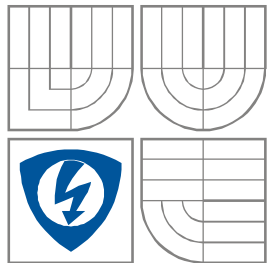


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

Koexistence stávajících a nových generací zemské digitální televize a mobilních bezdrátových komunikačních služeb

Co-existence of the still used and upcoming digital terrestrial television and mobile communication services

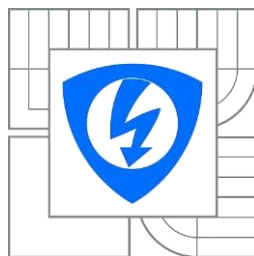
BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Denis Plaisner

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Ladislav Polák, Ph.D.



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Studen: Denis Plaisner

ID:154835

Ročník: 3

Akademický rok: 2014/2015

NÁZEV TÉMATU:

Koexistence stávajících a nových generací zemské digitální televize a mobilních bezdrátových komunikačních služeb

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

BB2E: V teoretické části práce detailně prostudujte vlastnosti standardů DVB-T/T2/T2-Lite pro zemské digitální vysílání a LTE pro mobilní bezdrátové komunikační služby. Definujte společná frekvenční pásma, ve kterých tyto standardy mohou koexistovat. Navrhněte měřicí pracoviště a vhodnou metodiku na měření koexistence mezi uvažovanými standardy.

BBCE: V experimentální části práce proveďte měření, analýzu a podrobný rozbor kritických koexistenčních scénářů mezi službami digitální televize a mobilních bezdrátových služeb podle uvedených standardů a vyhodnoťte vzájemný vliv na kvalitu obou služeb. Navrhněte laboratorní úlohu pro měření koexistence mezi zemské digitální televize a mobilních bezdrátových komunikačních služeb. Připravte vzorové vypracování navržené úlohy.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] EN 302 755 V1.2.1 (2012-04). Digital Video Broadcasting (DVB); Frame structure channel coding and modulation for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2), European Standard ETSI, 2012.

[2] EN 302 755 V1.2.1 (2012-04). Digital Video Broadcasting (DVB); Frame structure channel coding and modulation for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2), European Standard ETSI, 2012.

Termín zadání: 9.2.2015

Termín odevzdání: 28.5.2015

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

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření semestrální 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

Táto práca sa zaoberá skúmaním, meraním a vyhodnotením možných koexistenčných scenárov, ktoré sa môžu vyskytnúť medzi terestriálnou digitálnou televíziou (DVB-T/T2) a mobilnými bezdrôtovými službami, poskytovaný štandardom LTE. Štandardy DVB-T/T2 a LTE sú stručne popísané a sú definované rádiových pásmach, kde sa ich služby vysielajú. Na základe jednotlivých frekvenčných pásiem sú definované možné koexistenčné scenáre. Pre meranie, monitorovanie a vyhodnotenie definovaných koexistenčných scenárov je navrhnuté a realizované vhodné laboratórne pracovisko. Výsledky z merania ukazujú rôzne ovplyvňovanie kvality a chybovosti DVB-T/T2 signálu v závislosti uvažovaného koexistenčného scenára.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

DVB-T/T2, LTE, koexistencia bezdrôtových systémov, RF meranie, BER, QEF, EVM

ABSTRACT

This work deals with exploring, measuring and evaluation of possible coexistence scenarios between terrestrial digital TV (DVB-T/HT2) and mobile wireless services (GSM, LTE), which can occur in a shared RF frequency bands The DVB-T, DVB-T2 and LTE standards are briefly described. RF band, where these systems are operated, are outlined too. . There are defined different coexistence scenarios. For the measuring, monitoring and evaluation of these scenarios, an appropriate laboratory workplace is proposed and realized. Results from the measurements show various influence of interfering mobile services on the interacted DVB-T/H system, depending on the considered coexistence scenario.

KEYWORDS

DVB-T/T2, LTE, coexistence of wireless systems, RF measurement, BER, QEF, EVM

Plaisner, J. *Koexistence stávajících a nových generací zemské digitální televize a mobilních bezdrátových komunikačních služeb*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2015. 76 s., 24 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Ladislav Polák, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svůj semestrální projekt na téma Koexistence stávajících a nových generací zemské digitální televize a mobilních bezdrátových komunikačních služeb jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrálního projektu a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedeného semestrálního projektu dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením tohoto semestrálního projektu jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

POĎAKOVANIE

Ďakujem vedúcemu semestrálneho projektu Ing. Ladislavovi Polákovi Ph.D. za metodickú, pedagogickú a odbornú pomoc pri písaní mojej bakalárskej práce.

OBSAH

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Digitálne TV vysielanie DVB | 2 |
| 1.1 | Štandard DVB-T | 2 |
| 1.2 | Štandard DVB-T2 | 4 |
| 2 | Mobilné bezdrôtové vysielanie | 6 |
| 2.1 | Systém LTE | 6 |
| 3 | Typy prenosových kanálov | 9 |
| 3.1 | Gaussov kanál | 9 |
| 3.2 | Riceov kanál | 9 |
| 3.3 | Rayleighov kanál | 10 |
| 4 | Koexistencia štandardov DVB-T, DVB-T2 a LTE | 11 |
| 4.1 | Základný popis..... | 11 |
| 4.2 | Základné typy koexistencie | 12 |
| 5 | Meranie koexistencie medzi televíznymi a mobilnými službami | 13 |
| 5.1 | Princíp merania | 13 |
| 5.2 | Použité meracie prístroje | 13 |
| 5.3 | Objektívne parametre signálov DVB-T/T2 a LTE systémov | 14 |
| 6 | Meranie koexistencie DVB-T a LTE systémov v spoločnom RF pásme | 16 |
| 6.1 | Koexistenčný scenár a popis merania..... | 16 |
| 6.2 | Systémové nastavenie štandardov DVB-T/T2 a LTE..... | 17 |
| 7 | Koexistencia medzi DVB-T/T2 a LTE (celkové prekrytie RF signálov) | 19 |
| 7.1 | Popis meraného koexistenčného scenára | 19 |
| 7.2 | Meranie parametru MER | 19 |
| 7.3 | Meranie parametru BER | 29 |
| 8 | Koexistencia medzi DVB-T/T2 a LTE (čiastočné prekrytie RF signálov) | 41 |
| 8.1 | Popis meraného scenára..... | 41 |
| 8.2 | Meranie Parametru MER | 41 |
| 8.3 | Meranie Parametru BER..... | 47 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 9 | Scenár pre meranie EVM parametra LTE signálu | 58 |
| 9.1 | Popis meracieho scenára | 58 |
| 9.2 | Prípád celkového prekrytia RF spektier..... | 59 |
| 9.3 | Prípád čiastočného prekrytia RF spektier | 60 |
| 10 | Scenár merania koexistencie DVB-T a LTE systémov v reálnom prostredí | 63 |
| 10.1 | Koexistenčný scenár a popis merania | 63 |
| 10.2 | Systémové parametre signálov DVB-T a LTE | 64 |
| 11 | Vyhodnotenie reálneho merania | 65 |
| 11.1 | Meranie kvality TV signálu na SET-TOP-BOXE | 66 |
| 11.2 | Meranie bitovej chybovosti BER..... | 69 |
| 11.3 | Meranie modulačnej chybovosti MER | 71 |

ZOZNAM OBRÁZKOV

| | |
|--|----|
| Obr. 1 Bloková schéma spracovania TV signálu v štandarde DVB-T. | 2 |
| Obr. 2 Bloková schéma spracovania TV signálu pomocou štandardu DVB-T2 (prevzaté z [9]). | 4 |
| Obr. 3 Štruktúra siete LTE (prevzaté z [4]). | 6 |
| Obr. 4 Obecná bloková schéma komunikácie pre downlink. | 7 |
| Obr. 5 Obecná bloková schéma komunikácie pre uplink. | 8 |
| Obr. 6 Šírenie signálu v Gaussovom kanály. | 9 |
| Obr. 7 Šírenie signálu v Riceovom kanály. | 10 |
| Obr. 8 Šírenie signálu v Rayleighovom kanály. | 10 |
| Obr. 9 Znázornenie stručného princípu koexistencie medzi DVB-T/T2 a LTE službami. | 11 |
| Obr. 10 Frekvenčné prekrytie štandardov DVB-T/T2 a LTE (prevzaté z [14]). | 12 |
| Obr. 11 Scenár a) celkového b) čiastočného prekrytia RF spektra dvoch služieb. | 12 |
| Obr. 12 Bloková schéma monitorovania koexistencie medzi štandardmi DVB-T/T2 a LTE. | 13 |
| Obr. 13 Rozloženie meracieho pracoviska. | 16 |
| Obr. 14 Prekrytie RF spektier DVB-T/T2 a LTE signálov so šírkou pásma 10 MHz pri a) statickom prijme signálu (RC20), b) mobilnom prijme signálu (VU30). | 19 |
| Obr. 15 Referenčné hodnoty pre a) statický príjem DVB-T, b) mobilný príjem DVB-T, c) statický príjem DVB-T2, d) mobilný príjem DVB-T2 signálu. | 20 |
| Obr. 16 Závislosť parametru MER na parametri C/N pri statickom prijme DVB-T signálu s Gaussovským kanálom (AWGN), LTE so šírkou pásma 1,4 MHz. | 21 |
| Obr. 17 Závislosť parametru MER na parametri C/N pri statickom prijme DVB-T signálu s rôznymi únikovými kanálmi, LTE so šírkou pásma 1,4 MHz. | 21 |
| Obr. 18 Závislosť parametru MER na parametri C/N pri mobilnom prijme DVB-T signálu s únikovým kanálom VU30, LTE so šírkou pásma 1,4 MHz. ... | 22 |
| Obr. 19 Závislosť parametru MER na parametri C/N pri mobilnom prijme DVB-T signálu s rôznymi únikovými kanálmi, LTE so šírkou pásma 1,4 MHz. | 22 |
| Obr. 20 Závislosť parametru MER na parametri C/N pri statickom prijme DVB-T2 signálu s AWGN šumom, LTE so šírkou pásma 1,4 MHz. | 23 |
| Obr. 21 Závislosť parametru MER na parametri C/N pri statickom prijme DVB-T2 signálu s rôznymi únikovými kanálmi, LTE so šírkou pásma 1,4 MHz. | 23 |

| | | |
|---------|--|----|
| Obr. 22 | Konstelačný diagram a) signál DVB-T rušený LTE= -70 dBm, b) signál DVB-T2 rušený LTE= -50 dBm, c) signál DVB-T2 rušený LTE= -50 dBm a C/N= 20 dB | 23 |
| Obr. 23 | Závislosť parametru MER na parametri C/N pri mobilnom príjme DVB-T2 signálu s AWGN kanálom, LTE so šírkou pásma 1,4 MHz. | 24 |
| Obr. 24 | Závislosť parametru MER na parametri C/N pri mobilnom príjme DVB-T2 signálu s rôznymi únikovými kanálmi, LTE so šírkou pásma 1,4 MHz. 24 | |
| Obr. 25 | Porovnanie a) statického, b) mobilného príjmu signálu DVB-T2 pri LTE = -60 dBm..... | 25 |
| Obr. 26 | Závislosť parametru MER na parametri C/N pri statickom príjme DVB-T signálu s AWGN kanálom, LTE so šírkou pásma 10 MHz. | 26 |
| Obr. 27 | Závislosť parametru MER na parametri C/N pri statickom príjme DVB-T signálu s rôznymi únikovými kanálmi, LTE so šírkou pásma 10 MHz. 26 | |
| Obr. 28 | Závislosť parametru MER na parametri C/N pri mobilnom príjme DVB-T signálu s AWGN kanálom, LTE so šírkou pásma 10 MHz. | 26 |
| Obr. 29 | Závislosť parametru MER na parametri C/N pri mobilnom príjme DVB-T signálu s rôznymi únikovými kanálmi, LTE so šírkou pásma 10 MHz. 27 | |
| Obr. 30 | Závislosť parametru MER na parametri C/N pri statickom príjme DVB-T2 signálu s AWGN kanálom, LTE so šírkou pásma 10 MHz. | 27 |
| Obr. 31 | Závislosť parametru MER na parametri C/N pri statickom príjme DVB-T2 signálu s rôznymi únikovými kanálmi, LTE so šírkou pásma 10 MHz. 28 | |
| Obr. 32 | Závislosť parametru MER na parametri C/N pri mobilnom príjme DVB-T2 signálu s rôznymi únikovými kanálmi, LTE so šírkou pásma 10 MHz. 28 | |
| Obr. 33 | Referenčné hodnoty pre a) statický príjem DVB-T, b) mobilný príjem DVB-T, c) statický príjem DVB-T2, d) mobilný príjem DVB-T2 signálu. | 30 |
| Obr. 34 | Závislosť parametru BER na parametri C/N pri statickom príjme signálu DVB-T s AWGN kanálom, LTE so šírkou pásma 1,4 MHz. | 30 |
| Obr. 35 | Závislosť parametru BER na parametri C/N a) LTE = -70 dBm, b) LTE = -50 dBm pri statickom príjme DVB-T a rôznych únikových kanáloch. | 31 |
| Obr. 36 | Závislosť parametru BER na parametri C/N pri mobilnom príjme signálu DVB-T s AWGN kanálom, LTE so šírkou pásma 1,4 MHz. | 32 |
| Obr. 37 | Závislosť parametru BER na parametri C/N pri mobilnom príjme signálu DVB-T s únikovým kanálom MR100, LTE so šírkou pásma 1,4 MHz. | 32 |
| Obr. 38 | Závislosť parametru MER na parametri C/N pri rôznych únikových kanáloch pre mobilný príjem signálu DVB-T, LTE so šírkou pásma 1,4 MHz. ... | 32 |
| Obr. 39 | Závislosť parametru BER na parametri C/N pri statickom príjme signálu DVB-T2 s AWGN kanálom, LTE so šírkou pásma 1,4 MHz. | 33 |
| Obr. 40 | Závislosť parametru BER na parametri C/N pri statickom príjme signálu DVB-T2 s únikovým kanálom RL20, LTE so šírkou pásma 1,4 MHz. | 33 |
| Obr. 41 | Závislosť parametru BER na parametri C/N pri mobilnom príjme signálu DVB- | |

| | |
|---|----|
| T2 s únikovým kanálom VU30, LTE so šírkou pásma 1,4 MHz. | 34 |
| Obr. 42 Závislosť parametru BER na parametri C/N pri statickom prijíme signálu DVB-T s AWGN kanálom, LTE so šírkou pásma 10 MHz. | 34 |
| Obr. 43 Závislosť parametru BER na parametri C/N pri statickom prijíme signálu DVB-T s únikovým kanálom RL20, LTE so šírkou pásma 10 MHz. | 35 |
| Obr. 44 Závislosť parametru MER na parametri C/N pri rôznych únikových kanáloch pre statický príjem signálu DVB-T, LTE so šírkou pásma 10 MHz. | 35 |
| Obr. 45 Závislosť parametru BER na parametri C/N pri mobilnom prijíme signálu DVB-T s AWGN kanálom, LTE so šírkou pásma 10 MHz. | 36 |
| Obr. 46 Závislosť parametru BER na parametri C/N pri statickom prijíme signálu DVB-T2 s AWGN kanálom, LTE so šírkou pásma 10 MHz. | 36 |
| Obr. 47 Závislosť parametru BER na parametri C/N pri statickom prijíme signálu DVB-T2 s únikovým kanálom RL20, LTE so šírkou pásma 10 MHz. | 37 |
| Obr. 48 Závislosť parametru MER na parametri C/N pri rôznych únikových kanáloch pre mobilný príjem signálu DVB-T2, LTE so šírkou pásma 10 MHz. .. | 37 |
| Obr. 49 Závislosť počtu iterácií na parametri C/N pre statický príjem signálu DVB-T2, LTE so šírkou pásma 1,4 MHz (celkové prekrytie)..... | 40 |
| Obr. 50 Závislosť počtu iterácií na parametri C/N pre mobilný príjem signálu DVB-T2, LTE so šírkou pásma 10 MHz (celkové prekrytie)..... | 40 |
| Obr. 51 Prekrytie spektier jednotlivých signálov pri a) statickom, b) mobilnom prijíme signálu DVB-T/T2 | 41 |
| Obr. 52 Závislosť parametru MER na parametre C/N pri rôznom prekrytí spektier signálov DVB-T so statickým príjmom a AWGN kanálom, LTE = -70 dBm..... | 42 |
| Obr. 53 Závislosť parametru MER na parametre C/N pri rôznom prekrytí spektier signálov DVB-T so statickým príjmom a AWGN kanálom, LTE = -50 dBm..... | 42 |
| Obr. 54 Závislosť parametru MER na parametre C/N pri rôznom prekrytí spektier signálov DVB-T s mobilným príjmom a únikovým kanálom VU30, LTE = -70 dBm. | 42 |
| Obr. 55 Závislosť hodnoty MER na veľkosti prekrytia spektier signálov DVB-T2 so statickým príjmom, AWGN kanálom a C/N = 40 dB, LTE so šírkou pásma 1,4 MHz. | 43 |
| Obr. 56 Závislosť hodnoty MER na veľkosti prekrytia spektier signálov DVB-T2 s mobilným príjmom, AWGN kanálom a C/N = 20 dB, LTE so šírkou pásma 1,4 MHz. | 43 |
| Obr. 57 Závislosť hodnoty MER na veľkosti prekrytia spektier signálov DVB-T2 so statickým príjmom, únikovým kanálom RC20 a C/N = 40 dB, LTE so šírkou pásma 1,4 MHz. | 44 |
| Obr. 58 Závislosť parametru MER na parametri C/N pri rôznom prekrytí spektier signálov DVB-T s mobilným príjmom a AWGN kanálom, LTE = -70 | |

| | |
|--|----|
| dBm..... | 45 |
| Obr. 59 Závislosť parametru MER na parametri C/N pri rôznom prekrytí spektier signálov DVB-T s mobilným príjmom a AWGN kanálom, LTE = -60 dBm..... | 45 |
| Obr. 60 Závislosť parametru MER na parametri C/N pri rôznom prekrytí spektier signálov DVB-T s mobilným príjmom a únikovým kanálom VU30, LTE = -50 dBm. | 46 |
| Obr. 61 Závislosť hodnoty MER na veľkosti prekrytia spektier signálov DVB-T so statickým príjmom, AWGN kanálom a C/N = 40 dB, LTE so šírkou pásma 10 MHz. | 46 |
| Obr. 62 Závislosť hodnoty MER na veľkosti prekrytia spektier signálov DVB-T so statickým príjmom, AWGN kanálom a C/N = 20 dB, LTE so šírkou pásma 10 MHz. | 47 |
| Obr. 63 Závislosť parametru BER na parametri C/N pri signáloch DVB-T so statickým príjmom a AWGN kanálom, LTE = -70 dBm so šírkou pásma 1,4 MHz. | 48 |
| Obr. 64 Závislosť parametru BER na parametri C/N pri signáloch DVB-T2 so statickým príjmom a AWGN kanálom, LTE = -70 dBm so šírkou pásma 1,4 MHz. | 48 |
| Obr. 65 Závislosť parametru BER na parametri C/N pri signáloch DVB-T s mobilným príjmom a AWGN kanálom, LTE = -70 dBm so šírkou pásma 1,4 MHz. | 49 |
| Obr. 66 Závislosť parametru BER na parametri C/N pri signáloch DVB-T2 s mobilným príjmom a AWGN kanálom, LTE = -70 dBm so šírkou pásma 1,4 MHz. | 49 |
| Obr. 67 Závislosť parametru BER na parametri C/N pri signáloch DVB-T so statickým príjmom a únikovým kanálom RL20, LTE = -70 dBm so šírkou pásma 10 MHz. | 50 |
| Obr. 68 Závislosť parametru BER na parametri C/N pri signáloch DVB-T2 so statickým príjmom a únikovým kanálom RL20, LTE = -70 dBm so šírkou pásma 10 MHz. | 50 |
| Obr. 69 Závislosť parametru BER na parametri C/N pri signáloch DVB-T s mobilným príjmom a AWGN kanálom, LTE = -50 dBm so šírkou pásma 10 MHz. | 51 |
| Obr. 70 Závislosť parametru BER na parametri C/N pri signáloch DVB-T s mobilným príjmom a únikovým kanálom MR100, LTE = -60 dBm so šírkou pásma 10 MHz. | 51 |
| Obr. 71 Závislosť hodnoty BER na veľkosti prekrytia spektier signálov DVB-T2 s mobilným príjmom a LTE pri C/N = 40 dB. | 51 |
| Obr. 72 Závislosť hodnoty BER na veľkosti prekrytia spektier signálov DVB-T2 s mobilným príjmom a LTE pri C/N = 20 dB. | 52 |
| Obr. 73 Závislosť počtu iterácií na parametri C/N pre statický príjem signálu DVB-T2, | |

| | |
|--|----|
| LTE so šírkou pásma 10 MHz. | 56 |
| Obr. 74 Závislosť počtu iterácií na parametri C/N pre mobilný príjem signálu DVB-T2, LTE so šírkou pásma 10 MHz. | 57 |
| Obr. 75 Konstelačné diagramy bez rušenia pri modulácii a) QPSK, b) 16QAM, c) 64QAM. | 58 |
| Obr. 76 Konstelačné diagramy bez rušenia pri modulácii a) QPSK, b) 16QAM, c) 64QAM. | 58 |
| Obr. 77 Závislosť parametru EVM na parametri C/N pri LTE = 1,4 MHz pre moduláciu QPSK (celkové prekrytie)..... | 59 |
| Obr. 78 Závislosť parametru EVM na parametri C/N pri LTE = 10 MHz pre moduláciu QPSK (celkové prekrytie)..... | 59 |
| Obr. 79 Závislosť parametru EVM na parametri C/N pri LTE = 10 MHz pre moduláciu 64QAM (celkové prekrytie)..... | 60 |
| Obr. 80 Závislosť parametru EVM na parametri C/N pri LTE = 10 MHz a DVB-T = -65 dBm pre moduláciu 64QAM (čiastočné prekrytie). | 60 |
| Obr. 81 Závislosť parametru EVM na parametri C/N pri LTE = 10 MHz a DVB-T = -70 dBm pre moduláciu 64QAM (čiastočné prekrytie). | 61 |
| Obr. 82 Závislosť parametru EVM na parametri C/N pri LTE = 1,4 MHz a DVB-T = -65 dBm pre moduláciu 64QAM (čiastočné prekrytie). | 61 |
| Obr. 83 Závislosť parametru EVM na parametri C/N pri LTE = 10 MHz a DVB-T = -60 dBm pre moduláciu 16QAM (čiastočné prekrytie). | 62 |
| Obr. 84 Závislosť parametru EVM na parametri C/N pri LTE = 1,4 MHz a DVB-T = -60 dBm pre moduláciu 16QAM (čiastočné prekrytie). | 62 |
| Obr. 85 Spektrá LTE a DVB-T signálov. | 63 |
| Obr. 86 Zapojené meracie pracovisko. | 65 |
| Obr. 87 Konštelačný diagram a) DVB-T signálu s hodnotou MER=37,2 dB b) DVB-T signálu rušeného LTE 3MHz signálom s hodnotou MER=13,5 dB. | 66 |
| Obr. 88 RF spektrum pri okrajovom dotyku DVB-T a LTE signálu..... | 66 |
| Obr. 89 Graf závislosti kvality signálu na úrovni LTE signálu pri okrajovom dotyku. . | 67 |
| Obr. 90 RF Spektrum pri celkovom prekrytí DVB-T a LTE signálu. | 67 |
| Obr. 91 Graf závislosti kvality signálu na úrovni LTE signálu pri celkovom prekrytí. . | 68 |
| Obr. 92 RF Spektrum pri čiastočnom prekrytí DVB-T a LTE signálu..... | 68 |
| Obr. 93 Graf závislosti kvality signálu na úrovni LTE signálu pri čiastočnom prekrytí. | 69 |
| Obr. 94 Graf závislosti bitovej chybovosti BER na SDR parametre pri okrajovom dotyku. | 70 |
| Obr. 95 Graf závislosti bitovej chybovosti BER na SDR parametre pri celkovom prekrytí..... | 70 |

| | |
|--|----|
| Obr. 96 Graf závislosti bitovej chybovosti BER na SDR parametre pri čiastočnom prekrytí..... | 71 |
| Obr. 97 Graf závislosti modulačnej chyby MER na SDR parametre pri okrajovom dotyku. | 72 |
| Obr. 98 Graf závislosti modulačnej chyby MER na SDR parametre pri celkovom prekrytí..... | 72 |
| Obr. 99 Graf závislosti modulačnej chyby MER na SDR parametre pri čiastočnom prekrytí..... | 73 |

ZOZNAM TABULIEK

| | |
|---|----|
| Tabuľka 1 Porovnanie systémových parametrov štandardov DVB-T..... | 5 |
| Tabuľka 2 Rozdelenie kmitočtového pásma pre systém LTE (prevzaté z [12]). | 8 |
| Tabuľka 3 Systémové parametre štandardov DVB-T/T2 pre statický príjem..... | 17 |
| Tabuľka 4 Systémové parametre štandardov DVB-T/T2 pre mobilný príjem..... | 18 |
| Tabuľka 5 Systémové parametre štandardu LTE. | 18 |
| Tabuľka 6 Tabuľka QEF príjmu pre signál DVB-T rušený signálom LTE so šírkou pásma 1,4 MHz..... | 38 |
| Tabuľka 7 Tabuľka QEF príjmu pre signál DVB-T2 rušený signálom LTE so šírkou pásma 1,4 MHz..... | 38 |
| Tabuľka 8 Tabuľka QEF príjmu pre signál DVB-T rušený signálom LTE so šírkou pásma 10 MHz..... | 39 |
| Tabuľka 9 Tabuľka QEF príjmu pre signál DVB-T2 rušený signálom LTE so šírkou pásma 10 MHz..... | 39 |
| Tabuľka 10 Tabuľka QEF príjmu čiastočného prekrytia pre signál DVB-T (statický príjem) rušený signálom LTE so šírkou pásma 1,4 MHz. | 52 |
| Tabuľka 11 Tabuľka QEF príjmu čiastočného prekrytia pre signál DVB-T (mobilný príjem) rušený signálom LTE so šírkou pásma 1,4 MHz..... | 53 |
| Tabuľka 12 Tabuľka QEF príjmu čiastočného prekrytia pre signál DVB-T2 (statický príjem) rušený signálom LTE so šírkou pásma 1,4 MHz. | 53 |
| Tabuľka 13 Tabuľka QEF príjmu čiastočného prekrytia pre signál DVB-T2 (mobilný príjem) rušený signálom LTE so šírkou pásma 1,4 MHz. | 54 |
| Tabuľka 14 Tabuľka QEF príjmu čiastočného prekrytia pre signál DVB-T (statický príjem) rušený signálom LTE so šírkou pásma 10 MHz. | 54 |
| Tabuľka 15 Tabuľka QEF príjmu čiastočného prekrytia pre signál DVB-T (mobilný príjem) rušený signálom LTE so šírkou pásma 10 MHz. | 55 |
| Tabuľka 16 Tabuľka QEF príjmu čiastočného prekrytia pre signál DVB-T2 (statický príjem) rušený signálom LTE so šírkou pásma 10 MHz. | 55 |
| Tabuľka 17 Tabuľka QEF príjmu čiastočného prekrytia pre signál DVB-T2 (mobilný príjem) rušený signálom LTE so šírkou pásma 10 MHz. | 56 |
| Tabuľka 18 Parametre multiplexu DVB-T sít' 3..... | 64 |
| Tabuľka 19 Parametre systému LTE. | 64 |
| Tabuľka 20 Maximálne hodnoty SDR [dB] parametru pri splnenom QEF príjme DVB-T signálu pre rôzne scenáre..... | 71 |

ÚVOD

Analógové TV vysielanie bolo definitívne nahradené digitálnym TV vysielaním a to z dôvodu jeho neefektívnosti z hľadiska moderných užívateľských nárokov . Nový systém, ktorý vznikol na začiatku 90. rokov minulého storočia a nazýva sa DVB (Digital Video Broadcasting), nahrádza analógové TV vysielanie. Sú známe tri štandardy DVB a to DVB-T (terestriálne), DVB-S (satelitné) a DVB-C (káblové) [1]. Postupom času sa začali tieto štandardy zdokonaľovať a vznikli ich druhé generácie DVB-T2/S2/C2 [1]. Tieto štandardy sa líšia výkonom vysielania , systémovou konfiguráciou a moduláciou. V tejto práci budú uvažované len štandardy terestriálneho vysielania digitálnej televízie, čiže DVB-T a DVB-T2.

Systém LTE (Long-Term Evolution) je jedným z najnovších štandardov v oblasti mobilných komunikácií. Systém už nie je komutovaný, používa iba paketový prenos. Je založený na protokole IP respektíve MIP (Mobile IP). Výhodou je malá odozva na rádiové rozhranie, spektrálna účinnosť a vyššia prenosová rýchlosť signálu [2]

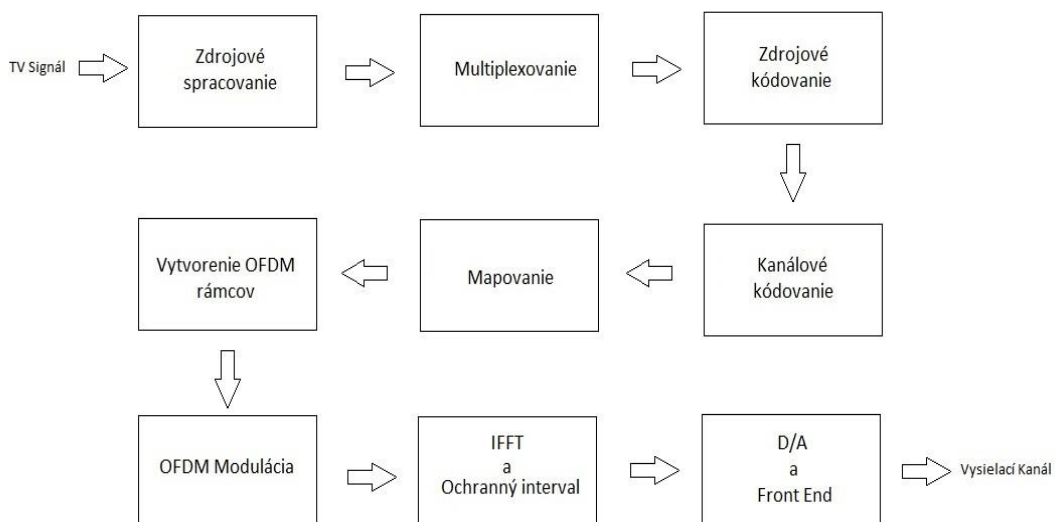
V dôsledku rozvoja bezdrôtového vysielania mobilných zariadení a televíznym prenosom je obsadených veľa frekvenčných pásiem. Preto aj napriek dobre naplánovaným vysielacím scenárom sa môžu vyskytnúť situácie, keď služby DVB-T/T2 a LTE budú na spoločnom frekvenčnom pásme alebo aspoň na časti tohto pásma koexistovať [1]. Môžu vzniknúť prípady, pri ktorých vzájomný vplyv systémov bude zanedbateľný, alebo naopak, môže dochádzať k stratám signálu a výskytu chýb v obraze. Cieľom tejto bakalárskej práce je definovanie jednotlivých koexistenčných scenárov medzi štandardmi DVB-T/T2 a LTE a ich meranie vhodnými meracími prístrojmi.

1 DIGITÁLNE TV VYSIELANIE DVB

V dnešnej dobe pri rýchlom rozvoji televíznych technológií aj mobilných sietí sa kladú vysoké nároky na frekvenčné spektrum. Prechod z analógového vysielania na digitálne bol podmienený lepším využitím frekvenčného spektra a možnosti prenášať viac programov v jednom TV kanále. Na digitalizáciu TV signálu bol hlavne v Európe použitý štandard DVB, ktorý sa podľa druhu prenosového kanálu delí na pozemný, satelitný a káblový štandard. Všetky štandardy majú rovnaké zdrojové kódovanie pre ktoré používajú štandard MPEG-2 (Motion Picture Experts Group) alebo MPEG-4. Ako posledný a technicky najkomplexnejší bol navrhnutý pozemný štandard TV vysielania DVB-T, ktorý sa ďalej zdokonaľoval a dnes už poznáme aj jeho vylepšenú verziu DVB-T2 [3].

1.1 Štandard DVB-T

Tento štandard je charakteristický veľkým vysielacím výkonom a úzkym prenosovým kanálom. Pri vysielaní často nastávajú odrazy signálu, preto sa počíta s najväčším rušením s pomedzi všetkých DVB štandardov. Z týchto dôvodov sa využíva modulácia ortogonálneho deleného kmitočtového multiplexu OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) [4]. Blokový diagram vysielateľa TV signálu v štandarde DVB-T je možné vidieť na Obr. 1.



Obr. 1 Bloková schéma spracovania TV signálu v štandarde DVB-T.

Analógový TV signál sa skladá z jasového a dvoch barvonosných signálov (červený a modrý). Pre počiatkové vzorkovanie je doporučená norma ITU-R. 601 [5], ktorá používa formát vzorkovania signálu 4:2:2. Jasový signál má vzorkovací kmitočt 13,5 MHz a barvonosné signály polovičný 6,75 MHz. Jednotlivé vzorky TV signálu sa kvantujú na 256 úrovni. Pre štandardnú televíznu normu so 625 riadkami a 25 snímkami za sekundu je bitová rýchlosť 216 Mb/s [6].

Cieľom zdrojového kódovania je výrazne znížiť prenosovú rýchlosť digitálneho signálu z 216 Mb/s až na 4 až 9 Mb/s. Dosiahneme to redukciami jeho redundancie a irelevancie. Redundancia predstavuje nadbytočné dáta, ktoré nie sú nutné na prenos danej informácie a je ich možné eliminovať. Irelevancia naopak znamená nepodstatnú zložku informácie, ktorú príjemca nevníma a preto je ju možné potlačiť. Redukciu zaručuje používaný štandard MPEG-2, ktorý je určený na komprimáciu signálu. Používa diskretnú kosínusovú transformáciu DCT (Discrete Cosine Transform), ktorá prevedie bloky signálu do kmitočtovej oblasti [7].

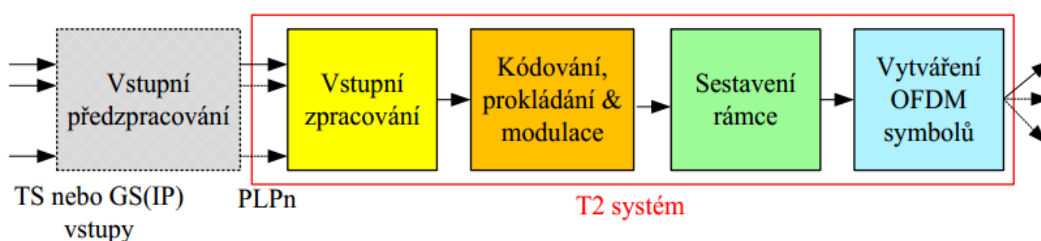
Komprimovaný signál je privedený do blokov, v ktorých sú oba dátové toky aj prídavné dáta rozdelené do paketov PES (Packetized Elementary Stream) [7]. Toto je vhodné najmä pre dobrú synchronizáciu obrazu a zvuku. Keď sú tieto pakety multiplexované, dostávame programový a transportný tok. Pre prenos DVB-T je určený transportný tok. Dostávame teda transportný tok jedného programu. Jednotlivé programy sú potom multiplexované do jedného kanálu. V jednom kanále sa môže nachádzať viac programov.

Pred ďalším spracovaním sa signál musí zabezpečiť pred chybami v prenosovom kanále. Jedná sa o kanálové kódovanie. Do signálu sa zavedie určitá redundancia, ale výrazne sa tým zníži chybovosť. Ochrana je zabezpečená vonkajším ochranným kódom FEC (Forward Error Correction) a vnútorným ochranným kódom FEC. Vonkajší kód používa Reed-Solomonov kód. Vnútorný kód používa konvolučný kód, ktorý zväčšuje bitovú rýchlosť pridaním redundancie, ktorá zavádza kódový pomer. Kódový pomer je počet informačných bitov k celkovému počtu. Štandardné kódové pomery sú $R=1/2$, $2/3$, $3/4$, $5/6$ a $7/8$ [1].

Pozemné vysielanie je citlivé na odrazené signály. Rušivé vplyvy sa prejavujú pomocou intersymbolových interferencií ISI (Inter Symbol Interference) a majú za následok vysokú chybovosť BER (Bit Error Ratio) na prijímacej strane. Preto sa aj v digitálnej televízii používa technika OFDM. Používa sa väčší počet nosných vln. Širokopásmový signál teda obsahuje viac úzkopásmových nosných zložiek. Podľa počtu nosných kmitočtov sa vysielacie módy delia na 2K (1705 aktívnych nosných) a 8K (6817 aktívnych nosných). Súčasťou aktívnych nosných sú užitočné nosné, rozptýlené nosné, spojené nosné a TPS nosné. V móde 8K je rozostúp 1116 Hz a pri móde 2K je to 4464 Hz. Pomocou mapovacieho obvodu sa sériový bitový tok premieňa na skupiny s počtom bitov vhodným pre moduláciu QPSK alebo QAM (16QAM a 64QAM) a tak je modulovaný na jednotlivé užitočné nosné [3]. Do systému sa tiež zavádza ochranný interval. Ten pracuje tak, že po príchode užitočného signálu, prijímač prestane po dobu ochranného intervalu zachytávať oneskorené signály. Dĺžka tohto intervalu je časť periódy užitočného signálu počas ktorej neprijíma ďalší signál [8]. Modulovanie na vysokofrekvenčnú nosnú sa uskutoční pomocou IQ modulátoru. Filtrovaný komplexný signál je rozdelený na reálnu zložku I a imaginárnu zložku Q.

1.2 Štandard DVB-T2

Pri vývoji štandardu DVB-T2, ktorého blokové schéma môžeme vidieť na Obr. 2, museli byť zaistené vyššie požiadavky používateľov a poskytovateľov digitálneho TV obsahu. Kládol sa dôraz na väčšiu systémovú flexibilitu, efektívnejšieho využívania RF pásma, využívanie domácich antén a prenosových sietí, navýšenie prenosovej kapacity minimálne o 30%, podporu prenosových prijímačov a umožnenie prenosu rôznych transportných tokov [9].



Obr. 2 Bloková schéma spracovania TV signálu pomocou štandardu DVB-T2 (prevzaté z [9]).

Vstupné spracovanie PLP pozostáva z dvoch procesov: prispôsobenie módu a prispôsobenie dátového toku. Pri prispôsobovaní módu sa odstránia nulové pakety NPD, ktoré sú pre prenos nepotrebné. Na prijímacej strane sa však znova obnovia z informačného bajtu DNP v ktorom boli uložené. Na konci sa vytvorí BB rámec (base-band frame). Prispôsobovanie dátového toku má za úlohu vytvorenie kompletného BB rámca s konštantnou dĺžkou [10].

Zabezpečenie dát proti chybovosti pri prenose zaisťuje chybová korekcia FEC. Ako aj pri štandarde DVB-T, aj tu sa aplikuje vonkajšie aj vnútorné kódovanie FEC, ktoré je však pri DVB-T2 inovované. Používajú sa modernejšie kódy BCH (Bose-Chaudhuri-Hocquenghem) pre vonkajšie a LDPC (Low-Density Parity-Check) pre vnútorné kódovanie. Dáta zabezpečenia sa pridávajú za BB rámec a vzniká FEC rámec s dvomi možnými veľkosťami (16200 a 64800 bitov) [9].

