámcov jednému zariadeniu,
- Prevádzka TDD na vyšších kmitočtoch,
- Beamforming – lúčové smerovanie energie signálu k zariadeniu napr. pomocou MU-MIMO,
- Prevádzka v pásmach mm vln – využitie kmitočtových pásiem 26, 28, 38 a 76 GHz. [2]

Architektúra 5G systémov sa bude taktiež líšiť v závislosti od aplikačných požiadaviek. Systémy nahradzujúce vláknové a káblové pripojenie domácností v decentralizovaných oblastiach pravdepodobne implementujú standalone (SA) základňové stanice gNode-Bs pripojené do kompatibilnej vnútornej siete (NGC). Non-standalone (NSA) základňové stanice využívajú kombinácie základňových staníc eNode-Bs využívaných na naviazanie spojenia a riadenie a gNode-Bs využívaných na prenos užívateľských dát. [2][12]

2 Analýza koexistencie systémov

2.1 Koexistenčné scenáre pre mobilné systémy

Neustály prísun nových bezdrôtových zariadení určených na mnoho typov aplikácií, požadujúcich vysoké dátové rýchlosti značne zvyšuje dopyt po zdrojoch rádiového spektra. Prevádzka v licencovanej časti tohto spektra sa tak stáva každým dňom nákladnejšia. Mnoho mobilných operátorov sa preto usiluje o presun časti prevádzky práve do bezlicenčných pásiem. Bolo preskúmaných a predstavených mnoho riešení, tzv. koexistenčných mechanizmov, pre koexistenciu systémov LTE a 5G NR v bezlicenčnom spektre. Jedná sa najmä o systémy:

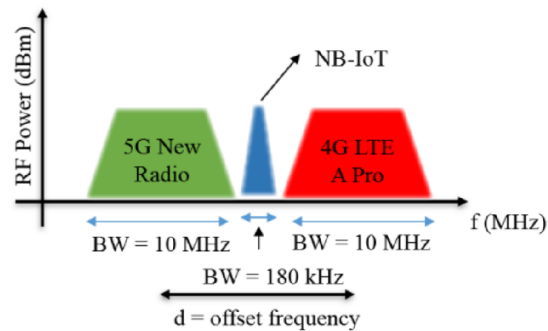
- LTE-Unlicensed (LTE-U), ktorý bol navrhnutý najmä pre prevádzku v pásme ISM 5 GHz, kde regulačné entity nepožadujú mechanizmu načúvania pred vysielaním (LBT). Využíva modifikácie pôvodného systému pre prevádzku v bezlicenčnom pásme a naviazanie spojenia a riadenie v licenčnom pásme.
- LTE-Licensed Assisted Access (LAA), ktorý bol predstavený v 3GPP Release 13, opäť pracujúci v pásme ISM 5 GHz, a ktorého bezlicenčné pásmo je opäť využívané pre prenos užívateľských dát, pričom naviazanie spojenia a riadenie je realizované v licenčnom pásme. Na rozdiel od LTE-U, LAA zavádza mechanizmy pre LBT.
- MuLTEfire je variant pracujúci výhradne v bezlicenčnom pásme s malým pokrytím a má slúžiť najmä pre nasadenie LTE sietí nezávislými poskytovateľmi služieb. [10][11]
- NR-U je 5G štandard, ktorý v porovnaní s LTE štandardmi pracujúcich výhradne v pásme ISM 5 GHz využíva viaceré bezlicenčné frekvenčné pásma, ako napr. 2,4 GHz, 5 GHz, 6 GHz a 60 GHz [11].

2.1.1 Meranie koexistenčných scenárov 5G NR s LTE a IoT

Moderné požiadavky na aplikácie vyžadujúce širokopásmový prístup s ďalekým dosahom pre odľahlé miesta a aplikácie IoT vyžadujú prevádzku systémov v sub-1 GHz pásme, z dôvodu vysokých propagačných signálových strát na vyšších kmitočtoch. Koexistenčným scenárom celulárnych technológií v pásme 700 MHz (konkrétne koexistenciou 5G, LTE a IoT) sa zaoberá [12].

Štúdia popisuje koexistenčné prípady pre implementáciu 5G NR v NSA režime a spektrálna konfigurácia je znázornená na obrázku 2.1, kedy hlavný koexistenčný parameter d určuje frekvenčný odstup nosných 5G a LTE signálov. Popísané sú 2 merania s vnútornými moduláciami 16-QAM a 64-QAM pre 5G a LTE signály. Vplyv frekvenčného odstupu je diskutovaný spoločne s požiadavkami na maximálnu

vektorovú chybu (EVM). Maximálne povolené hodnoty EVM pre 5G NR sú 12,5% pri 16-QAM a 8,0% pri 64-QAM.



Obr. 2.1: Koexistenčný scenár pre 5G NR, LTE-A a NB-IoT. (prevzaté z [12])

Ako najlepší kompromis medzi odstupom frekvenčných pásiem a EVM bol frekvenčný odstup 14 MHz pričom boli hodnoty EVM_{RMS} 4,26% pre 16-QAM a 3,27% pre 64-QAM. Navyše bolo navrhnuté využitie prázdneho medzi-pásma systémom NB-IoT, kedy nebola zaznamenaná žiadna degradácia 5G a LTE prenosu. [12]

2.1.2 Koexistenčné scenáre pre 5G NR a IEEE 802.11

Štandard 5G NR podporuje prevádzku v rôznych kmitočtových pásmach pričom aj prevádzku v pásme 5 a 6 GHz. Zvýšené nároky na prenosové rýchlosti napr. v prípade rozšírenej a virtuálnej reality (AR a VR) viedli k alokácii 6 GHz spektra pre bezlicenčné využitie, kde po novom operuje a štandard IEEE 802.11. Má preto zmysel sa zaoberať práve koexistenčnými prípadmi v týchto dvoch pásmach.

5G kanály, identifikované písmenom „n“ a následným číslom kanálu (napr. n10), sú vo frekvenčných pásmach delené do dvoch skupín – skupina FR1 pre kanály operujúce v pásme sub-6 GHz a skupina FR2 pre kanály operujúce od 6 do 52,6 GHz. V pásme ISM 2,4 GHz susedia kanály IEEE 802.11 s kanálmi n7, n40 a n41 NR a v pásme ISM 5 GHz s kanálmi n79 NR. Súčasná technológia implementujúca RF front-end neposkytuje úplné riešenia kanálových únikov v dôsledku vznikajúcich emisií v pásmach a v blízkosti týchto pásiem. [10]

2.1.3 Simulácia koexistenčných scenárov systémov LTE, UMTS a GSM

Z dôvodu limitovaného licencovaného pásma pre mobilné siete mobilní operátori využívajú refarmingu kmitočtových pásiem, pričom dochádza ku koexistencii nových a starších mobilných systémov. [13] študuje prípady koexistencie LTE v pásmach 900

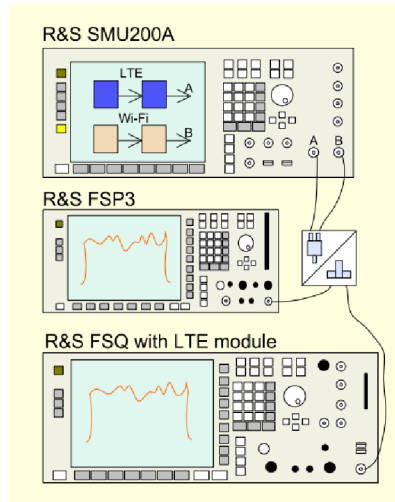
MHz, 1800 MHz a 2100 MHz s interferujúcimi systémami GSM 850 MHz, GSM 900 MHz, GSM 1800 MHz a UMTS 2100 MHz. Pre vykreslenie interferenčných vplyvov na LTE OFDMA DL bol využitý nástroj Advanced SEAMCAT s výpočtovým algoritmom Monte Carlo. Meraná bola priepustnosť kanálu a pomer užitočného signálu k rušeniu (SINR).

Vo frekvenčnom pásme 900 MHz bola pri rôznych šírkach LTE kanálu nameraná vždy najvyššia priepustnosť kanálu pri rušení UMTS 2100 MHz, s maximálnou priepustnosťou pri šírke pásma 20 MHz približne 18,4 kbit/s. Zaujímavosťou je prípad, kedy LTE systém rušený samým sebou pracuje optimálne len pri šírke pásma 10 MHz. Vo frekvenčnom pásme 1800 MHz bola najvyššia priepustnosť kanálu opäť pri rušení UMTS 2100 MHz. Priepustnosť však sa celkovo znížila, s maximálnou hodnotou pri UMTS 2100 MHz a šírke pásma 20 MHz približne 13,7 kbit/s. V prípade rušenia LTE systému samým sebou neboli dosiahnuté optimálne hodnoty ani v jednom z prípadov. Vo frekvenčnom pásme 2100 MHz bolo dosiahnutej najvyššej priepustnosti v prípade rušenia GSM 900 MHz a GSM 1800 MHz s priepustnosťami približne 18,15 kbit/s pri šírke pásma 20 MHz. Mimo šírky pásma 20 MHz bola opäť dosiahnutá maximálna priepustnosť pri rušení UMTS 2100 MHz. Pri vlastnom rušení LTE nebolo opäť ani v jednom z prípadov dosiahnutých optimálnych hodnôt. Dosiahnuté hodnoty SINR korešpondujú s dosiahnutými hodnotami priepustnosti kanálu.

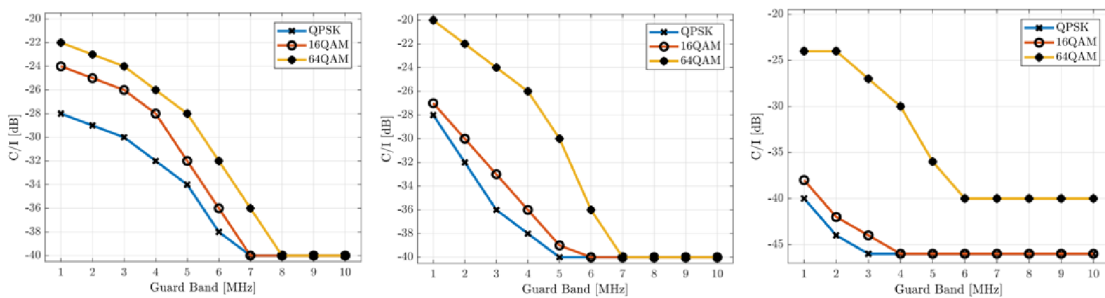
Na základe dosiahnutých výsledkov možno tvrdiť, že koexistencia systému LTE s inými mobilnými systémami má najnižší vplyv na celkovú priepustnosť kanálu v pásme 900 MHz.

2.1.4 Meranie koexistenčných scenárov LTE s IEEE 802.11b/g

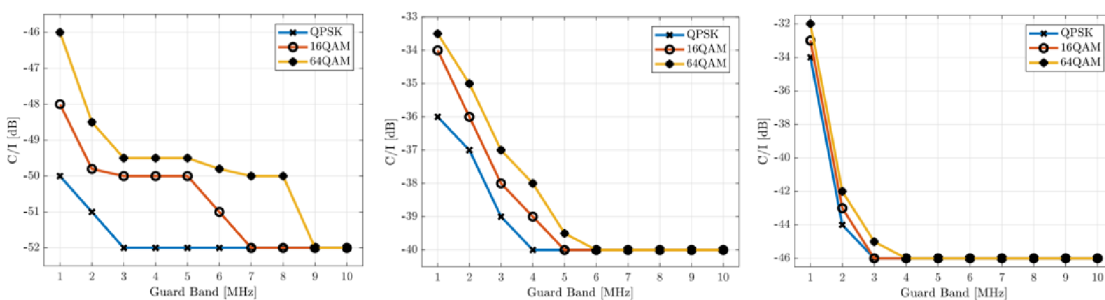
Prípady koexistencie LTE so systémom IEEE 802.11b/g na vrstve PHY v pásme ISM 2,4 GHz sú analyzované v [14]. Študované boli najmä koexistenčné scenáre v priľahlých kanáloch s rôznou šírkou ochranného intervalu, pričom systémy IEEE 802.11 pracovali s rôznymi modulačnými schémami, vysielacími výkonmi (P_{LTE} , P_{Wi-Fi}) a šírkami pásma (B_{LTE}). Na základe týchto parametrov bol stanovený minimálny výkon prijímaného LTE signálu. Signál IEEE 802.11 bol generovaný v závislosti od parametrov systému, pričom sa výkon interferujúceho signálu navyšoval až do prahovej hodnoty presiahnutia EVM limitov pre LTE. Hlavným koexistenčným parametrom bola šírka ochranného pásma (GI) nadobúdajúca hodnoty 1 MHz až 10 MHz, pričom bol meraný požadovaný pomer modulovaného signálu k rušeniu (C/I) v dB pre prahové limity EVM. Konfigurácia meracieho pracoviska je znázornená na obrázku 2.2.