Celý rámec FEC sa bitovo prekladá. Každý takýto FEC rámec je mapovaný do COFDM (Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing) buniek. Tieto COFDM bunky sú normované tak, aby ich stredná hodnota bola rovná jedna. Zabezpečenie proti symbolovým chybám je dosiahnuté bunkovým prekladáním. Bunkové prekladanie slúži k pseudonáhodnému prekladaniu jednotlivých COFDM buniek vo vnútri jedného FEC bloku [9]. Ako posledné nastáva časové prekladanie, ktoré pracuje s bunkovo preloženými FEC blokmi. Zoskupujú sa do IF rámcov (Interleaving Frame) a sú mapované do T2 rámcov. Časové prekladanie slúži na ochranu proti dlho trvajúcej interferencii a tiež znižuje nároky na spotrebu energie prijímača.

Pri zostavení rámca je najvyššia jednotka Super rámec, ktorý sa delí na T2 rámce (môže ich byť až 255) a ďalej na COFDM symboly. Maximálna doba trvania Super rámca je 64 s. Štruktúra T2 rámca nám hovorí, že sa skladá z P1 symbolu, ktorý slúži na prenášanie informácií o základných systémových parametroch, P2 symbolu, ktorý slúži

na prenos L1 signalizácie a COFDM symbolov. L1 signalizácia nesie údaje o počte nosných, modulácii a kódovaniu [10].

Terénne prekážky, odrazy od stien budov a prenosové prostredie majú za následok vznik medzisymbolových interferencií (ISI). Preto je opäť s výhodou aplikovaný kódovaný ortogonálny multiplex s kmitočtovým delením COFDM (Coded OFDM). Aktívne nosné vlny sa skladajú z dátových nosných a pilotných nosných. Na dátové nosné vlny sa modulujú dáta. Pilotné nosné sa ďalej skladajú z rozptýlených nosných, spojených nosných a okrajových nosných. Ako posledný je definovaný ochranný interval GI, ktorý slúži na zamedzenie ovplyvňovania jednotlivých COFDM symbolov pri rôznych oneskoreniach pri príme signálu. Je definovaný ako pomer dĺžky ochranného signálu k dĺžke trvania jedného COFDM symbolu.

V Tabuľke 1. sú porovnané štandardy DVB-T a DVB-T2. Z porovnania systémových parametrov obidvoch štandardov je jasné, že štandard DVB-T2 je komplexnejší a flexibilnejší.

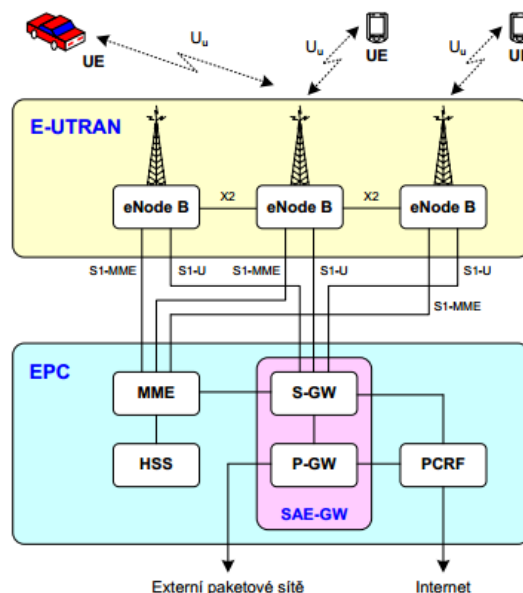
| | DVB-T | DVB-T2 |
|-------------------------------|-------------------------------|---|
| Zdrojové kódovanie | MPEG-2 | MPEG-4 |
| Ochranné kódy | Reed-Solomon a konvolučný kód | BCH a LDPC |
| Kódové pomery | 1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8 | 1/2, 3/5, 2/3, 3/4, 4/5, 5/6 |
| Vnútorne modulácie | QPSK, 16QAM, 64QAM | QPSK, 16-QAM, 64QAM, 256QAM |
| Mód FFT | 2K, 8K | 1K, 2K, 4K, 8K, 16K, 32K |
| Ochranné intervaly | 1/4, 1/8, 1/16, 1/32 | 1/4, 19/128, 1/8, 19/256, 1/16, 1/32, 1/128 |
| Frekvenčné pásma [MHz] | VHF 174-230 UHF 470-862 | VHF 174-230 UHF 470-862 |
| Šírka pásma [MHz] | 5, 6, 7, 8 | 1.7, 5, 6, 7, 8, 10 |

Tabuľka 1 Porovnanie systémových parametrov štandardov DVB-T.

2 MOBILNÉ BEZDRÔTOVÉ VYSIELANIE

2.1 Systém LTE

Veľmi obecnú štruktúru siete LTE je možné vidieť na Obr. 3. Systém LTE pozostáva z dvoch základných častí: EPC (Evolved Packet Core) a E-UTRAN (Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network).

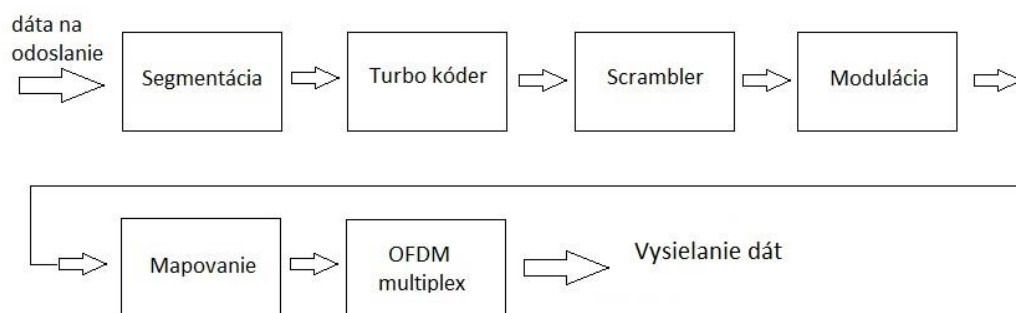


Obr. 3 Štruktúra siete LTE (prevzaté z [4]).

Rádiová prístupová sieť E-UTRAN má za úlohu spojenie jednotlivých staníc eNodeB (evolved Node Bs), ktoré tvoria bránu medzi rádiovým rozhraním a hlavnou sieťou. Rozhranie medzi UE (User Equipment) a eNodeB sa nazýva rozhranie Uu. EPC časť má za úlohu služby a riadenie v sieti. Na prepojenie medzi eNode B a EPC časťou môže byť použité metalický alebo optický kábel. Každý eNode B môže obsluhovať niekoľko UE, ale UE môže byť obsluhovaný iba jedným eNode B [2]. Časť EPC sa skladá z bloku MME (Mobility Management Entity), S-GW (Serving Gateway), HSS (Home Subscriber Server), P-GW (Packet Gateway) a PCRF (Policy and Charging Rules Function). Blok MME je hlavný riadiaci prvok siete LTE. Kontroluje prístup do siete a má na starosti overenie totožnosti. Zaisťuje taktiež ochranu komunikácie (šifruje a dešifruje signál). Zasiela identifikáciu do HSS po prihlásení EU do siete. Blok HSS je vlastne databáza všetkých užívateľov siete a služieb, ku ktorým majú prístup. Servisná brána S-GW a brána paketovej dátovej siete P-GW sú súčasťou brány SAE-GW cez ktorú prechádzajú všetky užívateľské dáta. Brána P-GW taktiež prideluje IP adresy terminálom. Blok PCRF kontroluje poskytované služby a zisťuje či odpovedajú užívateľskému profilu. Dohliada aj na vyúčtovanie poskytnutých služieb [2].

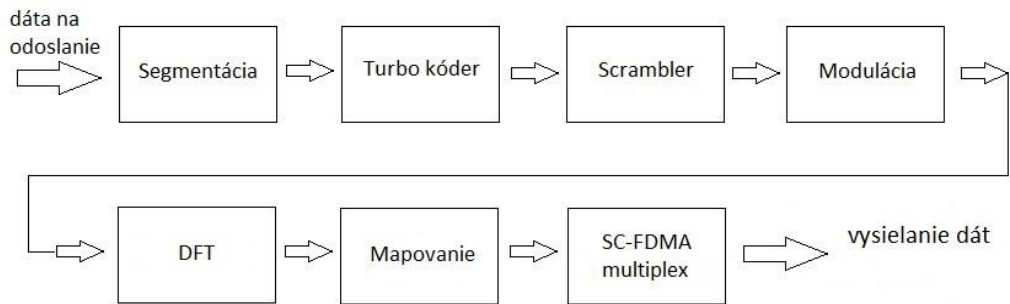
Komunikácia v systéme LTE môže prebiehať symetricky (párovo) alebo nesymetricky (nepárovo). Pri použití symetrickej komunikácie FDD (Frequency Division Duplex) má uplink a downlink odlišné frekvencie vzájomne vzdialené o danú hodnotu pre konkrétne pásmo. Pri použití nesymetrickej komunikácie sa spojenie naviaže na určenú frekvenciu a komunikácia prebieha v časových okamžikoch striedavo, hovorí sa teda o časovom duplexe TDD (Time Division Duplex). Jednotlivé frekvenčné pásma pre FDD aj TDD komunikáciu sú uvedené v Tab. 2. Bitový tok, ktorý nesie informáciu, je rozdelený do rámcov. Pre každý typ komunikácie (FDD alebo TDD) sa používa iný typ rámca. Každý rámec má dobu trvania $T_f = 10 \text{ ms} = 307\,200 \cdot TS$, kde $TS = 32,55 \text{ ns}$ je základná časová jednotka ($f_s = 30,72 \text{ MHz}$). Rámec typu 1 (FDD) je rozdelený na desať subrámcov s dobou trvania 1ms. Každý subrámec je rozdelený na dva sloty s dobou trvania 0,5 ms. Sloty obsahujú šesť alebo sedem OFDM symbolov, podľa toho či sa používa krátka alebo dlhá ochranná doba CP (Cyclic Prefix). Rámec typu 2 (TDD) je rozdelený iba na dva polrámece o dĺžke 5ms. Každý polrámec sa skladá z piatich subrámcov o dĺžke 1ms. Jeden subrámec prenáša informácie o prepínaní medzi downlinkem a uplinkem [2].

Vysokú prenosovú rýchlosť pri downlinku, ktorý môžeme vidieť na Obr. 4, dosiahneme použitím systému OFDM. Používa sa viac nosných, ktoré sú ortogonálne a na každú z nich sa modulujú jednotlivé symboly. Tieto symboly sú vysielané paralelne a je teda dovolené použiť väčšiu dobu trvania týchto symbolov. Tým sa zlepšujú vlastnosti ISI. Pre väčšiu elimináciu ISI sú medzi symboly vkladané ochranné intervaly. Keďže systém priradí na každú nosnú jeden symbol za daný časový interval, musí byť systém toľko modulátorov ako nosných. Preto sa využíva Fourierova transformácia [11].



Obr. 4 Obecná bloková schéma komunikácie pre downlink.

Pre uplink v systéme LTE sa využíva SC-FDMA (Single Carrier Frequency Division Multiplex Access). Dôvodom je prioritná požiadavka na nízky odber UE a zníženie PAPR (Peak-to-Average Power Ratio). Využíva sa modulácia na jednej nosnej. Na jednej nosnej sa pre šírku pásma $N \cdot 15 \text{ kHz}$ vysielajú signály po dobu $1/N$, kde N je počet využitých subnosných [11]. Základná bloková schéma je zobrazená na Obr. 5. V Tabuľke 2 je možné vidieť frekvenčné pásma systému LTE v uplinku a downlinku ako aj v móde FDD a TDD.



Obr. 5 Obecná bloková schéma komunikácie pre uplink.

Technika MIMO (Multiple Input Multiple Output) sa používa aby sme v systéme LTE dosiahli vysokú prenosovú rýchlosť a spektrálnu účinnosť. Základná konfigurácia pre downlink je 2x2. Sú použité dve antény na strane stanice eNB a dve antény na strane užívateľa UE. Známe sú aj konfigurácie 4x2 a 4x4. Pre MIMO v uplinku bude na strane UE iba jeden koncový vysielač s dvomi anténami. Medzi týmito dvomi anténami sa bude prepínať podľa toho, ktorá dodá do eNB lepší signál [2].

Kmitočtové pásma:

| E-UTRA Band | Uplink (UL) eNode B receive UE transmit | | Downlink (DL) eNode B transmit UE receive | | UL-DL Band separation | | Duplex Mode | |
|-------------|---|------------------------|---|------------------------|-----------------------|------------------------|-------------|-----|
| | F_{UL_low} | F_{UL_high} [MHz] | F_{DL_low} | F_{DL_high} [MHz] | F_{DL_low} | F_{UL_high} [MHz] | | |
| 1 | 1920 | – | 1980 | 2110 | – | 2170 | 130 | FDD |
| 2 | 1850 | – | 1910 | 1930 | – | 1990 | 20 | FDD |
| 3 | 1710 | – | 1785 | 1805 | – | 1880 | 20 | FDD |
| 4 | 1710 | – | 1755 | 2110 | – | 2155 | 355 | FDD |
| 5 | 824 | – | 849 | 869 | – | 894 | 20 | FDD |
| 6 | 830 | – | 840 | 875 | – | 885 | 35 | FDD |
| 7 | 2500 | – | 2570 | 2620 | – | 2690 | 50 | FDD |
| 8 | 880 | – | 915 | 925 | – | 960 | 10 | FDD |
| 9 | 1749.9 | – | 1784.9 | 1844.9 | – | 1879.9 | 60 | FDD |
| 10 | 1710 | – | 1770 | 2110 | – | 2170 | 340 | FDD |
| 11 | 1427.9 | – | 1452.9 | 1475.9 | – | 1500.9 | 23 | FDD |
| 12 | [TBD] | – | [TBD] | [TBD] | – | [TBD] | [TBD] | FDD |
| 13 | 777 | – | 787 | 746 | – | 756 | 21 | FDD |
| 14 | 788 | – | 798 | 758 | – | 768 | 20 | FDD |
| ... | | | | | | | | |
| 33 | 1900 | – | 1920 | 1900 | – | 1920 | N/A | TDD |
| 34 | 2010 | – | 2025 | 2010 | – | 2025 | N/A | TDD |
| 35 | 1850 | – | 1910 | 1850 | – | 1910 | N/A | TDD |
| 36 | 1930 | – | 1990 | 1930 | – | 1990 | N/A | TDD |
| 37 | 1910 | – | 1930 | 1910 | – | 1930 | N/A | TDD |
| 38 | 2570 | – | 2620 | 2570 | – | 2620 | N/A | TDD |
| 39 | 1880 | – | 1920 | 1880 | – | 1920 | N/A | TDD |
| 40 | 2300 | – | 2400 | 2300 | – | 2400 | N/A | TDD |

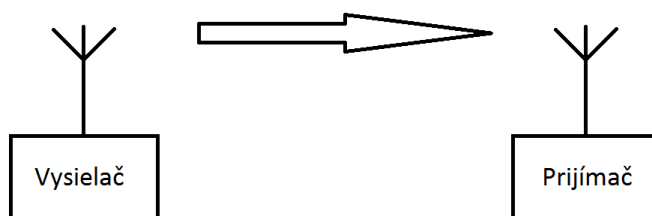
Tabuľka 2 Rozdelenie kmitočtového pásma pre systém LTE (prevzaté z [12]).

3 TYPY PRENOSOVÝCH KANÁLOV

Televízne vysielanie sa šíri hlavne priamou vlnou, ktorá sa však v teréne odráža od rôznych prekážok. To má za následok vytvorenie modelov prenosového kanálu. Ideálny prenosový kanál je takzvaný Gaussov kanál. Reálne modely prenosových kanálov sú Riceov a Rayleighov kanál.

3.1 Gaussov kanál

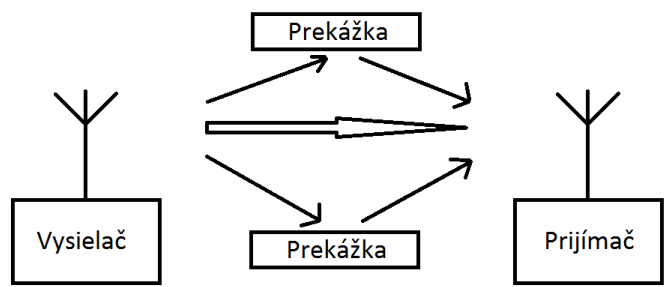
Prípado pri ktorom je vysielacia a prijímacia časť v priamom dohľade sa nazýva Gaussov kanál. Tento typ kanálu je typický ideálnymi podmienkami príjmu signálu. Signál prichádza k anténe len jednou, priamou cestou bez rôznych odrazov. Signál v takom kanále je ovplyvňovaný iba tzv. bielym Gaussovským šumom (AWGN), ktorý generujú hlavne samotné prijímače [3]. Gaussov kanál má najlepšie podmienky pre príjem. Šírenie signálu v Gaussovom kanále je znázornené na Obr. 6.



Obr. 6 Šírenie signálu v Gaussovom kanály.

3.2 Riceov kanál

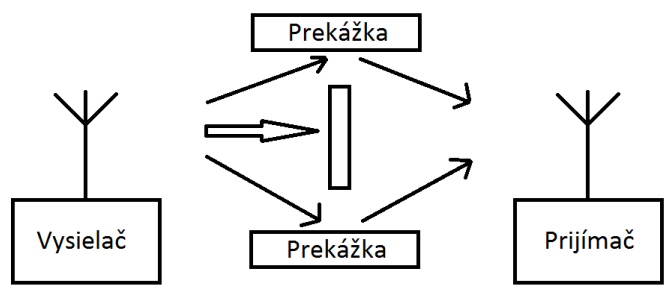
Prípado pri ktorom sa k priamemu šíreniu signálu pridá viaccestné šírenie signálu spôsobené rôznymi odrazmi sa nazýva Riceov kanál. Šírenie signálu v takomto kanále je možné vidieť na Obr. 7. V prenosovom prostredí dochádza k medzisymbolovým interferenciám. Riceov kanál je vlastne Gaussov kanál rozšírený o možnosť odrazu signálu od rôznych prekážok [3].



Obr. 7 Šírenie signálu v Riceovom kanály.

3.3 Rayleighov kanál

Model kanálu, ktorý potlačuje priamy signál a počíta len s odrazenými signálmi sa nazýva Rayleighov kanál. V praxi také prenosové prostredie predstavuje najhoršie podmienky z hľadiska komunikácie medzi vysielačom a prijímačom. Bol navrhnutý kvôli tomu, že pri prvých návrhoch systému DVB-T nebola požiadavka na mobilný príjem, kde nie je zaručené, že priamy signál bude dominantný [3]. Na Obr. 8 je vidieť šírenie signálu Rayleighovým kanálom.

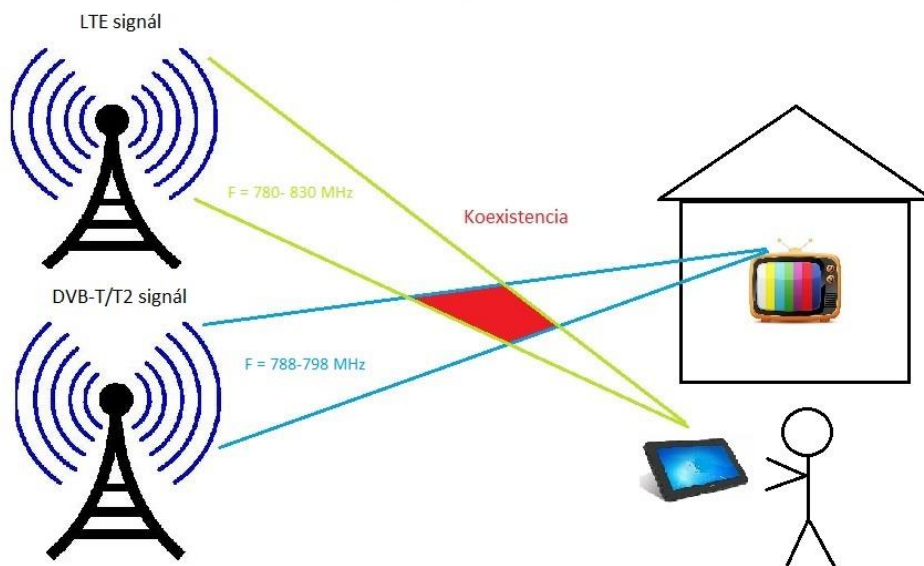


Obr. 8 Šírenie signálu v Rayleighovom kanály.

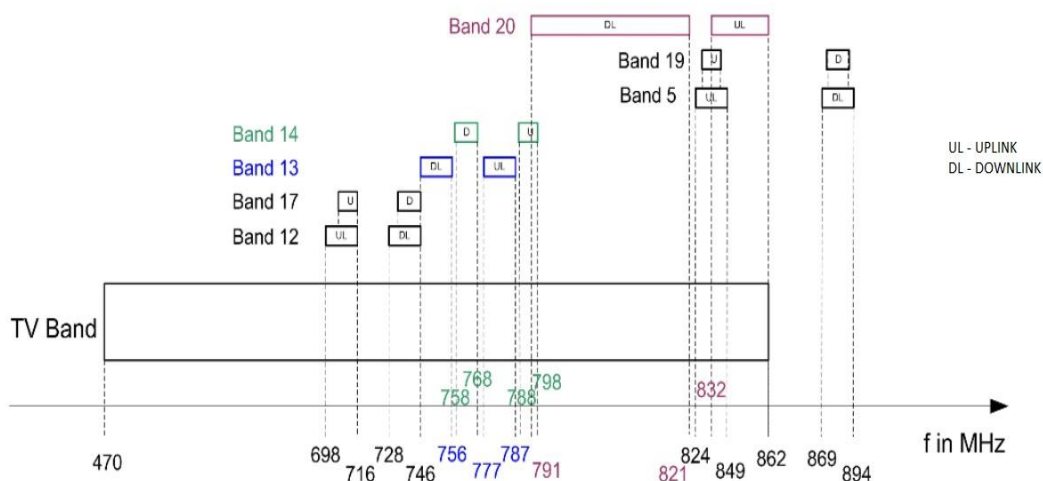
4 KOEXISTENCIA ŠTANDARDOV DVB-T, DVB-T2 A LTE

4.1 Základný popis

V posledných rokoch nastáva problém, že pribúda množstvo užívateľských zariadení a je použitých veľa bezdrôtových technológií, ktoré sa môžu nachádzať v rovnakom frekvenčnom pásme. V dôsledku tohto môže dôjsť k interakcii a vzájomným interferenciám signálov. Preto sa čoraz viac zaoberajú monitorovaním, meraním a možným potlačením týchto nežiaducich vplyvov. Stručný princíp koexistencie je znázornený na Obr. 9. Je vidieť, že signály DVB-T a LTE sa prekrývajú pri sledovaní televízie a súčasnej manipulácii na tablete. Signál na TV prijímači môže byť rušený uplinkom alebo downlinkom LTE služieb. Táto semestrálna práca je zameraná na preskúvanie rôznych koexistenčných scenárov medzi systémami DVB-T/T2 a LTE. Frekvenčné pásmo 790-862 MHz je jedno z pásem, ktoré boli nedávno priradené mobilným operátorom pre poskytovanie ich služieb v štandarde LTE. Keďže pre DVB-T/T2 je vyhradené frekvenčné pásmo 470-862 MHz, môže nastať vzájomné rušenie medzi štandardmi DVB-T/T2 a LTE [13]. Na Obr. 10 je vidieť prekrytie frekvenčných pásiem DVB-T/T2 a LTE služieb.



Obr. 9 Znáznornenie stručného princípu koexistencie medzi DVB-T/T2 a LTE službami.

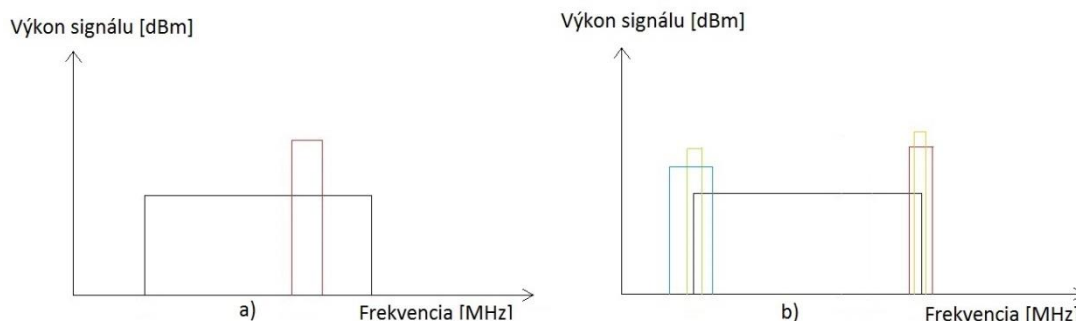


Obr. 10 Frekvenčné prekrytie štandardov DVB-T/T2 a LTE (prevzaté z [14]).

4.2 Základné typy koexistencie

Keďže sa frekvenčné pásma môžu prekrývať rôznym spôsobom, rozdeľujú sa na dva základné typy koexistencie. Prvý typ, ktorý je vidieť na Obr. 11 a) je scenár celkového prekrytia (Full Overlapping). Jedná sa o prípad, kde celé vyhradené frekvenčné pásmo pre vysielanie služby LTE leží vo frekvenčnom pásme štandardu DVB-T/T2.

Druhý typ, ktorý môže nastať je scenár čiastočného prekrytia (Partial Overlapping). Tento scenár nastáva, keď signál LTE a DVB-T/T2 nie sú prekryté úplne, ale prekrývajú sa len určitou časťou. Toto môžeme vidieť na Obr. 11 b). Veľkosť prekrytia môže byť rôzna a môže dôjsť k prekrytiu v dolnej časti frekvenčného pásma, ale aj v hornej časti. Pri tomto type je predpoklad, že čím väčšie je prekrytie, tým výraznejšie je rušenie RF signálu a naopak. Vplyv má však aj výkon signálu.

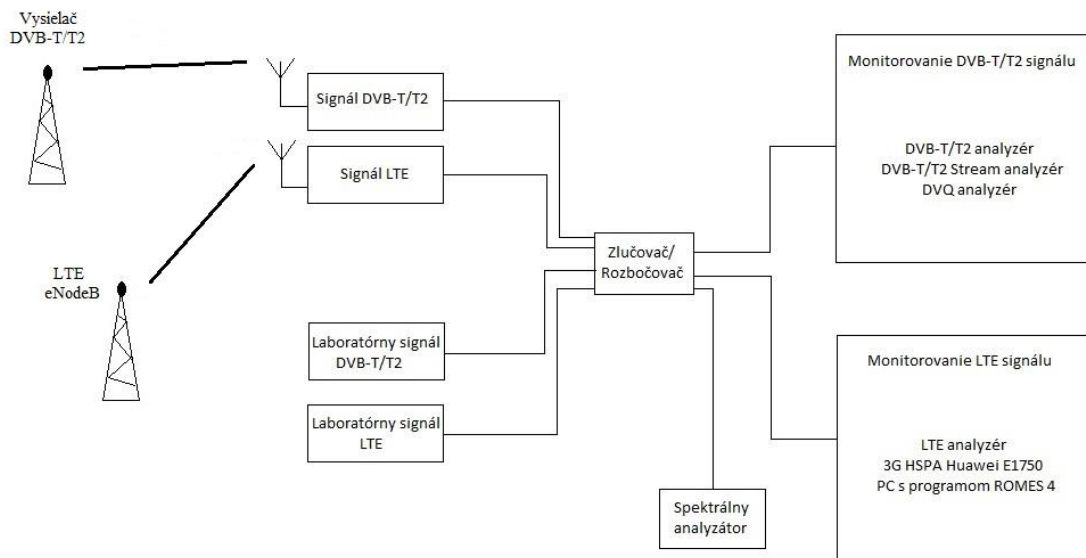


Obr. 11 Scenár a) celkového b) čiastočného prekrytia RF spektra dvoch služieb.

5 MERANIE KOEXISTENCIE MEDZI TELEVÍZNÝMI A MOBILNÝMI SLUŽBAMI

5.1 Princíp merania

Navrhnutá bloková schéma merania koexistencie medzi mobilnými a DVB systémami (na základe [14]) je znázornená na Obr. 12. Skladá sa z dvoch hlavných častí. Jedna časť tvorí získavanie bezdrôtových signálov z terénu. Reálny RF signál digitálnej TV (DVB-T/T2) služby a siete 3G (GSM, UMTS, LTE) je možné dostať priamo z vysielateľov, ktoré prevádzajú vysielanie v teréne. Na účely laboratórneho merania je však možné požadovaný zdrojový signál vytvoriť v laboratóriu za pomoci daných prístrojov. Všetky tieto signály sa spoja a následne rozdelia v bloku zlučovač/rozbočovač a sú analyzované na vhodných meracích prístrojoch. Je možné pozorovať rôzne typy koexistencie (vzájomné rušenie, rušenie v rovnakej alebo v susednej kanálovej frekvencii) medzi rôznymi komunikačnými systémami. Podľa týchto tipov koexistencie sa upravuje meracie pracovisko a nastavované hodnoty na prístrojoch [14].



Obr. 12 Bloková schéma monitorovania koexistencie medzi štandardmi DVB-T/T2 a LTE.

5.2 Použité meracie prístroje

Broadcast Test System R&S SFU – Tento prístroj slúži na generovanie RF signálu digitálneho TV podľa štandardu DVB-T/H/T2. Po nastavení potrebných systémových parametrov (pracovný kmitočet, kódový pomer, ochranný interval, modulácia, atď.) je

vygenerovaný DVB-T/T2 signál a RF modulovaný. Prístroj dokáže vytvoriť signál v ideálnych prenosových podmienkach, ale je možné vybrať aj medzi rôznymi kanálovými modelmi.

Arbitrary Signal Generator R&S SMU 200 with LTE – Je to prístroj, ktorý vytvára LTE signál podľa 3GPP2 Release 8. Ďalej sa dá nastaviť mód FDD alebo TDD a požadovaná modulácia. Prístroj na vytváranie DVB-T/T2 RF signálu a prístroj s LTE RF signálom spolu tvoria prvú časť blokovej schémy pre meranie koexistencie, ktorú vidíme na Obr. 12.

TV Analyzer R&S ETL – Slúži na meranie parametrov DVB-T/T2 signálu, ktoré si podrobnejšie rozoberieme v ďalšej časti. Pomocou prístroja sa dá taktiež zobraziť a pozorovať spektrum RF signálov. Prístroj je schopný zachytiť a analyzovať DVB-T aj DVB-T2 RF signál. Môže taktiež analyzovať transportný tok vysielaného TV signálu.

Signal Analyzer R&S FSQ with LTE modul – Tento prístroj slúži na zobrazenie spektra RF signálu a na meranie jeho základných parametrov. Je schopný pracovať v pásme od 500 kHz do 5 GHz.

Power Splitter – Je to rozbočovač, ktorý usmerňuje mobilné a TV signály k meracím prístrojom.

Set-Top-Box a TV prijímač – Pomocou Set-Top-Boxu zachytávame a spracovávame DVB-T/T2 RF signály a následne zobrazujeme prijímaný obsah na TV prijímači. Na TV prijímači sa ďalej hodnotí subjektívne miera koexistencie DVB-T/T2 a LTE systémov.

5.3 Objektívne parametre signálov DVB-T/T2 a LTE systémov

Pre analýzu spoločnej koexistencie sú vybrané určité parametre, na ktoré sa pri prijímaní signálu treba zamerať. Parametre sú rôzne pre štandardov DVB-T/T2 a LTE. U DVB-T/T2 signálu sú sledované viaceré parametre ako pri LTE. Pri oboch signáloch bude pozorované spektrum a taktiež bude zobrazený konštelačný diagram. Na základe toho bude stanovená typ a miera interferujúcich rušení.

Parametre sledované pri digitálnom TV signály aj pri mobilnom signály:

Miera prekrytia RF signálov – Na generátoroch budeme nastavovať nosné frekvencie služieb DVB-T/T2 a LTE, ktoré potom zobrazíme na spektrálnom analyzátore. To je dôležité pre určenie veľkosti prekrytia TV a mobilného RF signálu, ktorá výrazne ovplyvňuje chybovosť pred a po dekodovania FEC rámcov v uvažovaných systémoch.

Úroveň signálu – Tento parameter opäť nastavujeme na generátoroch. Pri prechode TV signálu prostredím alebo káblami však nastáva útlm, preto ho na analyzátore znovu odmeriame. Úroveň signálu je takisto dôležitý parameter, ktorá výrazne ovplyvňuje chybovosť BER v systémoch DVB-T/T2 a LTE.

Parametre sledované len pri LTE signály

Error Vector Magnitude (EVM) – Parameter EVM sa vyjadruje v percentách. Pre každú moduláciu je určená percentuálna hodnota, ktorá keď je prekročená, nastáva veľké rušenie. Tieto hodnoty sú 17,5% pre moduláciu QPSK, 12,5% pre 16 QAM moduláciu

a 8% pre moduláciu 64 QAM. Demodulácia takéhoto signálu je potom nemožná.

Parametre sledované len pri DVB-T a DVB-T2 signály

Modulation Error Ratio (MER) – Je to takzvaná modulácia pomeru chýb. Nesie informáciu o úrovni a šume, ktorý zasahuje do digitálneho signálu. V praxi bez znalosti tohto parametra nie je možné zaručiť stabilný príjem. Udáva sa jednotkách dB. Platí, že čím vyššia je jeho hodnota, tým menšia je miera rušenia 0.

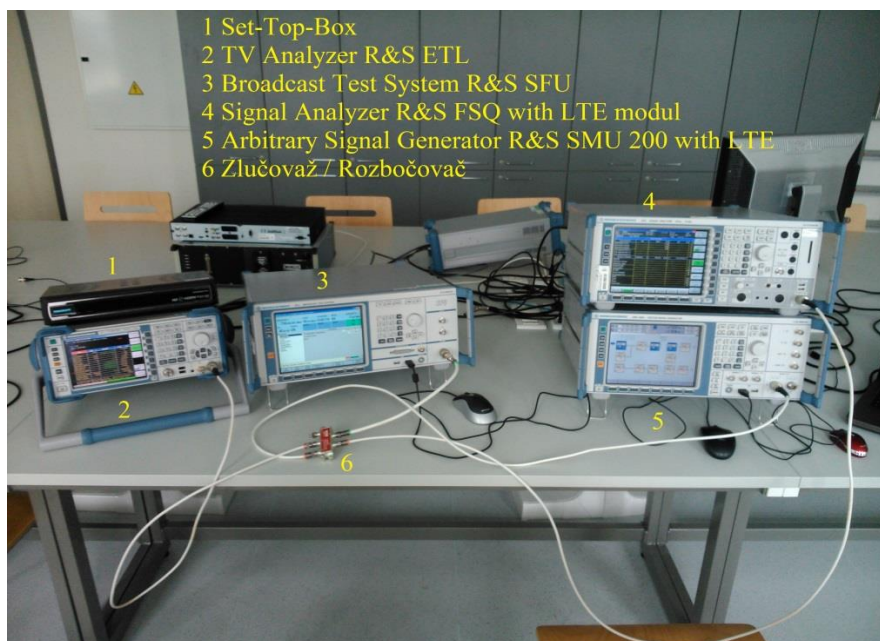
Bit Error Ratio (BER) – Ďalším dôležitým parametrom, ktorý by mal byť vzatý do úvahy pri meraní DVB-T/T2 signálov. Informuje o podiele chybných bitov (spôsobených chybami v prenosovom kanáli) vo vzťahu ku všetkým prenášaným bitom za určitý časový interval. Parameter BER môžeme merať pred dekodérom Viterbi alebo za dekodérom Viterbi v DVB-T prijímači. Pri signály DVB-T2 sa merá parameter BER pred a za dekodérom LDPC. U systému DVB-T pre QEF príjem BER pred Viterbiho dekodérom musí byť rovná alebo menšia ako $2 \cdot 10^{-4}$. V DVB-T2 táto hodnota je po LDPC dekódovaní $1 \cdot 10^{-7}$.

Carrier-toNoise (C/N) – Je to vyjadrenie pomeru medzi úrovňou nosnej vlny a šumom. Tento parameter sa udáva v dB. Požiadavky na C/N sa líšia vzhľadom na použitú moduláciu, kódový pomer a prenosové podmienky.

6 MERANIE KOEXISTENCIE DVB-T A LTE SYSTÉMOV V SPOLOČNOM RF PÁSME

6.1 Koexistenčný scenár a popis merania

V tejto kapitole bol navrhnutý koexistenčný scenár pre štandardy DVB-T/T2 a LTE. Všetky signály sú generované prístrojmi od Rohde&Schwarz (R&S). Meracie pracovisko je možné vidieť na Obr. 13. Pre štandard DVB-T/T2 bol zvolený kanál 54 so šírkou pásma 8 MHz a strednou frekvenciou 738 MHz. Pri tomto koexistenčnom scenári sme uvažovali ako statický tak aj mobilný signál DVB-T/T2. Jednotlivé systémové parametre pre statický aj mobilný príjem u DVB-T aj DVB-T2 budú rozobrané v ďalšej kapitole. Ďalej boli pri DVB-T/T2 signály prístrojom SFU emulované rôzne kanálové podmienky (Rice, Rayleigh). Pre statický DVB-T/T2 signál sú to únikové kanály RC20 a RL20 a pre mobilný DVB-T/T2 signál sú to kanály VU30 a MR100. Pre štandard LTE bol zvolený kanál 12 v uplinku so šírkou pásma 18 MHz. Pre tento LTE kanál je vyhradené frekvenčné spektrum od 728 MHz do 746 MHz v móde FDD. Stredná frekvencia LTE signálu bude nastavovaná podľa jednotlivých scenárov, ktoré budú podrobne popísané v nasledujúcich kapitolách. LTE signál bol v prístroji SMA vygenerovaný ako uplink signál s módom FDD a bolo zvolených 10 rámcov (Resource Block). V jednotlivých rámcoch boli použité modulácie QPSK, 16QAM a 64QAM rovnomerne [15].



Obr. 13 Rozloženie meracieho pracoviska.

6.2 Systémové nastavenie štandardov DVB-T/T2 a LTE

6.2.1 DVB-T/T2 (Statický príjem)

Statický signál DVB-T bol zvolený tak, aby sa podobal reálnemu vysielaciemu signálu. Pre statický signál DVB-T2 bola zvolená doporučená modulácia 256QAM a keďže ide o statický signál bol zvolený vysielací mód 32K (dlhý rámec). Modulácia 256QAM bola zvolená preto, že sa pri skúšobnom vysielaní ukázala ako najlepšia voľba pre DVB-T2 vysielanie. Tak isto bol podľa normy zvolený aj kódový pomer a ochranný interval. Ochranný interval slúži na potlačenie únikov a medzysymbolových intrferencií. Systém potláča oneskorený signál, ktorý prichádza v dobe trvania ochranného intervalu. Doba trvania ochranného intervalu bola vypočítaná podľa vzorca (1) a ďalej podľa normy vyhladané vhodné rozloženie nosných.

$$T_{GI} = k_{GI} \cdot T_S, \quad (1)$$

Vo vzorci T_{GI} znamená dobu trvania ochranného intervalu, k_{GI} je ochranný interval vyjadrený číslom a T_S je doba symbolu. Keďže sa jedná o statický signál, parametre boli zvolené tak aby mohol systém využiť čo najväčšie prenosové pásmo pri dostatočnom zabezpečení. Všetky systémové parametre sú prehľadne znázornené v Tabuľke 3.

| | DVB-T | DVB-T2 |
|---------------------------|--------------------------------------|---------------|
| Šírka pásma | 8 MHz | 8 MHz |
| Vysielací mód | 8K | 32K |
| Ochranný interval | 1/8 | 1/32 |
| Rozloženie nosných | Pevná štruktúra [ETSI EN 300 744] | PP4 |
| Kódový pomer | 2/3 | 3/5 |
| Modulácia nosných | 64QAM | 256QAM |
| Únikové kanály | RC20 a RL20 | RC20 a RL20 |

Tabuľka 3 Systémové parametre štandardov DVB-T/T2 pre statický príjem.