Obr. 2.2: Konfigurácia meracieho pracoviska pre koexistenčný scenár LTE a IEEE 802.11b/g. (prevzaté z [14])



Obr. 2.3: Obr. 2a – Koexistencia IEEE 802.11b pri šírkach LTE kanálu 1,4 MHz (vľavo hore), 10 MHz (vpravo hore) a 20 MHz (dole). (prevzaté z [14])



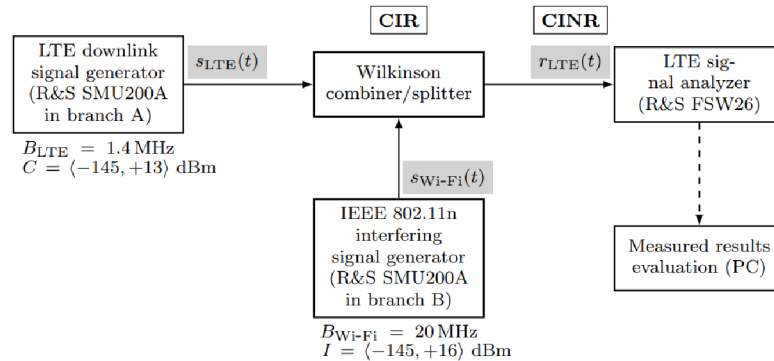
Obr. 2.4: Obr. 2a – Koexistencia IEEE 802.11g pri šírkach LTE kanálu 1,4 MHz (vľavo hore), 10 MHz (vpravo hore) a 20 MHz (dole). (prevzaté z [14])

Dosiahnuté výsledky, kedy s rastúcou veľkosťou GI klesá pomer C/I, zodpovedajú teoretickým predpokladom a sú znázornené na obrázkoch 2.3 a 2.4. Požadované hodnoty C/I sú zároveň závislé na zvolenej šírke pásma kanálu LTE a zvolenej vnú-

tornej modulácií. V prípade IEEE 802.11b využívajúci moduláciu DSSS je vidieť, že s rastom B_{LTE} vplyv rušenia klesá, no zvyšujú sa rozdiely na požadované C/I medzi moduláciami M-QAM. V prípade IEEE 802.11g je vidieť, že využívaná modulačná metóda OFDM znižuje požadované hodnoty C/I na optimálny prenos v LTE s užším GI a zároveň značne znižuje rozdiely C/I medzi moduláciami. Požadovaný pomer C/I je však v porovnaní s IEEE 802.11b vyšší pri veľmi malých hodnotách GI, pričom C/I sa líši o viac ako 10 dB.

2.1.5 Meranie koexistenčných scenárov LTE s IEEE 802.11n

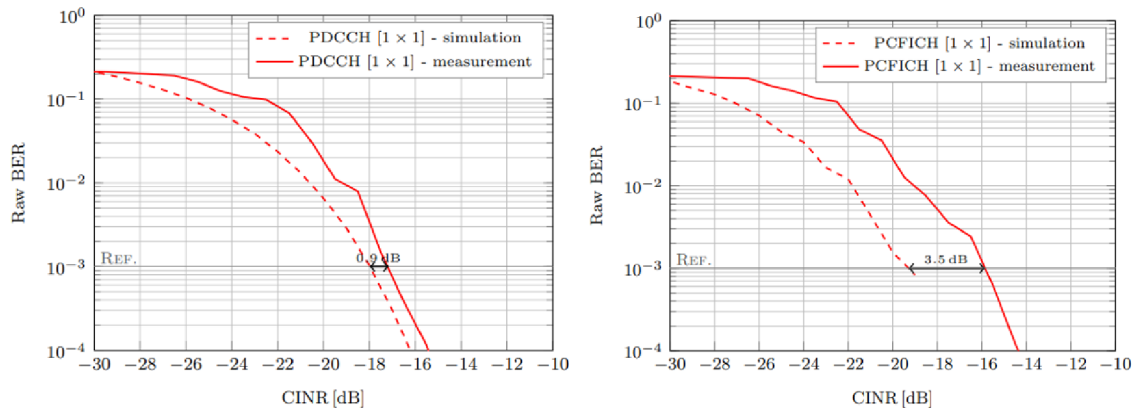
Štúdia [16] predstavuje meracie metódy pre analýzu interferenčného vplyvu IEEE 802.11n na LTE downlink (LTE-DL) v pásme ISM 2,4 GHz na vrstve PHY. Meraný bol vplyv rušenia na bitovú chybovosť (BER) a strednú hodnotu vektorovej chyby (EVM_{RMS}) v riadiacich kanáloch PDCCH, PCFICH a PHICH. Hodnoty EVM boli prepočítané na pravdepodobnosť bitovej chyby P_b pre prehľadnejšiu analýzu. Namerané hodnoty sú porovnané so simuláciou, kedy bol použitý simulátor LTE-DL [17] vyvinutý Technickou univerzitou vo Viedni. Konfigurácia meracieho pracoviska je znázornená na obrázku 2.5.



Obr. 2.5: Blokový diagram konfigurácie meracieho pracoviska pre koexistenčný scenár LTE a IEEE 802.11n. (prevzaté z [16])

Je generovaný LTE-DL signál s výkonovou úrovňou C , s vysielačím výkonom závislým od veľkosti bunky, a šírkou pásma B_{LTE} 1,4 MHz. Interferujúci signál IEEE 802.11n má šírku pásma 20 MHz a výkonovú úroveň I . Nosná frekvencia oboch signálov je nastavená na 2,412 GHz. Vygenerované signály sú následne vedené koaxiálnymi káblami do Wilkinsonovho deliča. Výstupný signál je vedený do signálového analyzátoru s pomerom výkonu nosnej-ku-interferencii a šumu (CINR) danom rovnicou: $CINR = C - (I + N)$, kde C je výkon LTE nosnej OFDM signálu, I je výkon interferujúceho signálu IEEE 802.11n a $N = -112,52 \text{ dBm}$ je stredná hodnota šumu na vstupe analyzátoru. N je definovaný ako: $N = N_0 + \log_{10}(B_{LTE})$,

kedy $N_0 = 10 \log_{10}(kT) + 30$, kde k je Boltzmannova konštanta a $T = 290$ K je teplota na vstupe analyzátoru.



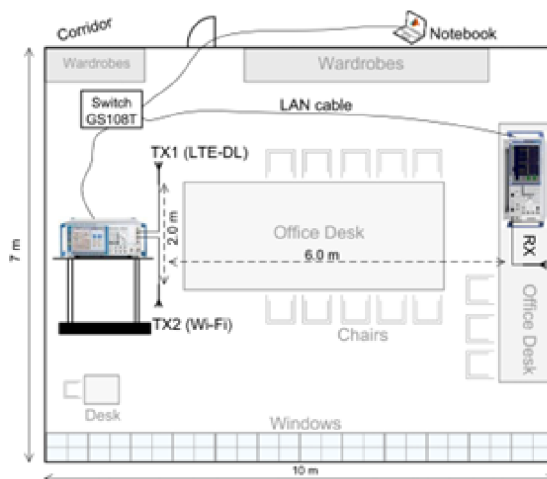
Obr. 2.6: Závislosť BER na CINR v LTE kanáli PDCCH (vľavo) a kanáli PCFICH (vpravo). (prevzaté z [16])

Výsledné namerané a simulované závislosti BER na CINR v LTE riadiacich kanáloch PDCCH a PCFICH sú znázornené na obrázku 2.6. Hodnoty BER boli merané až do dosiahnutia požadovanej hodnoty P_b pre príjem riadiacich informácií. Prahovej hodnoty P_b v kanáli PDCCH bolo dosiahnutej pri CINR -18,1 dB v simulácii a CINR -17,2 dB pri meraní. V kanáli PCFICH bolo prahových hodnôt P_b dosiahnutých pri CINR -19,3 dB v simulácii a CINR -15,8 dB pri meraní. Maximálna odchýlka simulovaných a meraných signálov pri prahových hodnotách pravdepodobnosti bitovej chybovosti bola 3,5 dB, čo bolo dôsledkom výkonových strát v meracom prostredí.

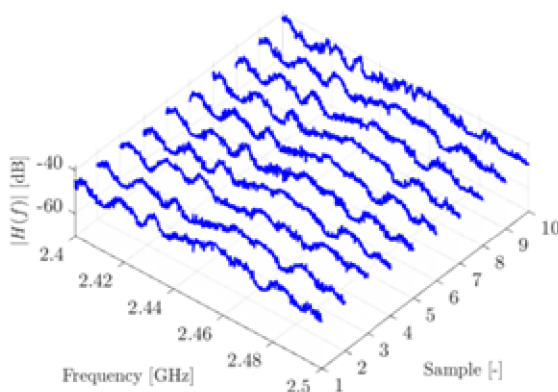
2.1.6 Meranie koexistenčných scenárov LTE a IEEE 802.11n v reálnom prenosovom prostredí

Na rozdiel od meraných koexistenčných scenárov v [14] a [16], kedy bol prenos realizovaný pomocou koaxiálnych káblov, sú merania [19] v ISM 2,4 GHz realizované šírením signálov v indoorovom prenosovom prostredí laboratória. Analýza koexistenčných scenárov je realizovaná opäť na vrstve PHY. Diagram meracieho pracoviska spolu s parametrami systémov je znázornený na obrázku 2.7.

Signály sú generované v RF generátoroch a sú anténami vysielané do prenosového prostredia a predmeranou prenosovou charakteristikou na obrázku 2.8. Je vidieť že prenosový kanál má charakteristické vlastnosti Riceovho kanálu. Na prijímacej strane je využitý spektrálny analyzátor merajúci EVM prijatých signálov. Konfigurácia parametrov generovaných signálov a ich analýza je realizovaná prostredníctvom počítača.

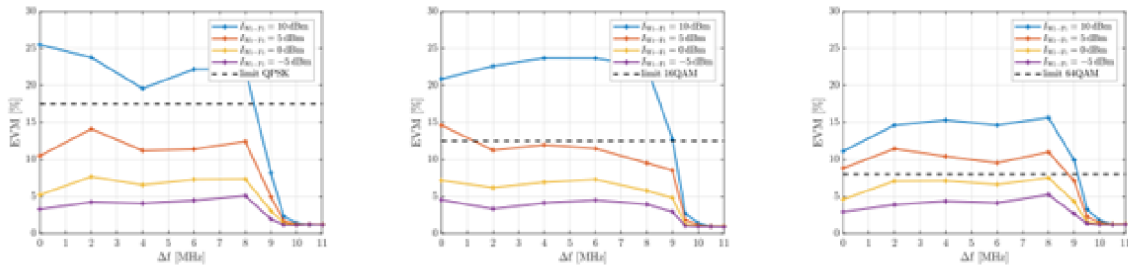


Obr. 2.7: Diagram meracieho pracoviska (vľavo) a systémové parametre (vpravo) pre koexistenčný scenár LTE a IEEE 802.11n/ac. (prevzaté z [19])

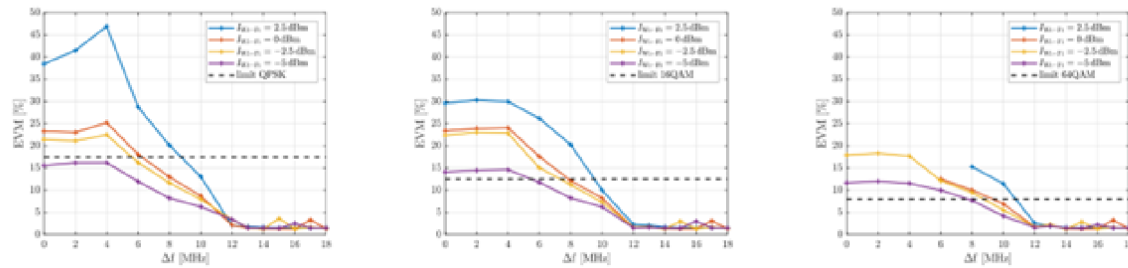


Obr. 2.8: Zmeraná charakteristika prenosového prostredia v laboratóriu. (prevzaté z [19])

Merania boli realizované moduláciami QPSK, 16-QAM a 64-QAM s hlavným koexistenčným parametrom odstupu nosných kmitočtov signálov a pri rôznych výkonových úrovniach užitočného signálu C_{LTE} a interferujúceho signálu I_{Wi-Fi} . Práhové hodnoty EVM sú pre systém LTE-DL 17,5% pre QPSK, 12,5% pre 16-QAM a 8% pre 64-QAM. Pri prekročení prahových hodnôt nie je zabezpečené správne spracovanie signálov na prijímači. Na obrázkoch 2.9 a 2.10 sú znázornené výsledné hodnoty merania EVM pre šírky pásma $B_{LTE} = 1,4 \text{ MHz}$ a $B_{LTE} = 20 \text{ MHz}$, pričom $C_{LTE} = -40 \text{ dBm}$. Z dosiahnutých výsledkov je vidieť že odolnosť LTE-DL signálu voči rušeniu IEEE 802.11n klesá s rastúcim B_{LTE} a s voľbou menej robustnej modulácie. Závery priamo zodpovedá so [14], kde je taktiež vidieť, že pri menšom B_{LTE} klesá požadovaný pomer C_{LTE}/I_{Wi-Fi} pre správne spracovanie signálov.



Obr. 2.9: Závislosť EVM na odstupe nosných kmitočtov LTE-DL a IEEE 802.11n pri modulácii LTE-DL QPSK (vľavo), 16-QAM (v strede) a 64-QAM (vpravo), kedy $BLTE=1,4$ MHz. (prevzaté z [19])



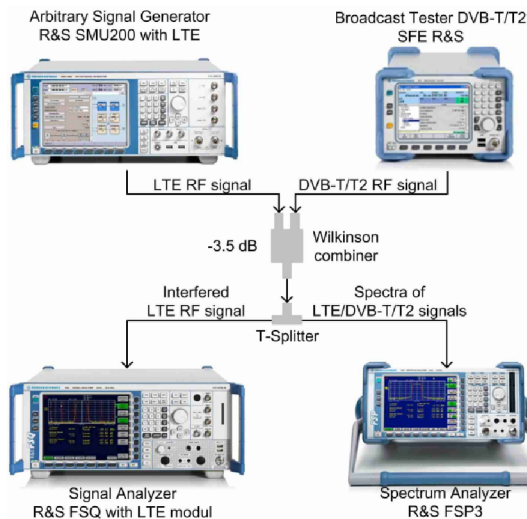
Obr. 2.10: Závislosť EVM na odstupe nosných kmitočtov LTE-DL a IEEE 802.11n pri modulácii LTE-DL QPSK (vľavo), 16-QAM (v strede) a 64-QAM (vpravo), kedy $BLTE=20$ MHz. (prevzaté z [19])

2.1.7 Meranie koexistenčných scenárov LTE s DVB-T2

Koexistenčné scenáre LTE a DVB-T2 vznikajú v pásmach 700 MHz a 800 MHz. Kritickými koexistenčnými scenármi, ku ktorým dochádza najmä v pásme 800 MHz sa zaoberá [15]. Kanály LTE downlinku (LTE-DL) a DVB-T2 sú v tomto pásme často oddelené GI so šírkou 1 MHz kedy môže dochádzať k interferenciám z dôvodu sub-pásmových a medzi-pásmových únikov.

Pre vyhodnotenie interferenčného vplyvu na LTE-DL sa využíva objektívnych parametrov EVM a pomeru C/I . Šírka GI bola pevne nastavená na 1 MHz a $P_{DVB-T2} = -60$ dBm. Oba vygenerované signály boli následne sčítané. Výkon LTE signálu postupne narastal od $P_{LTE} = -90$ dBm až do prahovej hodnoty EVM, pri ktorej je ešte zaručený optimálny príjem. Táto hodnota výkonu bola následne zaznamenaná pre výpočet požadovaného C/I . Boli skúmané rôzne konfigurácie systémov, ako napr. pre rôzne šírky pásma, modulačné metódy, stacionárny alebo mobilný príjem DVB-T2 a vysielanie pri úplnom vyťažení kanálu a zatažení v nečinnom režime. Konfigurácia meracieho pracoviska je znázornená na obrázku 2.11.

Obrázok 2.12 znázorňuje závislosť EVM na P_{LTE} pre šírky pásma 1,4 MHz a 20 MHz bez interferencie DVB-T2 a slúži ako referencia. Skratky AI a PI definujú



Obr. 2.11: Konfigurácia meracieho pracoviska pre koexistenčný scenár LTE a DVB-T2. (prevzaté z [15])

amplitúdovú a fázovú nevyváženosť pri sú-fázových a kvadratúrnych chybách. Z výsledných hodnôt je vidieť, že limitná hodnota EVM pre optimálny prenos pri modulácii 64-QAM nie je dosiahnuteľná.

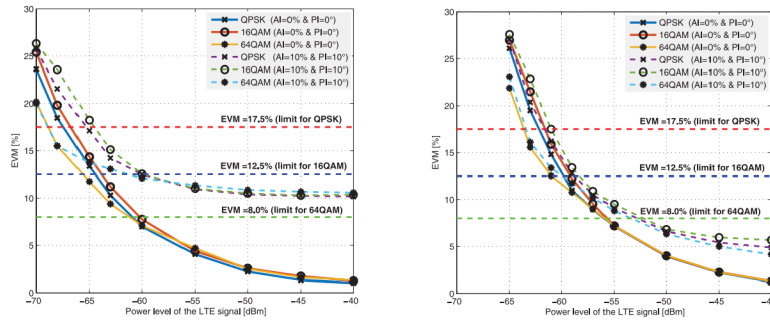
Preštudovaná bola taktiež závislosť potrebného C/I pre LTE pri rušení DVB-T2, rôznych typoch modulácií a rôzne šírky kanálu LTE. Získané hodnoty zodpovedajú teoretickým predpokladom, kedy s rastúcou šírkou kanálu a s komplexnejšou moduláciou narastá požadované C/I . Rôzne konfiguračné scenáre DVB-T2, tj. stationárny príjem a mobilný príjem, ovplyvňujú C/I len minimálne a majú takmer zanedbateľný vplyv na výsledné hodnoty.

Z obrázku 2.13 je vidieť, že s rastúcou šírkou kanálu a rastúcim rušením DVB-T2, symbolizovaným sú-fázovými a kvadratúrными chybami, rastú aj nároky na C/I . Pri zaťažení kanálu v nečinnom režime pri šírkach kanálu 1 MHz až 5 MHz sú nároky na C/I nižšie.

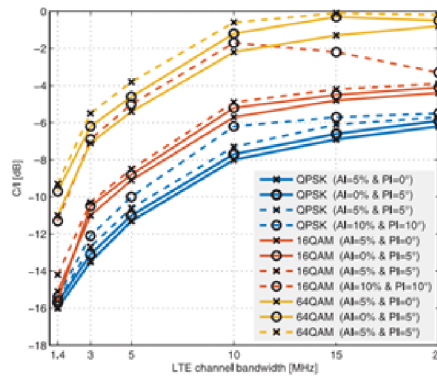
2.2 Koexistenčné scenáre pre WLAN a WPAN

2.2.1 Meranie koexistenčných scenárov IEEE 802.11n/ac a LTE v reálnom prenosovom prostredí

[19] sa taktiež zaoberá opačným prípadom kedy je IEEE 802.11n/ac rušený signálom LTE-DL. Konfigurácia pracoviska a charakteristika prenosového kanálu sú na obrázkoch 3a a 3b. Popis a konfigurácia merania sú v sekcii 2.1.6.



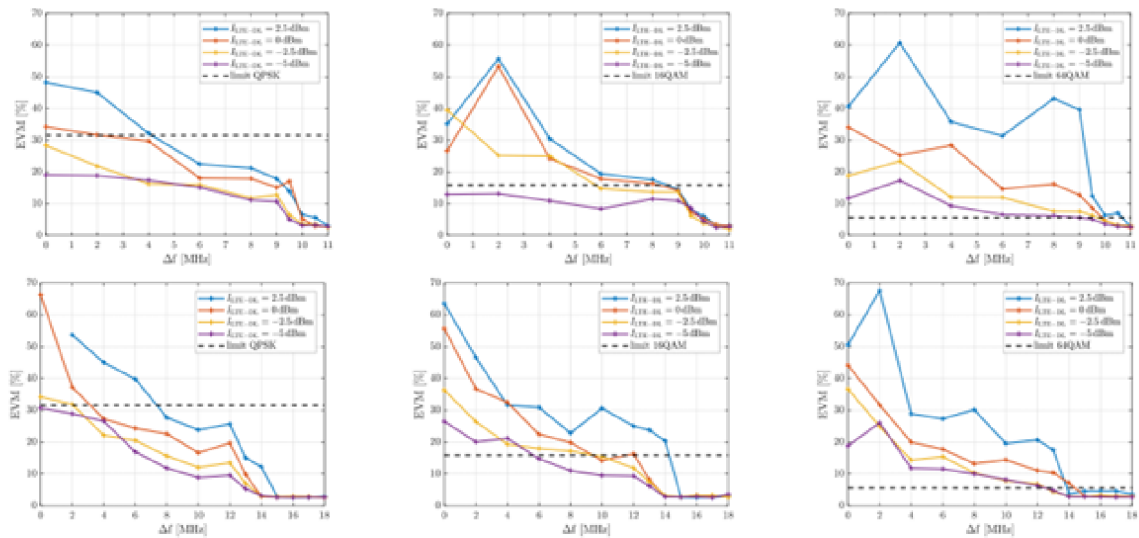
Obr. 2.12: Závislosť EVM na P_{LTE} pri šírke pásma kanálu 1,4 MHz(vľavo) a pri šírke 20 MHz(vpravo). (prevzaté z [15])



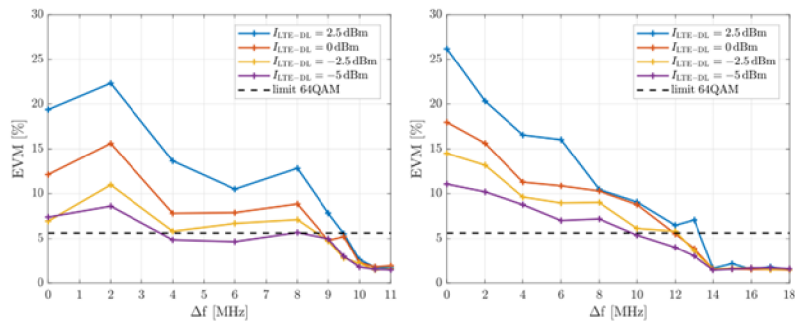
Obr. 2.13: Požadované C/I pre správnu funkciu LTE-DL pri úplnom vyťažení kanálu, rušení DVB-T2 so stacionárnym príjmom a šírke GI 1 MHz. (prevzaté z [15])

V prípade IEEE 802.11n/ac sú prahové hodnoty EVM 31,6% pre QPSK, 15,85% pre 16-QAM a 5,62% pre 64-QAM. Pri prekročení týchto hodnôt opäť prijímač nie je schopný správne spracovávať prijímaný signál. Výkon užitočného signálu C_{Wi-Fi} bol nastavený -40 dBm. Dosaiahnuté výsledky sú znázornené na obrázkoch 2.14 a 2.15.