6.2.2 Mobilný signál DVB-T/T2

Pri mobilnom signály musia byť nastavované systémové parametre vybrané tak, aby mali lepšie zabezpečenie pri prenose signálu ako statický signál. Keďže sa jedná o mobilný signál, bola pre štandard DVB-T aj DVB-T2 zvolená modulácia 16QAM s vysielacím módom 2k. Pri DVB-T2 je použitý krátky FEC rámec, takže sa jedná o štandard DVB-T2-Lite. Ochranný interval a kódový pomer sú vybrané podobným spôsobom ako u statického kanála z priradenej normy. Pre DVB-T2 signál bolo ďalej v norme vybrané rozloženie nosných. Jednotlivé systémové parametre sú zobrazené v Tabuľke 4.

| | DVB-T | DVB-T2 |
|---------------------------|--------------|---------------|
| Šírka pásma | 8 MHz | 8 MHz |
| Vysielací mód | 2K | 2K |
| Ochranný interval | 1/8 | 1/8 |
| Rozloženie nosných | - | PP3 |
| Kódový pomer | 2/3 | 2/3 |
| Modulácia nosných | 16QAM | 16QAM |
| Únikové kanály | VU30 a MR100 | VU30 a MR100 |

Tabuľka 4 Systémové parametre štandardov DVB-T/T2 pre mobilný príjem.

6.2.3 Signál LTE

Signál LTE bol vygenerovaný prístrojom Arbitrary Signal Generator R&S SMU 200 with LTE. Jeho nastavenie zodpovedá klasickému nastaveniu LTE signálu. Vygenerovaná bol LTE signál v downlinku s módom FDD. Použitých bolo 10 rámcov, v ktorých bola rovnomerne rozdelená modulácia QPSK, 16QAM a 64QAM. Jednotlivé systémové nastavenia sú v Tabuľke 5.

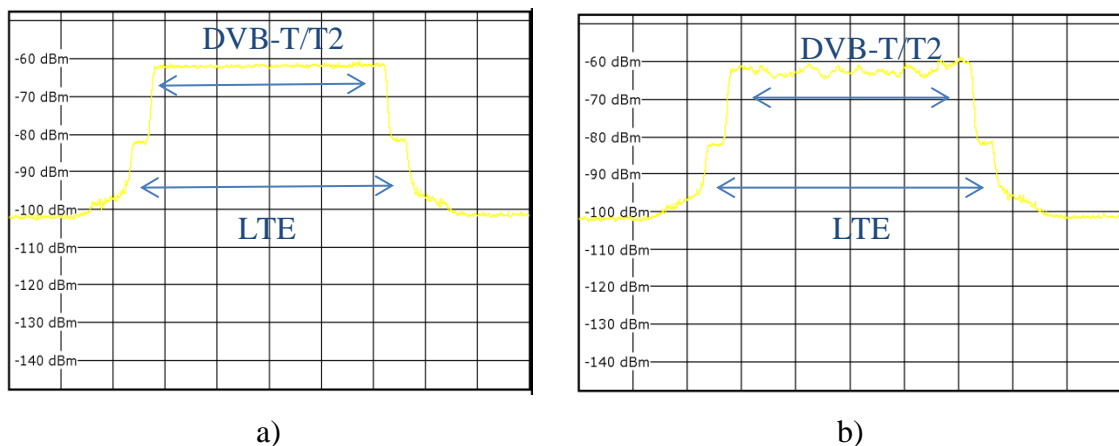
| | |
|------------------------------|---------------------------|
| Kódový pomer | 1/3 (Turbo) |
| Šírka pásma | 1,4 MHz 3 MHz 5 MHz |
| IFFT veľkosť | 128 512 1024 |
| Ochranný interval | 4,7 μ s |
| Modulácia na subrámcu | QPSK, 16QAM a 64QAM |

Tabuľka 5 Systémové parametre štandardu LTE.

7 KOEXISTENCIA MEDZI DVB-T/T2 A LTE (CELKOVÉ PREKRYTIE RF SIGNÁLOV)

7.1 Popis meraného koexistenčného scenára

V tomto scenáre bol uvažovaný ako DVB-T tak aj DVB-T2 signál s rôznymi systémovými nastaveniami pre statický aj mobilný príjem TV signálu (kapitola 6). Signál DVB-T/T2 bol generovaný so štandardnou šírkou pásma 8 MHz. Zvolený bol TV kanál 54 so strednou frekvenciou 738 MHz. Rušiaci LTE signál bol generovaný ako downlink v režime FDD v kanále 12. Šírka pásma rušiaceho LTE však bola 1,4 MHz a 10 MHz, z dôvodu preskúmania úzkopásmového a širokopásmového rušenia. Keďže sa jedná o scenár celkového prekrytia, bola stredná frekvencia LTE signálu bola 738 MHz. Prekrytie jednotlivých spektier je možné vidieť na Obr. 14. Pre vyhodnotenie jednotlivých koexistenčných scenárov bol použitý parameter BER pred aj po dekodéry Viterbi a parameter MER. Závislosti boli skúmané pri zmene parametru C/N. Pri vyjadrení jednotlivých závislostí sú pre vyššiu prehľadnosť v grafoch používané rôzne nastavenia osí.

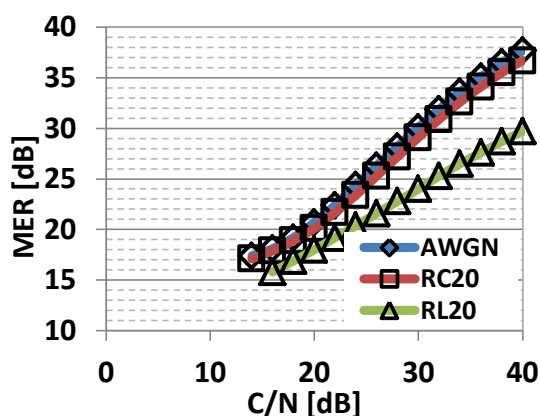


Obr. 14 Prekrytie RF spektier DVB-T/T2 a LTE signálov so šírkou pásma 10 MHz pri a) staticom prijíme signálu (RC20), b) mobilnom prijíme signálu (VU30).

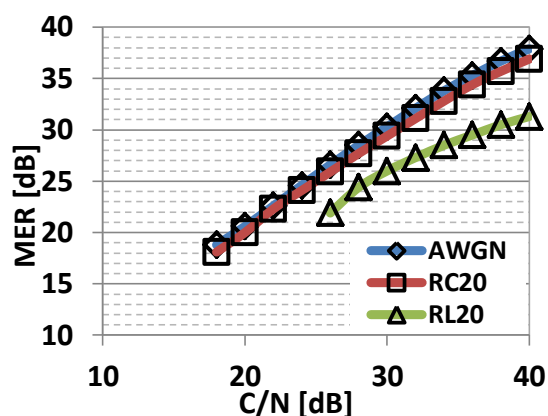
7.2 Meranie parametru MER

7.2.1 Rušiaci signál LTE so šírkou pásma 1,4 MHz

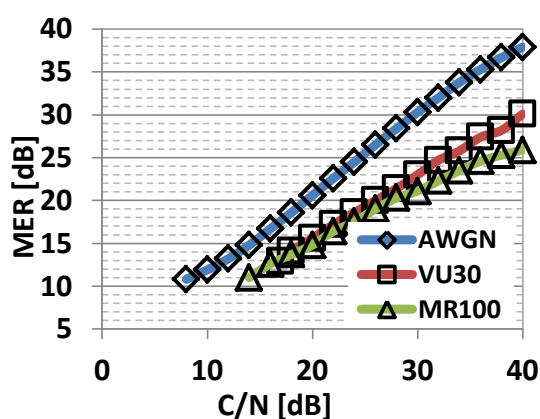
Ako prvé boli odmerané referenčné závislosti MER na C/N (bez rušenia LTE signálom) signálu DVB-T/T2 s rôznymi nastaveniami (mobilný a statický scenár) a v rôznych kanálových podmienkach. Jednotlivé závislosti je možné vidieť na Obr. 15 a) až d).



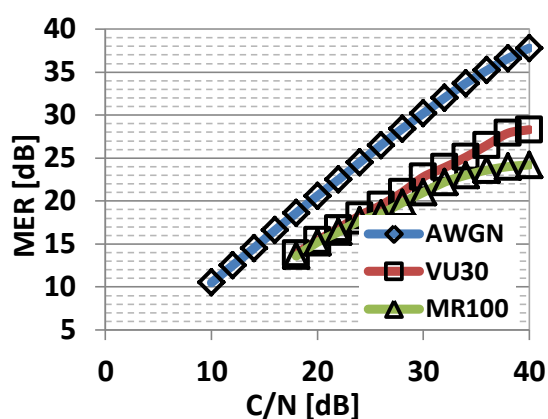
a) DVB-T (statický scenár)



c) DVB-T2 (statický scenár)



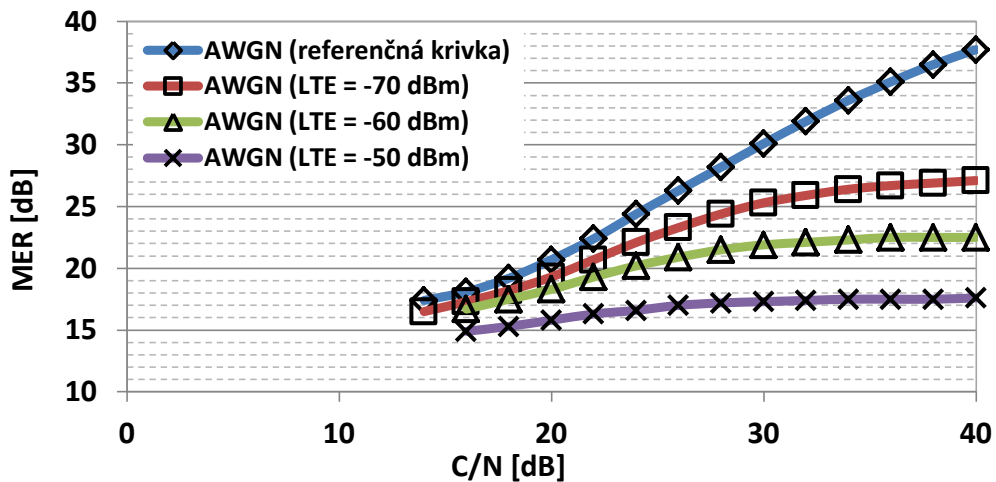
b) DVB-T (mobilný scenár)



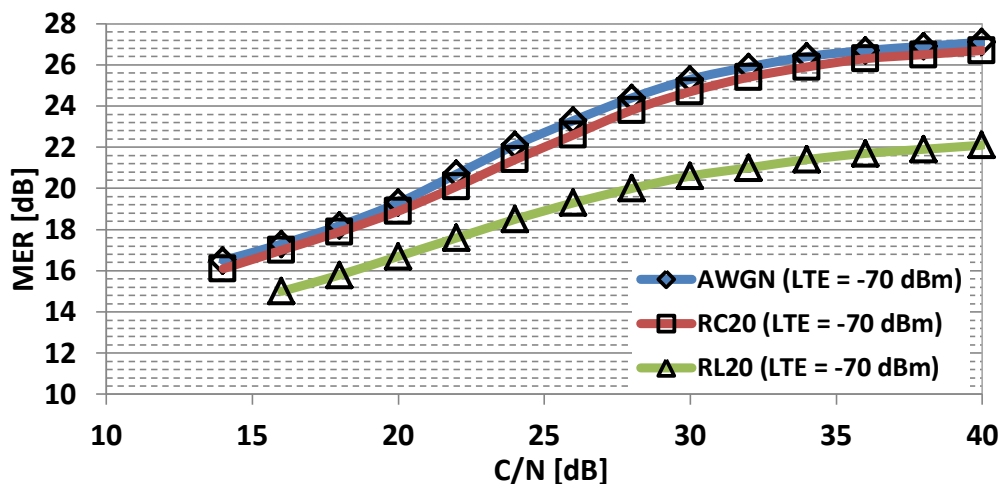
d) DVB-T2 (mobilný scenár)

Obr. 15 Referenčné hodnoty pre a) statický príjem DVB-T, b) mobilný príjem DVB-T, c) statický príjem DVB-T2, d) mobilný príjem DVB-T2 signálu.

Systemové parametre pre tieto signály je možné vidieť v kapitole 6. Z referenčných grafov je dobre vidieť vplyv vlastností jednotlivých únikových kanálov. Únikový kanál RC20 sa podobá na AWGN kanál preto, lebo je pri ňom zaistená priama viditeľnosť medzi vysielačom a prijímačom signálu. Ostatné únikové kanály ovplyvňujú MER podstatne viac. Ďalšie merania už prebiehali s rušiacim LTE signálom. Pri znižovaní parametru C/N, to znamená znižovanie hodnôt signálu od šumu, sa všetky merané parametre zhoršovali. Tento jav je možné vidieť u všetkých grafov a je teoreticky očakávaný. Pri statickom prijíme signálu DVB-T má na kvalitu signálu vplyv, okrem znižovania C/N, hlavne úroveň rušiaceho signálu LTE. Toto je možné vidieť na Obr. 16. Rušiaci LTE signál s úrovňou -50 dBm ruší DVB-T signál najviac a s úrovňou -70 dBm najmenej. Ako sa však dalo predpokladať referenčná krivka bez rušenia má hodnoty MER najvyššie. Takýto priebeh signálov bolo možné pozorovať aj pri oboch únikových kanáloch. Z Obr. 17 je vidieť, že únikový kanál RC20 sa hodnotami blíži k signálu v kanále Guassovskom (AWGN), čo bolo vysvetlené u referenčných kriviek. Naopak signál s únikovým kanálom RL20 má na signál DVB-T oveľa väčší vplyv.

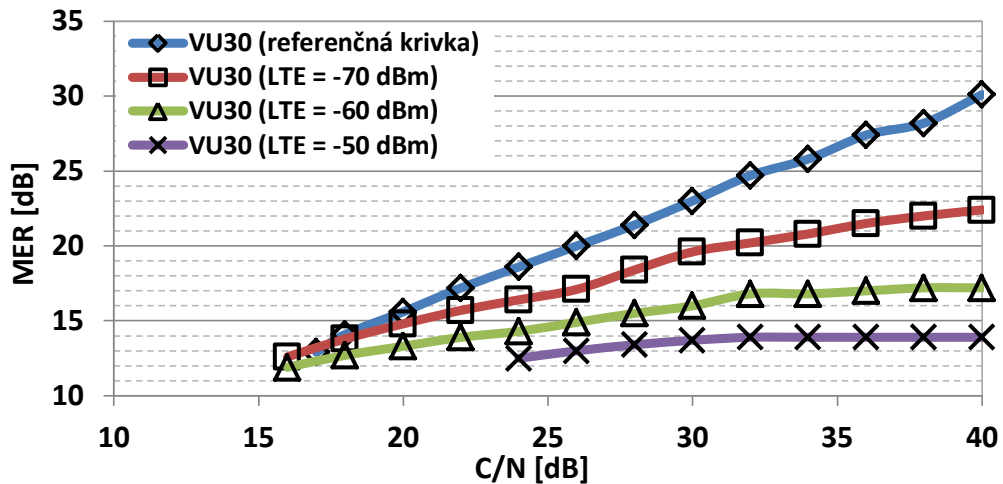


Obr. 16 Závislosť parametru MER na parametri C/N pri statickom prijíme DVB-T signálu s Gaussovským kanálom (AWGN), LTE so šírkou pásma 1,4 MHz.

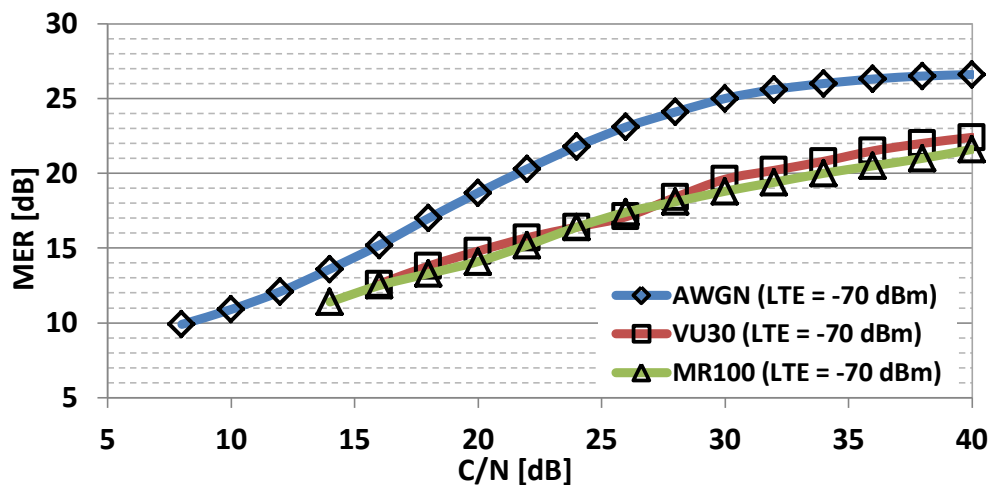


Obr. 17 Závislosť parametru MER na parametri C/N pri statickom prijíme DVB-T signálu s rôznymi únikovými kanálmi, LTE so šírkou pásma 1,4 MHz.

Pri mobilnom prijíme DVB-T signálu má tak isto veľký vplyv úroveň rušiaceho signálu LTE, možno vidieť na Obr. 18. V porovnaní so statickým prijímom majú však na mobilný príjem väčší dopad únikové kanály VU30 a MR100. Je to spôsobené vlastnosťami jednotlivých únikových kanálov. Keď sa však porovná únikový kanál VU30 s rýchlosťou 30 km/h a únikový kanál MR100 s rýchlosťou 100 km/h, tak je medzi nimi vidieť len malé zmeny. Oproti signálu s AWGN šumom je však rozdiel väčší. Z toho vyplýva, že pohyb má na DVB-T signál vplyv avšak rýchlosť pohybu v tomto prípade (malý Gaussovský posun) taký veľký vplyv nemá. Závislosť medzi únikovými kanálmi je znázornená na Obr. 19.

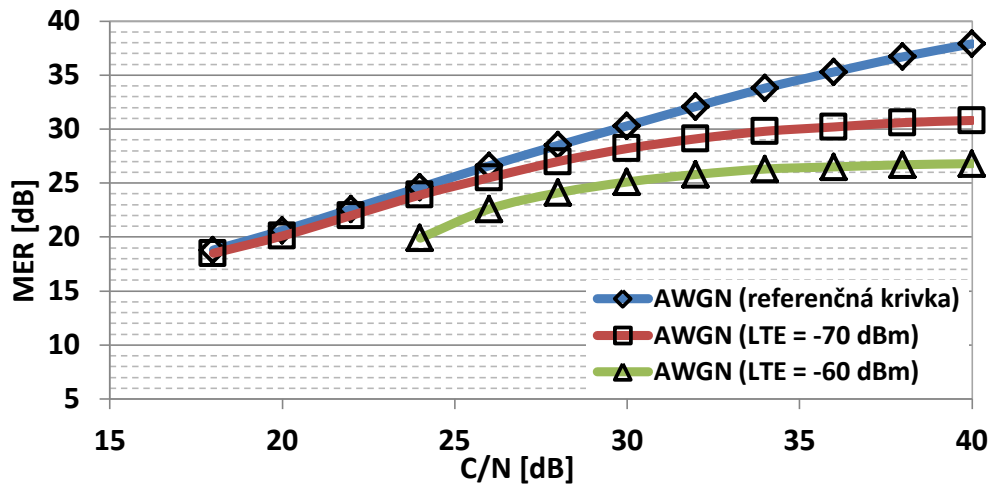


Obr. 18 Závislosť parametru MER na parametri C/N pri mobilnom prijíme DVB-T signálu s únikovým kanálom VU30, LTE so šírkou pásma 1,4 MHz.

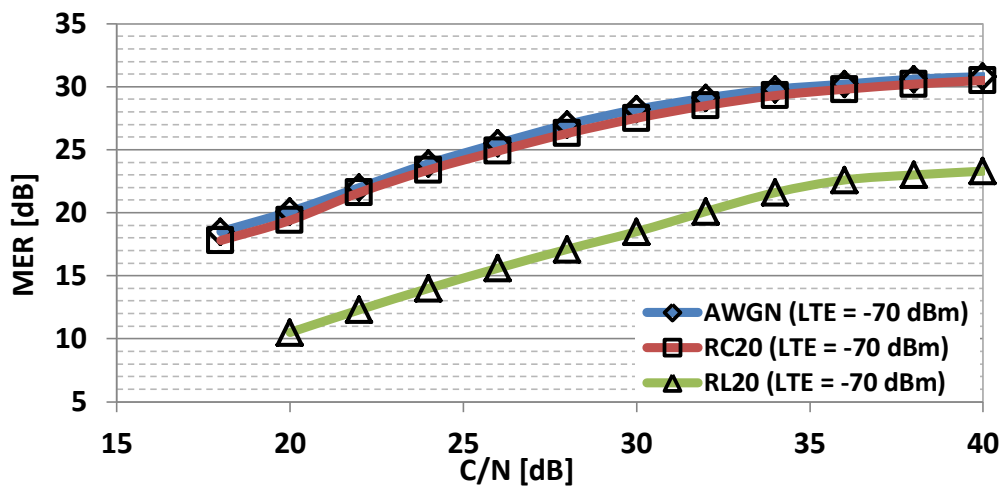


Obr. 19 Závislosť parametru MER na parametri C/N pri mobilnom prijíme DVB-T signálu s rôznymi únikovými kanálmi, LTE so šírkou pásma 1,4 MHz.

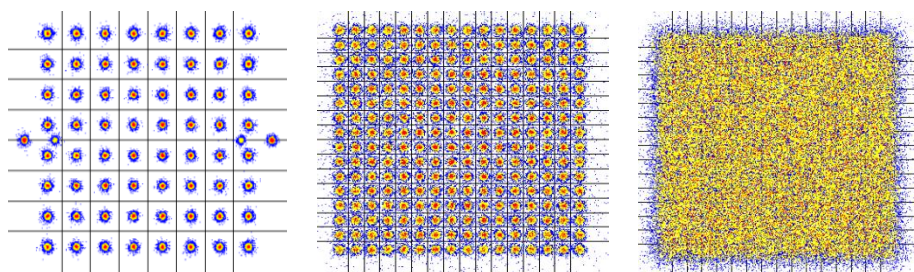
Vplyv úrovne rušiaceho signálu LTE na DVB-T2 signál so statickým príjmom je znázornený na Obr. 20. Tak ako aj v predchádzajúcich prípadoch má úroveň LTE signálu značný vplyv na parameter MER. Pri veľkých hodnotách C/N má dokonca DVB-T2 so statickým príjmom vyššie hodnoty MER ako pri signály DVB-T. V spodných hodnotách C/N sa to však vyrovnáva. Vplyv únikových kanálov na DVB-T2 signál (Obr. 21) pri statickom prijíme je podobný ako u DVB-T (statický príjem). Výrazný rozdiel medzi signálmi DVB-T a DVB-T2 pri statickom scenári je však pri úrovni signálu -50 dBm. V prípade DVB-T2 sa MER pri LTE = -50 dBm vôbec nedá namerať a pri únikovom kanáli RL20 sa nedajú namerať hodnoty MER ani pri LTE = -60 dBm. Je to spôsobené citlivosťou meracieho prístroja ale hlavne moduláciou, ktorá je v DVB-T2 nastavená na 256QAM. Vplyv rušenia je možné pozorovať a porovnať na konstelačných diagramoch, ktoré sú na Obr. 22. Na poslednom konstelačnom diagrame 256QAM (Obr. 22 c)) je vidieť rušenie, pri ktorom sa už MER nedá merať.



Obr. 20 Závislosť parametru MER na parametri C/N pri statickom prijíme DVB-T2 signálu s AWGN šumom, LTE so šírkou pásma 1,4 MHz.



Obr. 21 Závislosť parametru MER na parametri C/N pri statickom prijíme DVB-T2 signálu s rôznymi únikovými kanálmi, LTE so šírkou pásma 1,4 MHz.

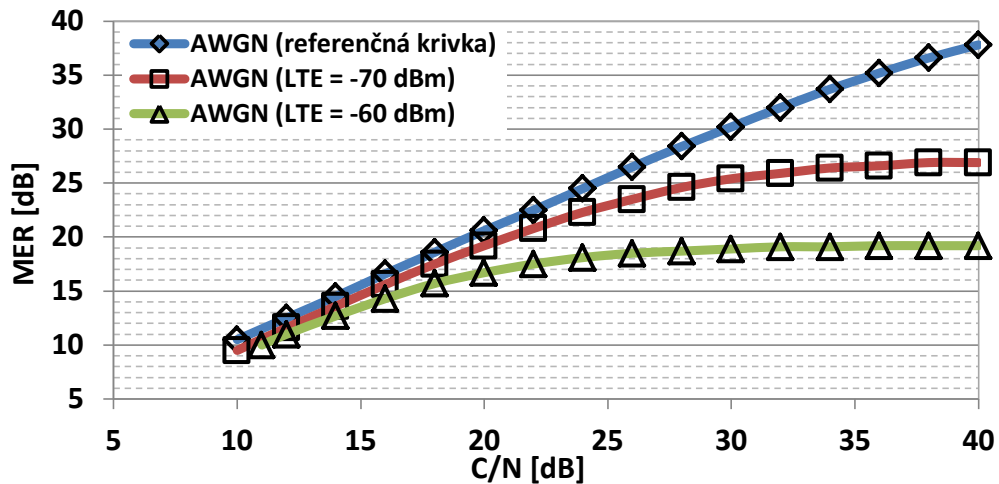


a) MER = 32,3

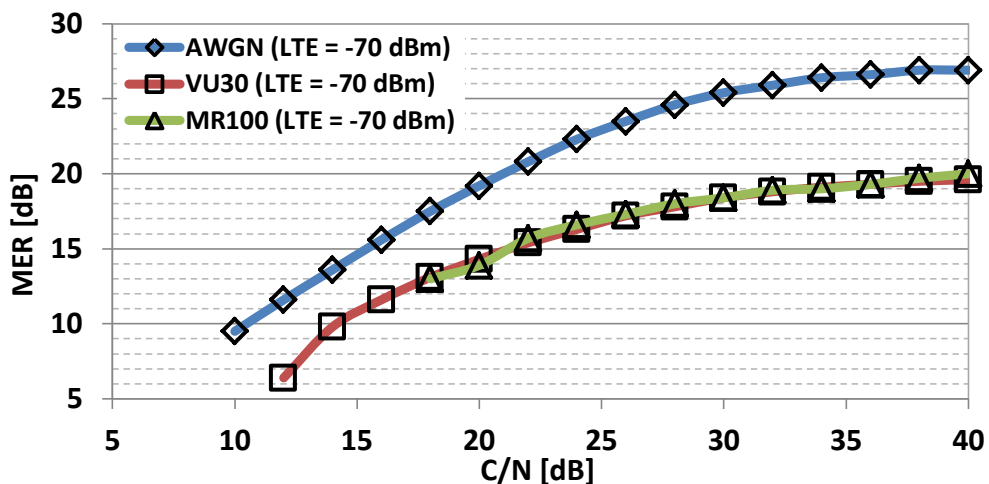
b) MER = 27,7

c) nejde merať

Obr. 22 Konstelačný diagram a) signál DVB-T rušený LTE= -70 dBm, b) signál DVB-T2 rušený LTE= -50 dBm, c) signál DVB-T2 rušený LTE= -50 dBm a C/N= 20 dB

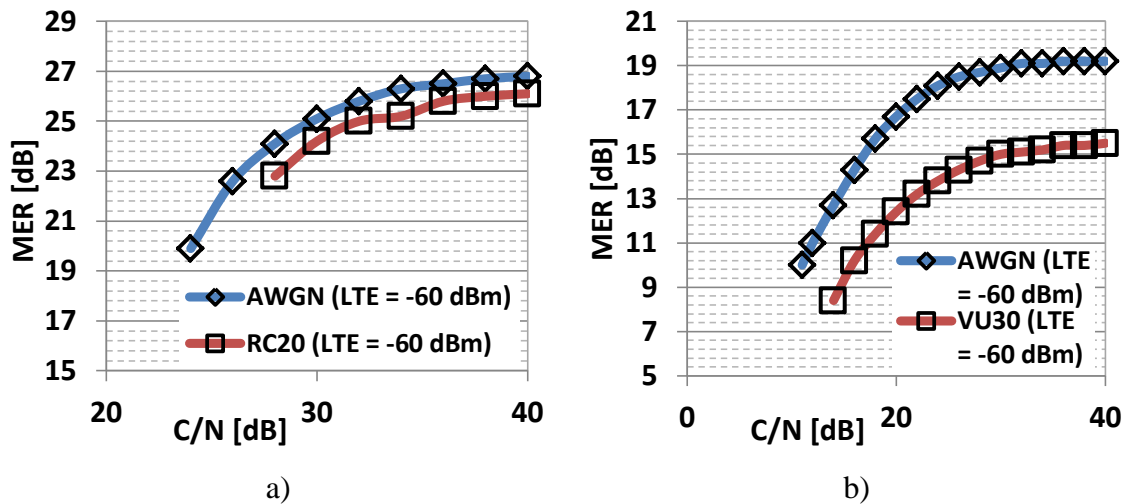


Obr. 23 Závislosť parametru MER na parametri C/N pri mobilnom prijíme DVB-T2 signálu s AWGN kanálom, LTE so šírkou pásma 1,4 MHz.



Obr. 24 Závislosť parametru MER na parametri C/N pri mobilnom prijíme DVB-T2 signálu s rôznymi únikovými kanálmi, LTE so šírkou pásma 1,4 MHz.

V prípade mobilného prijímu signálu DVB-T2 je to podobné ako u signálu DVB-T2 so statickým prijímom. Hodnoty MER v AWGN kanály sú porovnateľné, čo je vidieť na Obr. 23. Keď sa však pri DVB-T2 signály budú uvažovať vlastnosti únikových kanálov VU30 a MR100, bude vplyv na rušenie signálu väčší ako pri vlastnostiach únikových kanálov pri statickom DVB-T2 prijíme. Toto môžeme pozorovať na Obr. 24. Aj s meraním hodnôt pri úrovni LTE = -50 dBm je to podobné ako pri statickom prijíme DVB-T (nedajú sa korektne namerať) a pri LTE = -60 dBm je meranie obmedzené. Porovnanie tohto merania je na Obr. 25, kde sa dajú porovnať aj rušiaci vplyv pri LTE s úrovňou -60 dBm a použité únikové kanály. V grafoch sú znázornené len scenáre, ktoré ETL TV analyzátor ešte dokázal odmerať a analyzovať.



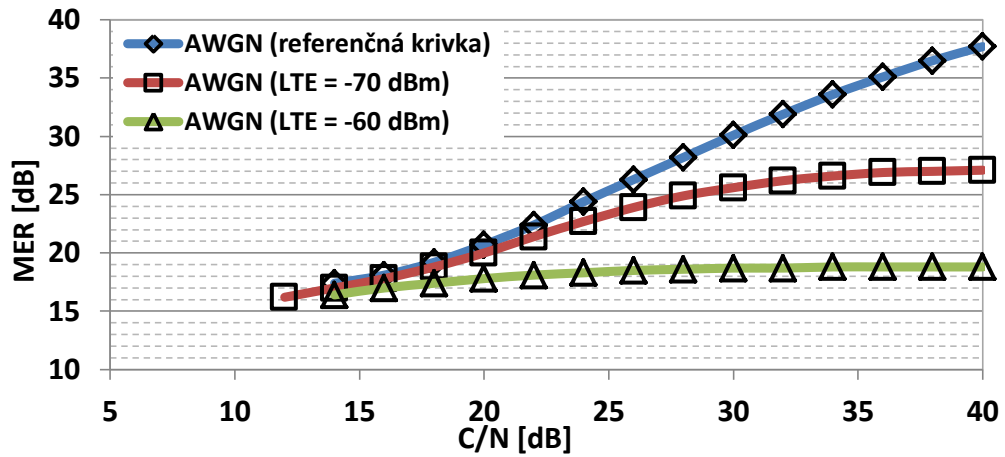
Obr. 25 Porovnanie a) statického, b) mobilného príjmu signálu DVB-T2 pri LTE = -60 dBm.

Z porovnania všetkých meraní vychádza, že pri úrovni LTE = -70 dBm sú rozdiely medzi jednotlivými nastaveniami DVB-T/T2 signálu mále avšak so zväčšovaním úrovne LTE signálu sú zmeny väčšie. Signál DVB-T v niektorých prípadoch je odolnejším oproti signálu DVB-T2. To platí aj o statickom príjme, ktorý je odolnejší voči mobilnému príjmu. Rozdiel je vidieť aj medzi jednotlivými únikovými kanálmi.

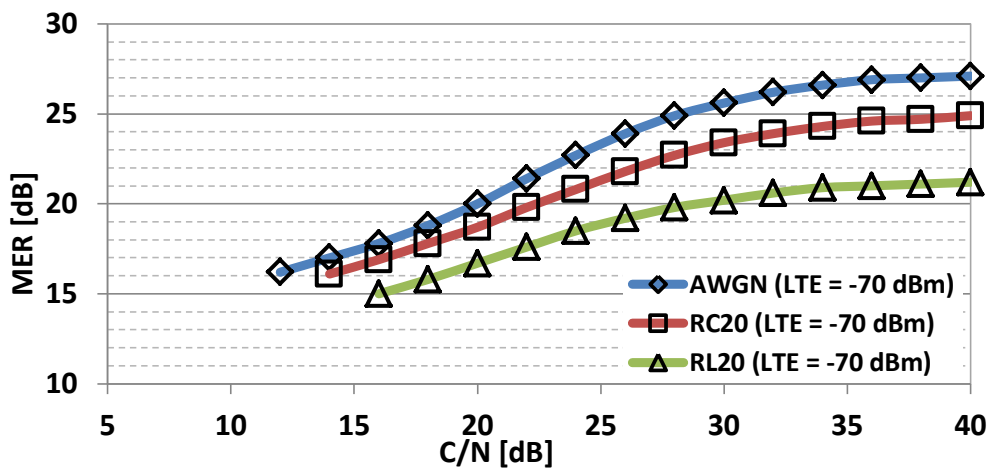
7.2.2 Rušiaci signál LTE so šírkou pásma 10 MHz

Referenčné krivky sú rovnaké ako pri šírke pásma LTE signálu 1,4 MHz a sú zobrazené v predchádzajúcej kapitole na Obr. 15. Pri statickom príjme DVB-T signálu má LTE signál so šírkou pásma 10 MHz podobný vplyv ako LTE signál so šírkou pásma 1,4 MHz. Rozdiel je asi okolo 3 dB pri vysokých hodnotách C/N. Pri znižovaní C/N sa tento rozdiel stráca. Väčší rozdiel je v tom, že pri rušiacom LTE signály so šírkou pásma 10 MHz sa nedajú odmerať údaje pri úrovni LTE = -50 dBm. To je vidieť na Obr. 26. Ďalší rozdiel je aj pri vplyve únikových kanálov na signál DVB-T. V tomto prípade má únikový kanál RC20 väčší vplyv ako signál rušený len AWGN kanálom a únikový kanál RL20 má najväčší negatívny vplyv. Toto je možné pozorovať na Obr. 27. Pri rušiacom signály LTE so šírkou pásma 1,4 MHz bol vplyv RC20 menší.

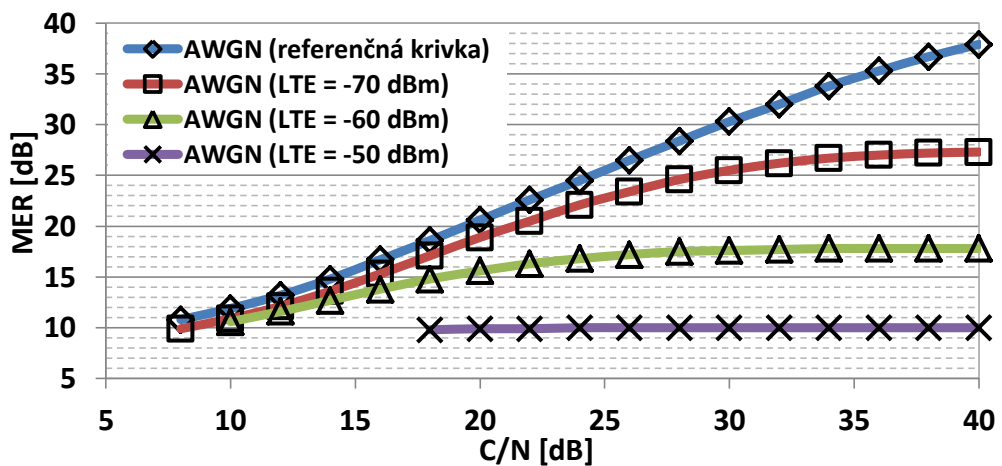
Pri mobilnom príjme DVB-T signálu môžeme zase vidieť vplyv úrovne rušiaceho LTE signálu. Pri vysokých hodnotách C/N sa dá mobilný príjem porovnať so statickým príjmom. Menší rozdiel nastáva pri nízkych hodnotách C/N, kde mobilný príjem signálu DVB-T klesá na nižšie hodnoty MER ako pri statickom príjme DVB-T signálu. Závislosti mobilného príjmu DVB-T signálu sú vidieť na Obr. 28. Zaujímavý je aj vplyv signálu LTE = -50 dBm AWGN kanálom. Počas znižovania C/N sa drží stále konštantne na nízkych hodnotách MER. V tomto prípade platí, že C/N nemá na znižovanie MER vplyv. Únikové kanály pri signály so šírkou pásma 10 MHz (možno vidieť na Obr. 29) ovplyvňujú hodnotu MER viac ako pri signály so šírkou pásma 1,4 MHz. Pri porovnaní únikových kanálov pri mobilnom príjme DVB-T signálu platí to isté aj pri LTE signály so šírkou pásma 1,4 aj 10 MHz. Únikové kanály majú porovnateľný vplyv na parameter MER. Pri úrovni LTE = -60 dBm však medzi jednotlivými šírkami pásma LTE signálu nastávajú zmeny.



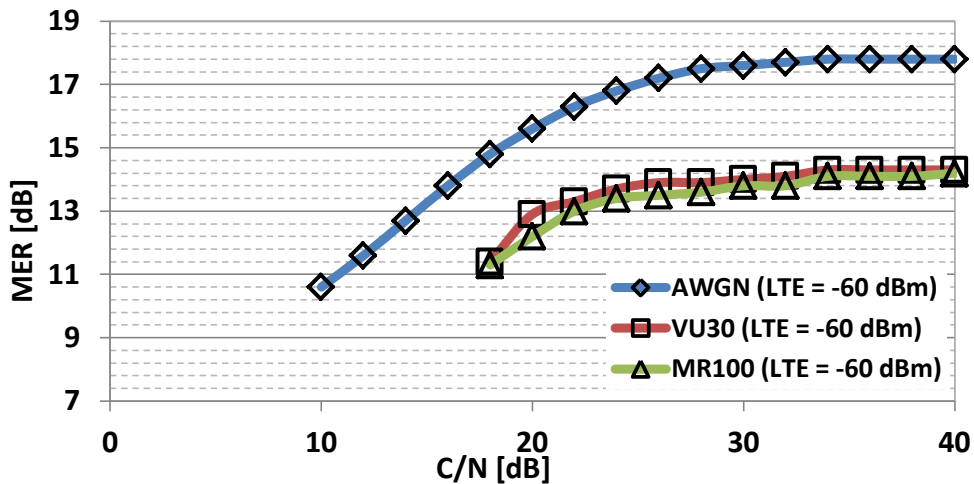
Obr. 26 Závislosť parametru MER na parametri C/N pri statickom prijíme DVB-T signálu s AWGN kanálom, LTE so šírkou pásma 10 MHz.



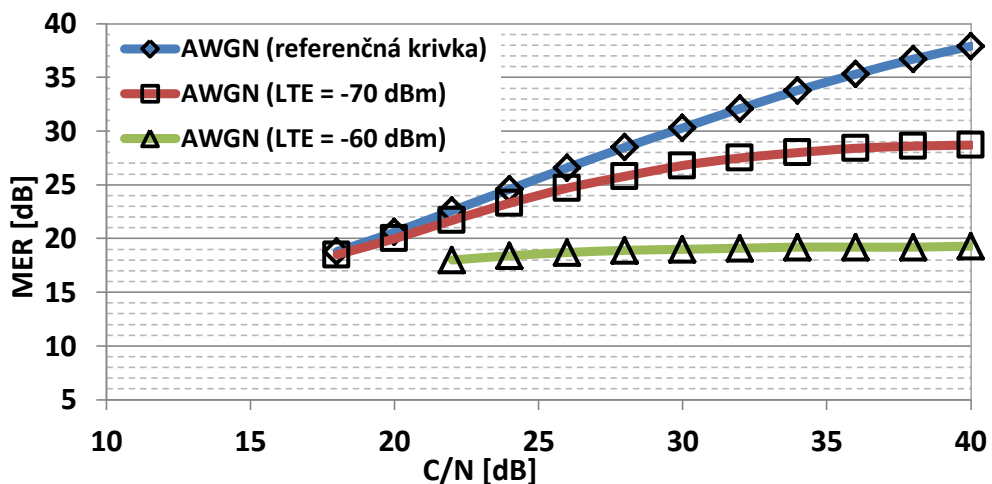
Obr. 27 Závislosť parametru MER na parametri C/N pri statickom prijíme DVB-T signálu s rôznymi únikovými kanálmi, LTE so šírkou pásma 10 MHz.



Obr. 28 Závislosť parametru MER na parametri C/N pri mobilnom prijíme DVB-T signálu s AWGN kanálom, LTE so šírkou pásma 10 MHz.

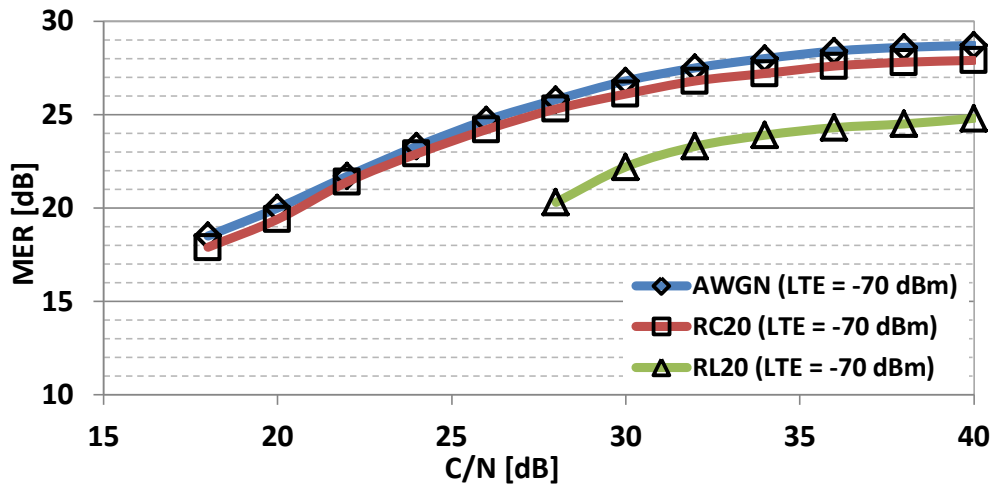


Obr. 29 Závislosť parametru MER na parametri C/N pri mobilnom prijíme DVB-T signálu s rôznymi únikovými kanálmi, LTE so šírkou pásma 10 MHz.

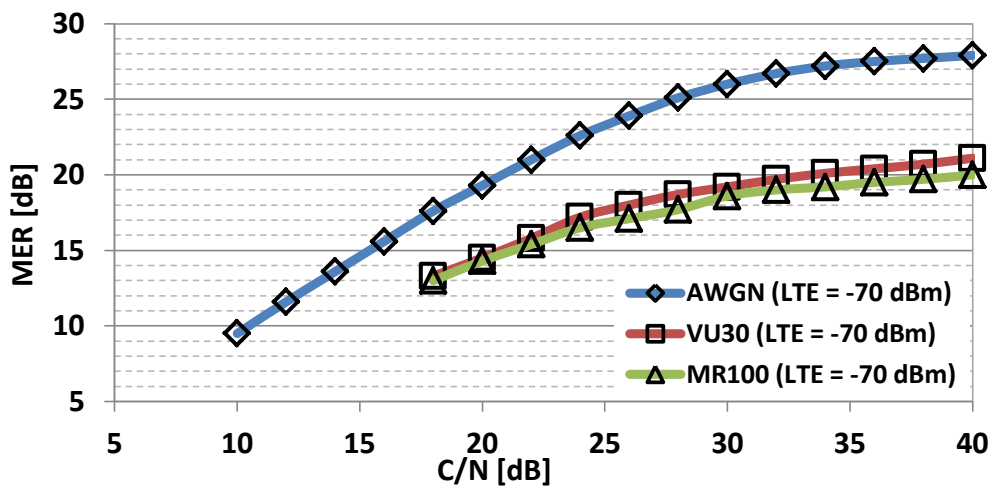


Obr. 30 Závislosť parametru MER na parametri C/N pri statickom prijíme DVB-T2 signálu s AWGN kanálom, LTE so šírkou pásma 10 MHz.

Pri signály DVB-T2 so statickým príjmom sa tvary kriviek poklesu MER podobajú, avšak pri vysokých hodnotách C/N dosahuje DVB-T2 signál vyššie hodnoty MER ako signál DVB-T. Pri znižovaní C/N sa však signály DVB-T aj DVB-T2 vyrovnávajú. Graf jednotlivých závislostí je vidieť na Obr. 30. Signál so šírkou 10 MHz má na DVB-T2 signál so statickým príjmom väčší vplyv ako signál LTE so šírkou pásma 1,4 MHz. Aj tento vplyv však s klesajúcim C/N klesá. Únikový signál RC20 sa v tomto prípade zase podobá signálu DVB-T2 rušenému len AWGN kanálom, čo je oproti signálu DVB-T rozdiel. Pri únikovom kanály RL20 je však pokles MER väčší tak ako aj v prípade signálu DVB-T. Graf je možno vidieť na Obr. 31.



Obr. 31 Závislosť parametru MER na parametri C/N pri statickom prijíme DVB-T2 signálu s rôznymi únikovými kanálmi, LTE so šírkou pásma 10 MHz.



Obr. 32 Závislosť parametru MER na parametri C/N pri mobilnom prijíme DVB-T2 signálu s rôznymi únikovými kanálmi, LTE so šírkou pásma 10 MHz.

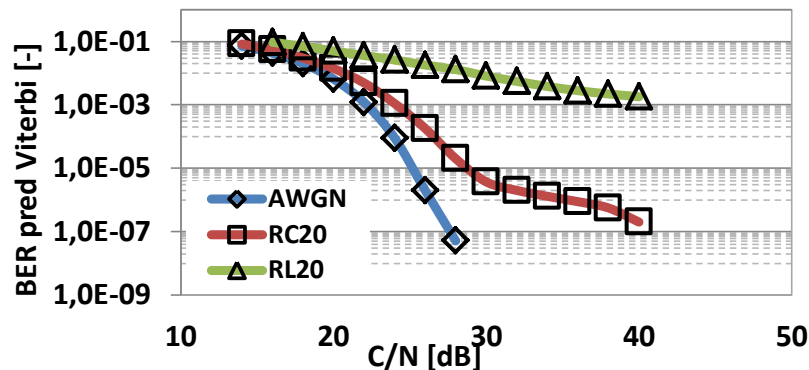
Úroveň signálu má podobný vplyv ako pri všetkých doterajších meraniach. Zaujímavý rozdiel je však medzi signálmi DVB-T a DVB-T2 s mobilným prijímom pri zohľadnení únikových kanálov VU30 a MR100. To je vidieť na obrázku Obr. 32. Pri vysokých hodnotách C/N je rozdiel okolo 5 dB, postupným zvyšovaním C/N sa tento rozdiel vyrovnáva. Toto platí ako pre únikový kanál VU30 tak aj pre únikový kanál MR100, lebo sú si veľmi podobné, čo bolo dokázané aj v predchádzajúcich meraniach.

7.3 Meranie parametru BER

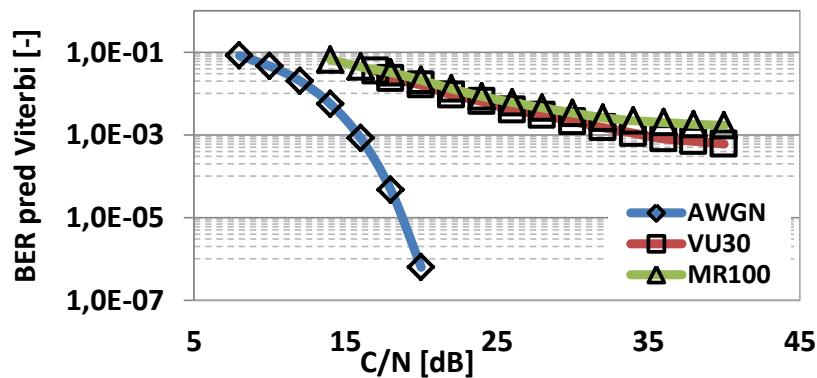
7.3.1 Rušiaci signál LTE so šírkou pásma 1,4 MHz

V tomto scenári sa merala bitová chybovosť BER ako pred tak aj po Viterbiho respektíve LDPC dekodéry. Hodnoty pred dekodérmi boli vynesené do grafov a budú ďalej porovnávané. Z hodnôt po dekodéroch sa vytvorili tabuľky QEF príjmov. Tak ako v predchádzajúcom prípade boli na začiatku odmerané referenčné hodnoty, ktoré sú zobrazené na Obr. 33.

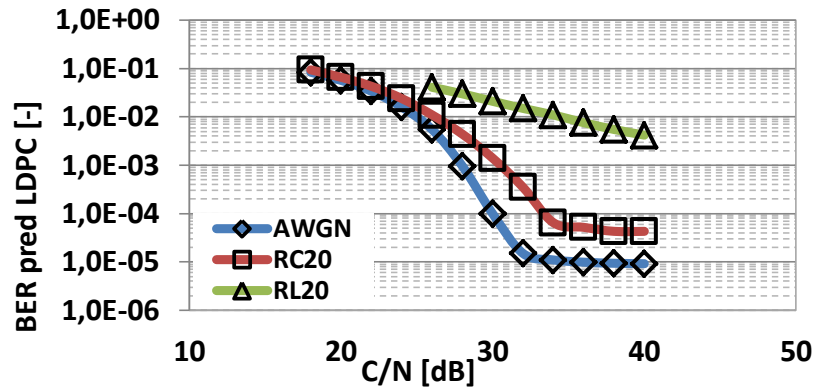
Pri statickom prijíme signálu DVB-T sa mení chybovosť BER hlavne u referenčných kriviek. Pri koexistencii so signálom LTE sa drží na vysokých hodnotách (rádovo 10^{-2}). Keďže už je hodnota BER vysoká, zvýšením signálu dosiahneme len malú zmenu parametru BER. Toto je možné vidieť na Obr. 34. Vplyv únikového kanálu RC20 je porovnateľný s AWGN kanálom. Únikový kanál RL20 má na signál DVB-T najväčší vplyv ako bolo preukázané aj pri meraní parametru MER. Čím sa však zväčšuje úroveň LTE signálu tým sa vplyv vyrovnáva. Porovnanie je vidieť na Obr. 35.



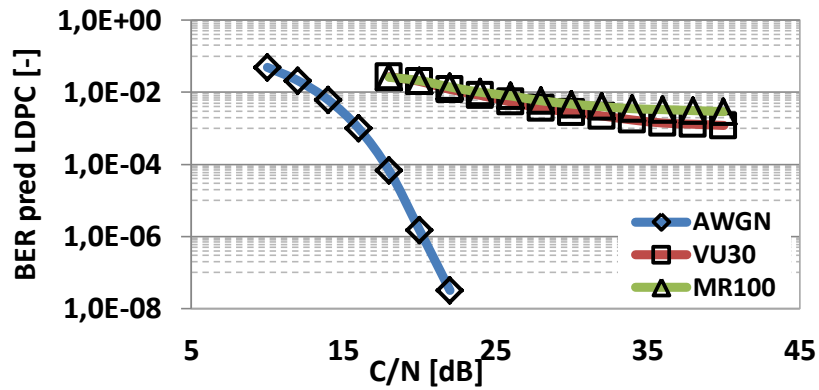
a) DVB-T (statický scenár)



b) DVB-T (mobilný scenár)

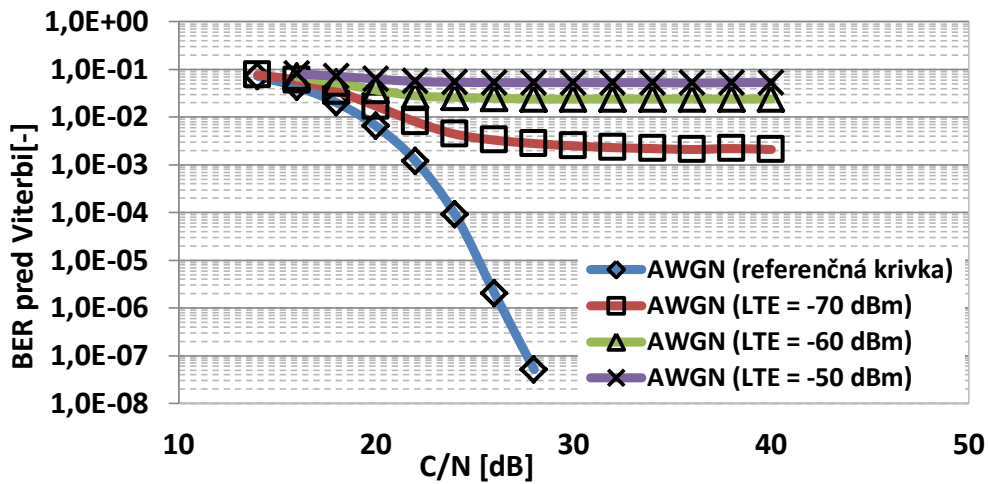


c) DVB-T2 (statický scenár)

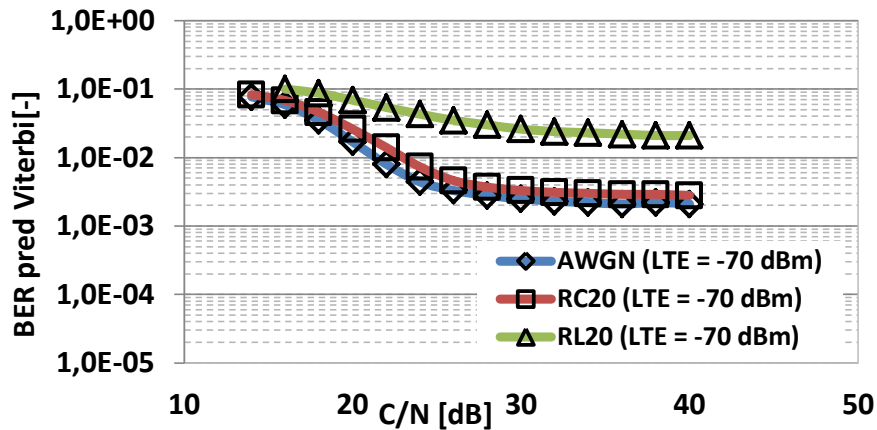


d) DVB-T2 (mobilný scenár)

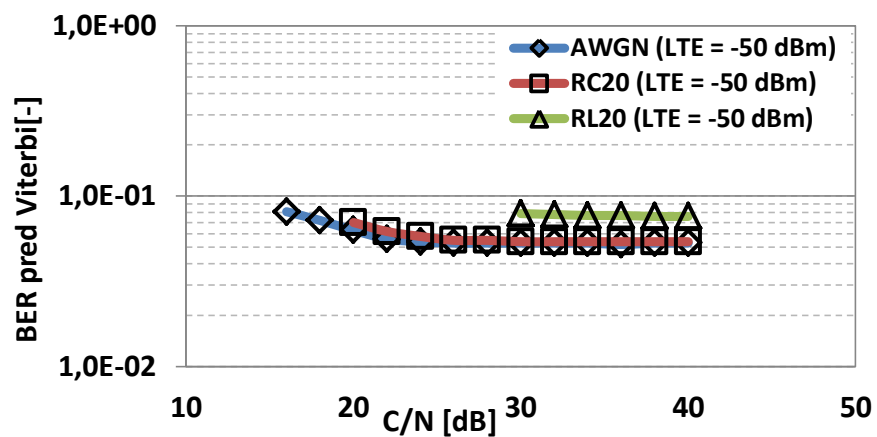
Obr. 33 Referenčné hodnoty pre a) statický príjem DVB-T, b) mobilný príjem DVB-T, c) statický príjem DVB-T2, d) mobilný príjem DVB-T2 signálu.



Obr. 34 Závislosť parametru BER na parametru C/N pri statickom prijme signálu DVB-T s AWGN kanálom, LTE so šírkou pásma 1,4 MHz.



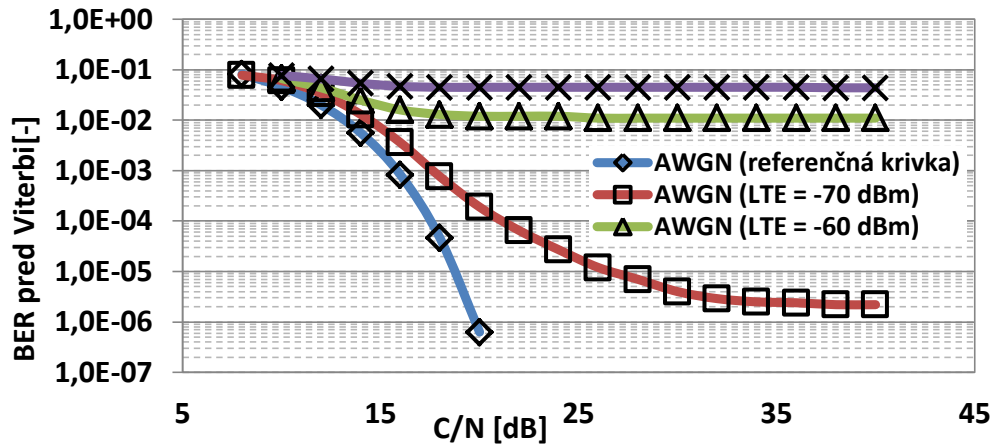
a)



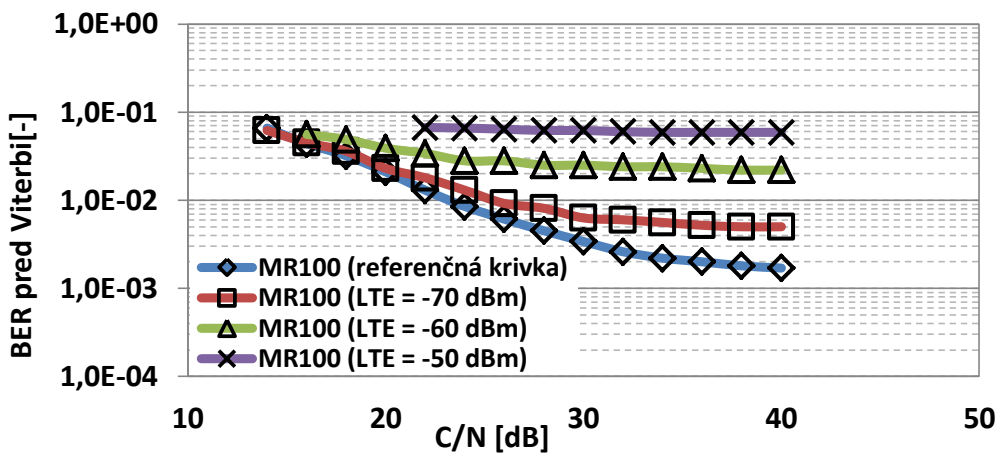
b)

Obr. 35 Závislosť parametru BER na parametri C/N a) LTE = -70 dBm, b) LTE = -50 dBm pri statickom príjme DVB-T a rôznych únikových kanáloch.

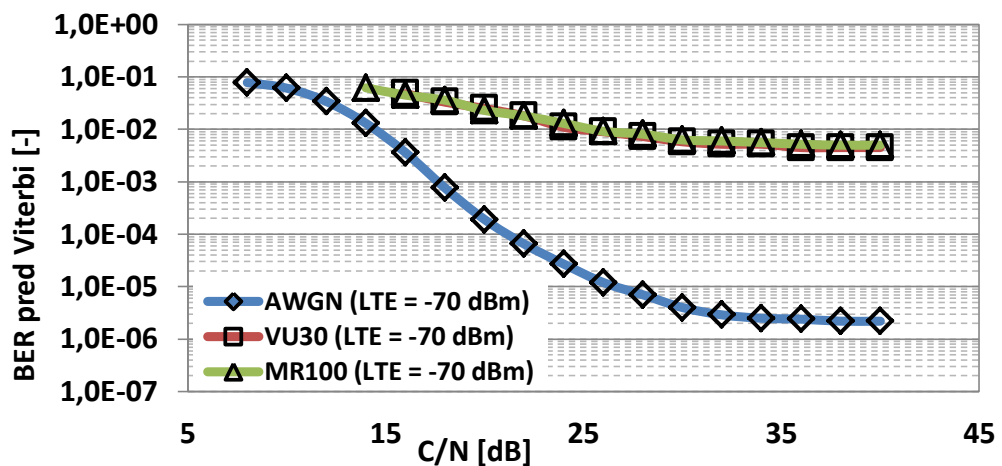
Z Obr. 36 je vidieť, že mobilný príjem TV signálu DVB-T je odolnejší voči bitovej chybovosti ako v prípade statického scenára. Pri úrovni LTE signálu -60 a -50 dBm je vplyv skoro rovnaký. Rozdiel je však pri referenčnej krivke a pri koexistencii so signálom LTE = -70 dBm. Referenčná krivka má po hodnotu C/N = 20 dB nízku nemerateľnú hodnotu, potom prudko klesá. Pri signále LTE = -70 dBm je hodnota BER pri mobilnom príjme o tri rády nižšia ako pri statickom príjme a postupne klesá. Pri uvažovaní kanálových únikov sa však aj pri týchto dvoch prípadoch BER parameter zvýši, možno vidieť na Obr. 37. Vplyv vlastností únikových kanálov VU30 a MR100 na DVB-T signál je opäť podobný, avšak oproti referenčnej krivke sú v týchto únikových kanáloch namerané oveľa väčšie hodnoty BER, čo je vidieť na Obr. 38. S postupným zväčšovaním úrovne LTE signálu sa ich vplyv vyrovnáva len rušeniu AWGN kanálom, čo bolo pozorované aj v predchádzajúcom prípade.



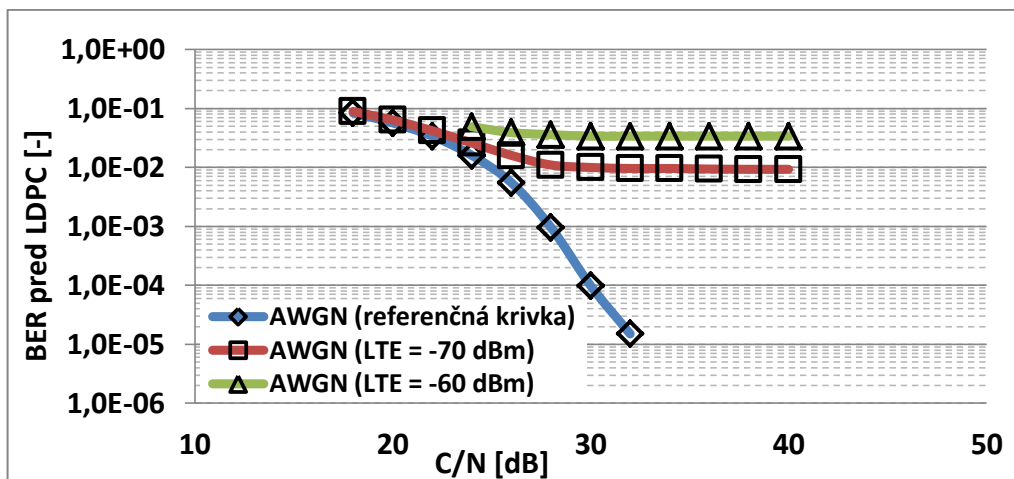
Obr. 36 Závislosť parametru BER na parametri C/N pri mobilnom prijíme signálu DVB-T s AWGN kanálom, LTE so šírkou pásma 1,4 MHz.



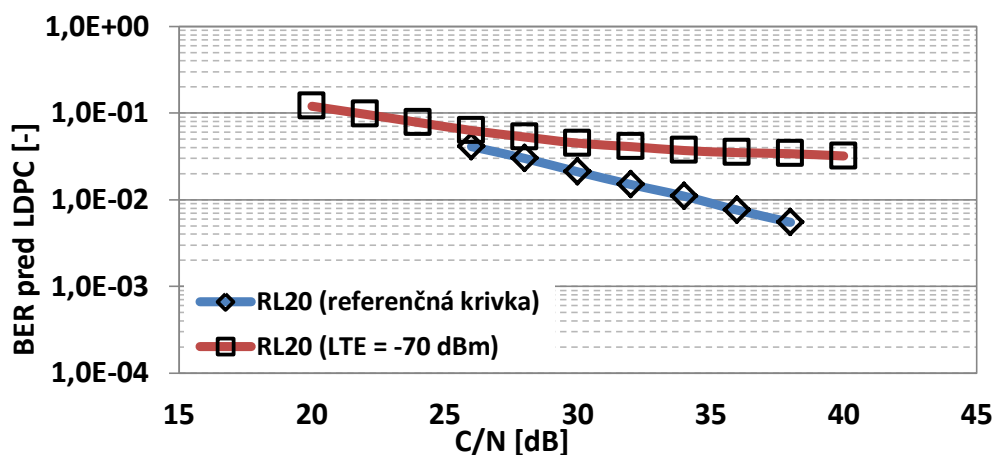
Obr. 37 Závislosť parametru BER na parametri C/N pri mobilnom prijíme signálu DVB-T s únikovým kanálom MR100, LTE so šírkou pásma 1,4 MHz.



Obr. 38 Závislosť parametru BER na parametri C/N pri rôznych únikových kanáloch pre mobilný príjem signálu DVB-T, LTE so šírkou pásma 1,4 MHz.



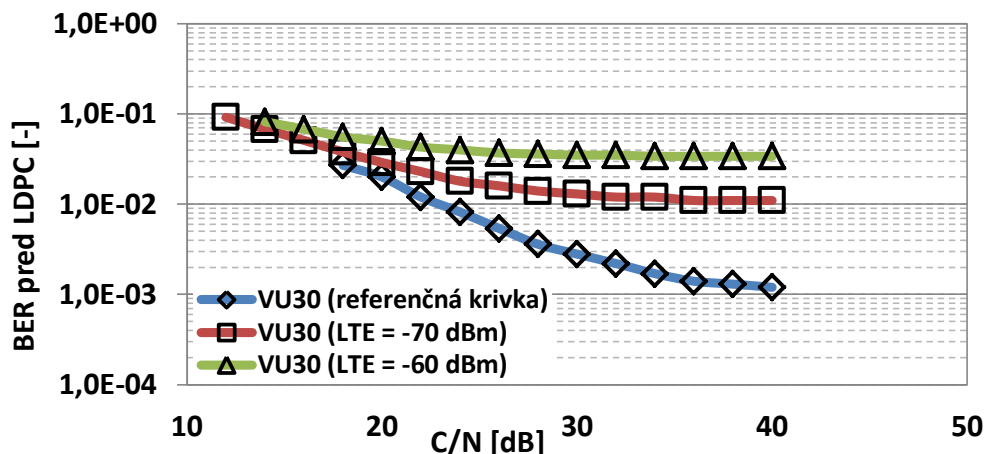
Obr. 39 Závislosť parametru BER na parametri C/N pri statickom príjme signálu DVB-T2 s AWGN kanálom, LTE so šírkou pásma 1,4 MHz.



Obr. 40 Závislosť parametru BER na parametri C/N pri statickom príjme signálu DVB-T2 s únikovým kanálom RL20, LTE so šírkou pásma 1,4 MHz.

Pri statickom príjme DVB-T2 signálu boli namerané hodnoty, ktoré sa dajú porovnať so statickým príjmom signálu DVB-T. Koexistenčné krivky sú podobné, líši sa len referenčná krivka, ktorá pri signály DVB-T2 začne klesať už u vyšších hodnôt C/N. Toto je vidieť na Obr. 39. Keďže už pri AWGN kanály nadobúda BER vysoké hodnoty, pri únikových kanáloch RC20 a RL20 budú výsledky podobné. Meniť sa bude len referenčná krivka pri kanálovom úniku RL20, ktorá bude nízka aj pri vyšších hodnotách C/N (Obr. 40). Ako aj v predchádzajúcich prípadoch RC20 sa podobá DVB-T signálu len s AWGN kanálom a RL20 má na hodnotu BER najväčší vplyv.

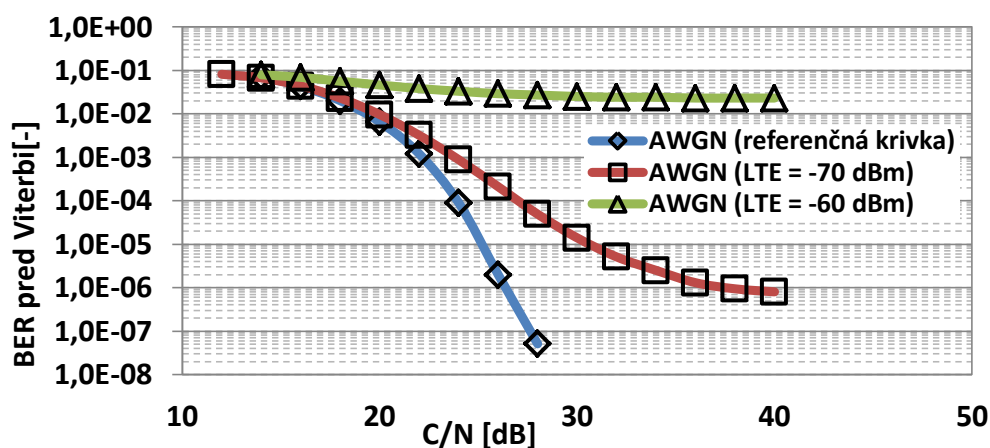
Pri mobilnom príjme sa signál DVB-T aj DVB-T2 iba s AWGN kanálom podobajú. U signálu DVB-T2 však nie je schopný prístroj kvôli citlivosti odmerať hodnoty pri rušiacom signály LTE s úrovňou -50 dBm. Pri únikovom kanály VU30 nastávajú pri týchto dvoch signáloch menšie rozdiely. Hodnoty BER pri signály DVB-T2 rušenom signálom LTE = -70 dBm sú vyššie ako pri tom istom prípade len so signálom DVB-T. Tak isto sa líšia aj referenčné krivky bez rušenia. Pri zvyšovaní úrovne LTE signálu sa tento rozdiel vyrovnáva. Toto je možné pozorovať na Obr. 41.



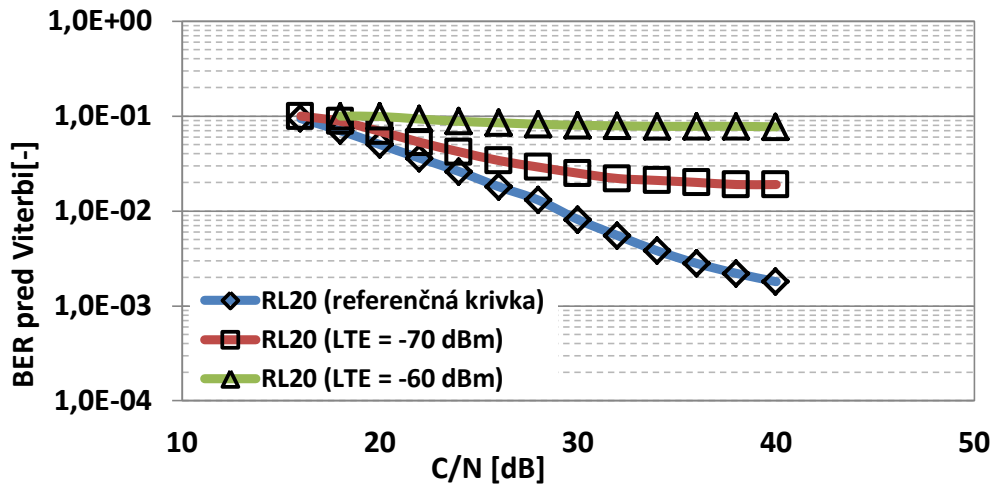
Obr. 41 Závislosť parametru BER na parametri C/N pri mobilnom prijíme signálu DVB-T2 s únikovým kanálom VU30, LTE so šírkou pásma 1,4 MHz.

7.3.2 Rušiaci signál LTE so šírkou pásma 10 MHz

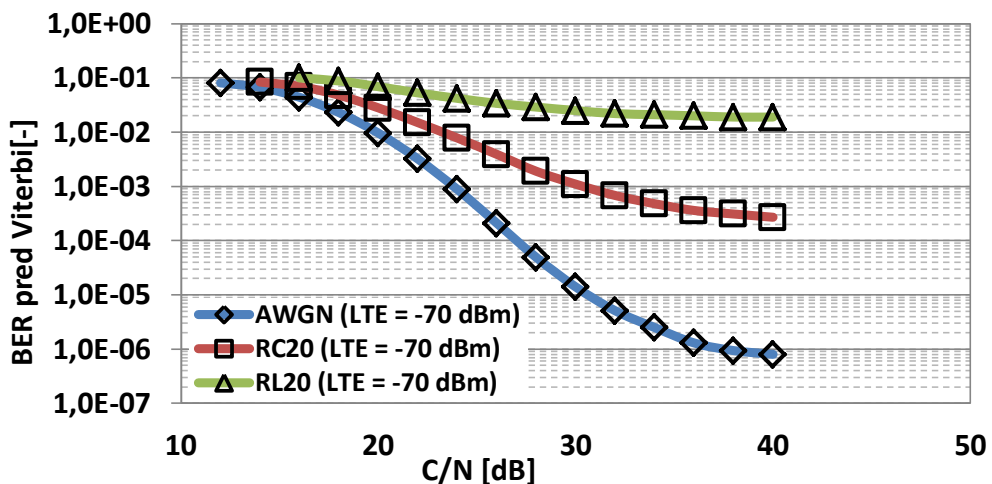
Na statický príjem DVB-T signálu má rušiaci signál LTE so šírkou pásma 10 MHz menší vplyv ako rušiaci signál so šírkou pásma 1,4 MHz. Toto je dobre vidieť pri rušení signálom LTE = -70 dBm s AWGN kanálom. V týchto prípadoch je rozdiel značný. Na signál DVB-T rušený signálom LTE = -60 dBm majú už jednotlivé šírky pásma podobný veľmi silný vplyv. Graf závislostí pri rušiacom signály so šírkou pásma 10 MHz je možné vidieť na Obr. 42. Keď sa zoberú do úvahy únikové kanály tak sa tento rozdiel v rušení znižuje. Graf závislostí pri rušiacom signály so šírkou pásma 10 MHz spolu s únikovým kanálom RL20 je možné vidieť na Obr. 43. Rozdiel je aj medzi vplyvom jednotlivých únikových kanálov. Zatiaľ čo pri signály LTE so šírkou pásma 1,4 MHz mal na DVB-T signál väčší vplyv RL20 únikový kanál a RC20 sa podobal len na AWGN kanálu, pri signály LTE so šírkou pásma 10 MHz má RC20 porovnateľne väčší vplyv na signál DVB-T ako len signál s AWGN kanálom. Únikový kanál RL20 má však pri oboch prípadoch najviac ovplyvňuje (negatívne) kvalitu prijímaného TV signálu. Toto je možné vidieť na Obr. 44.



Obr. 42 Závislosť parametru BER na parametri C/N pri statickom prijíme signálu DVB-T s AWGN kanálom, LTE so šírkou pásma 10 MHz.

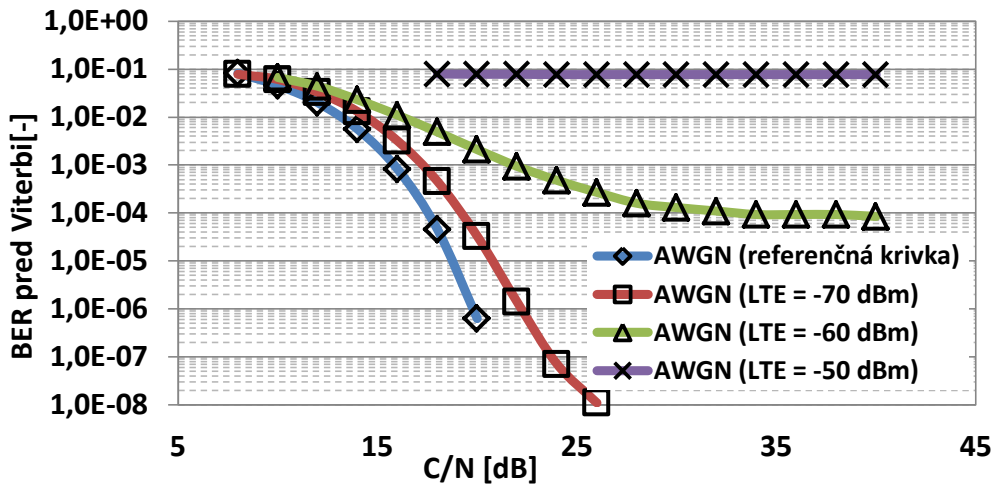


Obr. 43 Závislosť parametru BER na parametri C/N pri statickom prijme signálu DVB-T s únikovým kanálom RL20, LTE so šírkou pásma 10 MHz.

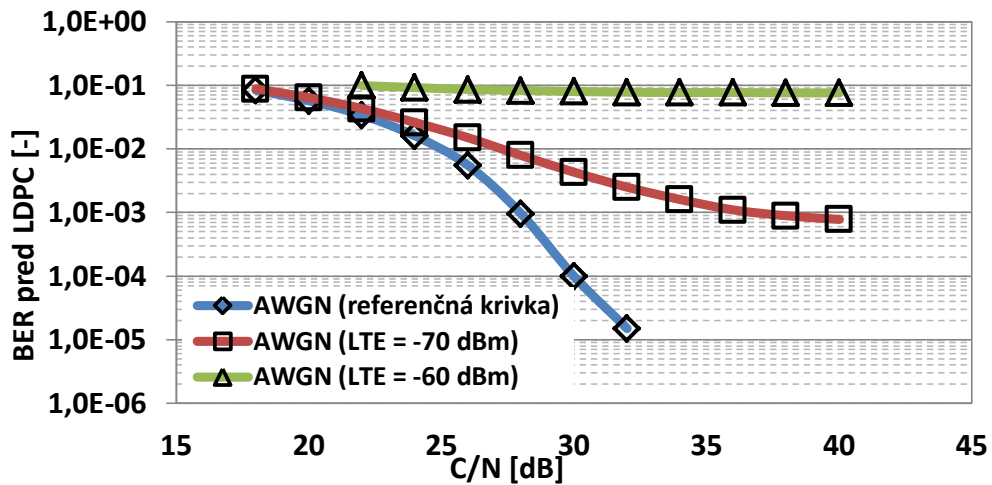


Obr. 44 Závislosť parametru BER na parametri C/N pri rôznych únikových kanáloch pre statický príjem signálu DVB-T, LTE so šírkou pásma 10 MHz.