V porovnaní s 2.1.6 sú signály IEEE 802.11 rušené LTE-DL citlivejšie na vplyv rušivého signálu, ako tomu bolo v opačnom prípade. V prípade IEEE 802.11ac bolo prahových hodnôt EVM dosiahnutých na nižších hodnotách, čo je pravdepodobne zaistené rozšíreným signálovým spracovaním. Vplyv LTE signálu na IEEE 802.11ac bol meraný v pásme 2,4 GHz, pretože konfigurácia pracoviska neumožňovala generáciu signálov v pásme 5 GHz. Predpokladom však je, že všeobecné závery môžu byť prenesené aj do tohto pásma.



Obr. 2.14: Závislosť EVM na odstupe nosných kmitočtov IEEE 802.11n a LTE-DL pri modulácii IEEE 802.11n QPSK (vľavo), 16-QAM (v strede) a 64-QAM (vpravo), kedy BLTE=1,4 MHz(horná sekcia) a BLTE=20 MHz(dolná sekcia). (prevzaté z [19])

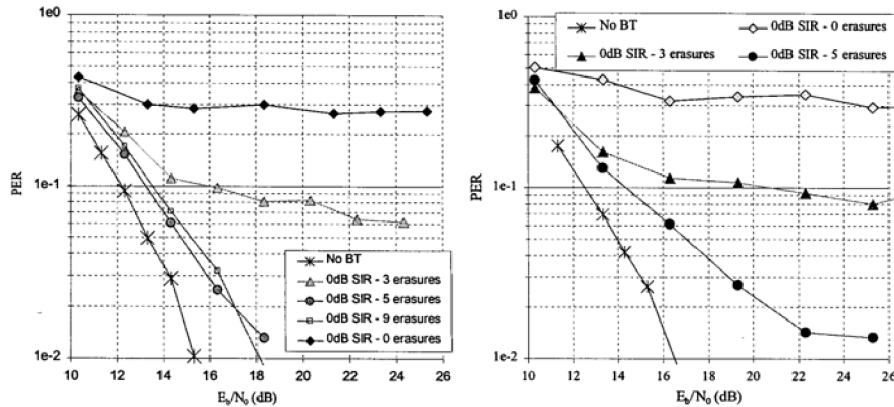


Obr. 2.15: Závislosť EVM na odstupe nosných kmitočtov IEEE 802.11ac a LTE-DL pri modulácii IEEE 802.11ac 64-QAM, kedy BLTE=1,4 MHz (vľavo) a BLTE=20 MHz (vpravo). (prevzaté z [19])

2.2.2 Koexistencia IEEE 802.11 a Bluetooth

Koexistenčný scenár je preberaný v [18]. Uvažovaný je najhorší prípad, kedy sa prenos jedného časového slotu s HV1 paketmi javí ako úzkopásmové Bluetooth rušenie a jeho vplyv je závislý od okupovaného pásma, šírky kanálu IEEE 802.11g a dĺžke paketov. Ako prenosový kanál bol zvolený viac-cestný Rayleighov prenosový kanál s exponenciálnym slabnutím. IEEE 802.11g využíva OFDM moduláciu s vnútornými moduláciami 16-QAM s kódovým pomerom 1/2 a QPSK, BPSK s kódovým pomerom 3/4. Bluetooth signál je modulovaný pomocou GFSK. Štúdia sa následne zaoberá vplyvom koexistenčného mechanizmu zmazávacieho kódovania, kedy sú interfero-

vané sub-nosné ignorované, na výslednú paketovú chybovosť PER. Pomer signálu k rušeniu (SIR) je prijímači 0 dB, pričom prijímač pre zjednodušenie pozná nosnú frekvenciu Bluetooth signálu. Hlavným koexistenčným parametrom je normalizovaná energia jedného bitu E_b/N_0 . Dosažené výsledky pre scenáre s moduláciou 16-QAM a QPSK sú na obrázku 2.16.



Obr. 2.16: Výsledný PER pre moduláciu 16-QAM(vľavo) a QPSK(vpravo). (prevzaté z [18])

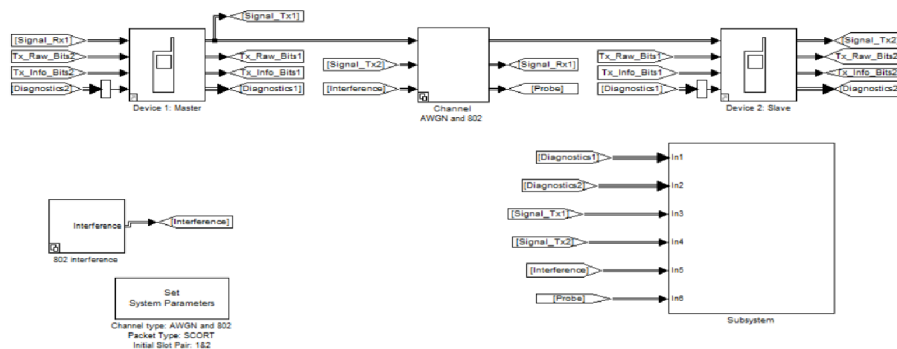
Výsledky simulácie demonštrujú vplyv rušenia IEEE 802.11g signálom Bluetooth a efektívnosť mazávacích kódov na výslednú paketovú chybovosť. Tento typ FEC kódovania značne navyšuje kvalitu prenosu. Nevýhodou je nutná implementácia systému v prijímači so schopnosťou monitorovania interferencie.

2.2.3 Simulácia koexistencie Bluetooth a IEEE 802.11b

[20] využíva pre simuláciu model siete vytvorený v Matlab Simulinku, ktorého blokový diagram je znázornený na obrázku 2.17. Model simuluje prenos Bluetooth signálu medzi 2 zariadeniami, pričom jedno je nastavené ako master a druhé ako slave. Signál je modulovaný GMSK. Interferujúci signál IEEE 802.11b je generovaný v interferenčnom bloku. Model navyše obsahuje systém pre meranie chybovosti prenosu.

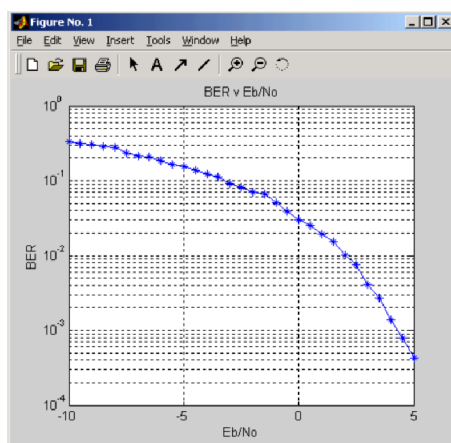
Dáta sú vo vysielačom zariadení spracované, uložené do rámcov, rozšírené FEC kódovaním a modulované. Nosná je následne modulovaná pre prenos pomocou FHSS. Pre overenie prenosu ACK je použitý bit ARQN. V prípade, že prenos nebol úspešný, zariadenie neúspešný paket opäť preposiela. Po prijatí paketu na prijímači sú dáta demodulované a je prevedená detekcia a korekcia chýb pomocou HEC a CRC kódov. V prípade nespracovateľného paketu je pri spätnom prenose odoslaný NACK bit.

Šírka kanálu IEEE 802.11b je 22 MHz s konfigurovateľnými parametrami, ako dĺžka paketu, priemerná paketová rýchlosť, frekvencia nosnej a vysielač výkon. Na



Obr. 2.17: Schéma simulačného modelu v Simulinku. (prevzaté z [20])

užitočný signál je v prenosovom kanáli kombinovaný s interferenciou a AWGN šumom. Útlm je závislý na zvolenej vzdialenosti zariadení.



Obr. 2.18: Závislosť BER na strednej výkonovej úrovni celkového rušenia Bluetooth signálu. (prevzaté z [20])

Pre demonštráciu vplyvu interferencie IEEE 802.11b na Bluetooth signál bola meraná premeraná závislosť celkovej priepustnosti systému od vzdialenosti interferenčného zdroja pri prenose v oboch smeroch a závislosť BER na celkovej strednej výkonovej úrovni rušenia vyjadrenej pomerom E_b/N_0 . Autori žiaľ nepriložili informácie o zvolenej konfigurácii parametrov jednotlivých vysielacích výkonov, modulácie IEEE 802.11b, atď. A preto dosiahnuté výsledky slúžia ako potvrdenie základných teoretických predpokladov. Závislosť BER na E_b/N_0 je znázornená na obrázku 2.18.

3 Návrh modelu prenosového kanálu

3.1 Charakteristika základných prenosových kanálov

Pred návrhom samotného prenosového modelu je potrebné si predstaviť základné faktory ovplyvňujúce šírenie signálu v bezdrôtovom prenosovom prostredí. Jedná sa najmä, ale nie výhradne o viac-cestné šírenie, šumové rušenie, tienenie, Dopplerov posuv, časovú a frekvenčnú disperziu a oneskorenie. Signál je teda prostredím tlmený, skreslený a podlieha disperziám, ktoré spôsobujú medzi-symbolové interferencie. Jedny zo základných modelov prenosových kanálov zohľadňujúc tieto faktory sú: Gaussov kanál, Riceov kanál a Rayleighov kanál.

3.1.1 Gaussov kanál

Model Gaussovho kanálu popisuje jednocestné šírenie signálu bez odrazov. Signál je tlmený a je naň superponovaný šum, ktorého spektrálne zloženie zodpovedá aditívnemu bielemu Gaussovskému šumu (AWGN). Výkonová hustota AWGN je v celom spektre signálu konštantná a výskyt amplitúd je popísaný pomocou pravdepodobnostnej funkcie Gaussovského rozloženia [22].

3.1.2 Riceov kanál

Riceov model popisuje viac-cestné šírenie signálu, kedy je prítomná aj priama cesta medzi prijímačom a vysielačom. Rozloženie dopadajúcich signálov na prijímač je aproximované pomocou pravdepodobnostnej funkcie Riceovho rozloženia. Viac-cestné šírenie spôsobuje kolísanie signálu, čo vedie k signálovým únikom, pričom rozlišujeme dva typy únikov: pomalý a rýchly. Rýchly únik je spôsobený najmä viac-cestným šírením a pomalý únik možno charakterizovať ako tienenie signálu prekážkou na prenosovej ceste. Matematický vzťah popisujúci vplyv Riceovho kanálu na signál $x(t)$ je popísaný rovnicou 3.1. V Riceovom kanáli sa navyše definuje tzv. K-faktor, ktorý udáva pomer útlmu priameho signálu k súčtu útlmu všetkých odrazených signálov a je popísaný rovnicou 3.2. [22]

$$y(t) = \frac{\rho_0 x(t) + \sum_{i=1}^{N_e} \rho_i e^{-j2\pi\Theta_i} x(t - \tau_i)}{\sqrt{\sum_{i=0}^{N_e} \rho_i^2}} \quad (3.1)$$

$$K = \frac{\rho_0^2}{\sum_{i=0}^{N_e} \rho_i^2} \quad (3.2)$$

ρ_0 je útlm v priamej ceste, N_e udáva počet odrazov, ρ_i je útlm v odrazenej ceste i , Θ_i je fázový posuv v ceste i a τ_i je oneskorenie signálu v ceste i .

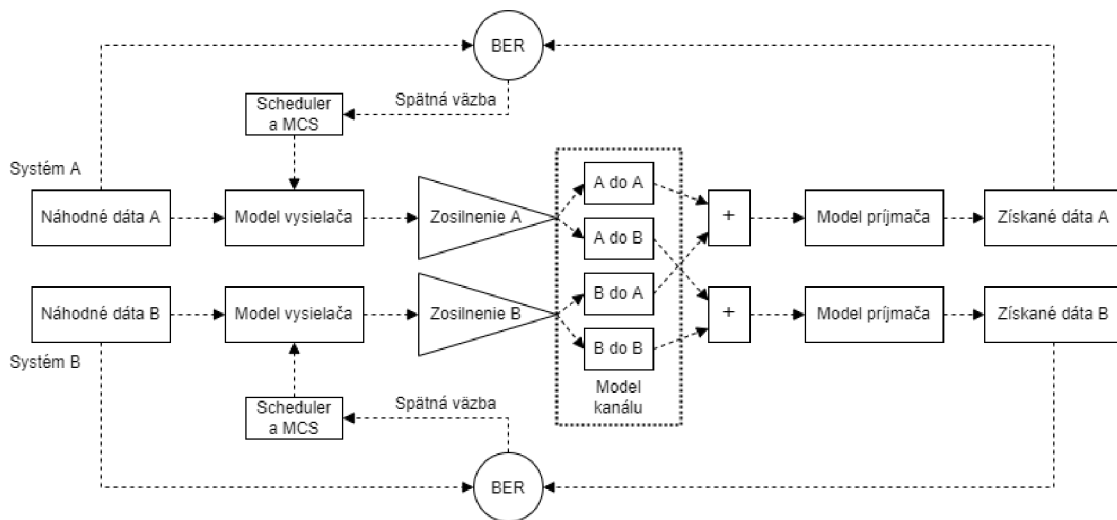
V praxi sa najčastejšie Riceov kanál používa v kombinácii s Gaussovým.