Podobne ako v predchádzajúcom prípade aj v prípade mobilného príjmu DVB-T signálu platí, že signál LTE so šírkou pásma 1,4 MHz ovplyvňuje parameter BER viac ako signál LTE so šírkou pásma 10 MHz. V tomto prípade to dokonca môžeme pozorovať aj pri LTE signály s úrovňou -60 dBm. Závislosť rušenia DVB-T signálu s AWGN kanálom signálom LTE so šírkou pásma 10 MHz je vidieť na Obr. 45. Pri únikových kanáloch sa jednotlivé rozdiely znižujú. Vplyv vlastností únikových kanálov VU30 a MR100 na DVB-T signál je však podobný u oboch širok pásma LTE signálu. Oba únikové kanále majú takmer rovnaký vplyv, avšak oveľa väčší ako pri TV signály v DVB-T štandarde v prípade, keď sa uvažuje len AWGN kanál.

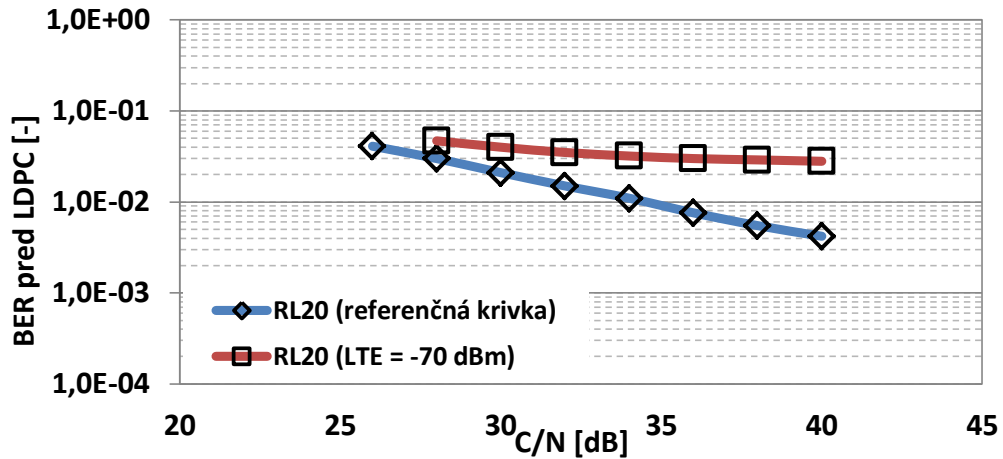


Obr. 45 Závislosť parametru BER na parametri C/N pri mobilnom prijíme signálu DVB-T s AWGN kanálom, LTE so šírkou pásma 10 MHz.

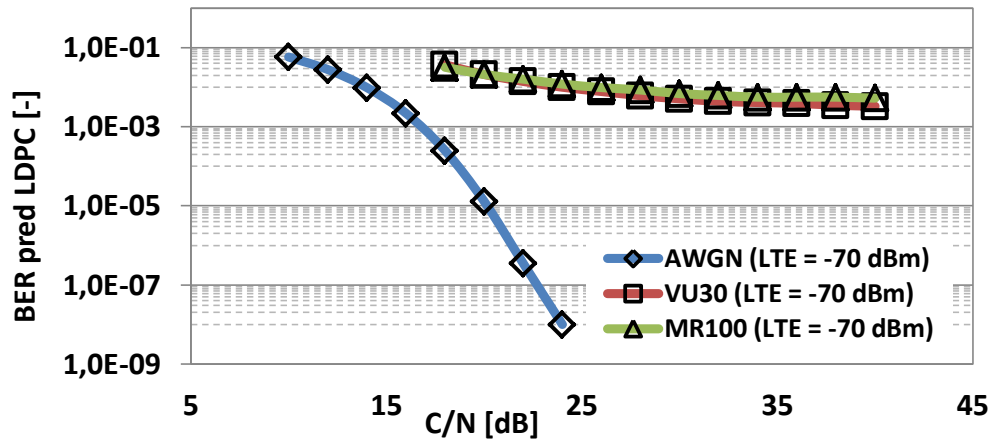


Obr. 46 Závislosť parametru BER na parametri C/N pri statickom prijíme signálu DVB-T2 s AWGN kanálom, LTE so šírkou pásma 10 MHz.

Aj pri statickom prijíme signálu DVB-T2 môžeme vidieť ako v predchádzajúcich prípadoch, že signál LTE so šírkou pásma 10 MHz ruší DVB-T signál menej. Rozdiely však nie sú také veľké ako v predchádzajúcich prípadoch. Pri porovnaní statických scenárov DVB-T a DVB-T2 je možné vidieť, že DVB-T2 signál je menej odolnejší proti rušeniu, čo znamená že hodnoty BER dosahujú väčšie hodnoty. Toto je vidieť na Obr. 46. Aj pri únikovom kanály RL20 sa nedajú odmerať hodnoty BER pri signály s úrovňou -60 dBm, čo naopak u signálu DVB-T ešte možné je. Graf závislostí pri DVB-T2 signály s únikovým kanálom RL20 je na Obr. 47.



Obr. 47 Závislosť parametru BER na parametri C/N pri statickom príjme signálu DVB-T2 s únikovým kanálom RL20, LTE so šírkou pásma 10 MHz.



Obr. 48 Závislosť parametru BER na parametri C/N pri rôznych únikových kanáloch pre mobilný príjem signálu DVB-T2, LTE so šírkou pásma 10 MHz.

Aj v poslednom prípade u mobilného príjmu DVB-T2 signálu je rušenie LTE signálom so šírkou pásma 1,4 MHz podstatne horšie ako so šírkou pásma 10 MHz. V prípadoch s mobilným príjmom je tento rozdiel ešte väčší ako pri statickom príjme signálu DVB-T/T2. Postupným pridávaním únikových kanálov sa však rušenie vyrovnáva a je v oboch prípadoch veľké. Jednotlivé únikové kanály majú veľký vplyv na rušenie TV signálu v DVB-T2 štandarde pri mobilnom príjme, čo je vidieť na Obr. 48. Vlastnosti oboch kanálov sú však podobné a nie je medzi nimi veľký rozdiel.

Pri skúmaní parametru BER sa zistilo, že úzkopásmové rušenie má na signál DVB-T/T2 väčší vplyv ako širokopásmové rušenie. Je to asi spôsobené tým, že jednotlivé úrovne signálov nie sú odmerané v prenosovom kanály a preto nastavená hodnota úrovne LTE signálu sa pri úzkopásmovom signály nakumuluje do menšej šírky pásma. To znamená, že energia bude viac koncentrovaná a viac bude ovplyvňovať DVB-T/T2 signál pri strednej frekvencii 738 MHz, zatiaľ čo pri širokopásmovom rušení je energia rovnomerne rozložená po celej šírke pásma 10 MHz. Z toho vyplýva, že ruší DVB-T/T2 signál aj po okrajoch kde sa nenachádzajú dôležité nosné pre prenos signálu.

7.3.3 Tabuľky QEF príjmu a iterácie

Ako už bolo spomenuté parameter BER sa meral aj po dekodéry Viterbi respektíve LDPC. Z týchto údajov boli vytvorené tabuľky QEF (Quasi-Error Free) príjmov. QEF príjem je takmer bezchybný príjem signálu keď za hodinu vysielania nastane maximálne jedna chyba v prenose. Pri DVB-T signály je QEF príjem splnený ak je hodnota BER menšia ako $2 \cdot 10^{-4}$. U signálu DVB-T2 je QEF príjem splnený ak je hodnota BER menšia ako $1 \cdot 10^{-7}$. Jednotlivé minimálne hodnoty parametra C/N pre QEF príjem je možné vidieť v Tabuľke 6 až v Tabuľke 9. Miesta v tabuľkách označené symbolom (-) sa nedali odmerať, lebo signál je tak silno rušený, že sa buď nedá odmerať alebo nie je vôbec splnený QEF príjem.

| | DVB-T so statickým príjmom | | | DVB-T s mobilným príjmom | | |
|---------------------------|----------------------------|----------|----------|--------------------------|----------|----------|
| | AWGN | RC20 | RL20 | AWGN | VU30 | MR100 |
| | C/N [dB] | C/N [dB] | C/N [dB] | C/N [dB] | C/N [dB] | C/N [dB] |
| Referenčná hodnota | 15,8 | 17,2 | 19,6 | 10,5 | 17,8 | 19,4 |
| LTE (-70 dB) | 18,4 | 19,3 | 22,9 | 12,9 | 19,7 | 20,1 |
| LTE (-60 dB) | - | - | - | 15,1 | - | - |
| LTE (-50 dB) | - | - | - | - | - | - |

Tabuľka 6 Tabuľka QEF príjmu pre signál DVB-T rušený signálom LTE so šírkou pásma 1,4 MHz

| | DVB-T2 so statickým príjmom | | | DVB-T2 s mobilným príjmom | | |
|---------------------------|-----------------------------|----------|----------|---------------------------|----------|----------|
| | AWGN | RC20 | RL20 | AWGN | VU30 | MR100 |
| | C/N [dB] | C/N [dB] | C/N [dB] | C/N [dB] | C/N [dB] | C/N [dB] |
| Referenčná hodnota | 16,5 | 17 | 18,3 | 9,5 | 19,7 | 20,4 |
| LTE (-70 dB) | 17 | 20,2 | 21,4 | 10,3 | 25,2 | 26,8 |
| LTE (-60 dB) | - | - | - | 12,8 | - | - |
| LTE (-50 dB) | - | - | - | - | - | - |

Tabuľka 7 Tabuľka QEF príjmu pre signál DVB-T2 rušený signálom LTE so šírkou pásma 1,4 MHz

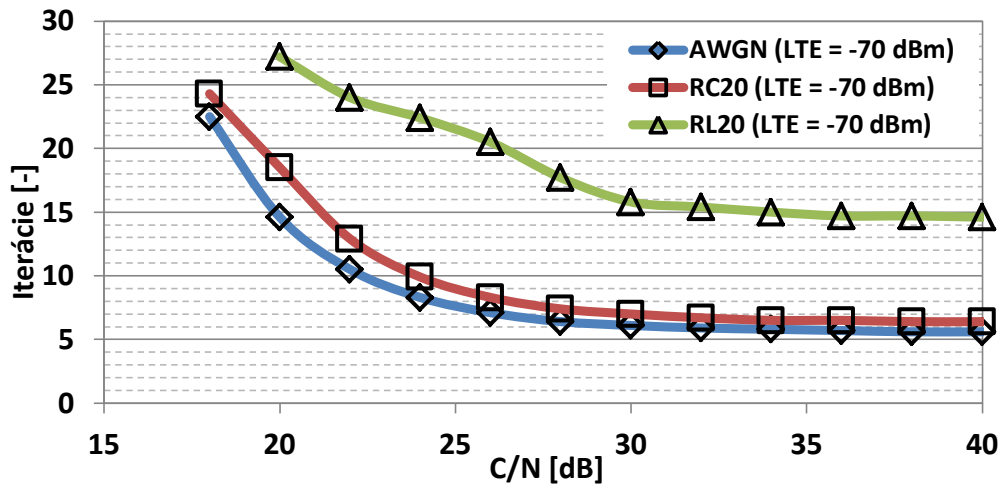
| | DVB-T so statickým príjmom | | | DVB-T s mobilným príjmom | | |
|---------------------------|----------------------------|----------|----------|--------------------------|----------|----------|
| | AWGN | RC20 | RL20 | AWGN | VU30 | MR100 |
| | C/N [dB] | C/N [dB] | C/N [dB] | C/N [dB] | C/N [dB] | C/N [dB] |
| Referenčná hodnota | 15,8 | 17,2 | 19,6 | 10,5 | 17,8 | 19,4 |
| LTE = -70 dB | 16,9 | 19,1 | 21,9 | 12,7 | 18,5 | 19,8 |
| LTE = -60 dB | 25,4 | - | - | 15,1 | - | - |
| LTE = -50 dB | - | - | - | - | - | - |

Tabuľka 8 Tabuľka QEF príjmu pre signál DVB-T rušený signálom LTE so šírkou pásma 10 MHz

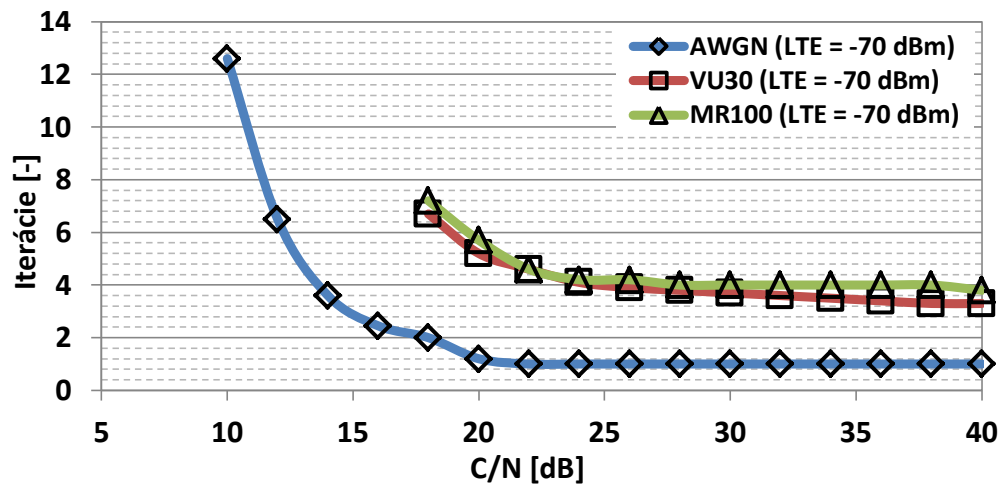
| | DVB-T2 so statickým príjmom | | | DVB-T2 s mobilným príjmom | | |
|---------------------------|-----------------------------|----------|----------|---------------------------|----------|----------|
| | AWGN | RC20 | RL20 | AWGN | VU30 | MR100 |
| | C/N [dB] | C/N [dB] | C/N [dB] | C/N [dB] | C/N [dB] | C/N [dB] |
| Referenčná hodnota | 16,5 | 17 | 18,3 | 9,5 | 19,7 | 20,4 |
| LTE = -70 dB | 18,3 | 18,6 | 20,8 | 10,3 | 24,6 | 25,9 |
| LTE = -60 dB | 25,9 | 27,3 | - | 10,9 | - | - |
| LTE = -50 dB | - | - | - | - | - | - |

Tabuľka 9 Tabuľka QEF príjmu pre signál DVB-T2 rušený signálom LTE so šírkou pásma 10 MHz

Ďalej s dekodérom LDPC v DVB-T2 signály súvisí aj počet iterácií, čo znamená počet opakovaní dekódovacieho procesu. Počet iterácií sa dá merať len u signálu DVB-T2. Čím je signál DVB-T2 viacej rušený, teda má vyššie hodnoty BER, tým sa počet iterácií zväčšuje. Počet iterácií sa pri rušiacom signály LTE s oboma šírkami pásma chová podobne. Zaujímavý rozdiel je medzi statickým a mobilným príjmom signálu DVB-T2. Pri statickom príjme sa únikový kanál RC20 podobá AWGN kanálu a RL20 má počet iterácií najväčší. Všetky hodnoty sa však držia na väčšom počte iterácií ako u mobilného príjmu DVB-T2 signálu. Toto je možné vidieť na Obr. 49. Pri mobilnom scenári sa do hodnoty C/N = 20 dB drží počet iterácií konštantne na veľmi nízkej úrovni a potom začne rýchlo stúpať. Toto platí pre signál s AWGN kanálom. Pre oba únikové kanály sa taktiež hodnoty do C/N = 20 dB držia skoro konštantne avšak na vyššej úrovni. Toto je vidieť na Obr. 50.



Obr. 49 Závislosť počtu iterácií na parametri C/N pre statický príjem signálu DVB-T2, LTE so šírkou pásma 1,4 MHz (celkové prekrytie).

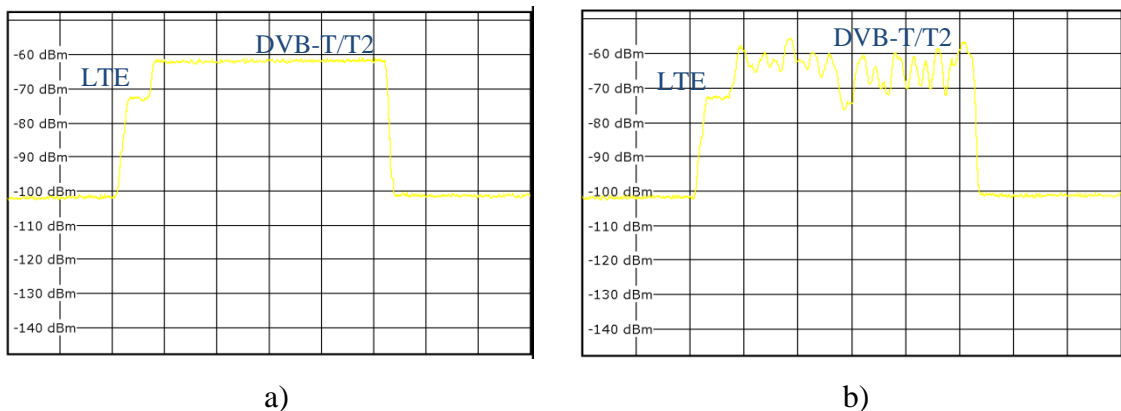


Obr. 50 Závislosť počtu iterácií na parametri C/N pre mobilný príjem signálu DVB-T2, LTE so šírkou pásma 10 MHz (celkové prekrytie).

8 KOEXISTENCIA MEDZI DVB-T/T2 A LTE (ČIASŤOČNÉ PREKRYTIE RF SIGNÁLOV)

8.1 Popis meraného scenára

Tak ako aj v scenári celkového prekrytia, aj pri čiastočnom prekrytí budú uvažované signály DVB-T/T2 s rôznymi systémovými nastaveniami. Použité kanále pre DVB-T/T2 ako aj pre LTE signál zostanú nezmenené. Stredná frekvencia DVB-T/T2 signálu bude 738 MHz. Stredná frekvencia LTE signálu sa bude meniť pri šírke pásma 1,4 MHz od 733,5 po 734,5 MHz s krokom 200 kHz. Stredná frekvencia LTE signálu sa pri šírke pásma 10 MHz bude meniť od 730 do 733 MHz s krokom 1 MHz. Prekrytie spektier teda nastáva z ľavej strany RF pásma DVB-T/T2 signálu. Prekrytie spektier DVB-T/T2 signálu a LTE signálu so šírkou pásma 1,4 MHz je vidieť na Obr. 51.

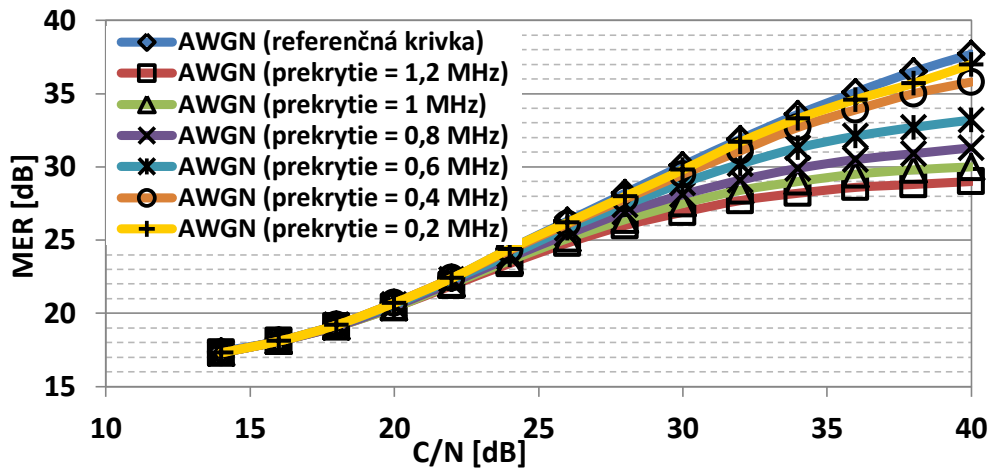


Obr. 51 Prekrytie spektier jednotlivých signálov pri a) statickom, b) mobilnom prijímači signálu DVB-T/T2

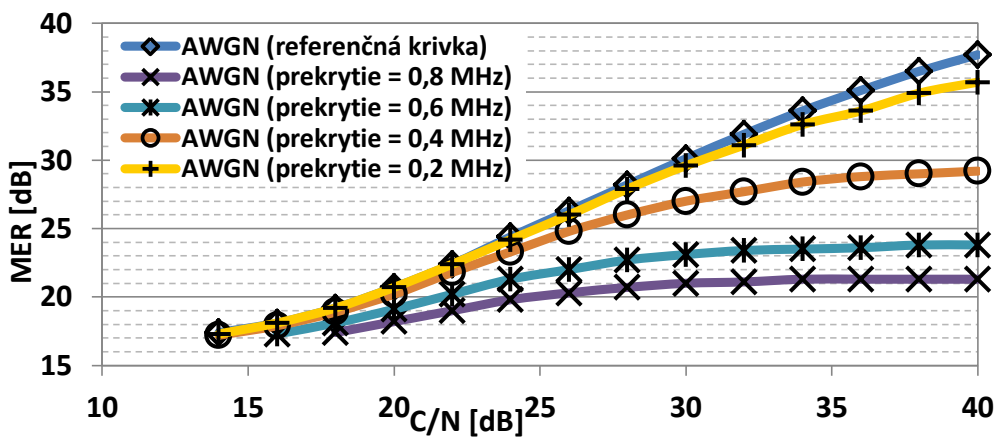
8.2 Meranie Parametru MER

8.2.1 Rušiaci signál LTE so šírkou pásma 1,4 MHz

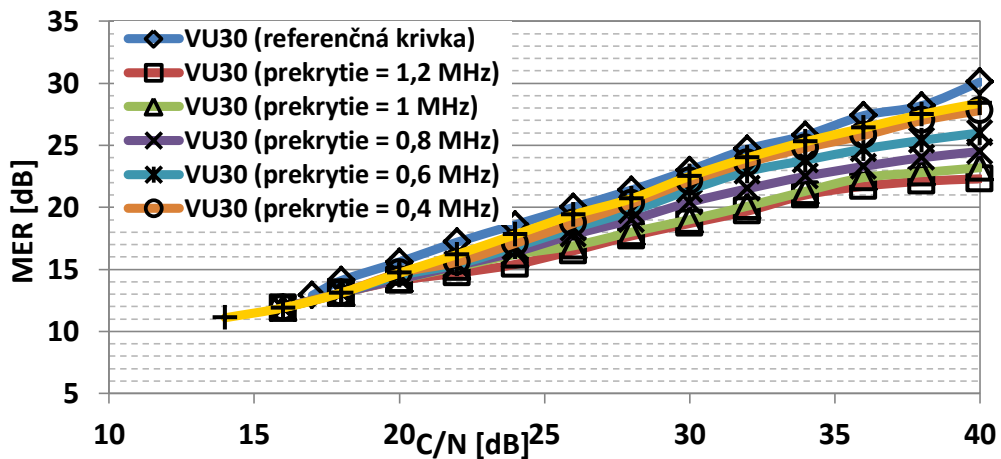
Pre lepšie porovnanie je možné využiť referenčné krivky z kapitoly 7 (Obr. 15). Pri všetkých systémových nastaveniach či už DVB-T alebo DVB-T2 signálu je možné pozorovať, že pri zväčšovaní úrovne LTE signálu sa pri všetkých veľkostiach prekrytia hodnota MER znižuje. Neplatí to však pre prekrytie 200 kHz, ktoré sa s úrovňou LTE znižuje len málo a svojím tvarom aj rušením sa podobá referenčnej krivke bez rušenia. Toto platí aj pre všetky unikové kanály. Referenčná krivka a prekrytie 200 kHz sa teda od ostatných prekrytí líšia a čím je úroveň LTE signálu väčšia tým je rozdiel v MER väčší. Toto ale platí pre vyššie hodnoty C/N, pri nižších hodnotách sú negatívne účinky rovnaké. Celé toto porovnanie je možné vidieť na Obr. 52, Obr. 53 a Obr. 54.



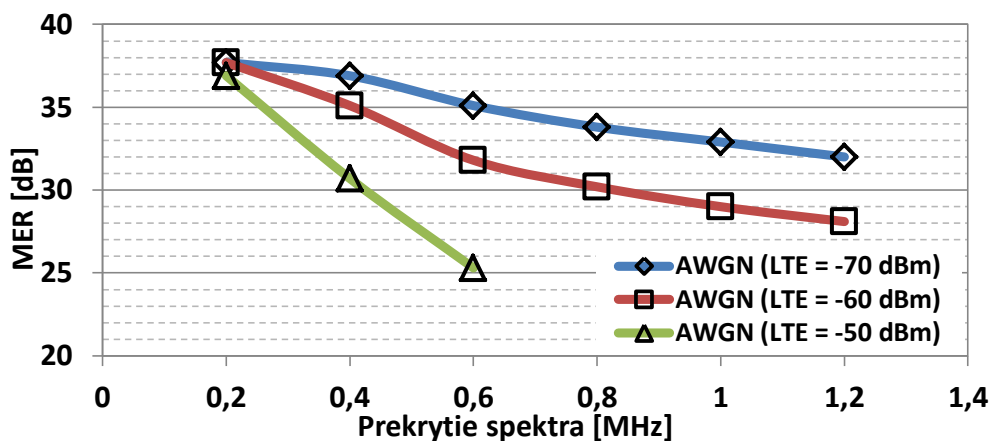
Obr. 52 Závislosť parametru MER na parametre C/N pri rôznom prekrytí spektier signálov DVB-T so statickým príjmom a AWGN kanálom, LTE = -70 dBm.



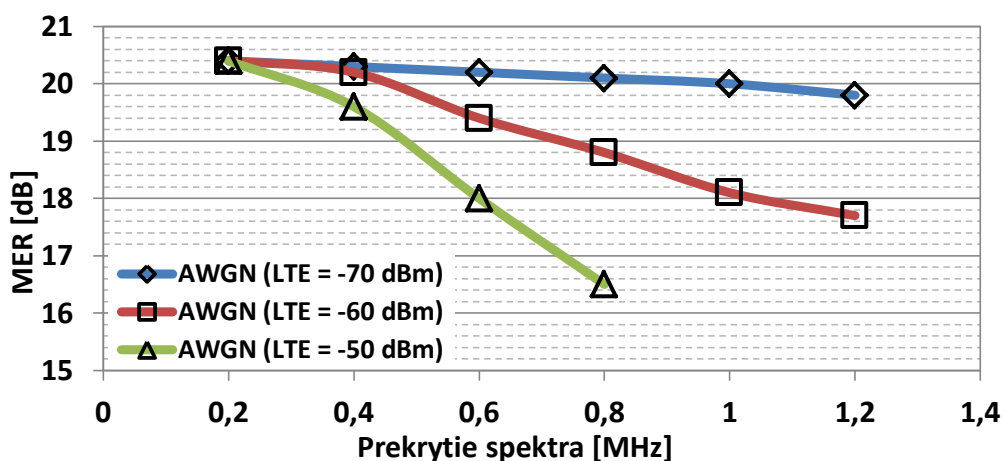
Obr. 53 Závislosť parametru MER na parametre C/N pri rôznom prekrytí spektier signálov DVB-T so statickým príjmom a AWGN kanálom, LTE = -50 dBm.



Obr. 54 Závislosť parametru MER na parametre C/N pri rôznom prekrytí spektier signálov DVB-T s mobilným príjmom a únikovým kanálom VU30, LTE = -70 dBm.

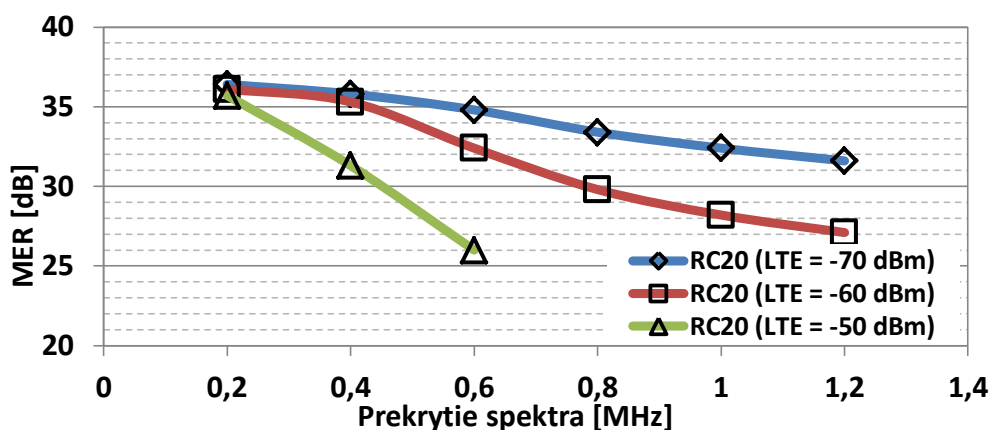


Obr. 55 Závislosť hodnoty MER na veľkosti prekrytia spektier signálov DVB-T2 so statickým príjmom, AWGN kanálom a $C/N = 40$ dB, LTE so šírkou pásma 1,4 MHz.



Obr. 56 Závislosť hodnoty MER na veľkosti prekrytia spektier signálov DVB-T2 s mobilným príjmom, AWGN kanálom a $C/N = 20$ dB, LTE so šírkou pásma 1,4 MHz.

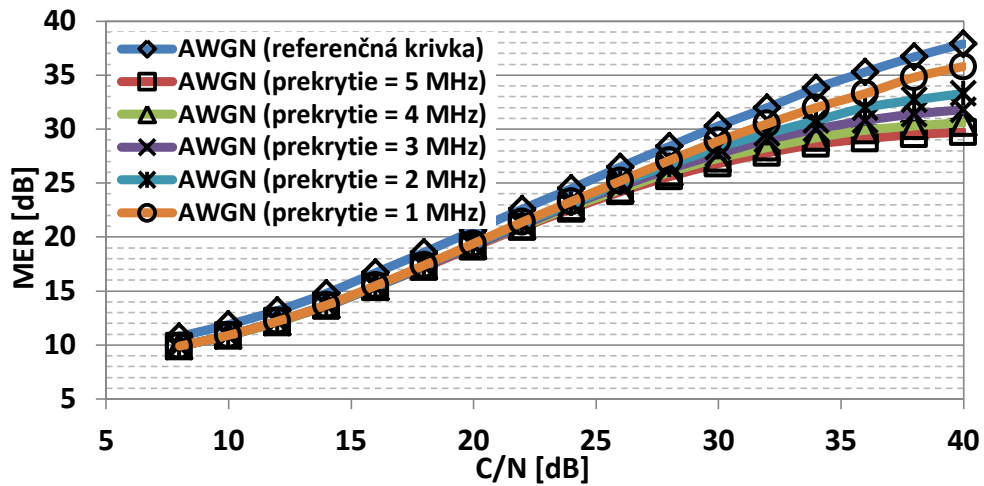
Ďalšie zaujímavé porovnanie je vplyv veľkosti prekrytia na znižovanie hodnoty MER. Boli zostavené grafy na ktorých je vidno, že čím je väčšie prekrytie, tým väčší je vplyv na signál DVB-T/T2. V týchto grafoch je vidieť aj vplyv úrovne LTE signálu na znižovanie hodnoty MER. Vplyv veľkosti prekrytia spektier je vidieť aj pri znižovaní parametru C/N . Tento vplyv sa dá pozorovať tak isto na všetkých systémových nastaveniach DVB-T/T2 signálu a je veľmi podobný. Preto bude do práce zahrnutých len niekoľko grafov, ktoré je možno vidieť na Obr. 55 a Obr. 56. Pri únikových kanáloch môžeme tak isto pozorovať, že čím väčšie je prekrytie tým väčší je pokles hodnoty MER, je možné vidieť na Obr. 57. Týmto je dokázané že veľkosť prekrytia výrazne ovplyvňuje kvalitu signálu DVB-T/T2.



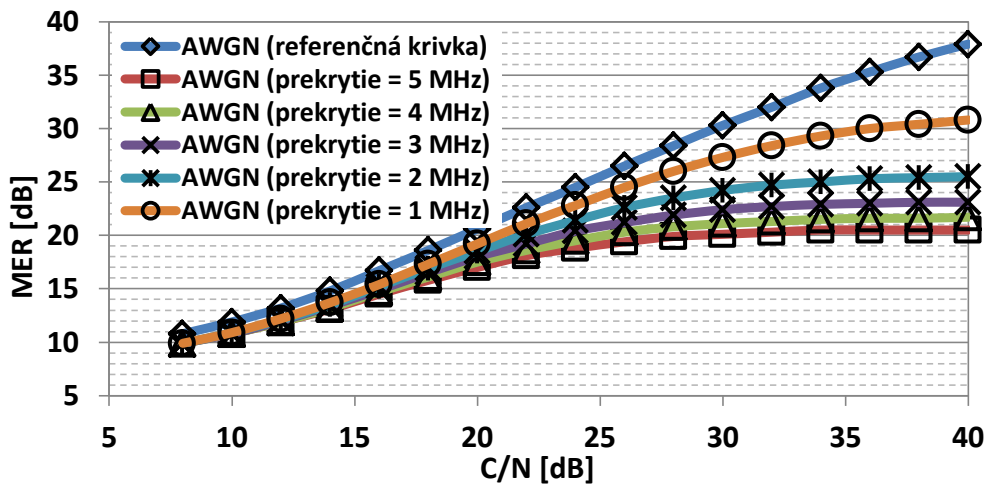
Obr. 57 Závislosť hodnoty MER na veľkosti prekrytia spektier signálov DVB-T2 so statickým príjmom, únikovým kanálom RC20 a $C/N = 40$ dB, LTE so šírkou pásma 1,4 MHz.

8.2.2 Rušiaci signál LTE so šírkou pásma 10 MHz

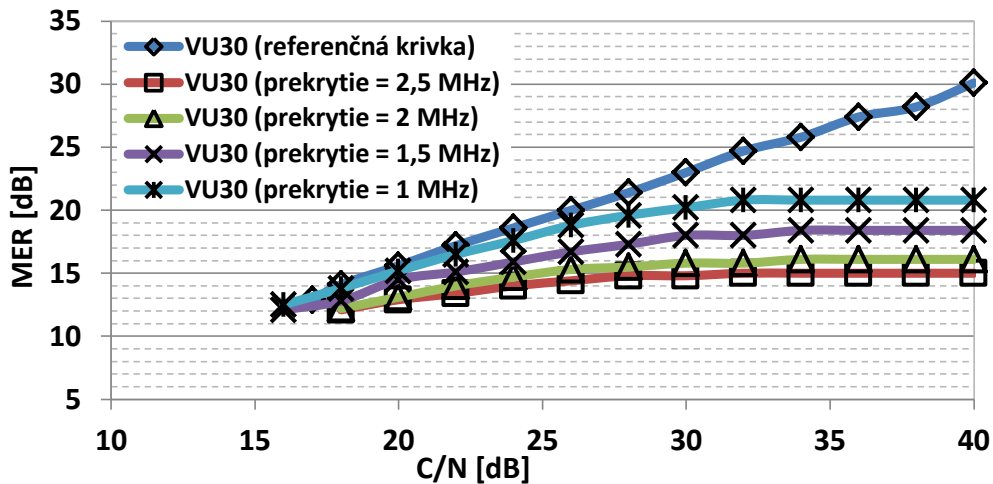
Podobne ako pri šírke pásma LTE signálu 1,4 MHz tak aj pri šírke pásma 10 MHz sa rozdiel medzi jednotlivými veľkosťami prekrytia zvyšuje pri zvyšovaní úrovne LTE signálu, čo je vidieť na Obr. 58. Pri úrovni LTE = -70 dBm je rozdiel medzi maximálnym a minimálnym prekrytím okolo 5 dB. Pri úrovni signálu LTE = -60 dBm je tento rozdiel až okolo 10 dB. Pri najmenšom prekrytí, čo je 1 MHz, však sú vidieť rozdiely oproti referenčnej krivke na rozdiel od najmenšieho prekrytia (200 kHz) v predchádzajúcom prípade. Toto môžeme pozorovať na Obr. 59. Samozrejme, že záleží aj na únikových kanáloch, ktoré majú na hodnotu MER tiež veľký vplyv a už pri vyšších hodnotách C/N majú menšie hodnoty MER. Pri väčšej úrovni LTE signálu a väčšom prekrytí spektier sa dokonca hodnoty nedajú namerať a MER parameter dosahuje nízke hodnoty už pri menšom prekrytí spektier. To je vidieť na Obr. 60. Rozdiel medzi statickým a mobilným príjmom pri signály DVB-T aj DVB-T2 je hlavne pri únikových kanáloch, ktoré sú pre každý signál iné. Pri porovnaní statického príjmu signálu DVB-T a DVB-T2 sa pri LTE = -70 dBm podobajú, ale pri signály LTE = -60 dBm má signál DVB-T2 okolo 2 dB lepšie hodnoty parametru MER. Pri úrovni LTE = -50 dBm sa tieto dva signály porovnať nedajú, lebo signál DVB-T2 sa už nedá merať. Dôvodom je modulácia 256QAM, ktorá je nastavená u DVB-T2 a citlivosť meracieho prístroja. Signály DVB-T a DVB-T2 s mobilným príjmom sa na seba podobajú aj ich hodnoty sa pohybujú v rozdiel 1 dB, čo môžeme pokladať za zanedbateľné. Jediný rozdiel je ten, že pri únikových kanáloch sa pri DVB-T2 signály nedá namerať koexistencia so signálom LTE = -50 dBm a pri signály DVB-T sa menšie prekrytia spektier merať dajú.



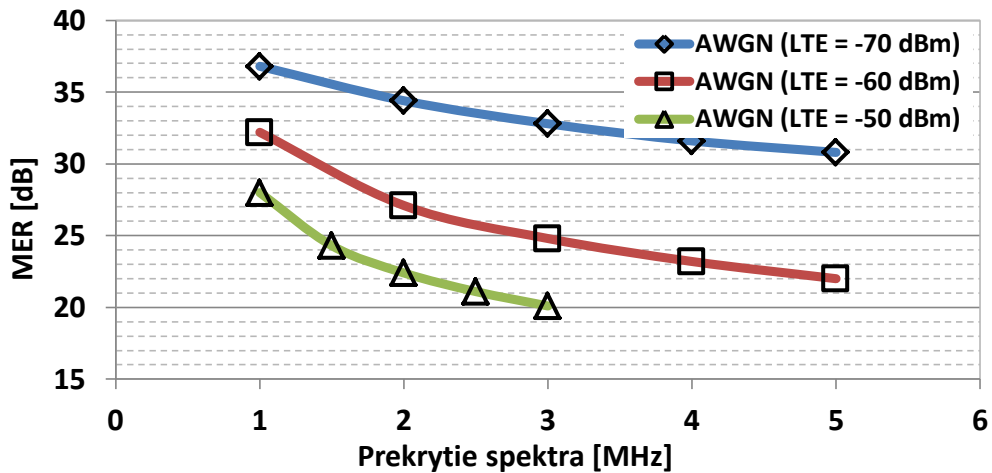
Obr. 58 Závislosť parametru MER na parametri C/N pri rôznom prekrytí spektier signálov DVB-T s mobilným príjmom a AWGN kanálom, LTE = -70 dBm.



Obr. 59 Závislosť parametru MER na parametri C/N pri rôznom prekrytí spektier signálov DVB-T s mobilným príjmom a AWGN kanálom, LTE = -60 dBm.

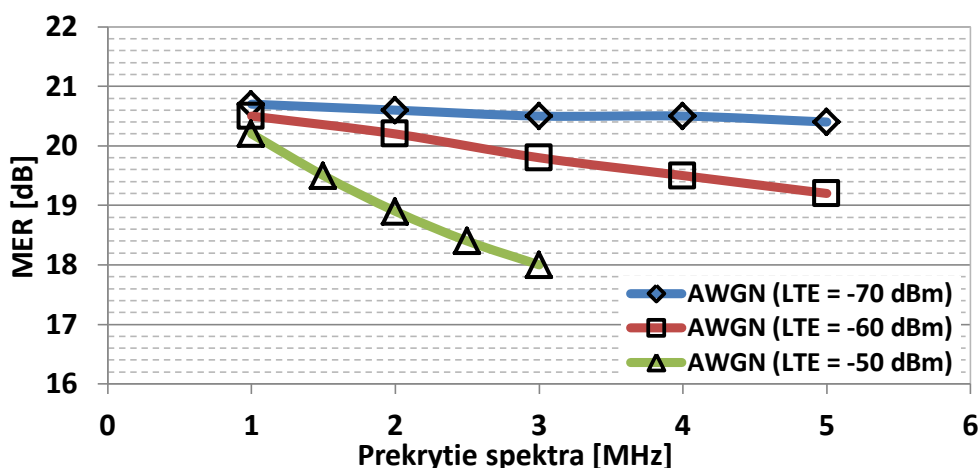


Obr. 60 Závislosť parametru MER na parametri C/N pri rôznom prekrytí spektier signálov DVB-T s mobilným príjmom a unikovým kanálom VU30, LTE = -50 dBm.



Obr. 61 Závislosť hodnoty MER na veľkosti prekrytia spektier signálov DVB-T so statickým príjmom, AWGN kanálom a C/N = 40 dB, LTE so šírkou pásma 10 MHz.

Závislosť parametru MER na veľkosti prekrytia bola ukázaná v predchádzajúcom prípade. Tak isto aj v tomto prípade so širokopásmovým rušením má veľkosť prekrytia spektier významnú úlohu. Tu si môžeme dokonca všimnúť, že aj najmenšie prekrytie 1 MHz má nezanedbateľný vplyv na parameter MER oproti zanedbateľnému účinku najmenšieho prekrytia 200 kHz v predchádzajúcom prípade. Keď sa však znižuje parameter C/N tak aj vplyv najmenšieho prekrytia 1 MHz sa začína znižovať. Porovnať je to možné na Obr. 61 a Obr. 62.



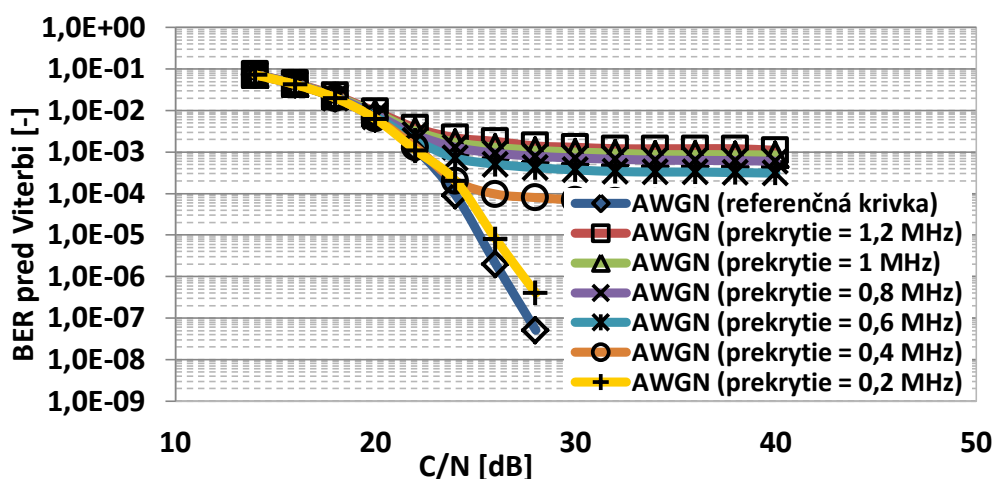
Obr. 62 Závislosť hodnoty MER na veľkosti prekrytia spektier signálov DVB-T so statickým príjmom, AWGN kanálom a $C/N = 20$ dB, LTE so šírkou pásma 10 MHz.

8.3 Meranie Parametru BER

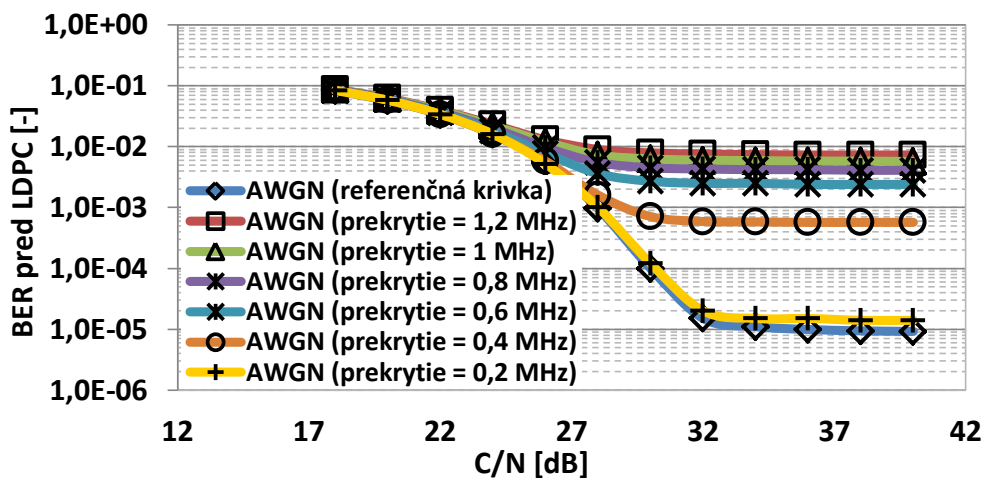
8.3.1 Rušiaci signál LTE so šírkou pásma 1,4 MHz

Referenčné krivky pre parameter BER sú zobrazené v kapitole 7 (Obr. 33). Ďalej už sú porovnávané prípady bitovej chybovosti BER pred Viterbiho respektíve LDPC dekodérom v závislosti na parametre C/N a na veľkosti prekrytia spektier.

Krivka s najmenším prekrytím 200 kHz sa ako v prípade parametru MER aj tu približuje k referenčnej krivke. Oplatí sa však porovnať scenár statického príjmu signálu DVB-T a DVB-T2. Signál DVB-T je oveľa odolnejší proti rušeniu než signál DVB-T2. Bez kanálových únikov má referenčná krivka značne nižšiu chybovosť BER a jednotlivé koexistenčné prípady majú chybovosť o rád menšiu. Toto je možné vidieť na Obr. 63 a Obr. 64. Pri únikovových kanáloch sa jednotlivý vplyv rušenia vyrovnáva. Pri únikovom kanály RC20 sú hodnoty BER u DVB-T signálu však stále o rád nižšie ako u signálu DVB-T2. Pri únikovo kanály RL20 sú už oba signály natoľko rušené, že ich vplyv je zrovnateľný. Samozrejmosťou je aj vplyv úrovne LTE signálu, pri jej zväčšovaní sa zväčšuje aj chybovosť BER.

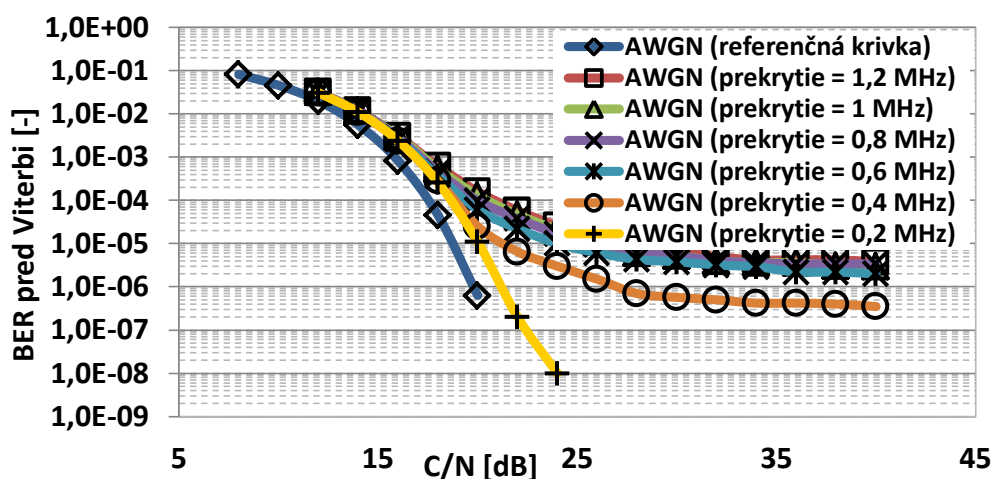


Obr. 63 Závislosť parametru BER na parametri C/N pri signáloch DVB-T so statickým príjmom a AWGN kanálom, LTE = -70 dBm so šírkou pásma 1,4 MHz.

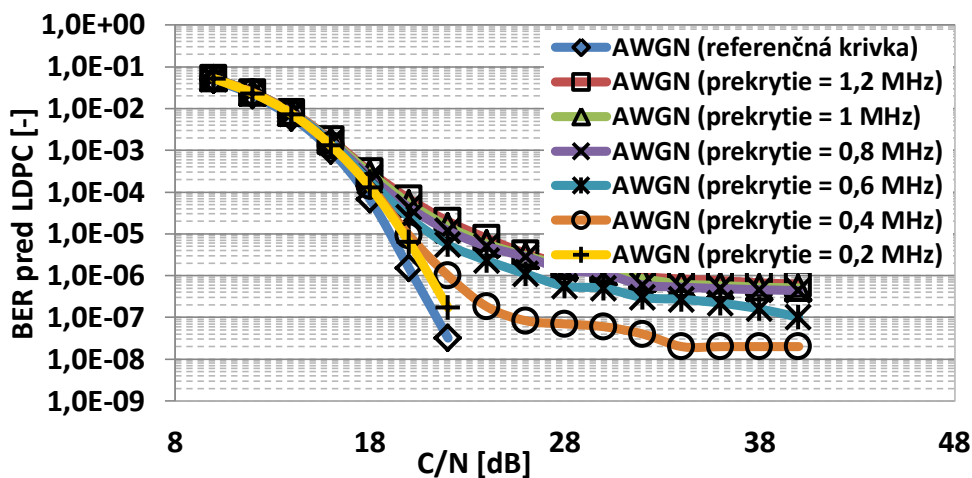


Obr. 64 Závislosť parametru BER na parametri C/N pri signáloch DVB-T2 so statickým príjmom a AWGN kanálom, LTE = -70 dBm so šírkou pásma 1,4 MHz.

Pri porovnaní mobilného príjmu signálu DVB-T a DVB-T2 je vidieť, že odolnosť proti rušeniu signálu má väčšiu DVB-T2 signál, čo bolo v statickom príjme signálu naopak. Rozdiely sú v mobilnom príjme však menšie ako u statického príjmu signálu. Porovnanie je vidieť na Obr. 65 a Obr. 66. U signálu DVB-T s mobilným príjmom sa pri únikových kanáloch dajú namerať niektoré prípady, ktoré sa u signálu DVB-T2 namerať nedajú. Aj v tomto prípade však platí, že pri únikových kanáloch VU30 a MR100 je signál DVB-T/T2 už natoľko rušený a hodnota tak BER vysoká, že rozdiel medzi signálmi je už zanedbateľný. Platí to pri oboch únikových kanáloch, čo bolo dokázané aj v predchádzajúcich meraniach, že VU30 a MR100 majú podobné účinky na DVB-T/T2 signál.



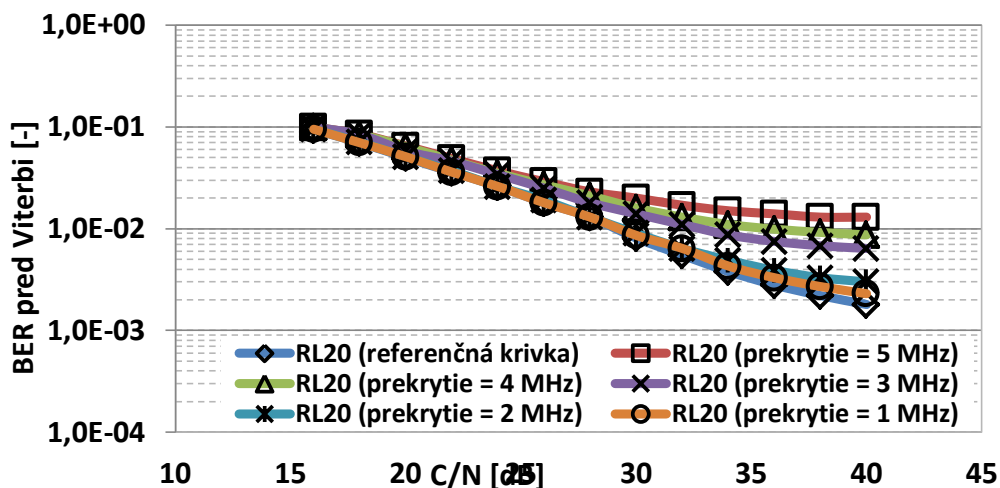
Obr. 65 Závislosť parametru BER na parametri C/N pri signáloch DVB-T s mobilným príjmom a AWGN kanálom, LTE = -70 dBm so šírkou pásma 1,4 MHz.



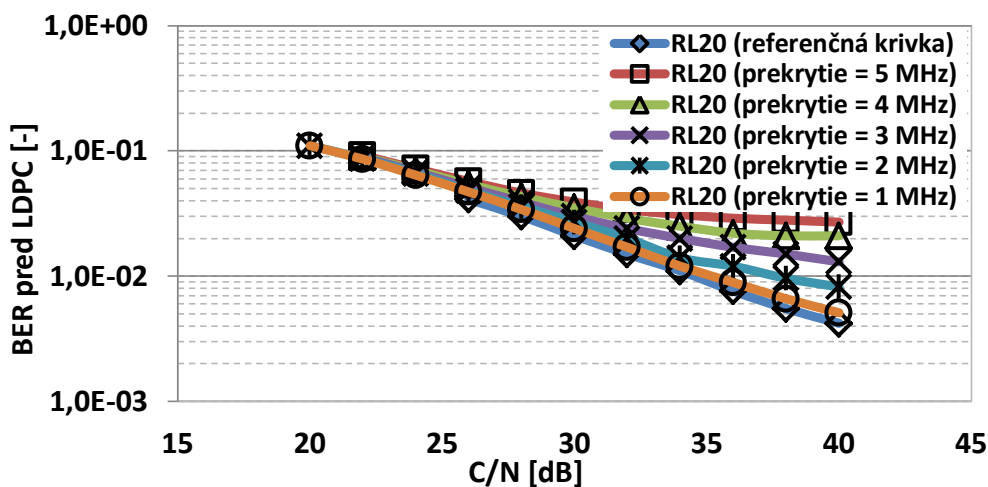
Obr. 66 Závislosť parametru BER na parametri C/N pri signáloch DVB-T2 s mobilným príjmom a AWGN kanálom, LTE = -70 dBm so šírkou pásma 1,4 MHz.

8.3.2 Rušiaci signál LTE so šírkou pásma 10 MH

Tak ako aj pri úzkopásmovom rušení, tak aj pri širokopásmovom rušení je DVB-T signál so statickým príjmom odolnejší voči rušeniu ako signál DVB-T2 so statickým príjmom. Najviac to je vidieť pri AWGN kanály, kde je rozdiel parametru BER značný. Pri zvyšovaní úrovne LTE signálu sa rozdiel medzi signálmi DVB-T a DVB-T2 znižuje. Tak isto aj keď sa k signálu pridajú únikové kanály, tak sa rozdiel medzi DVB-T a DVB-T2 znižuje. Na Obr. 67 a Obr. 68 je vidieť zmenšenie rozdielu medzi signálmi DVB-T a DVB-T2 s únikovými kanálmi. Pri porovnaní úzkopásmového a širokopásmového vplyvu na bitovú chybovosť vychádza, že úzkopásmové rušenie ovplyvňuje signál DVB-T/T2 viac, čiže parameter BER nadobúda vyššie hodnoty. Podobný prípad nastal pri scenáre celkového prekrytia. Dôvodom tohto javu je aj teraz rozloženie energie na väčšiu šírku prenosového kanálu.

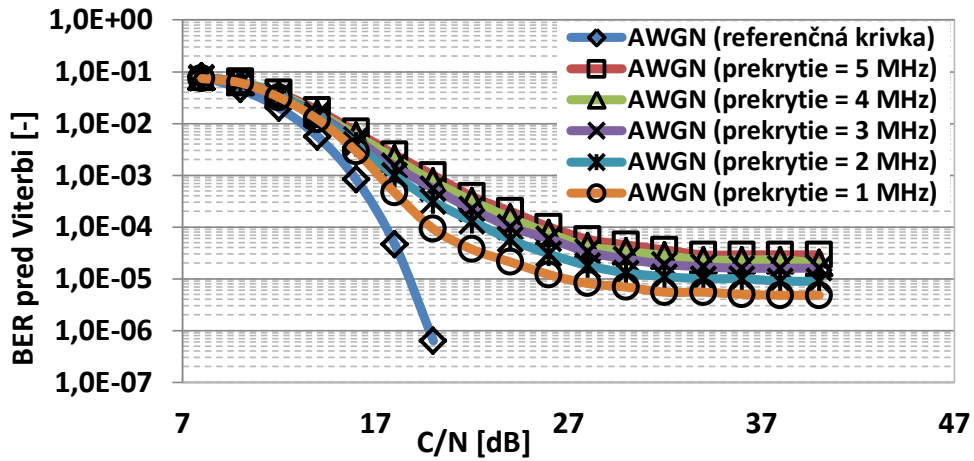


Obr. 67 Závislosť parametru BER na parametri C/N pri signáloch DVB-T so statickým príjmom a únikovým kanálom RL20, LTE = -70 dBm so šírkou pásma 10 MHz.

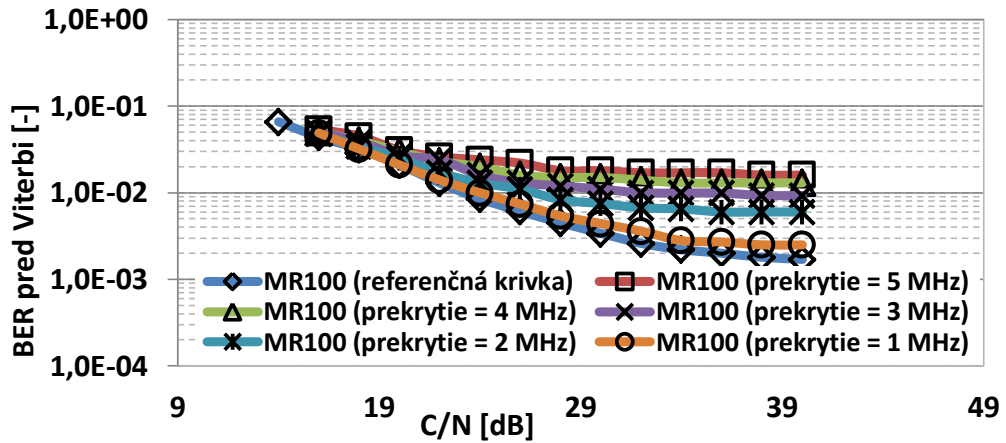


Obr. 68 Závislosť parametru BER na parametri C/N pri signáloch DVB-T2 so statickým príjmom a únikovým kanálom RL20, LTE = -70 dBm so šírkou pásma 10 MHz.

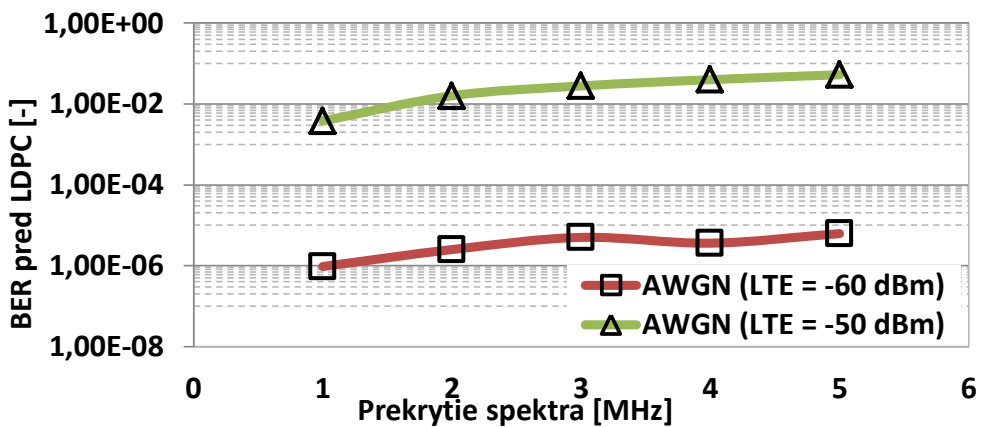
Pri mobilnom príjme signálu DVB-T sú v porovnaní s mobilným príjmom signálu DVB-T2 hodnoty bitovej chybovosti BER o rád horšie. To znamená, že signál DVB-T2 s mobilným príjmom je odolnejší proti bitovej chybovosti. Pri zvyšovaní úrovne signálu LTE sa však tieto hodnoty vyrovnávajú. Pri únikových kanáloch je rušenie pri oboch signáloch rovnaké. Z toho vyplýva, že rozdiel nastáva len pri nižších hodnotách bitovej chybovosti BER. Pri vysokých hodnotách sú signály DVB-T aj DVB-T2 rušené rovnako. Na Obr. 69 a Obr. 70 je vidieť, že pri AWGN kanály je referenčná hodnota rušená len málo a výrazne klesá s klesajúcim C/N. Pri zohľadnení vlastností únikových kanálov je aj referenčná krivka rušená pri vysokých hodnotách C/N. Z toho plynie vplyv únikových kanálov na zhoršovanie bitovej chybovosti BER. Z grafov na Obr. 71 a Obr. 72 vyplýva, že veľkosť prekrytia spektra v tomto prípade nehrá takú veľkú úlohu ako pri hodnotách modulačnej chybovosti MER. Pri porovnaní hodnôt pri maximálnom a minimálnom prekrytí je vidieť, že sa líšia maximálne o rád. Väčšiu úlohu zohráva úroveň signálu a prítomnosť únikových kanálov.



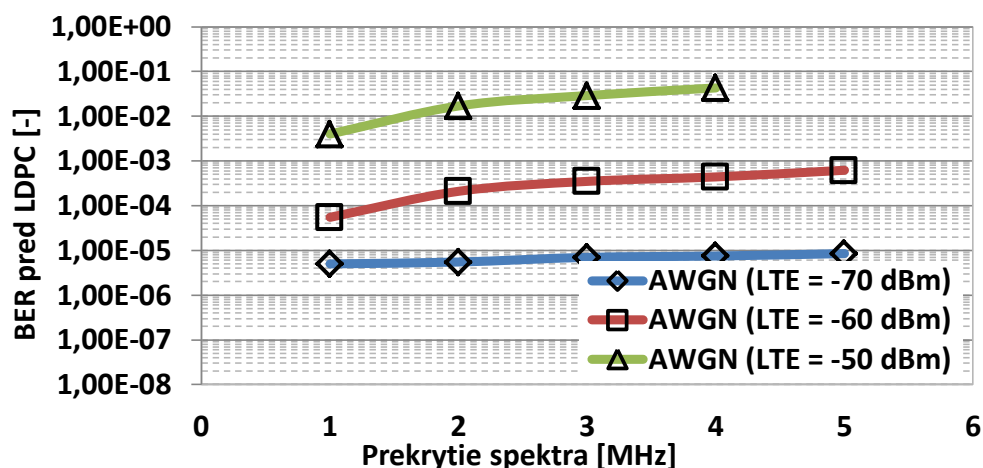
Obr. 69 Závislosť parametru BER na parametri C/N pri signáloch DVB-T s mobilným príjmom a AWGN kanálom, LTE = -50 dBm so šírkou pásma 10 MHz.



Obr. 70 Závislosť parametru BER na parametri C/N pri signáloch DVB-T s mobilným príjmom a únikovým kanálom MR100, LTE = -60 dBm so šírkou pásma 10 MHz.



Obr. 71 Závislosť hodnoty BER na veľkosti prekrytia spektier signálov DVB-T2 s mobilným príjmom a LTE pri C/N = 40 dB.



Obr. 72 Závislosť hodnoty BER na veľkosti prekrytia spektier signálov DVB-T2 s mobilným príjmom a LTE pri C/N = 20 dB.

8.3.3 Tabuľky QEF príjmu a iterácie

Hodnoty BER po dekodéry Viterbi respektíve LDPC sú namerané aj pri scenáre čiastočného prekrytia. Sú priehľadne zobrazené v tabuľkách Tabuľka. 10 až Tabuľka. 17.

| Statický príjem | prekrytie 0,2 MHz | prekrytie 0,4 MHz | prekrytie 0,6 MHz | prekrytie 0,8 MHz | prekrytie 1 MHz | prekrytie 1,2 MHz |
|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------|-------------------|
| | C/N [dB] | C/N [dB] | C/N [dB] | C/N [dB] | C/N [dB] | C/N [dB] |
| AWGN LTE=-70dBm | 15,8 | 15,8 | 16 | 16,1 | 16,2 | 16,3 |
| AWGN LTE=-60dBm | 15,8 | 16,4 | 19,7 | 26,6 | - | - |
| AWGN LTE=-50dBm | 15,9 | - | - | - | - | - |
| RC20 LTE=-70dBm | 16,8 | 16,9 | 17 | 17,1 | 17,1 | 17,2 |
| RC20 LTE=-60dBm | 16,8 | 17,8 | 25,1 | - | - | - |
| RC20 LTE=-50dBm | 16,9 | - | - | - | - | - |
| RL20 LTE=-70dBm | 19,3 | 19,5 | 19,8 | 19,8 | 19,9 | 20,2 |
| RL20 LTE=-60dBm | 19,3 | - | - | - | - | - |
| RL20 LTE=-50dBm | 19,7 | - | - | - | - | - |

Tabuľka 10 Tabuľka QEF príjmu čiastočného prekrytia pre signál DVB-T (statický príjem) rušený signálom LTE so šírkou pásma 1,4 MHz.

| Mobilný príjem | prekrytie 0,2 MHz | prekrytie 0,4 MHz | prekrytie 0,6 MHz | prekrytie 0,8 MHz | prekrytie 1 MHz | prekrytie 1,2 MHz |
|---------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------|-------------------|
| | C/N [dB] | C/N [dB] | C/N [dB] | C/N [dB] | C/N [dB] | C/N [dB] |
| AWGN LTE=-70dBm | 12,6 | 12,7 | 12,7 | 12,8 | 12,8 | 12,8 |
| AWGN LTE=-60dBm | 12,7 | 12,7 | 13 | 13,2 | 13,8 | 14,1 |
| AWGN LTE=-50dBm | 12,8 | 13 | 14,4 | - | - | - |
| VU30 LTE=-70dBm | 18,2 | 18,3 | 19,2 | 19,3 | 19,4 | 20 |
| VU30 LTE=-60dBm | 18,2 | 19,4 | 24 | - | - | - |
| VU30 LTE=-50dBm | 18,4 | 31,5 | - | - | - | - |
| MR100 LTE=-70dBm | 19,5 | 19,7 | 19,6 | 19,6 | 19,7 | 20 |
| MR100 LTE=-60dBm | 19,6 | 20 | 28 | - | - | - |
| MR100 LTE=-50dBm | 19,8 | - | - | - | - | - |

Tabuľka 11 Tabuľka QEF príjmu čiastočného prekrytia pre signál DVB-T (mobilný príjem) rušený signálom LTE so šírkou pásma 1,4 MHz

| Statický príjem | prekrytie 0,2 MHz | prekrytie 0,4 MHz | prekrytie 0,6 MHz | prekrytie 0,8 MHz | prekrytie 1 MHz | prekrytie 1,2 MHz |
|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------|-------------------|
| | C/N [dB] | C/N [dB] | C/N [dB] | C/N [dB] | C/N [dB] | C/N [dB] |
| AWGN LTE=-70dBm | 17,7 | 17,8 | 17,9 | 18 | 18 | 18,1 |
| AWGN LTE=-60dBm | 17,7 | 19,3 | 21,8 | 27,2 | - | - |
| AWGN LTE=-50dBm | 17,8 | 19,5 | - | - | - | - |
| RC20 LTE=-70dBm | 18,2 | 18,2 | 18,3 | 18,4 | 18,4 | 18,5 |
| RC20 LTE=-60dBm | 18,2 | 18,5 | 25,8 | - | - | - |
| RC20 LTE=-50dBm | 18,3 | 20 | - | - | - | - |
| RL20 LTE=-70dBm | 19,6 | 19,8 | 20,1 | 20,2 | 20,2 | 20,3 |
| RL20 LTE=-60dBm | 19,6 | 19,8 | 27,4 | - | - | - |
| RL20 LTE=-50dBm | 19,7 | 20,9 | - | - | - | - |

Tabuľka 12 Tabuľka QEF príjmu čiastočného prekrytia pre signál DVB-T2 (statický príjem) rušený signálom LTE so šírkou pásma 1,4 MHz.

| Mobilný príjem | prekrytie 0,2 MHz | prekrytie 0,4 MHz | prekrytie 0,6 MHz | prekrytie 0,8 MHz | prekrytie 1 MHz | prekrytie 1,2 MHz |
|---------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------|-------------------|
| | C/N [dB] | C/N [dB] | C/N [dB] | C/N [dB] | C/N [dB] | C/N [dB] |
| AWGN LTE=-70dBm | 10,1 | 10,1 | 10,2 | 10,3 | 10,4 | 10,4 |
| AWGN LTE=-60dBm | 10,2 | 10,3 | 10,5 | 10,8 | 11,1 | 11,4 |
| AWGN LTE=-50dBm | 10,4 | 11,2 | - | - | - | - |
| VU30 LTE=-70dBm | 21 | 21,3 | 21,8 | 22,1 | 22,5 | 22,8 |
| VU30 LTE=-60dBm | 21,2 | 22,6 | 25,2 | - | - | - |
| VU30 LTE=-50dBm | 21,4 | 26,2 | - | - | - | - |
| MR100 LTE=-70dBm | 22,6 | 22,8 | 23,3 | 23,7 | 24,1 | 24,5 |
| MR100 LTE=-60dBm | 22,9 | 23,7 | 26,3 | - | - | - |
| MR100 LTE=-50dBm | 23,1 | - | - | - | - | - |

Tabuľka 13 Tabuľka QEF príjmu čiastočného prekrytia pre signál DVB-T2 (mobilný príjem) rušený signálom LTE so šírkou pásma 1,4 MHz.

| Statický príjem | prekrytie 1 MHz | prekrytie 2 MHz | Prekrytie 3 MHz | prekrytie 4 MHz | prekrytie 5 MHz |
|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | C/N [dB] | C/N [dB] | C/N [dB] | C/N [dB] | C/N [dB] |
| AWGN LTE=-70dBm | 15,8 | 15,9 | 15,9 | 16 | 16,1 |
| AWGN LTE=-60dBm | 16 | 16,3 | 16,8 | 17,3 | 17,7 |
| AWGN LTE=-50dBm | 22,9 | - | - | - | - |
| RC20 LTE=-70dBm | 16,4 | 16,5 | 16,7 | 16,7 | 16,9 |
| RC20 LTE=-60dBm | 16,8 | 17,2 | 17,8 | 18,2 | 18,8 |
| RC20 LTE=-50dBm | 20,3 | - | - | - | - |
| RL20 LTE=-70dBm | 19,7 | 19,8 | 21,1 | 21,4 | 21,6 |
| RL20 LTE=-60dBm | 19,8 | 20,6 | 21,8 | 25,1 | 29,8 |
| RL20 LTE=-50dBm | - | - | - | - | - |

Tabuľka 14 Tabuľka QEF príjmu čiastočného prekrytia pre signál DVB-T (statický príjem) rušený signálom LTE so šírkou pásma 10 MHz.

| Mobilný príjem | prekrytie 1 MHz | prekrytie 2 MHz | prekrytie 3 MHz | prekrytie 4 MHz | prekrytie 5 MHz |
|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | C/N [dB] | C/N [dB] | C/N [dB] | C/N [dB] | C/N [dB] |
| AWGN LTE=-70dBm | 12,2 | 12,2 | 12,3 | 12,4 | 12,5 |
| AWGN LTE=-60dBm | 12,5 | 12,5 | 12,6 | 12,6 | 12,9 |
| AWGN LTE=-50dBm | 13,2 | 17,7 | - | - | - |
| VU30 LTE=-70dBm | 18,7 | 19,6 | 19 | 19,3 | 19,4 |
| VU30 LTE=-60dBm | 19,7 | 20,3 | 22 | 22,2 | 25 |
| VU30 LTE=-50dBm | - | - | - | - | - |
| MR100 LTE=-70dBm | 18,5 | 18,7 | 19,2 | 19,4 | 19,7 |
| MR100 LTE=-60dBm | 19,6 | 20,8 | 22 | 23,2 | 24,8 |
| MR100 LTE=-50dBm | - | - | - | - | - |

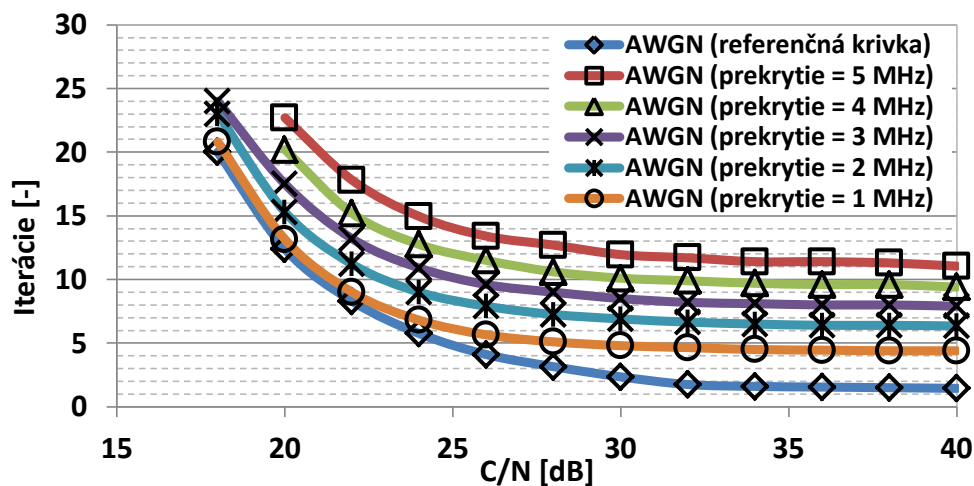
Tabuľka 15 Tabuľka QEF príjmu čiastočného prekrytia pre signál DVB-T (mobilný príjem) rušený signálom LTE so šírkou pásma 10 MHz.

| Statický príjem DVB-T2 | prekrytie 1 MHz | prekrytie 2 MHz | prekrytie 3 MHz | prekrytie 4 MHz | prekrytie 5 MHz |
|---------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | C/N [dB] | C/N [dB] | C/N [dB] | C/N [dB] | C/N [dB] |
| AWGN LTE=-70dBm | 17,8 | 17,8 | 17,9 | 17,9 | 18 |
| AWGN LTE=-60dBm | 17,9 | 18,5 | 19,2 | 19,9 | 20,8 |
| AWGN LTE=-50dBm | 21,1 | - | - | - | - |
| RC20 LTE=-70dBm | 18,2 | 18,2 | 18,3 | 18,4 | 18,5 |
| RC20 LTE=-60dBm | 18,3 | 18,5 | 18,9 | 19,3 | 19,8 |
| RC20 LTE=-50dBm | 24,1 | - | - | - | - |
| RL20 LTE=-70dBm | 19,6 | 19,7 | 19,7 | 19,8 | 19,9 |
| RL20 LTE=-60dBm | 19,8 | 20,8 | 22,2 | 24 | 26,2 |
| RL20 LTE=-50dBm | 24,8 | - | - | - | - |

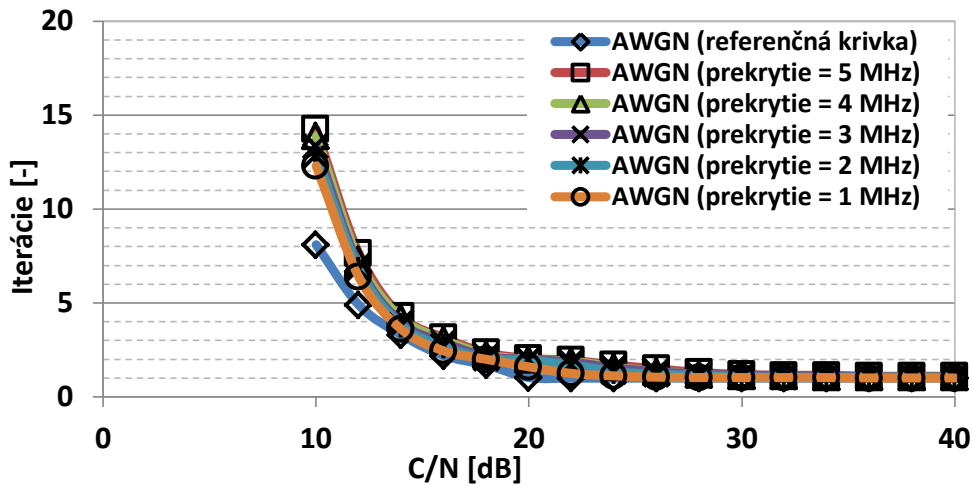
Tabuľka 16 Tabuľka QEF príjmu čiastočného prekrytia pre signál DVB-T2 (statický príjem) rušený signálom LTE so šírkou pásma 10 MHz.

| Mobilný príjem DVB-T2 | prekrytie 1 MHz | prekrytie 2 MHz | prekrytie 3 MHz | prekrytie 4 MHz | prekrytie 5 MHz |
|--------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | C/N [dB] | C/N [dB] | C/N [dB] | C/N [dB] | C/N [dB] |
| AWGN LTE=-70dBm | 10,3 | 10,3 | 10,3 | 10,4 | 10,4 |
| AWGN LTE=-60dBm | 10,4 | 10,4 | 10,5 | 10,6 | 10,7 |
| AWGN LTE=-50dBm | 10,7 | 14,3 | 34 | - | - |
| VU30 LTE=-70dBm | 21 | 21,3 | 21,8 | 22,1 | 22,5 |
| VU30 LTE=-60dBm | 24,1 | 25,4 | 26,3 | - | - |
| VU30 LTE=-50dBm | - | - | - | - | - |
| MR100 LTE=-70dBm | 22,8 | 23,3 | 24,3 | 25,4 | 26,1 |
| MR100 LTE=-60dBm | 25,2 | 26,1 | - | - | - |
| MR100 LTE=-50dBm | - | - | - | - | - |

Tabuľka 17 Tabuľka QEF príjmu čiastočného prekrytia pre signál DVB-T2 (mobilný príjem) rušený signálom LTE so šírkou pásma 10 MHz.