3.1.3 Rayleighov kanál

Rayleighov kanál popisuje viac-cestné šírenie signálu, kedy je priama cesta signálu potlačená a sú prítomné len tie odrazené. Na prijímač môžu prichádzať signály zo všetkých smerov s rovnakou pravdepodobnosťou. Rozloženie dopadajúcich signálov je v tomto prípade aproximované pomocou pravdepodobnostnej funkcie Rayleighovho rozloženia. Matematický vzťah popisujúci vplyv Rayleighovho kanálu na signál $x(t)$ je popísaný 3.3. [22]

$$y(t) = \frac{\sum_{i=1}^{N_e} \rho_i e^{-j2\pi\theta_i} x(t - \tau_i)}{\sqrt{\sum_{i=0}^{N_e} \rho_i^2}} \quad (3.3)$$

3.2 Návrh prenosového modelu

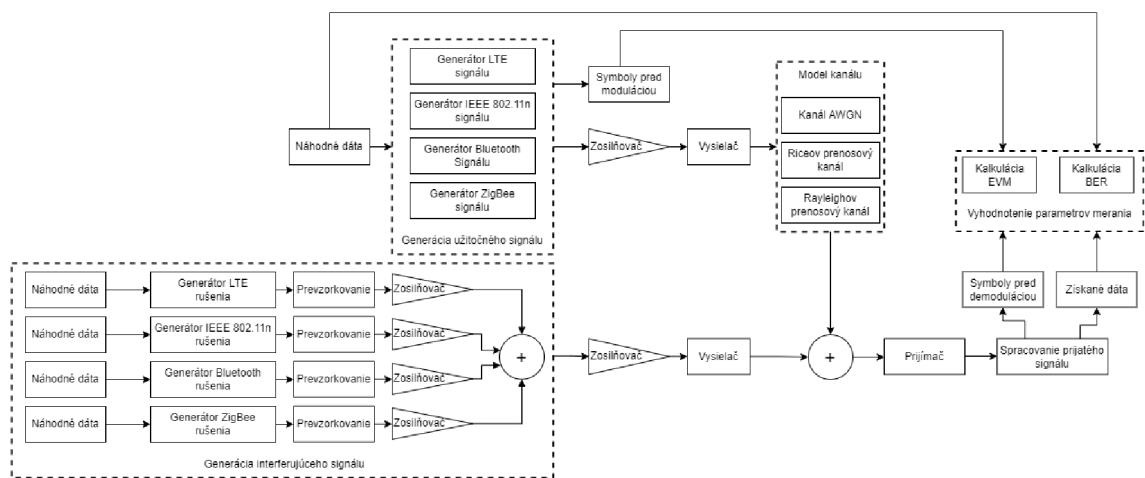


Obr. 3.1: Všeobecný blokový diagram koexistenčného scenáru v prenosovom kanáli pre 2 systémy. (prekreslené z [21])

[21] mimo iné, predstavuje všeobecný blokový diagram koexistenčného scenáru v prenosovom kanáli pre dva systémy a je znázornený na obrázku 3.1. Po vygenerovaní náhodnej bitovej sekvencie sú dáta kódované a modulované v závislosti od konfigurácie. Výstupné signály sú následne zosilnené, prenesené prenosovým kanálom, následne sčítané a nakoniec prijaté na prijímačoch. Získané dáta sú porovnávané s pôvodnými a je realizovaný výpočet bitovej chybovosti Bit-Error-Ratio (BER). Takto získaná chybovosť, môže byť následne použitá na riadenie a optimalizáciu časovača a modulačných a kódovacích schém MCS pre zníženie bitovej chybovosti.

Pri kombinácii užitočného a interferujúceho signálu sa objavuje problém s diferenciou vzorkovacích kmitočtov generovaných signálov. Ako príklad je popísaný

prípád dvoch signálov ($s_A(t)$ a $s_B(t)$) v základnom pásme s komplexnou OFDM obálkou s vnútornou moduláciou QPSK. Signál $s_A(t) = s_{I_A}(t) + s_{Q_A}(t)$, s rozstupom sub-nosných 15 kHz, 8 sub-nosnými a veľkosťou FFT okna 8. Vzorkovací kmitočet je potom daný rovnicou $f_{vz_A} = \Delta F_{SC_A} \cdot N$, kde ΔF_{SC_A} je rozstup nosných a N počet sub-nosných. Výsledný vzorkovací kmitočet je $f_{vz_A} = 15 \cdot 10^3 \cdot 8 = 120 \text{ kHz}$. Signál $s_B(t) = s_{I_B}(t) + s_{Q_B}(t)$, s rozstupom sub-nosných 21 kHz a 16 sub-nosnými s veľkosťou FFT okna 16 bude mať výsledný $f_{vz_B} = 21 \cdot 10^3 \cdot 16 = 336 \text{ kHz}$. Pre správne sčítanie signálov je teda potrebné signál A interpolovať alebo nadvzorkovať, a tak umelo navýšiť počet vzoriek tak, aby boli signály zarovnané v čase. Sčítanie signálov s rôznymi vzorkovacími kmitočtami nemá žiadnu informačnú hodnotu pri modelovaní reálneho prenosu.



Obr. 3.2: Návrh blokového diagramu zjednodušeného modelu prenosového kanálu.

Návrh zjednodušeného modelu prenosového kanálu som realizoval na podobnom princípe ako [21] a jeho blokový diagram je znázornený na obrázku 3.2. Model pracuje iba s jedným zvoleným užitočným signálom, pričom na prijímači sa ostatné generované signály javia ako interferencia v kanáli. Vygenerovaný užitočný signál prechádza do modelu prenosového kanálu, kde naň môže byť superponovaný šum AWGN, prípadne môže byť simulované viac-cestné šírenie s Dopplerovým javom pomocou Riecovho alebo Rayliegovho prenosového kanálu. Užitočný signál je potom skombinovaný s interferujúcim signálom a následne spracovaný na prijímacej strane, kde sa vyhodnocuje vektorová chybovosť EVM alebo bitová chybovosť BER.

3.3 Implementácia prenosového modelu v Matlabe

Pre zjednodušenie návrhu bolo využitých rozširovacích balíkov. Jedná sa o Matlab balíky: DSP System Toolbox, Communications Toolbox, Bluetooth Toolbox, WLAN

Toolbox, LTE Toolbox a Communications Toolbox Library for ZigBee and UWB. Program spoľahlivo beží na verzii Matlab R2022a a spätná kompatibilita s ostatnými verziami nie je zaručená. Simuluje sa prenos s analýzou BER alebo EVM v závislosti na CIR alebo CINR. Simulácia prebieha cyklicky a užívateľ volí rozsah maximálny a minimálny výkon interferencie, výkonový krok a počet opakovaní v jednom kroku. Okolo modelu bolo pre jednoduchšiu konfiguráciu premeniteľných parametrov a jednoduchšiu analýzu simulačných výsledkov postavené užívateľské GUI, ktoré možno vidieť napríklad na obrázku 4.9.

3.3.1 Generovanie užitočného signálu

Generovaný môže byť vždy iba jeden užitočný signál. Na výstupe každej z funkcií je objekt `amp`. Ten má funkciu ideálneho lineárneho zosilňovača a slúži pre nastavenie vysielacieho výkonu. `txWaveform` je výstupný signál zo zvoleného generátoru. `txData` je náhodná bitová postupnosť reprezentujúca užívateľské dáta a slúži ako referencia pri výpočte BER na prijímači.

Generátor LTE signálu

Generátor pracuje s konfiguračnými parametrami R.2, R.3 a R7, ktoré definujú typ modulácie a kódový pomer. Šírka pásma signálu je 10 MHz. `lteSampleRate` je výstupný vzorkovací kmitočet signálu a spolu so štruktúrou `rmcOut` slúžia pre konfiguráciu na strane prijímača a pre správne spracovanie signálu na jeho vstupe.

```
function [txWaveform, lteSampleRate, txData, rmcOut] = ...  
    generateUsefulLte(app, amp);
```

Generátor IEEE 802.11n signálu

Generátor generuje signál v závislosti od zvolenej MCS, ktorá určuje typ modulácie a kódový pomer. Šírka kanálu je 20 MHz a kanálové kódovanie je BCC. `wlanSampleRate` je vzorkovací kmitočet výstupného signálu, `txData` sú náhodne generované užívateľské dáta pre určenie výsledného BER, `wlanInd` obsahuje referenčné indexy pre správne dekódovanie paketov a `cfgHT` obsahuje konfiguračné parametre pre správne spracovanie signálu na strane prijímača. `refSym` sú referenčné symboly pre určenie výsledného EVM.

```
function [txWaveform, wlanSampleRate, txData, wlanInd, cfgHT, ...  
    refSym] = generateUsefulWlan(app, amp);
```

Generátor Bluetooth signálu

Generátor pracuje v režime BR s moduláciou GFSK a paketmi typu DH1. Vzorkovací kmitočet výstupného signálu je daný `btSampleRate`. `txData` sú náhodne generované užívateľské dáta pre určenie výsledného BER a `rxCfg` obsahuje konfiguračné parametre pre správne spracovanie signálu na strane prijímača.

```
function [txWaveform, btSampleRate, txData, rxCfg] = ...  
    generateUsefulBt(app, amp);
```

Generátor ZigBee signálu

Generuje signál s moduláciou O-QPSK. `zbSampleRate` je vzorkovací kmitočet výstupného signálu, `txData` sú náhodne generované užívateľské dáta pre určenie výsledného BER a `zbSamplesPerChip` je konfiguračný parameter pre správne spracovanie signálu na strane prijímača.

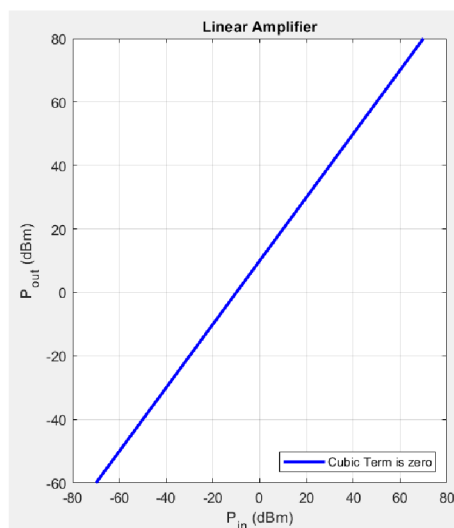
```
function [txWaveform, zbSampleRate, txData, zbSamplesPerChip] = ...  
    generateUsefulZb(app, amp);
```

Nastavenie zosilnenia a útlmu

Generované signály majú na výstupe funkcií rôzne výkonové úrovne. Do generátorov bol vložený objekt `comm.MemorylessNonlinearity`. Blok pôvodne slúži na návrh nelinearit ovplyvňujúcich signál v základnom pásme. Obsahuje však aj mnoho parametrov vhodných pre konfiguráciu ideálneho lineárneho zosilňovača. Pri nastavení nulového fázového posuvu pre AM-PM konverziu, nekonečného bodu zahradenia a požadovaného zosilnenia dostávame podobnú prenosovú charakteristiku ako je na obrázku 3.3.