Obr. 73 Závislosť počtu iterácií na parametri C/N pre statický príjem signálu DVB-T2, LTE so šírkou pásma 10 MHz.



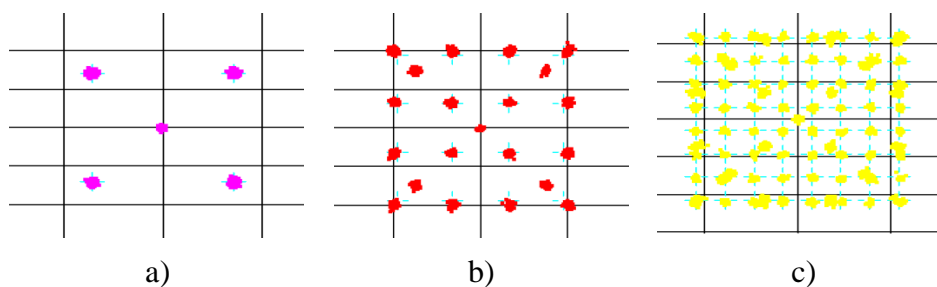
Obr. 74 Závislosť počtu iterácií na parametri C/N pre mobilný príjem signálu DVB-T2, LTE so šírkou pásma 10 MHz.

Keďže sa počet iterácií meria len pri signály DVB-T2, je možné porovnať statický a mobilný príjem signálu DVB-T2. Pri širokopásmovom rušení signálom LTE je počet iterácií väčší pri statickom prijme, čo znamená, že dekodér musí opravovať viacej chýb, to sa odzrkadlí aj pri väčšej bitovej chybovosti BER. Z toho vyplýva, že mobilný príjem signál DVB-T2 je odolnejší proti rušeniu oproti statickému príjmu signálu DVB-T2. Toto je možné pozorovať aj pri úzkopásmovom rušiacom signály LTE avšak v menšej miere. Jednotlivé počty iterácií je možné vidieť na Obr. 73 a Obr. 74.

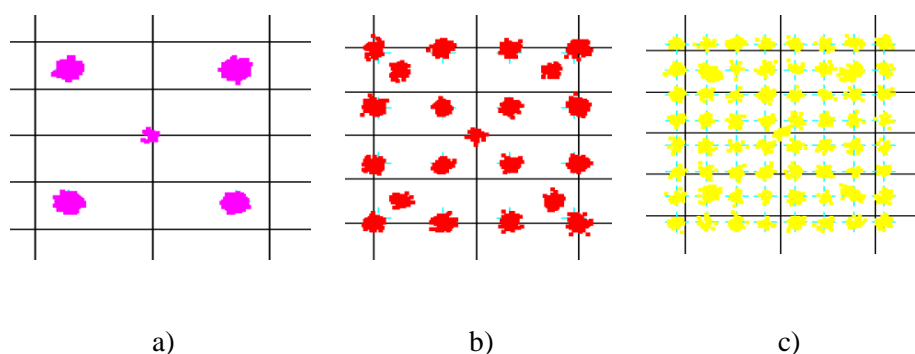
9 SCENÁR PRE MERANIE EVM PARAMETRA LTE SIGNÁLU

9.1 Popis meracieho scenára

Parameter EVM sa meria u signálu LTE, keďže v predchádzajúcich merania sme rušili silný televízny DVB-T/T2 signál slabším signálom LTE, nedal sa parameter EVM dobre analyzovať. Preto bol vytvorený nový scenár na meranie práve EVM parametra pri LTE signály. Jednotlivé vysielacie kanály s frekvenciami boli ponechané. Signál DVB-T má strednú frekvenciu 738 MHz. Pri celkovom prekrytí spektier má LTE signál strednú frekvenciu 734 MHz, pri čiastočnom prekrytí sa frekvencia mení pri úzkopásmovom signály od 733,6 do 734,5 MHz z krokom 300 kHz a pri širokopásmovom signály od 730 do 735 MHz s krokom 1 MHz. Úroveň signálu LTE je nastavená na -30 dBm a úroveň rušiaceho DVB-T signálu sa menila medzi úrovňami -70 dBm, -65 dBm a -60 dBm. Ako rušiaci signál bol vybraný DVB-T signál so statickým príjmom, ktorý ma systémové nastavenie ako reálny vysielací TV signál. Merané boli EVM parametre pre tri nastavené modulácie QPSK, 16QAM a 64QAM. Jednotlivé konstelačné diagramy použitých modulácií bez rušenia sú na Obr. 75 a konstelačné diagramy s rušením sú na Obr. 76. Keďže hodnota EVM meraná na prístroji sa stále menila, bola každá hodnota EVM zaznamenaná trikrát a následne bola z týchto troch hodnôt vypočítaná priemerná hodnota EVM, s ktorou sa ďalej pracovalo.



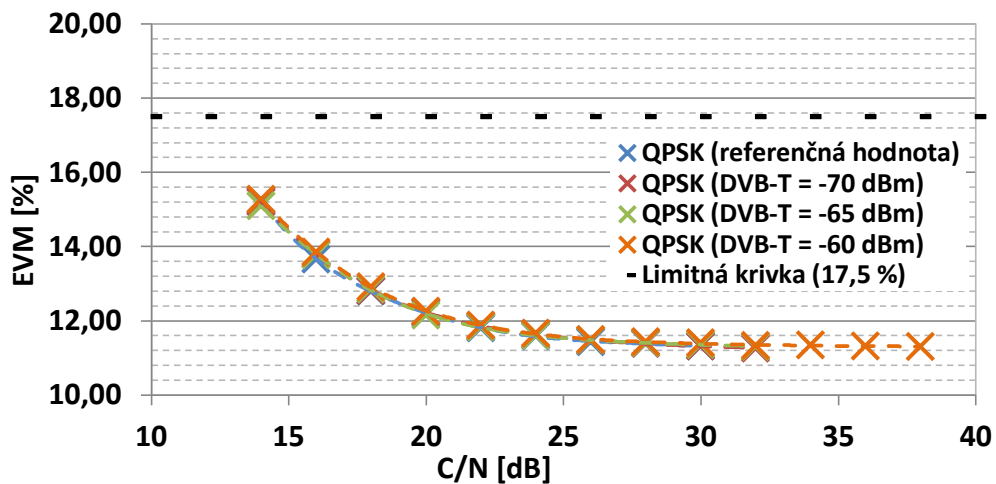
Obr. 75 Konstelačné diagramy bez rušenia pri modulácii a) QPSK, b) 16QAM, c) 64QAM.



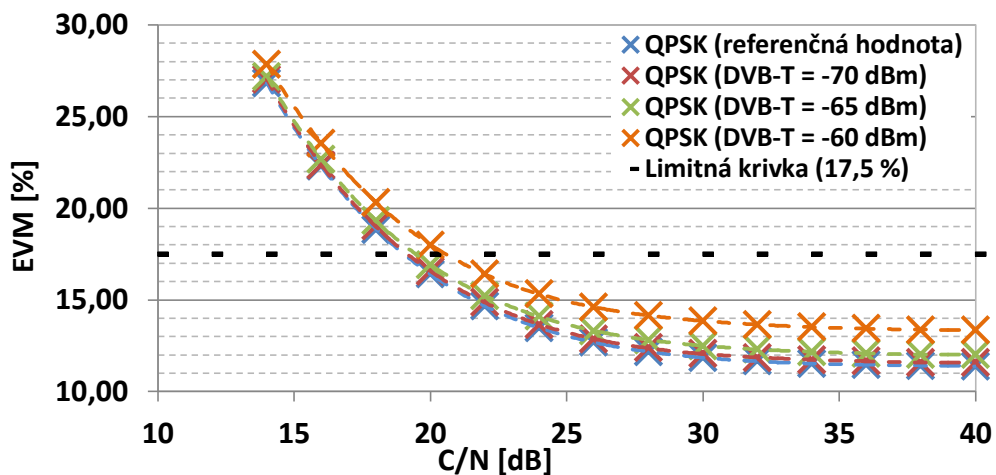
Obr. 76 Konstelačné diagramy bez rušenia pri modulácii a) QPSK, b) 16QAM, c) 64QAM.

9.2 Prípád celkového prekrytia RF spektier

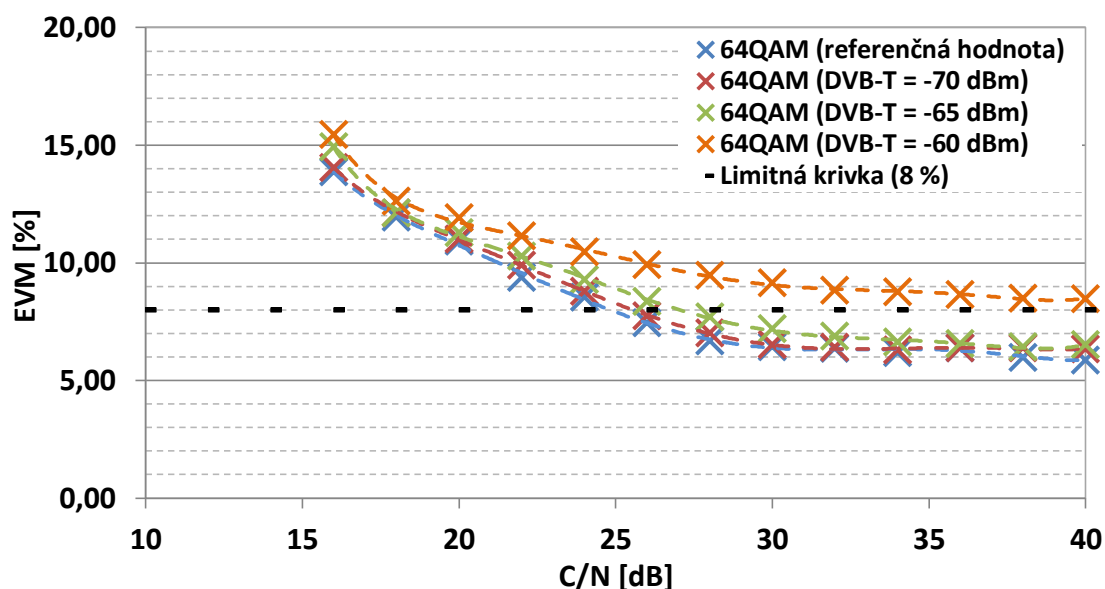
Najdôležitejším parametrom pri hodnotení rušenia LTE signálu je práve šírka pásma LTE signálu. Pri signály LTE so šírkou pásma 1,4 MHz je hodnota EVM pri všetkých moduláciách nižšia ako pri signály LTE so šírkou pásma 10 MHz. To je možné vidieť na Obr. 77 a Obr. 78. Ako najodolnejšia modulácia proti rušeniu sa ukázala QPSK modulácia ktorá pri šírke pásma 1,4 MHz vôbec neprekročila limit 17,5% a pri šírke pásma 10 MHz prekročila limit až pri nízkych hodnotách C/N. Ukážka EVM parametra pri ďalšej moduláciách je na Obr. 79. Z predchádzajúcich grafov je vidieť, že úroveň DVB-T signálu na LTE signál so šírkou pásma 1,4 MHz nemá vôbec vplyv a na LTE signál so šírkou pásma 10 MHz je vplyv malý, ale dá sa pozorovať. Rušiaci DVB-T signál bol však slabý, preto je predpoklad, že keby sa DVB-T signál ešte zvyšoval mala by väčší vplyv na rušenie aj jeho úroveň.



Obr. 77 Závislosť parametru EVM na parametri C/N pri LTE = 1,4 MHz pre moduláciu QPSK (celkové prekrytie).



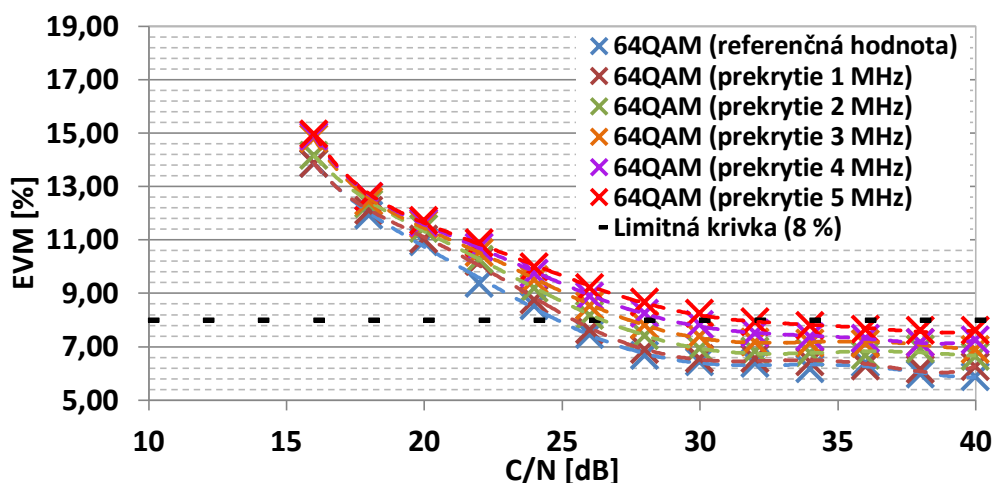
Obr. 78 Závislosť parametru EVM na parametri C/N pri LTE = 10 MHz pre moduláciu QPSK (celkové prekrytie)



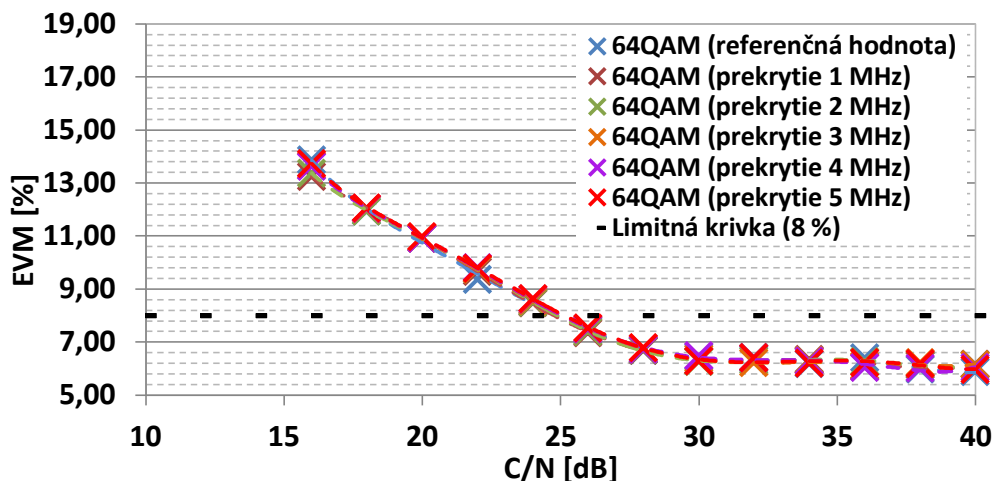
Obr. 79 Závislosť parametru EVM na parametri C/N pri LTE = 10 MHz pre moduláciu 64QAM (celkové prekrytie).

9.3 Prípád čiastočného prekrytia RF spektier

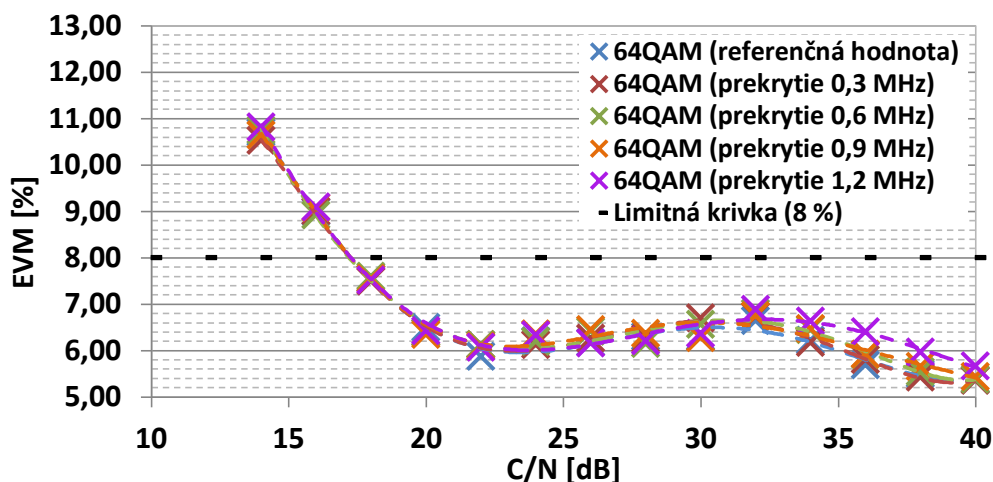
Veľkosť prekrytia má na EVM parameter vplyv iba pri vyššej úrovni rušiaceho DVB-T signálu, čo je v tomto prípade -60 dBm. To je možné vidieť na Obr. 80. Pri nízkej úrovni rušiaceho signálu (LTE = -70 dBm) sa vplyv veľkosti prekrytia spektier jednotlivých signálov pozorovať nedá, čo je vidieť na Obr. 81. Toto platí pre LTE signál so šírkou pásma 10 MHz. Pri LTE signály so šírkou pásma 1,4 MHz sa nedá vplyv veľkosti prekrytia spektier signálov vôbec pozorovať. Signál LTE je rovnako rušený pri maximálnom aj minimálnom prekrytí signálov. Menšie odchýlky sú však pozorovateľné pri modulácii 64QAM, ktorá je na Obr. 82.



Obr. 80 Závislosť parametru EVM na parametri C/N pri LTE = 10 MHz a DVB-T = -65 dBm pre moduláciu 64QAM (čiastočné prekrytie).

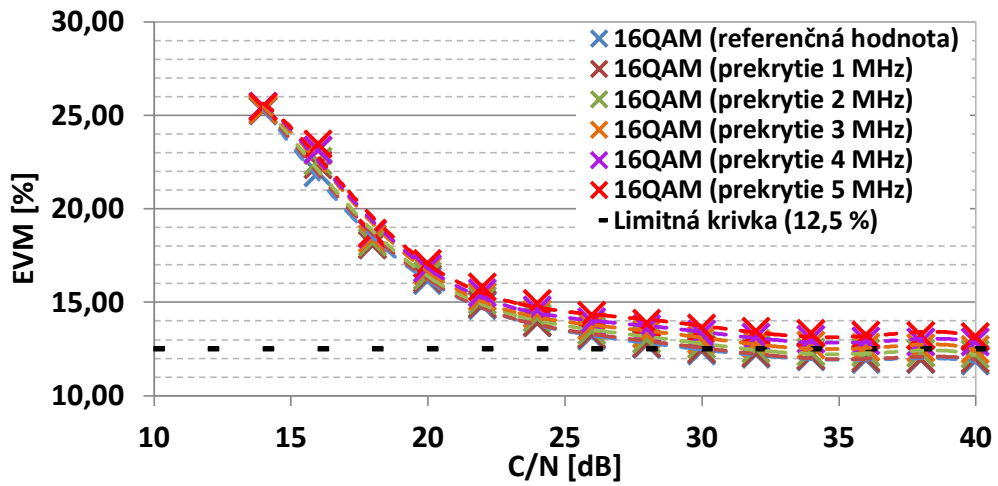


Obr. 81 Závislosť parametru EVM na parametri C/N pri LTE = 10 MHz a DVB-T = -70 dBm pre moduláciu 64QAM (čiastočné prekrytie).

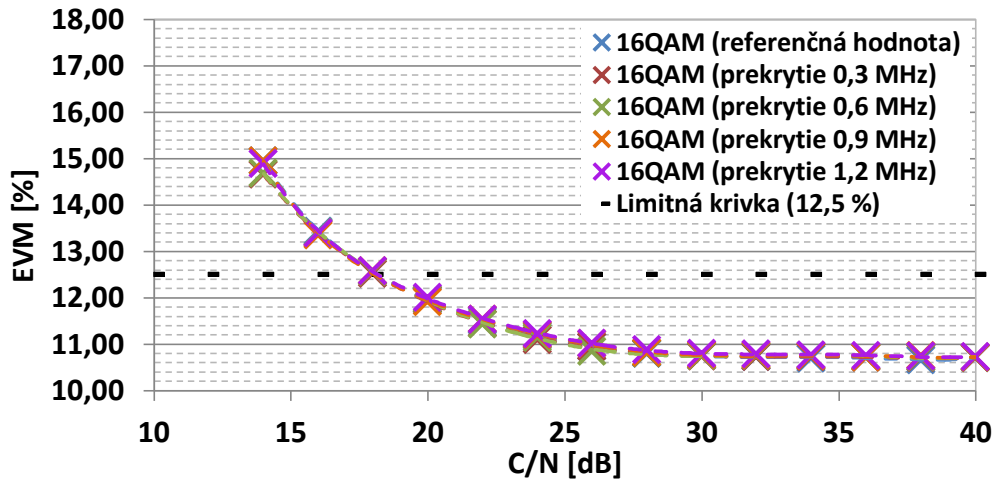


Obr. 82 Závislosť parametru EVM na parametri C/N pri LTE = 1,4 MHz a DVB-T = -65 dBm pre moduláciu 64QAM (čiastočné prekrytie).

Pri porovnaní LTE signálu so šírkou pásma 1,4 a 10 MHz je vidieť, že LTE s menšou šírkou pásma nadobúda nižšie hodnoty EVM a potrebuje silnejší rušiaci signál alebo nižší odstup signálu od šumu C/N nato aby prekročil maximálnu povolenú hodnotu. Z toho vyplýva, že je odolnejší proti rušeniu než LTE signál so šírkou pásma 10 MHz. Môže to byť spôsobené ako v predchádzajúcich prípadoch pri meraní parametrov MER a BER tým, že tá istá energia je pri väčšej šírke pásma viacej rozložená. Tento prípad je možný porovnať na Obr. 83 a Obr. 84, kde je vidieť, že pri LTE signály so šírkou pásma je limit prekročený už pri C/N = 30 dB a pri väčšom prekrytí signálov je limit prekročený už od začiatku. Pri LTE so šírkou pásma je limit prekročený až pri C/N = 18 dB.



Obr. 83 Závislosť parametru EVM na parametri C/N pri LTE = 10 MHz a DVB-T = -60 dBm pre moduláciu 16QAM (čiastočné prekrytie).

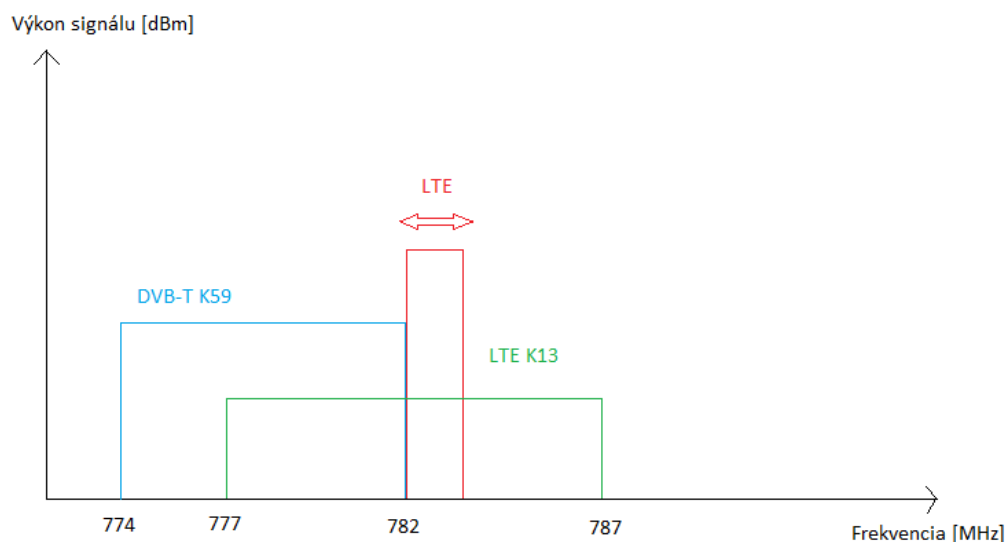


Obr. 84 Závislosť parametru EVM na parametri C/N pri LTE = 1,4 MHz a DVB-T = -60 dBm pre moduláciu 16QAM (čiastočné prekrytie).

10 SCENÁR MERANIA KOEXISTENCIE DVB-T A LTE SYSTÉMOV V REÁLNO M PROSTREDÍ

10.1 Koexistenčný scenár a popis merania

Toto meranie bude zamerané na zachytenie a preskúmanie reálneho televízneho signálu, vysielané v teréne. Televízny signál bude rušený LTE signálom, ktorý bude generovaný z laboratórneho prístroja. Meranie bude zamerané hlavne na pozorovanie degradácie TV signálu. Po preštudovaní frekvenčných pásiem signálov, bol zvolený kanál 59. Kanál 59 sa nachádza v multiplexe s názvom DVB-T sieť 3 a obsahuje programy ako Prima LOVE, Óčko, Šlágr TV a iné. Vysielacie pásmo tohto kanálu je od 774 MHz do 782 MHz (nosný kmitočet je 778 MHz). Rušiaci LTE signál bol generovaný v kanály 13 (Uplink) v režime FDD vo frekvenčnom pásme od 777 MHz do 787 MHz. Tento signál však nebudeme používať ako 10 MHz kanál. Veľkosť kanálu nastavíme postupne na 1,4 MHz, 3 MHz a 5 MHz a budeme pozorovať závislosť rušenia DVB-T signálu od šírky kanálu LTE. Konštantná nebude ani stredná frekvencia LTE signálu. Tá sa bude postupne meniť a posúvať po celej šírke svojho kanálu, čo je znázornené na Obr. 85. Ako posledný sa bude konštantne meniť výkon LTE signálu, na ktorom bude taktiež závisieť degradácia DVB-T signálu. Ostatné parametre LTE a DVB-T signálu budú konštantné a budú rozobrané v ďalšej časti. O vplyvňovaní TV vysielania LTE signálom budeme pozorovať na TV prijímači. Merať sa budú parametre spomenuté v predchádzajúcej časti.



Obr. 85 Spektrá LTE a DVB-T signálov.

10.2 Systémové parametre signálov DVB-T a LTE

Systémové parametre signálu DVB-T sú získané z internetovej stránky Digitální Televize, ktorá udáva pre multiplex DVB-T sieť 3 údaje zobrazené v tabuľke Tabuľka 18 [17]. Parametre generovaného signálu LTE sú rozpísané v tabuľke Tabuľka 19. Šírka pásma, stredná frekvencia a úroveň signálu sa budú pri LTE signály meniť. Pri LTE signály bude vygenerovaný iba jeden subrámeček s moduláciou QPSK. Použitý je len jeden subrámeček preto, že generátor v režime uplink dokáže vygenerovať iba jeden subrámeček.

| | |
|--------------------------|--------|
| Šírka pásma | 8 MHz |
| Vysielač mód | 8K |
| Ochranný interval | 1/8 |
| Kódový pomer | 3/4 |
| Modulácia nosných | 64 QAM |

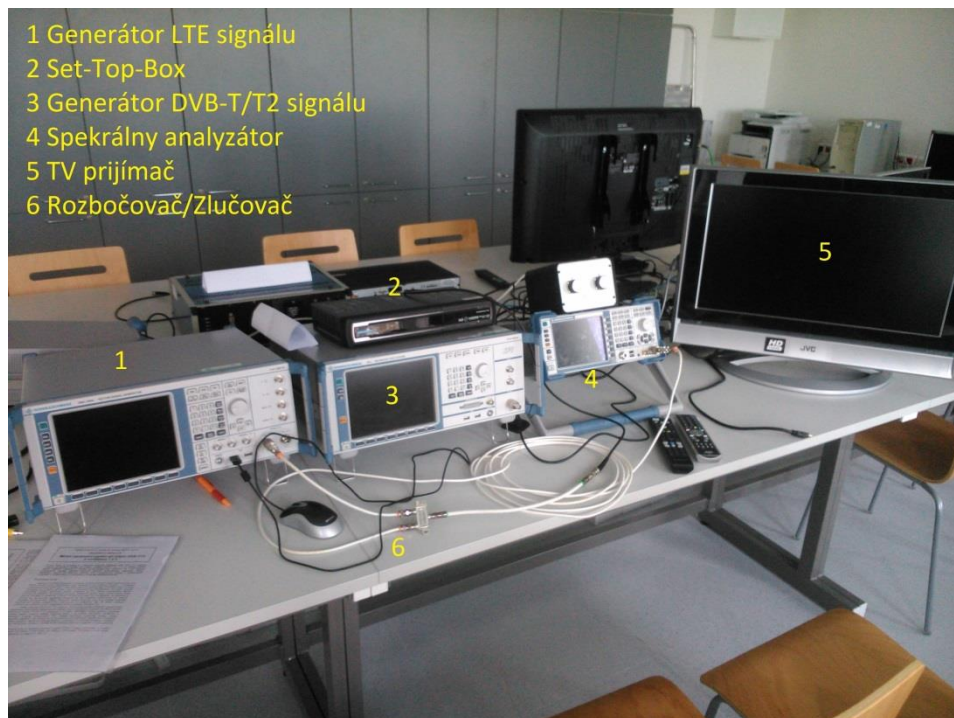
Tabuľka 18 Parametre multiplexu DVB-T sieť 3.

| | |
|--------------------------------|---------------------------|
| Kódový pomer | 1/3 (Turbo) |
| Šírka pásma | 1,4 MHz 3 MHz 5 MHz |
| IFFT veľkosť | 128 512 1024 |
| Ochranný interval | 4,7 μ s |
| Modulácia na subrámeček | QPSK |

Tabuľka 19 Parametre systému LTE.

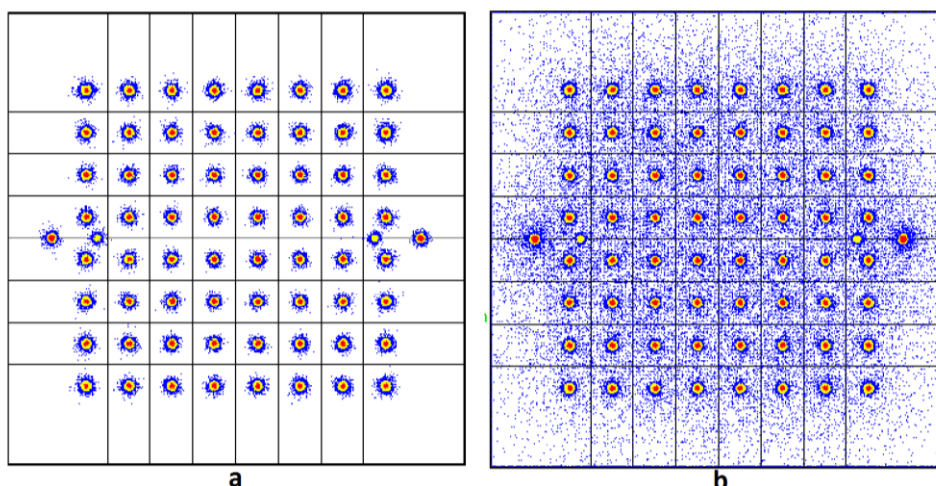
11 VYHODNOTENIE REÁLNEHO MERANIA

Meranie sa uskutočnilo na mierne upravenom meracom pracovisku, ktoré je vidieť na Obr. 86. Na spektrálnom analyzátore boli zobrazené RF spektrá koexistujúcich systémov a na ETL TV analyzátore bola meraná bitová chybovosť BER. Kvalita príjmu sa merala priamo na Set-Top-Boxe (STB), ktorý zachytával reálny signál. Generátor na DVB-T/T2 v tomto meraní nebol použitý.



Obr. 86 Zapojené meracie pracovisko.

Na spektrálnom analyzátore bolo overené, či LTE signál ovplyvňuje zachytávaný TV signál. Toto bolo následné sledované aj pomocou konštelačného diagramu. Konštelačný diagram bol zobrazený pri prijíme TV signálu bez interferenčných rušení a aj pri TV signály, ovplyvňovanom LTE signálom. Jednotlivé rušenie na konštelačnom diagrame je možno vidieť na Obr. 87. Podľa obrázkov je vidieť, že LTE signál ruší reálny TV príjem, čo bolo predpokladom pre ďalšie merania.

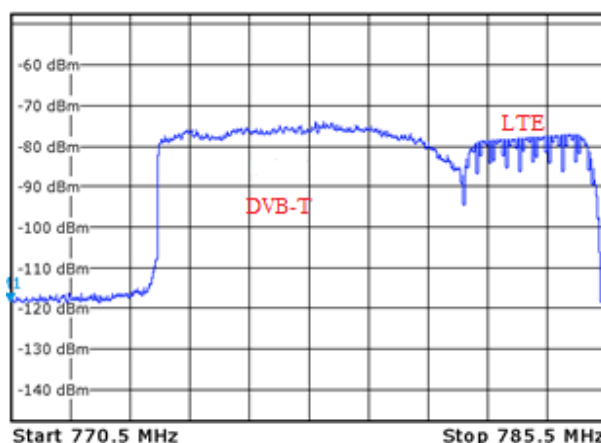


Obr. 87 Konšelačný diagram a) DVB-T signálu s hodnotou MER=37,2 dB b) DVB-T signálu rušeného LTE 3MHz signálom s hodnotou MER=13,5 dB.

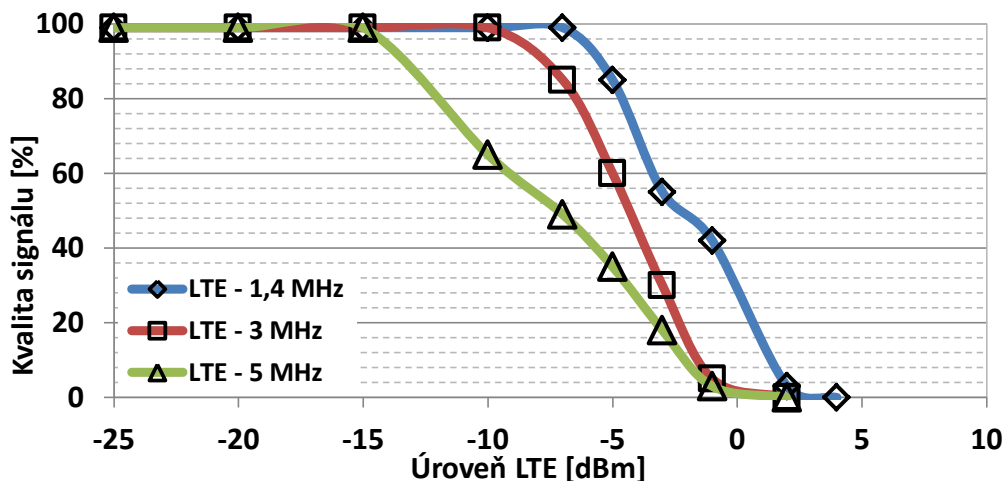
11.1 Meranie kvality TV signálu na SET-TOP-BOXE

Meranie kvality TV signálu na STB bolo merané preto, aby bolo zhodnotené reálne rušenie TV signálu, ktoré je viditeľné aj na TV prijímači.

Okrajový dotyk frekvenčných pásiem LTE a DVB-T signálu je vidieť na Obr. 88. Sú tu uvažované tri prípady. Prvý prípad je, že šírka pásma LTE signálu je 1,4 MHz a stredná frekvencia je 782,7 MHz. Pre druhý prípad bola zvolená šírka pásma 3 MHz so stredným kmitočtom 783,5 MHz a konečne posledný prípad so šírkou pásma 5 MHz o strednej frekvencii 784,5 MHz. Jednotlivé namerané údaje sú vynesené v grafe na obrázku Obr. 89. Z týchto údajom je vidieť, že LTE so šírkou pásma 1,4 MHz ovplyvňuje TV príjem najmenej. Širokopásmový LTE signál so šírkou pásma 5 MHz ovplyvňuje TV signál najviac. Tu je teda vidieť rozdiel medzi širokopásmovým a úzkopásmovým rušením. Rušenie TV signálu však nastáva až u vysokých hodnotách LTE signálu. Kvalitu TV príjmu ovplyvní až LTE signál s úrovňou okolo -10 dBm. Obráz začína sekať a vypadávať až pri kladných hodnotách úrovne LTE signálu.

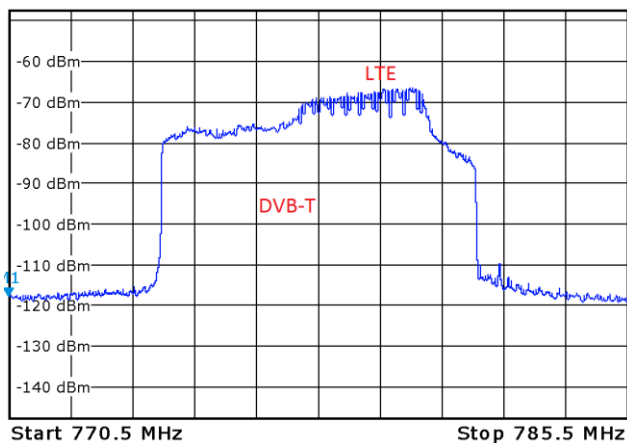


Obr. 88 RF spektrum pri okrajovom dotyku DVB-T a LTE signálu.

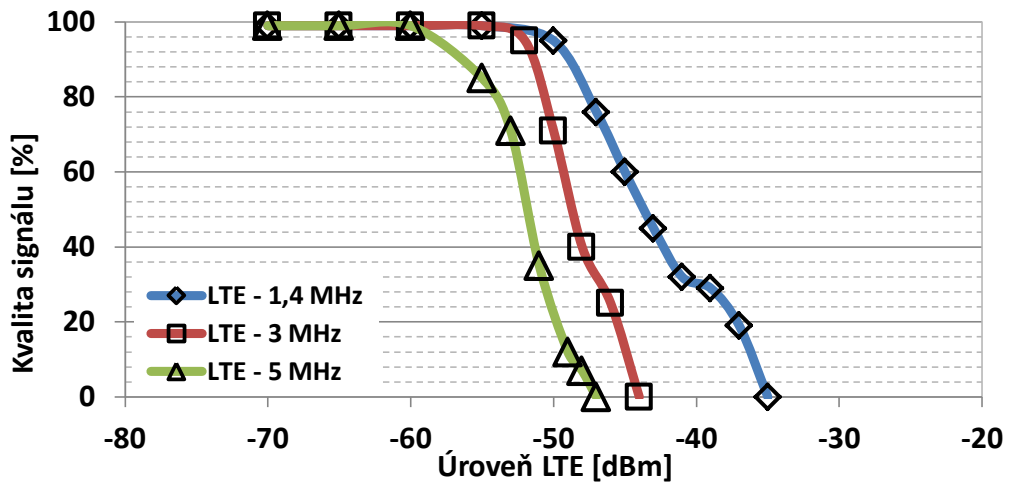


Obr. 89 Graf závislosti kvality signálu na úrovni LTE signálu pri okrajovom dotyku.

Na Obr. 90 je možné vidieť celkové prekrytie DVB-T a LTE signálu. Tak isto boli vygenerované signály LTE so šírkou pásma 1,4 a 3 a 5 MHz so strednou frekvenciou 779 MHz. Výsledky sú prezentované v grafe na Obr. 91. Medzi jednotlivými šírkami pásma je vidieť rozdiel v ovplyvňovaní LTE signálu a najväčší deštruktívny účinok má zasa signál s pásmom 5 MHz. Zaujímavé porovnanie je však medzi celkovým prekrytím signálov a medzi ich okrajovým dotykom. Keď sa tieto grafy porovnajú, je vidieť, že celkové prekrytie ovplyvňuje TV príjem oveľa viac ako okrajový dotyk. Pri celkovom prekrytí nastáva pokles kvality pri oveľa menšej úrovni rušiaceho LTE signálu, čo naopak pri okrajovom dotyku nastane až pri vysokých úrovniach LTE signálu.