3.3.2 Generovanie interferujúcich signálov

Proces je veľmi podobný ako pri generácii užitočného signálu. Jeden zo vstupných parametrov je opäť ideálny lineárny zosilňovač `amp`, ktorý slúži na nastavenie počiatočného výkonového offsetu a útlmu signálu v prenosovom prostredí definovaným parametrom `txAtten`. Parameter `txSampleRate` je kmitočet užitočného signálu, ktorý slúži pri prevzorkovaní interferujúceho signálu. Generátory interferujúcich signálov umožňujú nastaviť aj frekvenčný offset k nosnej frekvencii užitočného signálu. Výstupom všetkých funkcií je rušivý signál `intWaveform`, pričom dĺžka rušivého



Obr. 3.3: Prenosová charakteristika ideálneho lineárneho zosilňovača so zosilnením 10 dB.

signálu musí byť zhodná alebo väčšia ako dĺžka užitočného signálu. V prípade nedostatočnej dĺžky sa generácia interferencie opakuje a interferujúce signály sa sčítajú.

Generátor interferenčného signálu LTE

Funkcia generuje výstupný rušivý signál v rovnakej konfigurácii ako tomu bolo pri užitočnom LTE signáli. Konfigurácia modelu je opäť typu R.7 so šírkou pásma 10 MHz a moduláciou 64QAM.

```
function [intWaveform] = generateIntLte(app, txSampleRate, txAtten, ...
    amp);
```

Generátor interferenčného signálu IEEE 802.11n

Výstupný rušivý signál IEEE 802.11 má šírku pásma 20 MHz a využíva MCS 1 s moduláciou QPSK.

```
function [intWaveform] = generateIntWlan(app, txSampleRate, ...
    txAtten, amp);
```

Generátor interferenčného signálu Bluetooth

Generátor rušivého signálu má rovnakú konfiguráciu ako pri užitočnom Bluetooth signáli. Prenosový režim je opäť BR s paketmi HV3.

```
function [intWaveform] = generateIntBt(app, txSampleRate, txAtten, ...  
    amp);
```

Generátor interferenčného signálu ZigBee

Konfiguračné parametre pre generáciu rušivého signálu ZigBee sú totožná s prípadom generácie užitočného signálu ZigBee.

```
function [intWaveform] = generateIntZb(app, txSampleRate, txAtten, ...  
    amp);
```

Prevzorkovanie interferujúcich signálov

Prevzorkovanie je realizované vstavanou funkciou `resample()`, ktorá pre aproximáciu ideálneho anti-aliasingového filtra využíva metódu Kaiserovho okna. Všetky nastavenia sú východzie.

Prevzorkovanie interferujúcich signálov

Vstupný signál `in` so vzorkovacím kmitočtom `fs` je posunutý o `foffset` pričom princíp je podobný, ako pri využití objektu `comm.PhaseFrequencyOffset`.

```
function out = helperFrequencyOffset(in, fs, foffset);
```

3.3.3 Model prenosového kanálu

Užitočný signál prechádza modelom prenosového kanálu, kde môže možné navoliť rôzne konfigurácie Gaussovského, Riceovho a Rayleighovho kanálu. Princíp modelov týchto kanálov je popísaný v kapitole 3.1.

Kanál AWGN

Využíva sa objektu `comm.AWGNChannel`. Konfigurovateľný je len pomer signálu k šumu SNR a na výstupe funkcie je zašumený užitočný signál.

Riceov alebo Rayleighov kanál

Pre Riceov kanál sa využíva objekt `comm.RicianChannel` a je možné nastaviť časové oneskorenie aj priemerný zisk odrazených signálov na prenosovej ceste a K -faktor.

Pre Rayleighov kanál sa využíva objekt `comm.RayleighChannel`, pričom je možné nastaviť rovnaké parametre ako v Riceovom kanáli, okrem K-faktora.

3.3.4 Spracovanie signálu na prijímači

Prijímač je vybraný v závislosti od zvoleného užitočného signálu a realizuje korekciu frekvenčného a časového offsetu, demoduláciu a chybovú korekciu. `rxWaveform` je signál na vstupe prijímača. Pre správne spracovanie signálu je potrebné poznať vzorkovací kmitočet `txSampleRate`. Prijatý signál je vykresľovaný spektrálnym analyzátorom. `txData` je pôvodná bitová sekvencia a slúži na výpočet BER. Výstupom všetkých funkcií prijímačov je matica `measured` nesúca informácie o BER alebo EVM v jednotlivých opakovaníach. Pri výpočte priemerného BER alebo EVM na konci kroku je vynulovaná, a vracia sa späť do funkcie. Je nutné dodať, že výpočty EVM sú realizovateľné len pre signály LTE a IEEE 802.11n. Výstupmi Bluetooth a ZigBee prijímačov sú len dekódované bity.

Je nutné dodať, že zobrazenie konštalácie a výpočty EVM sú realizovateľné len pre signály LTE a IEEE 802.11n. Výstupmi Bluetooth a ZigBee prijímačov sú len dekódované bity.

Prijímače LTE, Bluetooth a ZigBee

`rmcOut` je výstupná štruktúra z generátoru, ktorá slúži pre nastavenie LTE prijímača. Bluetooth prijímač sa nastavuje cez `btCfg` a ZigBee potrebuje poznať len počet vzoriek na chirp `zbSpc`.

```
function measured = lteReceiver(app, rxWaveform, txSampleRate, ...
    txData, spectrumScope, constelDiag, rmcOut, measured);
function measured = btReceiver(app, rxWaveform, txSampleRate, ...
    txData, spectrumScope, btCfg, measured);
function measured = zbReceiver(app, rxWaveform, txSampleRate, ...
    txData, spectrumScope, zbSpc, measured);
```

Prijímač IEEE 802.11n

Pre nastavenie prijímača slúži štruktúra `cfgHT`. `wlanInd` je tabuľka indexov pre preskladanie prijatých dát. `refSym` sú referenčné symboly a slúžia pre výpočet EVM.

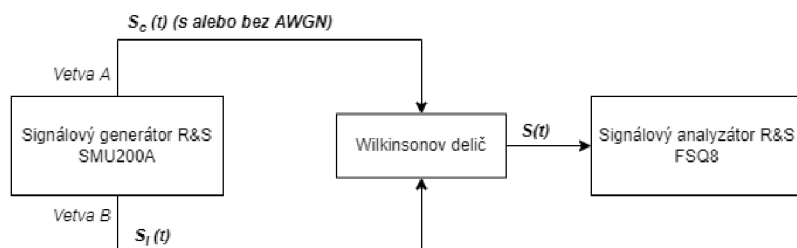
```
function measured = wlanReceiver(app, rxWaveform, txSampleRate, ...
    txData, spectrumScope, constelDiag, wlanInd, cfgHT, refSym, ...
    measured);
```

4 Overenie správnosti navrhnutého modelu

Pre overenie simulačného modelu boli realizované 3 laboratórne merania pre rozdielne koexistenčné scenáre. Jednalo sa o prenos LTE rušený IEEE 802.11n signálom, prenos IEEE 802.11n rušený LTE signálom a prenos LTE rušený Bluetooth signálom. Nosné všetkých signálov boli nastavené na kmitočet 2,4 GHz, pričom všetky uvážené systémy môžu pracovať v blízkom pásme ISM. V dnešnej dobe je implementovaných mnoho koexistenčných mechanizmov pre minimalizáciu vzájomného rušenia týchto systémov, preto je meranie realizované len ako veľmi zjednodušený scenár. Užitočný signál $s_c(t)$ má pevne nastavenú výkonovú úroveň. Interferenčný signál $s_i(t)$ má na začiatku rovnakú výkonovú úroveň ako s_c . Výkon P_{s_i} následne klesá s krokom 1 dB, pričom v každom kroku je meraná stredná hodnota EVM (EVM_{meas}) a počítaný pomer CIR alebo CINR.

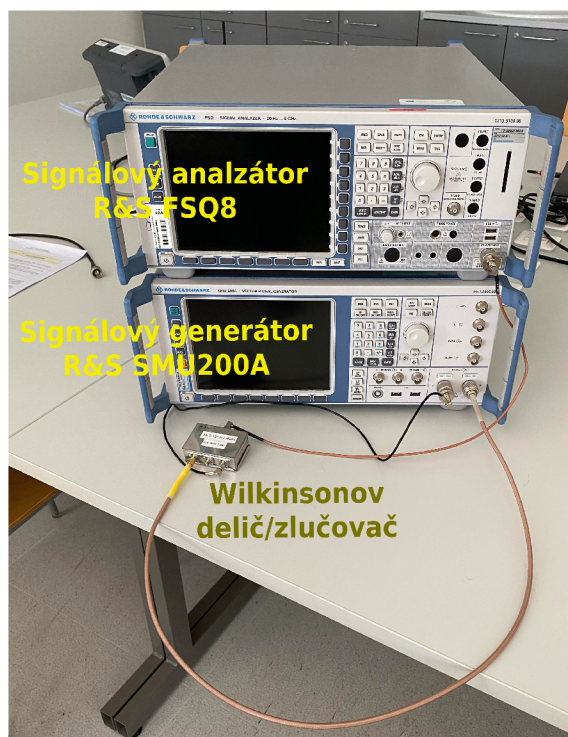
4.1 Konfigurácia meracieho pracoviska

Návrh meracieho pracoviska vychádza z laboratórnych návrhov uvedených v [15] a [16]. Obrázok 4.1 ilustruje základný blokový diagram návrhu. Signály $s_c(t)$ a $s_i(t)$ sú generované dvoj-kanálovým signálovým generátorom Rohde & Schwarz (R&S) SMU200A. Užitočný signál je vždy generovaný na vetve A kde k nemu môže byť pričítaný šum AWGN. Oba signály sú vedené do Wilkinsonovho deliča, navrhnutým na prevádzku v pásme 2,4 GHz, kde sú sčítané. Na výstupe deliča je signál $s(t) = s_c(t) + s_i(t)$. Ten je smerovaný na vstup signálového analyzátoru R&S FSQ8, ktorý meria priemernú hodnotu EVM. Útlm v prenosovej ceste je približne 20 dB. Fotografia meracieho pracoviska je na obrázku 4.2.



Obr. 4.1: Blokový diagram meracieho pracoviska.

Pri meraní som pre správnu konfiguráciu všetkých uvažovaných štandardov využil postupy popísané v [23], pričom som si niektoré parametre prispôbil tak, aby čo najviac zodpovedali parametrom simulácie. Významné z nich sú popísané v tabuľkách 4.1 a 4.2.



Obr. 4.2: Fotografia meracieho pracoviska.

Parametre	Popis	Parametre	Popis
Šírka pásma	10 MHz	Šírka pásma	20 MHz
Duplex	FDD	Modulácia	QPSK, 64QAM
Modulácia	QPSK, 64QAM	Bitová rýchlosť	65 Mbit/s
Velkosť FFT	1024	Dĺžka dát	1024 bytov
Cyklický prefix	Normálny	Ochranný interval	Dlhý
Kódový pomer	1/3	Kanálové kódovanie	BCC
Vysielací výkon	-30 dBm	Kódový pomer	5/6
Počet RB	50	Nosná frekvencia	2,4 GHz
Nosná frekvencia	2,4 GHz		

Tab. 4.1: Významné konfiguračné parametre LTE (vľavo) a IEEE 802.11n (vpravo).

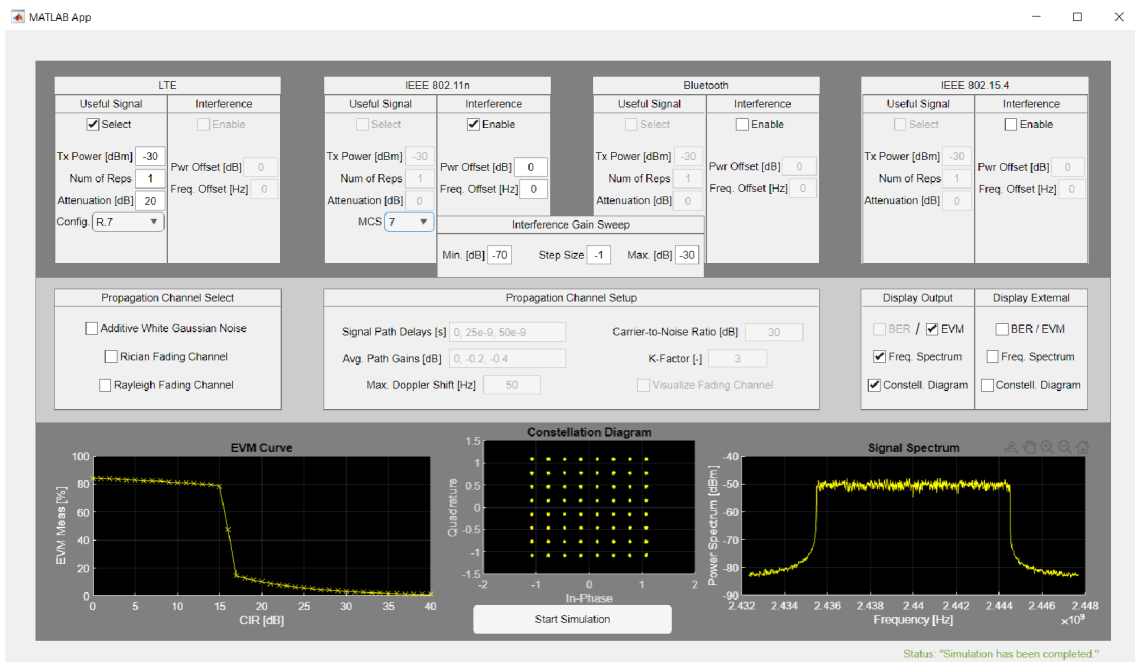
4.2 Koexistenčný scenár LTE a IEEE 802.11n

Ako prvé, som zmeral vplyv rušenia IEEE 802.11n na signál LTE a následne som scenár simuloval. Nastavenia a výstupné hodnoty simulácie sú na 4.3. Hodnoty zo simulácie a merania sú porovnávané v grafoch na obrázkoch 4.4 a 4.5.

Na obrázku 4.4 je pri simulácii značná skoková zmena EVM. Prijímač neprestáva merať EVM ani v prípade, keď je signál absolútne nespracovateľný. Schodovitý skok

Parametre	Popis
Šírka pásma	1 MHz
Modulácia	2FSK
Bitová rýchlosť	1 Mbit/s
Filter	Gauss
BT_b	0.5
Nosná frekvencia	2,4 GHz

Tab. 4.2: Významné konfiguračné parametre Bluetooth.

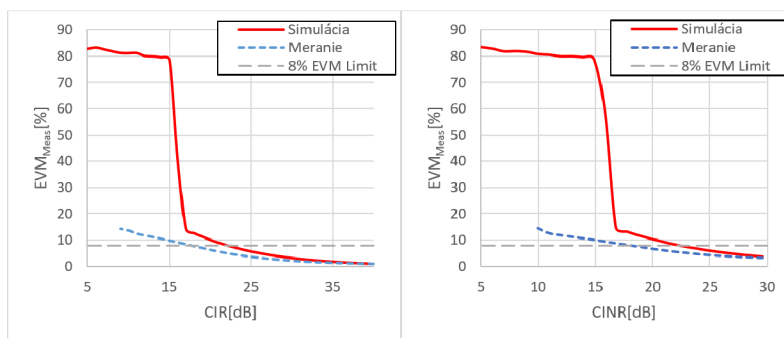


Obr. 4.3: Nastavenie a výsledky simulácie prenosu LTE s 64QAM rušeným IEEE 802.11n s 64QAM bez AWGN.

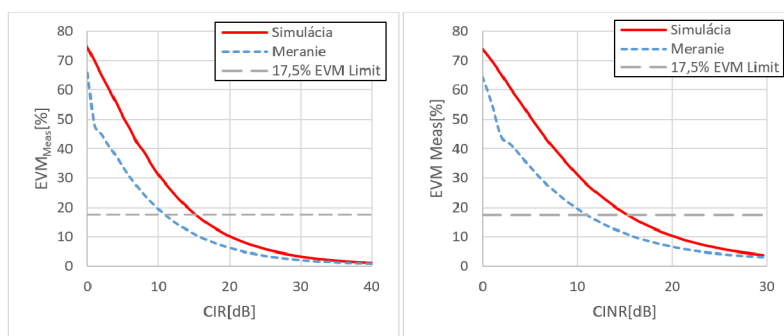
v okolí 16 až 17 dB značí, miesto, kde dochádza k výpadku synchronizácie a preto možno nasledovné hodnoty EVM zanedbať. Na prahovej úrovni EVM je rozdiel simulovaných a meraných hodnôt okolo 5 dB. Na obrázku 4.5 je vidieť, že použitie robustnejšej modulácie QPSK umožňuje synchronizáciu aj na nižších hodnotách CIR alebo CINR. Hodnoty sa však stále líšia v rozsahu 5 až 6 dB.

Ako ďalšie som meral a simuloval opačný scenár kedy bol signál IEEE 802.11n s 64QAM alebo QPSK moduláciou, rušený LTE signálom s moduláciou 64QAM. Konfigurácia simulácie je na obrázku 4.6 a výsledné hodnoty simulácie a merania, sú znázornené v grafoch na obrázkoch 15 a 16.

V tomto prípade bolo pri simulácii dosiahnutých nižších hodnôt EVM v porovnaní s meraním. Prenosový model však opäť nereprezentuje reálny scenár, pričom



Obr. 4.4: Simulované a namerané hodnoty pre signál LTE s 64QAM bez AWGN (Vľavo) a s AWGN (Vpravo) rušený signálom IEEE 802.11n s 64QAM.



Obr. 4.5: Simulované a namerané hodnoty pre prenos LTE s QPSK bez AWGN (Vľavo) a s AWGN (Vpravo) rušený signálom IEEE 802.11n s 64QAM.

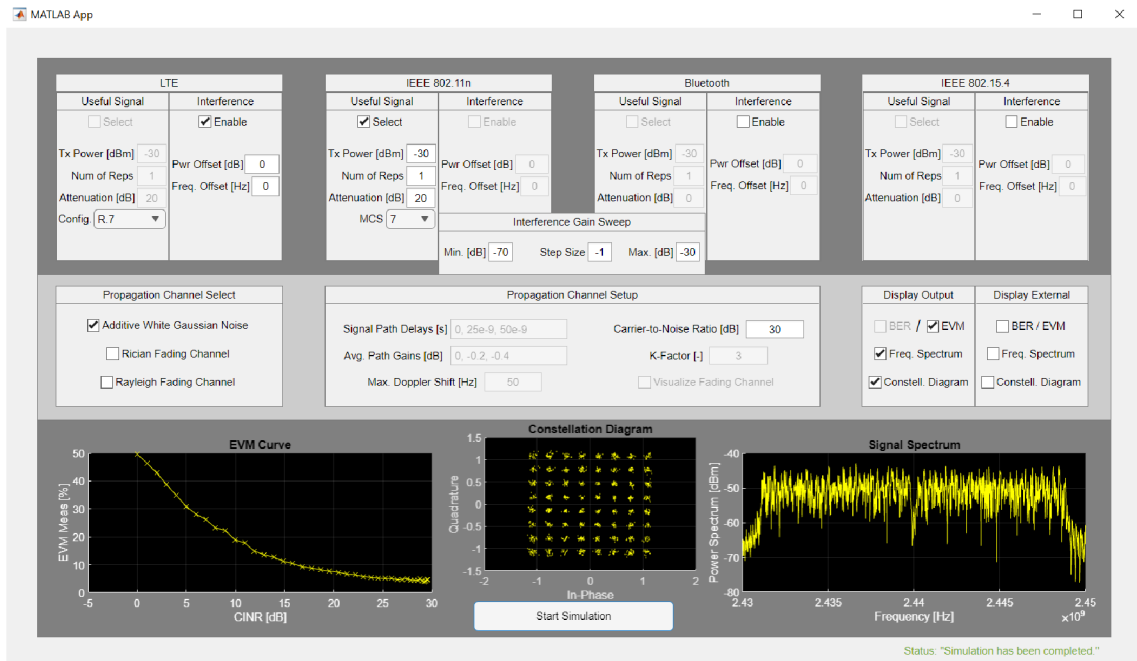
odchýlka na prahovej úrovni EVM je ešte väčšia ako pri predošlom scenári. Simulačné hodnoty sa najviac blížia k meraným v prípade modulácie 64QAM, pričom pri pridaní AWGN už vôbec nemôže byť dosiahnutá prahová hodnota EVM.

4.3 Koexistenčný scenár LTE a Bluetooth

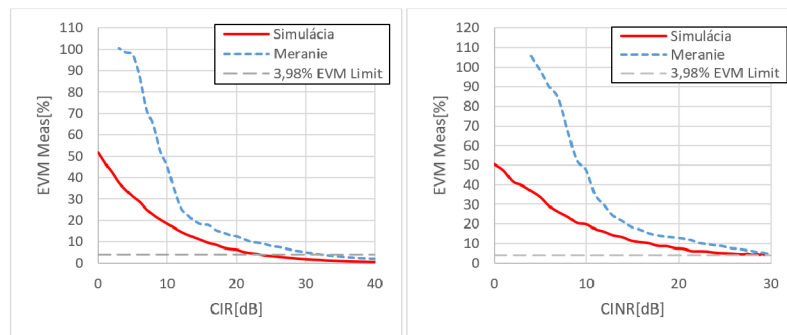
Ako posledné som premeral scenár rušenia Bluetooth signálu na LTE s moduláciou 64QAM. Získané hodnoty sú porovnané s nameranými v grafoch na obrázku 4.10. V tomto prípade sa simulovaný model veľmi dobre zhoduje s meraným scenárom. Maximálna odchýlka bola len 1,5 dB a spadá do tolerančných medzí.

4.4 Zhrnutie dosiahnutých výsledkov

Analýza EVM má zmysel len pre hodnoty v okolí maximálnej povolenej prahovej hodnoty EVM (maximálne do 30%). Pri jej značnom prekročení rastie aj skreslenie a dochádza ku veľkému kolísaniu hodnôt.



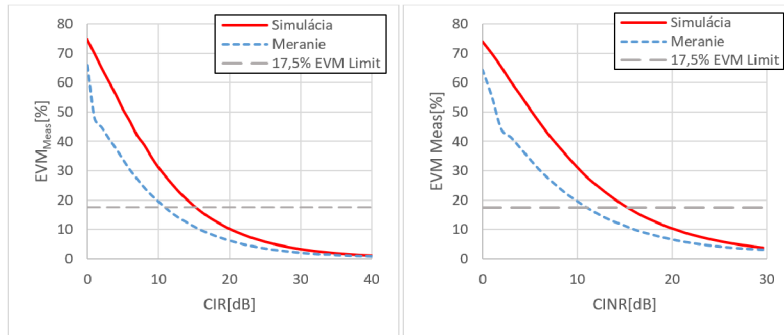
Obr. 4.6: Nastavenie a výsledky simulácie prenosu IEEE 802.11n s 64QAM so superponovaným AWGN a rušeným LTE s 64QAM.



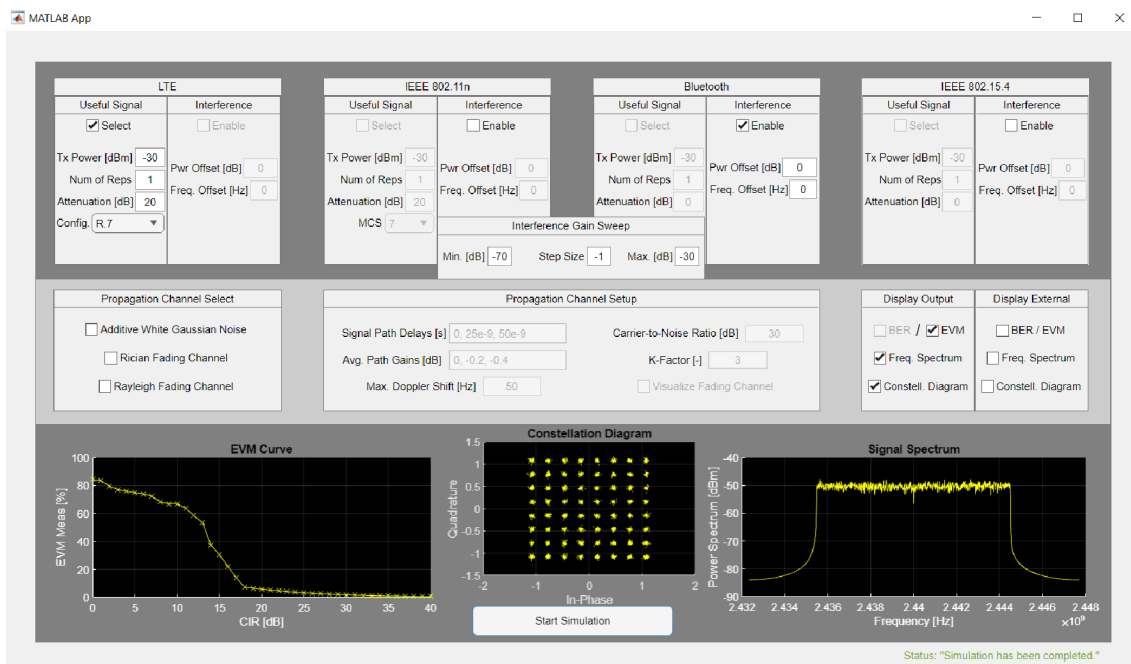
Obr. 4.7: Simulované a namerané hodnoty pre prenos IEEE 802.11n s 64QAM bez AWGN (Vľavo) a s AWGN (Vpravo) rušený signálom LTE s 64QAM.

Pri prvých dvoch testovaných koexistenčných scenároch sa ukázalo, že výsledky simulácie takmer vôbec nezodpovedajú meranému prenosovému prostrediu. Modely by sa dali považovať za v celku dôveryhodné v prípade, že by maximálna odchýlka simulovaných a meraných hodnôt pohybovala v rozsahu 1 až 4 decibely. Navrhnutý LTE prijímač nie je schopný realisticky spracovávať prijatý signál pri vyšších výkonových úrovniach širokopásmového rušenia. Pri robustnejšej LTE modulácii QPSK je tvar oboch charakteristík podobný, no rozdiel meraných a simulačných hodnôt v okolí prahovej úrovne EVM stále skoro 5 dB.

Prijímač IEEE 802.11 sa zas ukázal ako opačný extrém a dosahuje veľmi nízkych



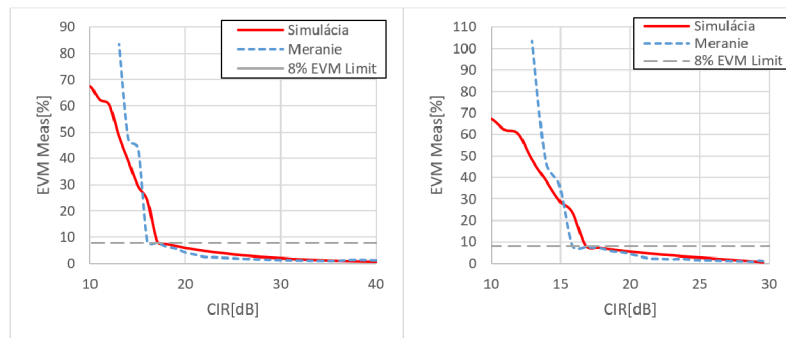
Obr. 4.8: Simulované a namerané hodnoty pre prenos IEEE 802.11n s QPSK bez AWGN (Vľavo) a s AWGN (Vpravo) rušený signálom LTE s 64QAM.



Obr. 4.9: Nastavenie a výsledky simulácie prenosu LTE s 64QAM rušeným Bluetooth signálom.

hodnôt EVM v porovnaní s meraným scenárom.

Simulovaný a meraný koexistenčný scenár sa veľmi dobre zhodujú v prípade LTE s 64QAM rušeným signálom Bluetooth. Maximálna odchýlka nie je väčšia ako 1,5 dB. Pri nižších hodnotách CIR alebo CINR je výsledné EVM veľmi skreslené a preto je rozumné uvažovať len hodnoty pod 30%.



Obr. 4.10: Simulované a namerané hodnoty pre prenos LTE s 64QAM bez AWGN (Vľavo) a s AWGN (Vpravo) rušený signálom Bluetooth.

Záver

V teoretickej časti boli preštudované rôzne typy bezdrôtových komunikačných systémov ako napríklad systémy WLAN a WPAN, DVB a systémy mobilných sietí. Následne sú rozoberané rôzne štúdie zaoberajúce sa koexistenciou spomínaných systémov v zdieľaných kmitočtových pásmach. Preberané sú rôzne koexistenčné scenáre, no najmä sú popísané rôzne simulačné a meracie metódy skúmania vzájomnej interferencie jednotlivých systémov, ako napríklad *Meranie koexistenčných scenárov LTE a IEEE 802.11n v reálnom prenosovom prostredí*.

V praktickej časti bola najprv popísaná základná myšlienka návrhu zjednodušeného prenosového kanálu. Následne bol implementovaný zjednodušený model prenosového kanálu v prostredí Matlab využívajúci viaceré vývojové balíky pre analýzu aj samotný návrh modelu. Popísané sú základné funkcie, parametre a premenné simulácie. Je možné generovať užitočný signál rušený až troma ďalšími systémami s prechodom cez Gaussov kanál, prípadne Riceov alebo Rayleigov blednúci kanál. Pre jednoduchšiu a prehľadnejšiu realizáciu koexistenčných scenárov bol celý návrh zlúčený do jedného užívateľského GUI s možnosťou veľmi rýchlej konfigurácie simulačných parametrov. Ako posledné bolo realizované meranie v laboratóriu, slúžiace pre overenie správnej funkcie prenosového systému. Výsledky meraní ukázali, že dva z troch skúmaných scenárov nezodpovedali meraným hodnotám s pomerne veľkými odchýlkami.

Do budúca by som sa zameral na bližšie preskúmanie generujúcich štruktúr využívaných vývojových balíkov, pre optimálnejšie prispôsobenie generácie, ekvalizácie a synchrnoziácie prenosových signálov. Prenosový model by sa dal rozšíriť doplnením viacerých systémov, ako sú napríklad LoRa, WiMAX a 5G NR s možnosťou simulácie moderných koexistenčných mechanizmov a diverzitným príjmom.

Literatúra

- [1] HANUS, Stanislav. *Rádiové a mobilní komunikace* [Elektronické skriptá]. Vysoké učení technické v Brně, 2012. [cit. 20.5.2022] Dostupné z URL: <https://moodle.vut.cz/pluginfile.php/368626/mod_resource/content/1/text%20000%20-%20129%20BRMK%202012.pdf>
- [2] SAUTER, Martin. *From GSM to LTE-advanced pro and 5G: an introduction to mobile networks and mobile broadband*. Third edition. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2017. ISBN 978-1119346869.
- [3] Bluetooth SIG. *Bluetooth Core Specification v5.0* [online]. 2016, s. 166-173, 326-335, 359-362. [cit. 20.5.2022] Dostupné z URL: <<https://www.mouser.it/pdfdocs/bluetooth-Core-v50.pdf>>
- [4] Tektronix. *Wi-Fi: Overview of the 802.11 Physical Layer and Transmitter Measurements* [online]. 2013, aktualizované November 2016 [cit. 24.5.2022]. Dostupné z URL: <<https://www.tek.com/en/document/primer/wi-fi-overview-80211-physical-layer-and-transmitter-measurements>>
- [5] IEEE Standard for Information Technology–Telecommunications and Information Exchange between Systems Local and Metropolitan Area Networks–Specific Requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 1: Enhancements for High-Efficiency WLAN. "*IEEE Std 802.11ax-2021 (Amendment to IEEE Std 802.11-2020)*". 2021, vol. 1. s. 47-48, 465-470, eISBN 978-1-5044-7389-7.
- [6] FISCHER, Walter. *Digital video and audio broadcasting technology: a practical engineering guide*. 3rd ed., New York: Springer, 2010. ISBN 3-6421-1611-6.
- [7] MIKÉSKA, Zdeněk *Specifikace rádiové části systému Bluetooth*. [online] Časopis elektorevue, 2004. [cit. 24.5.2022] Dostupné z URL: <<http://www.elektorevue.cz/clanky/04003/index.htm>>
- [8] STUBER, Gordon L. *Principles of mobile communication*. Fourth Edition. Cham: Springer, 2017. ISBN 978-3-319-55614-7.
- [9] GISLASON, Drew. *Zigbee wireless networking*. Amsterdam: Elsevier / Newnes, 2008. ISBN 978-0-7506-8597-9.

- [10] DAS K. S. D.; MALI P.; PATTANAİK N. V. "Testing and validation challenges for enabling LTE/5G and Wi-Fi networks Coexistence," *2021 2nd Global Conference for Advancement in Technology (GCAT)*, 2021, s. 1-4, doi: 10.1109/GCAT52182.2021.9587823.
- [11] SAHA, K. R. "Coexistence of Cellular and IEEE 802.11 Technologies in Unlicensed Spectrum Bands -A Survey," *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2021, vol. 2, s. 1996-2028, doi: 10.1109/OJCOMS.2021.3106502.
- [12] ALEXNADRE C. L.; CERQUEIRA A. S. "Contribution for the Coexistence Analysis between 5G and 4G in the sub-1GHz Band," *2019 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*, 2019, s. 1-3, doi: 10.1109/IMOC43827.2019.9317551.
- [13] ROSALINA A.; MUNADI R.; FAHMI A. "Coexistence LTE with GSM and UMTS - performance analysis using seamcat simulation," *2015 IEEE International Conference on Communication, Networks and Satellite (COMNESTAT)*, 2015, s. 68-73, doi: 10.1109/COMNETSAT.2015.7434287.
- [14] POLAK L. "On The Coexistence Of LTE And Wi-Fi In The 2.4 Ghz ISM Band," *2019 42nd International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)*, 2019, s. 24-27, doi: 10.1109/TSP.2019.8769070.
- [15] POLAK L.; MILOŠ J.; KRESTA D.; KRATOCHVÍL T.; MARŠÁLEK R. "LTE and DVB-T2 networks in the first digital dividend band in Europe: A coexistence study," *2018 28th International Conference Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA)*, 2018, s. 1-4, doi: 10.1109/RADIOELEK.2018.8376386.
- [16] MILOŠ J.; POLAK L.; KRATOCHVÍL T.; SLANINA M. "Measurement setup for evaluation the coexistence between LTE downlink and WLAN networks," *2016 10th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP)*, 2016, s. 1-4, doi: 10.1109/CSNDSP.2016.7573936.
- [17] Vienna University of Technology, Austria. *LTE Downlink Level Simulator*. [online] [cit. 25.5.2022] Dostupné z URL: <https://www.nt.tuwien.ac.at/research/mobile-communications/vccs/vienna-lte-a-simulators/lte-advanced-link-level-simulator/>
- [18] AGUADO E. L.; WONG K. K.; O'FARRELL T. "Coexistence issues for 2.4 GHz OFDM WLANs," *Third International Conference on 3G Mobile Communication Technologies*, 2002, s. 400-404, doi: 10.1049/cp:20020427.

- [19] MILOŠ J.; POLAK L.; ROZUM S. "Analysis of Indoor LTE-DL/Wi-Fi Coexistence Scenarios with Automated Measurement Testbed," *2019 29th International Conference Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA)*, 2019, s. 1-5, doi: 10.1109/RADIOELEK.2019.8733549.
- [20] MATHEW A.; CHANDRABABU N.; ELLEITHY K.; RIZVI S. "IEEE 802.11 & Bluetooth Interference: Simulation and Coexistence," *2009 Seventh Annual Communication Networks and Services Research Conference*, 2009, pp. 217-223, doi: 10.1109/CNSR.2009.41.
- [21] KUDER Z.; MILOŠ J.; HANUS S. "Radio coexistence of major and upcoming wireless standards in the ISM bands," *2016 26th International Conference Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA)*, 2016, s. 363-366, doi: 10.1109/RADIOELEK.2016.7477426.
- [22] POLÁK Ladislav. *Simulace mnohacestného vícestavových modulací*. [online] Časopis electrorevue, 2009. [cit. 29.5.2022] Dostupné z URL: <http://www.elektrorevue.cz/cz/clanky/komunikacni-technologie/0/simulace-mnohacestneho-sireni-vicestavovych-modulaci/>
- [23] PLAISNER, D. *LTE-Advanced/WLAN testbed*. Brno: Vysoké učení technické v Brne, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 72 s. Vedúci diplomovej práce Ing. Jiří Miloš, Ph.D..