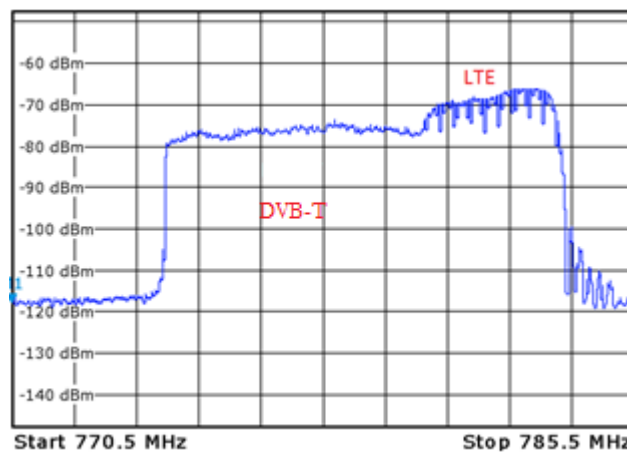


Obr. 90 RF Spektrum pri celkovom prekrytí DVB-T a LTE signálu.

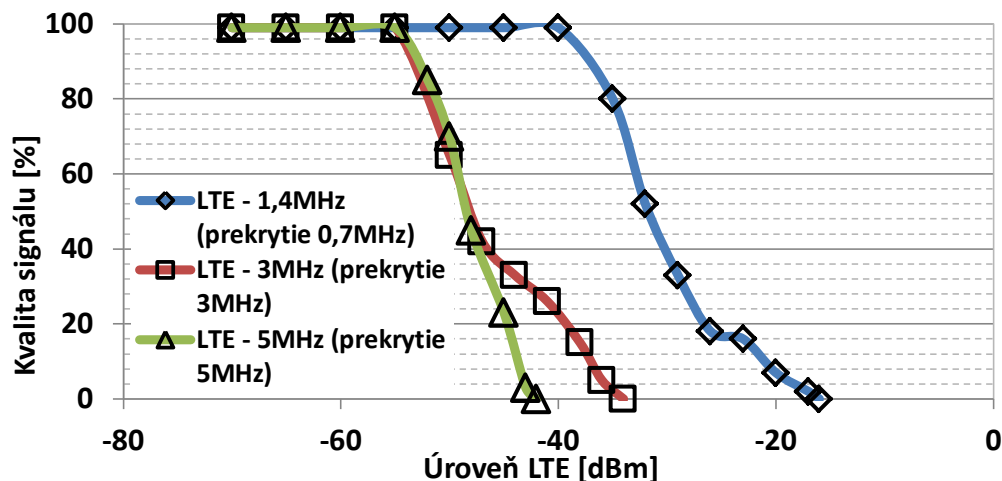


Obr. 91 Graf závislosti kvality signálu na úrovni LTE signálu pri celkovom prekrytí.

Posledným zo scenárov je čiastočné prekrytie jednotlivých systémov, ktoré je vidieť na Obr. 92. So strednou frekvenciou 782MHz sú vygenerované tri šírky pásma LTE signálu a to 1,4 a 3 a 5 MHz. V grafe na Obr. 93 je možné vidieť priebehy kvality signálu v závislosti na veľkosti úrovne LTE. Jednotlivé priebehy pre šírku pásma 3 a 5 MHz majú podobný charakter, no v TV prijímači je vidieť chyby v obraze najskôr pri rušiacom signály s 5 MHz šírkou pásma. Šírka pásma 1,4 MHz ovplyvňuje signál zasa najmenej. V porovnaní s celkovým prekrytím je potrebná väčšia úroveň rušiaceho signálu aby bolo vidieť chyby v obraze prípadne výpadok signálu. Naopak oproti okrajovému dotyku, čiastočné prekrytie ruší kvalitu TV signálu viac.



Obr. 92 RF Spektrum pri čiastočnom prekrytí DVB-T a LTE signálu.



Obr. 93 Graf závislosti kvality signálu na úrovni LTE signálu pri čiastočnom prekrytí.

11.2 Meranie bitovej chybovosti BER

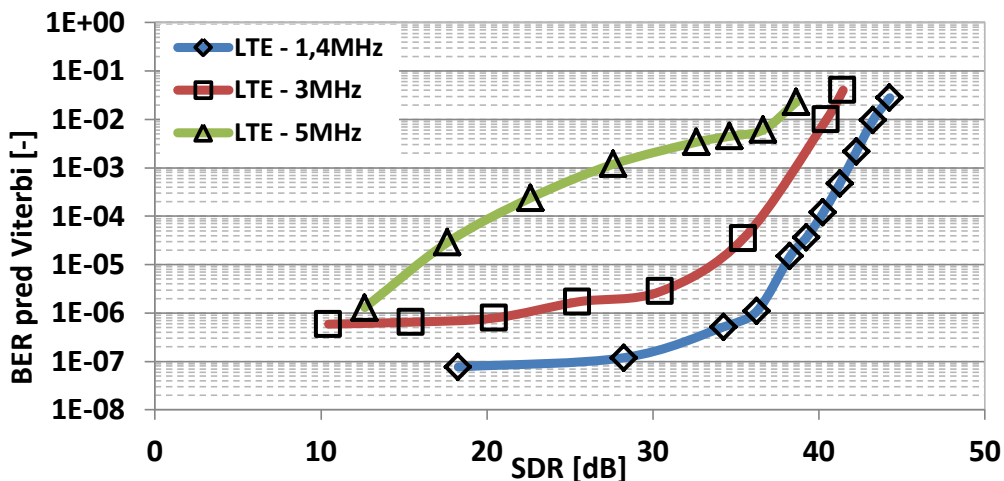
Parameter BER bol pozorovaný na závislosti na parametre SDR (Spectral Density Ratio). Tento parameter komplexne zahŕňa šírku pásma a úroveň ako prijímaného DVB-T tak aj rušiaceho LTE signálu. SDR je definovaný ako pomer výkonov medzi LTE a DVB-T vzťahnutý na jednotku šírky pásma. Je vyjadrený ako :

$$SDR = P_{LTE} - 10\log B_{LTE} - (P_{TV} - 10\log B_{TV}), \quad (6.1)$$

kde P_{LTE} je výkon signálu LTE, B_{LTE} vyjadruje šírku použitého pásma LTE kanálu, P_{TV} je výkon DVB-T signálu a B_{TV} je šírka pásma televízneho kanálu [18].

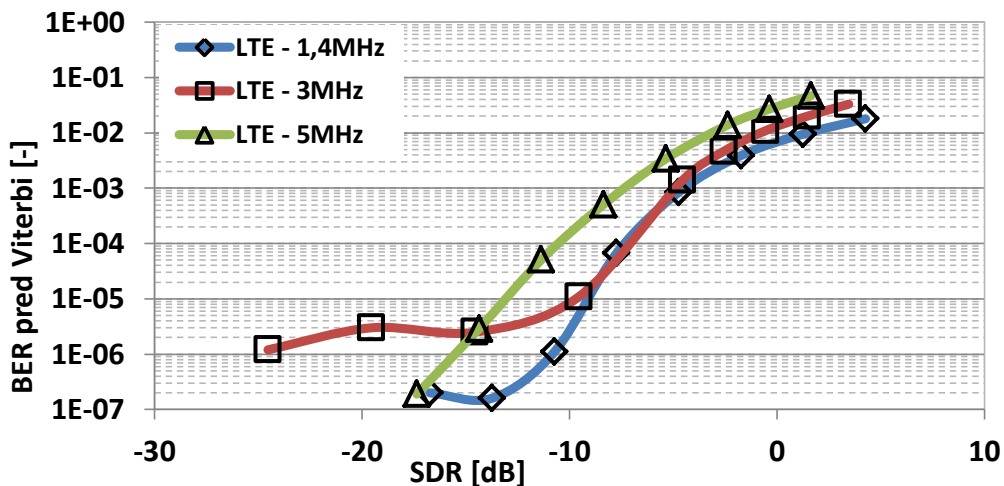
Pomocou tohto merania je možné zistiť kedy ešte TV signál spĺňa požiadavky QEF (Quasi Error Free). Táto požiadavka je splnená, keď je bitová chybovosť BER po Viterbiho dekódovaní menšia alebo rovná $2 \cdot 10^{-4}$.

Na Obr. 94 sa nachádza graf bitovej chybovosti pri okrajového dotyku frekvenčných spektier daných systémov. Ako bolo už uvedené pri meraní kvality boli vygenerované tri signály s rôznymi šírkami pásma LTE pre tri rôzne stredné frekvencie. Z grafu je vidieť rozdiel medzi širokopásmovým a úzkopásmovým rušením. Signál LTE s úzkou šírkou pásma 1,4 MHz ruší DVB-T signál najmenej. Naopak širokopásmový signál o šírke pásma 5 MHz ruší signál DVB-T najviac. Pri tomto type koexistencie sú vidieť najväčšie rozdiely medzi širokopásmovým a úzkopásmovým rušením. Toto rušenie však prebieha za pomerne vysokých hodnôt SDR parametru čo naopak neplatí u ďalších dvoch typov koexistencie, kde nastáva rušenie pri oveľa menších hodnotách SDR parametru.



Obr. 94 Graf závislosti bitovej chybovosti BER na SDR parametre pri okrajovom dotyku.

Graf bitovej chybovosti pri celkovom prekrytí pásma systémov je na Obr. 95. Pri rovnakej strednej frekvencii 779 MHz má TV signál najvyššiu bitovú chybovosť pri rušení signálom LTE so šírkou pásma 5 MHz. Najmenšie hodnoty BER sú namerané pri LTE so šírkou pásma 1,4 MHz. Rozdiely sú však menšie ako pri okrajovom dotyku spektier daných systémov. Na základe tohto je zrejmé, že ovplyvňovanie DVB-T signálu je závislé ako na veľkosti úrovne rušiaceho signálu, čo bolo preukázané aj pri meraní kvality TV signálu, tak aj na veľkosti prekrytej šírky pásma. Na rušenie TV signálu má iný vplyv úzkopásmové rušenie a iný vplyv širokopásmové rušenie. V Tabuľke 20. sa nachádzajú maximálne hodnoty SDR pri ktorých je ešte splnený QEF príjem pre DVB-T signál.

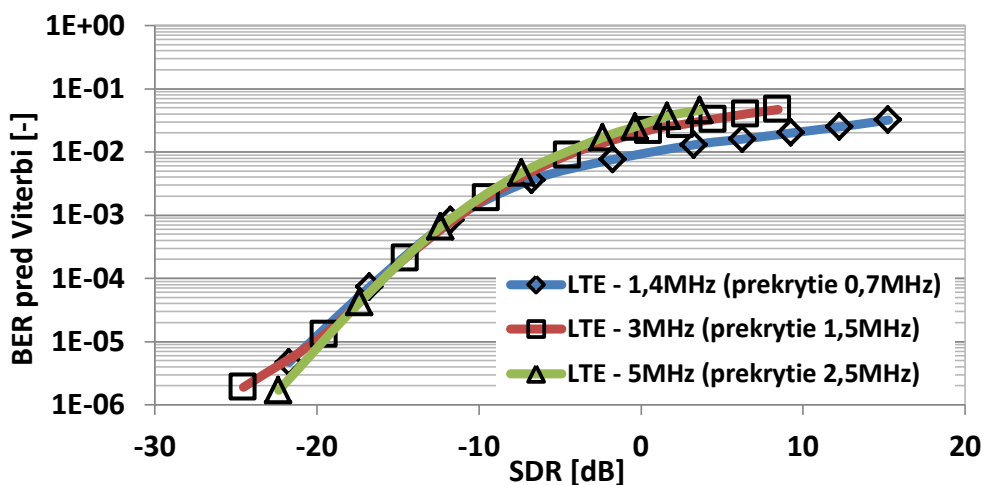


Obr. 95 Graf závislosti bitovej chybovosti BER na SDR parametre pri celkovom prekrytí.

| Šírka pásma LTE signálu [MHz] | Okrajový dotyk SDR [dB] | Celkové prekrytie SDR [dB] | Čiastočné prekrytie SDR [dB] |
|-------------------------------|-------------------------|----------------------------|------------------------------|
| 1,4 | 43,8 | 1,1 | 4,1 |
| 3 | 41 | 0,5 | 2,5 |
| 5 | 38,3 | -0,9 | -0,4 |

Tabuľka 20 Maximálne hodnoty SDR [dB] parametru pri splnenom QEF prijme DVB-T signálu pre rôzne scenáre.

Pre ďalšie porovnanie bola bitová chybovosť odmeraná aj pri čiastočnom prekryvaní frekvenčných pásem DVB-T a LTE signálu. Bitová chybovosť BER pri čiastočnom prekrytí systémov DVB-T a LTE je zobrazená v grafe na Obr. 96. Pri tomto scenári je vidieť, že šírka pásma LTE signálu nemá vplyv na rušenie signálu DVB-T až do hodnoty SDR 0 dBm. Po prekročení tejto hodnoty sa už jednotlivé šírky pásma trochu líšia. Týmto bolo dokázané, že okrem vplyvu úrovne a šírky pásma prekrytia, má na kvalitu a bitovú chybovosť vplyv aj druh vzájomného prekrytia.



Obr. 96 Graf závislosti bitovej chybovosti BER na SDR parametre pri čiastočnom prekrytí.

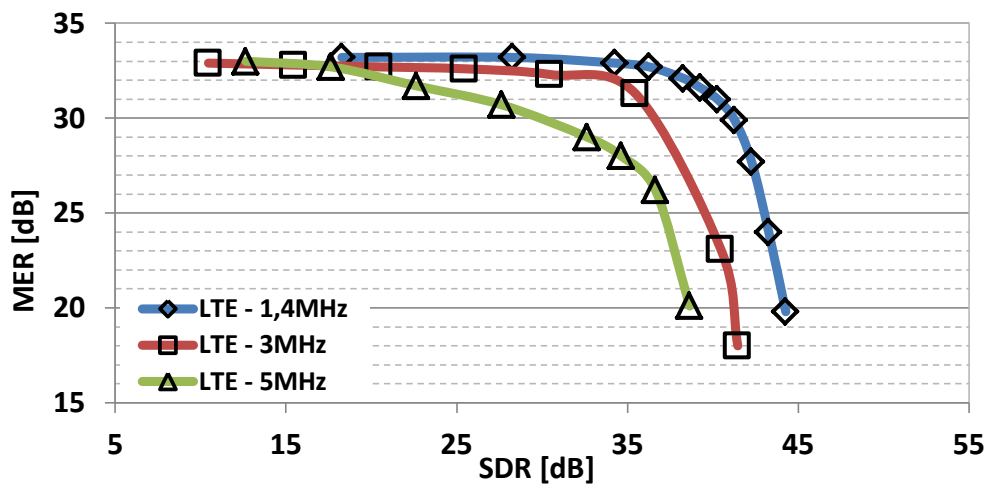
11.3 Meranie modulačnej chybovosti MER

Parameter MER bol tak isto ako BER vyhodnotený v závislosti na SDR parametre. Aj tu boli uvažované tri typy prekrytia spektra a to okrajový dotyk, celkové a čiastočné prekrytie. Parameter MER bol vyhodnotený taktiež pre tri šírky pásma 1,4 MHz, 3 MHz a 5 MHz.

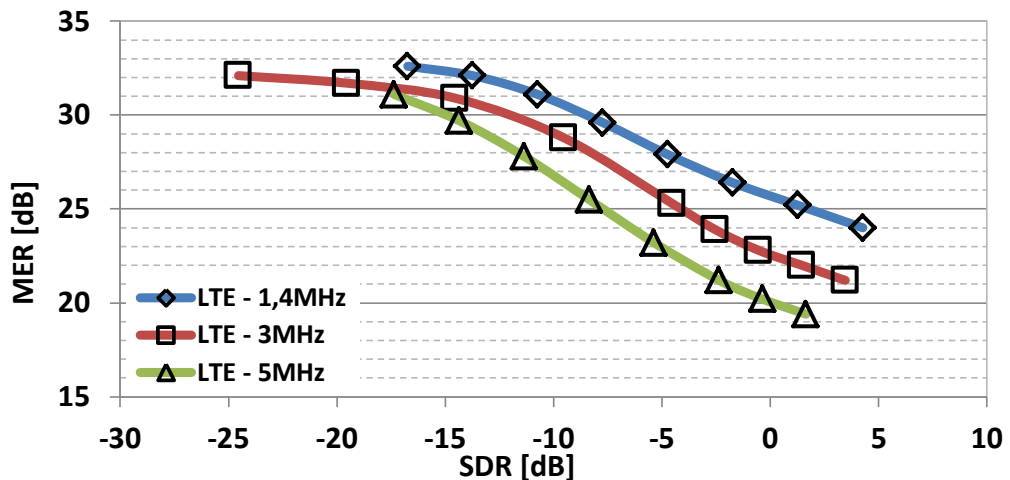
Scenár s okrajovým dotykom je možné vidieť na Obr. 97. Pre jednotlivé šírky kanála boli zvolené stredné frekvencie LTE signálu na 782,7 MHz (šírka pásma 1,4 MHz), 783,5 MHz (šírka pásma 3 MHz) a 784,5 MHz (šírka pásma 5 MHz). Z grafu je možné usúdiť, že úzkopásmové LTE rušenie má na TV signál najmenší vplyv, čiže nastáva pri vyšších hodnotách SDR ako širokopásmové rušenie. Na prudkosť poklesu však nemá

veľmi široka pásma vplyv. Je vidieť, že pokles hodnoty MER nastáva prudko a začína okolo hodnoty 35 dB. Hodnoty MER teda klesajú až pri vysokých hodnotách SDR, čomu predchádza silný rušiaci LTE signál.

Na Obr. 98 je možné vidieť graf modulačnej chyby MER závislej na SDR parametre pri celkovom prekrytí. Stredná frekvencia bola zvolená 779 MHz. Aj pri tomto prekrytí je možné vidieť, že širokopásmové 5 MHz rušenie má na parameter MER najväčší vplyv, naopak úzkopásmové rušenie vplyva na MER najmenej. Keď je však porovnané celkové prekrytie s okrajovým dotykom, je možné zistiť, že hodnota MER pri celkovom prekrytí klesá postupne. Rozdiel je aj v hodnotách SDR parametra pri ktorých k poklesu MER dochádza. Pri celkovom prekrytí hodnota MER začína klesať už pri SDR s hodnotou približne -15 dB a na nemerateľnú úroveň sa dostáva pri hodnote SDR okolo 4 dB.

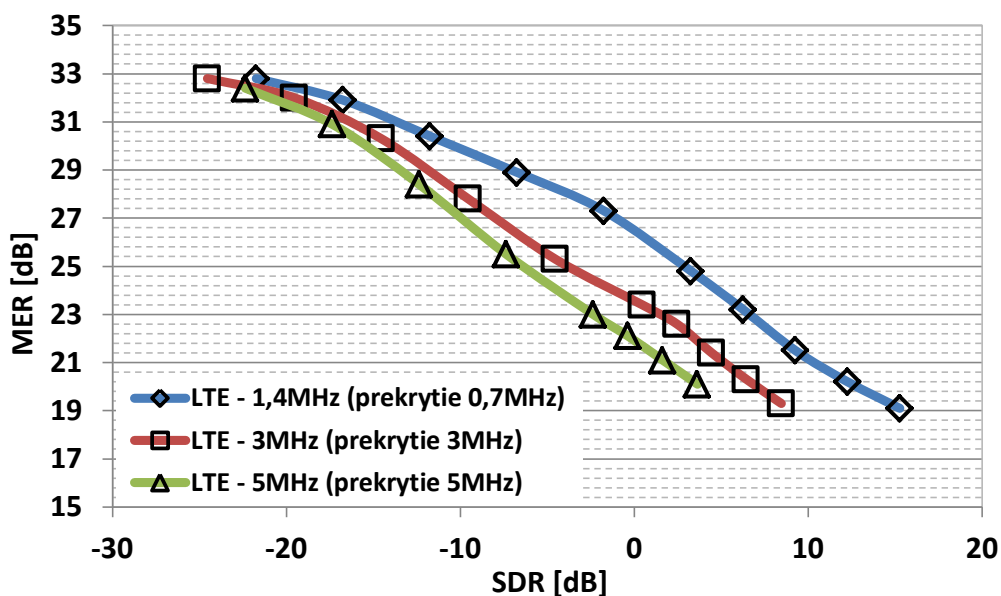


Obr. 97 Graf závislosti modulačnej chyby MER na SDR parametre pri okrajovom dotyku.



Obr. 98 Graf závislosti modulačnej chyby MER na SDR parametre pri celkovom prekrytí.

V grafe na Obr. 99 je možné vidieť závislosť parametra MER na hodnote SDR pri čiastočnom prekrytí spektier. Stredná frekvencia LTE signálu bola nastavená na 782 MHz. Šírky signálu LTE ovplyvňujú hodnoty MER tak isto ako v predchádzajúcich dvoch prípadoch a to tak, že širokopásmový signál ovplyvňuje MER najviac a úzkopásmový LTE signál najmenej. Pokles hodnôt MER pri čiastočnom prekrytí nastáva pomaly ako pri celkovom prekrytí, je však potrebný silnejší rušiaci LTE signál. Oproti okrajovému dotyku je však rušiaci LTE signál oveľa menšie.



Obr. 99 Graf závislosti modulačnej chyby MER na SDR parametre pri čiastočnom prekrytí.

ZÁVER

V tejto bakalárskej práci boli popísané DVB-T/T2 a LTE systémy. Definované boli ich frekvenčné pásma a kritické frekvenčné scenáre pri ktorých môže nastať koexistencia. Bolo navrhnuté meracie pracovisko a postup merania, ktorý sa bude používať pri meraní miery ovplyvňovania DVB-T/T2 a LTE signálov v rôznych koexistenčných scenároch. Parametre, ktoré sa budú merať boli popísané v samostatnej kapitole. Funkčnosť meracieho pracoviska a vhodne zvolený postup bol preverený v samotnom meraní.

Táto práca obsahuje niekoľko rôznych scenárov koexistencie. Pri meraní bol zahrnutý ako statický tak aj mobilný príjem DVB-T/T2 signálu. Preskúmaný bol aj signál LTE v scenáre zameranom na meranie parametru EVM. Ako posledný koexistenčný scenár bol zvolený scenár rušenia reálneho signálu získaného z prostredia. Všetky koexistenčné scenáre sú zhodnotené a porovnané, doplnené aj o grafické spracovanie výsledkov v podobe grafov.

K práci je taktiež pridaná príloha s návrhom laboratórnej úlohy a jej vzorové vypracovanie. Ďalšia príloha ešte obsahuje, niektoré zaujímavé závislosti vynesené v grafoch. Pre veľký počet meraní nebolo možné všetky závislosti prezentovať v práci. Všetky namerané hodnoty s príslušnými grafmi preto boli v podobe excelovských súborov vložené na priložené CD.

Časti práce s meraním koexistencie medzi štandardmi DVB-T/T2 a LTE v reálnom prostredí boli použité na vytvorenie článku na súťaž EEICT 2015. Výsledky z tohto reálneho merania boli tak isto použité aj do článku na 38. Medzinárodnú Telekomunikačnú Konferenciu TSP 2015 v Prahe, kde bol článok úspešne prijatý.

LITERATÚRA

- [1] FISHER, W. Digital Video and Audio Broadcasting Technology, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. ISBN 978-3-540-76357-4.
- [2] HANUS, S. Nové technologie mobilních komunikací pro integrovanou výuku VUT a VŠB-TUO. Elektronické skriptum. ISBN 978-80-214-4824-7. Brno, 2013. (cs)
- [3] DÁŘA, P. SIMULACE RF PŘENOSOVÉHO KANÁLU PRO DVB-T V PROSTŘEDÍ MATLAB. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 61 s. Vedoucí semestrální práce Ing. Radim Štukavec.
- [4] MARŠÁLEK, R. Teorie rádiové komunikace FEKT VUT v Brně. Elektronické texty. Brno
- [5] RECOMMENDATION, ITU-R BT.601-7; Studio encoding parameters of digital television for standard 4:3 and wide-screen 16:9 aspect ratios [on-line], 03/2011 [citované 2014-11-03]. Dostupné z http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.601-7-201103-I!!PDF-E.pdf
- [6] KRATOCHVÍL, T. Digitální televizní a rozhlasové systémy FEKT VUT v Brně. Elektronické texty. Brno
- [7] HANUS, S. Základy televizní techniky III. Skriptum FEKT VUT v Brně. Brno, MJ Servis, 2010. ISBN 978-80-214-4206-1
- [8] DIGITÁLNÍ TELEVIZE; Přesah rakouských DVB-T programů na území ČR - Ochranný interval [on-line], 10/2007 [citované 2014-11-03]. Dostupné z <http://www.digitalnitelevize.cz/forum/rakouske-dvb-t-programy-v-cr/ochranny-interval-31756/?stranka>
- [9] STROUHAL, A. Simulace RF přenosového kanálu pro DVB-T2. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 72 s. Vedoucí semestrální práce Ing. Ladislav Polák.
- [10] POSPÍCHAL, M. DIGITÁLNÍ POZEMNÍ TELEVIZNÍ VYSÍLÁNÍ DVB-T/H A DVB-T2. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 120 s. Vedoucí semestrální práce doc. Ing. TOMÁŠ KRATOCHVÍL, Ph.D.
- [11] NAVRÁTIL, P. MODEL SYSTÉMU LTE. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 72 s. Vedoucí semestrální práce prof. Ing. Stanislav Hanus, CSc.
- [12] 3rd GENERATION PARTNERSHIP PROJECT. 3GPP TS 36.211 V 8.9.0: Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation [on-line], 12/2009 [citováno 2012-04-17]. Dostupné z [www: <http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/36211.htm >](http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/36211.htm)
- [13] LTE-Advanced Compatibility with Digital Broadcasting Receiver at 800 MHz.
- [14] Coexistence Digital TV and LTE (1MA176_e3), Rohde & Schwarz, 2012, 34 pages.
- [15] POLÁK, L., KALLER, O., KLOZAR, L., ŠEBESTA, J., KRATOCHVÍL, T.: Mobile Communication Networks and Digital Television Broadcasting Systems in the Same Frequency Bands: Advanced Co-Existence Scenarios. *Radioengineering*, vol. 23, no. 1, pp. 375-386, Apr. 2014.

- [16] FILIP M & W; DVB-T meranie signal. [on-line], 2014 [citované 2014-11-12]. Dostupné z <http://www.filipmaw.sk/Text/DVB-T-meranie-signalu>
- [17] DIGITÁLNÍ TELEVIZE; Vysílací síť 3 [on-line], 10/2007 [citované 2014-11-23]. Dostupné z <http://www.digitalnitelevice.cz/informace/dvb-t/vysilaci-sit-3.html>
- [18] POLÁK, L., KALLER, O., KLOZAR, L., ŠEBESTA, J., KRATOCHVÍL, T.: Koexistence služeb DVB-T2-Lite a LTE ve sdílených frekvenčních pásmech. Sdělovací technika, 8/2014.

ZOZNAM PRÍLOH

Príloha A – Návrh laboratórnej úlohy

Príloha B – Vzorové vypracovanie laboratórnej úlohy

Príloha C – Prehľad zaujímavých grafov

PRÍLOHA A

Digitální televizní a rozhlasové systémy (MDTV, LDTV)

Laboratorná úloha

Meranie koexistencie medzi bezdrôtovými komunikačnými systémami DVB-T a LTE v uplinku

Cieľom tejto úlohy je priblížiť problematiku koexistencie bezdrôtových systémov DVB-T a LTE a pozorovať dopady vzájomnej koexistencie týchto systémov na ich poskytované služby. Plnením tejto úlohy nadobudnete predstavu o rôznych koexistenčných scenároch, ktoré môžu nastať a preskúmate spektrá týchto scenárov. Merat' sa budú objektívne parametre MER ((Modulation Error Ratio) a BER (Bit Error Ratio) reálneho DVB-T vysielania, ktoré bude rušené generovaným LTE signálom v uplinku.

Teoretický úvod

V dnešnej dobe je frekvenčné spektrum z veľkej časti obsadené rôznymi službami. V dôsledku toho môže dôjsť k interakcii a vzájomným interferenciám rádiových signálov (RF). Koexistencia teda znamená vzájomné ovplyvňovanie sa medzi rôznymi systémami. V tejto laboratornej úlohe sú pozorované scenáre koexistencie medzi terestriálnou digitálnou televíziou DVB-T a mobilnou bezdrôtovou komunikačnou službou LTE v uplinku. Keďže sa frekvenčné pásma môžu prekrývať rôznym spôsobom, rozdeľujú sa na dva základné typy koexistencie. Prvý typ je scenár celkového prekrytia (Full Overlapping). Jedná sa o prípad, kde celé vyhradené frekvenčné pásmo pre vysielanie služby LTE leží vo frekvenčnom pásme vysielania DVB-T. Druhý typ, ktorý môže nastať, je scenár čiastočného prekrytia (Partial Overlapping). Tento scenár nastáva, keď RF signál LTE a DVB-T nie sú prekryté úplne, ale prekrývajú sa len určitou časťou. Veľkosť prekrytia môže byť rôzna a môže dôjsť k prekrytiu v dolnej časti uvažovaného RF pásma, ale aj v hornej časti. Pri tomto type je predpoklad, že čím väčšie je prekrytie, tým výraznejšie je rušenie RF signálu a naopak. Špeciálny prípad je, keď sa frekvenčné RF pásma navzájom dotýkajú len bočnými lalokmi, no vôbec sa neprekrývajú. Aj tento prípad má však vplyv na monitorované parametre jednotlivých systémov.

V tejto úlohe bude meraný reálny DVB-T signál zachytený z vysielача v teréne. V súčasnej dobe je Brno pokryté DVB-T vysielaním v štyroch multiplexoch. Jednotlivé multiplexy so základnými parametrami sú uvedené v Tab.1. Najčastejšie sa na vyhodnotenie DVB-T štandardu používa bitová chybovosť BER a modulačná chybovosť MER. BER informuje o podiele chybných bitov (spôsobených chybami v prenosovom kanáli) vo vzťahu ku všetkým prenášaným bitom za určitý časový interval. Parameter BER môže byť meraný pred dekodérom Viterbi alebo za dekodérom Viterbi v DVB-T prijímači. Pri meraní pred Viterbiho dekodérom určujeme takzvaný QEF príjem (Quasi-Error Free), čiže bezchybný príjem, ktorý platí pre hodnoty BER menšie alebo rovné 2×10^{-4} . MER nesie informáciu o úrovni a šume, ktorý zasahuje do digitálneho signálu. V praxi bez znalosti tohto parametra nie je možné zaručiť stabilný príjem. Platí, že čím vyššia je jeho hodnota, tým menšia je miera rušenia.

Parametre BER a MER sa najčastejšie vyhodnocujú v závislosti na parametre SDR (Spectral Density Ratio). Tento parameter komplexne zahŕňa šírku pásma a úroveň ako prijímaného DVB-T tak aj rušiaceho LTE signálu. SDR je definovaný ako pomer výkonov medzi LTE a DVB-T vzťahnutý na jednotku šírky pásma. Je vyjadrený ako :

$$SDR = P_{LTE} - 10\log B_{LTE} - (P_{TV} - 10\log B_{TV}),$$

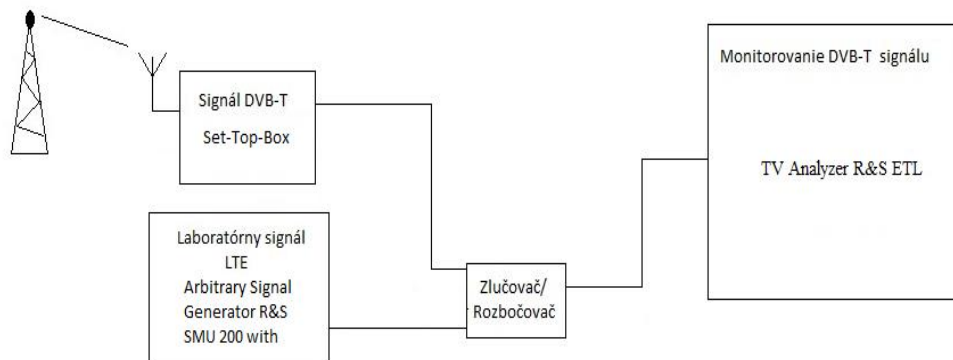
kde P_{LTE} je výkon signálu LTE, B_{LTE} vyjadruje šírku použitého pásma LTE kanálu, P_{TV} je výkon DVB-T signálu a B_{TV} je šírka pásma televízneho kanálu.

Parameter MER je často vyhodnocovaný aj v závislosti na parametre C/N, ktorý udáva pomer medzi úrovňou nosnej vlny a šumom. Tento parameter sa udáva v dB. Požiadavky na C/N sa líšia vzhľadom na použitú moduláciu, kódový pomer a prenosové podmienky.

Úloha bude meraná na meracom pracovisku, ktorého bloková schéma je na Obr.1. Arbitrary Signal Generator R&S SMU 200 with LTE je prístroj, ktorý vytvára LTE signál podľa 3GPP2 Release 8. Ďalej sa dá nastaviť mód FDD (Frequency Division Duplexing) alebo TDD (Time Division Duplexing) a požadovaná modulácia. TV Analyzer R&S ETL analyzátor slúži na meranie parametrov DVB-T/T2 signálu. Pomocou prístroja sa dá taktiež zobrazit' a pozorovat' spektrum RF signálov. Prístroj je schopný analyzovat' DVB-T aj DVB-T2 RF signál. Môže taktiež analyzovat' transportný tok vysielaného TV signálu.

Tab. 1 Základné systémové parametre a jednotlivé programy vysielané v štyroch multiplexoch v Brne.

| | | |
|---------------------------------------|--|---|
| DVB-T Sieť 1 (29. kanál, f=538MHz) | ČT1, ČT2, ČT24, ČT24 Sport | Šírka pásma 8 MHz Vysielací mód 8k Ochranný interval 1/4 Kódový pomer 2/3 Modulácia 64QAM |
| DVB-T Sieť 2 (40. kanál, f=626MHz) | Nova, Prima, Barrandov, Prima Cool, Nova Cinema | Šírka pásma 8 MHz Vysielací mód 8k Ochranný interval 1/4 Kódový pomer 2/3 Modulácia 64QAM |
| DVB-T Sieť 3 (59. kanál, f=778MHz) | Public TV, Z1 | Šírka pásma 8 MHz Vysielací mód 8k Ochranný interval 1/4 Kódový pomer 2/3 Modulácia 64QAM |
| DVB-T Sieť 4 (64. kanál, f=818MHz) | ČT1, Nova HD, Óčko | Šírka pásma 8 MHz Vysielací mód 8k Ochranný interval 1/8 Kódový pomer 2/3 Modulácia 64QAM |



Obr. 1 Bloková schéma meracieho pracoviska.

Zadanie a postup merania:

1. Zoznámte sa s obsluhou prístroja TV Analyzer R&S ETL, ktorý sa používa na analýzu DVB-T signálu a tak isto aj s prístrojom Arbitrary Signal Generator R&S SMU 200 with LTE pre generovanie rušiaco signálu LTE. Signál z LTE generátoru spolu s reálnym DVB-T signálom sú privedené do Zlučovača/Rozbočovača a následne pokračujú do ETL analyzátoru, kde sú vyhodnocované.
2. Nastavte generátor SMU na požadované parametre pre správne vygenerovanie rušiaco LTE signálu pri scenáre celkového prekrytia so šírkou pásma 1,4 a 5 MHz.

Postup: -Nastavenie Frekvencie $Freq = 779$ MHz

-Nastavenie úrovne signálu sa bude postupne meniť, na začiatok nastavte $Level = -90$ dBm

-Ďalšie nastavenie *Baseband A config. – EUTRA/LTE* a nastaviť *Duplexing – FDD, Link Direction – Uplink, Sequence Length – 1 Frame*

-Nastaviť šírku pásma LTE signálu *General UL Settings – Channel Bandwidth = 1,4 MHz* a po odmeraní na 5MHz.

-Nastaviť správne generovanie Rámčov, *Frame Configuration – Modulation – QPSK a No. RB* na maximum (iná hodnota pre šírku pásma 1,4 MHz a iná pre 5 MHz)

- Zapnúť výstup generátoru bez AWGN a Fading

3. Nastavenie ETL analyzátoru pre zobrazenie spektier RF signálov a meranie jednotlivých chybovostí pri scenáre celkového prekrytia.

Postup: -Nastaviť analyzátor na spracovanie DVB-T signálu *Digital TV – Digital TV Settings – OFDM DVB-T/H* (potvrdenie jemným potlačením otočného kolieska)

-Nastavenie Frekvencie $Freq = 778$ MHz

-Zmena jednotiek v ktorých analyzátor meria *Digital TV – Overview – Edit table* (Level – dBm, MER – dB)

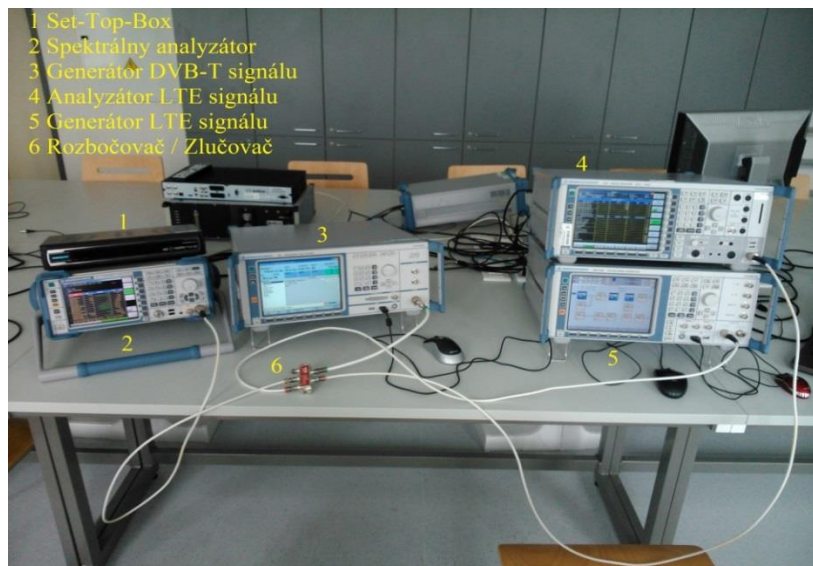
4. Zobrazte frekvenčné spektrum prekrytých signálov a pozorujte prekrytie signálov pri scenáre celkového aj čiastočného prekrytia. Frekvenčné spektrum si ručne zaznamenajte. Postup: -Zobrazenie spektra *Digital TV – Spectrum*

5. Zobrazte konstelačný diagram pre nerušený signál DVB-T a potom konstelačný diagram pre signál DVB-T rušený signálom LTE. Úroveň LTE signálu vhodne zvolte aby bolo vidieť rušenie v konstelačnom diagrame. Konstelačné diagramy v závere porovnajte a vyhodnoťte.

Postu: -Zobrazenie konstelačného diagramu *Digital TV – Modulation Analysis – Const Diagram*.

6. Pri postupnom zvyšovaní úrovne LTE signálu premerajte modulačnú chybovosť MER a bitovú chybovosť BER pred aj po Viterbiho dekódovaní na ETL analyzátore pre scenár celkového prekrytia. Úroveň LTE signálu meňte od -75 do -50 dBm. Šírku pásma volte 1,4 MHz a 5 MHz. Do záveru vypracujte graf závislostí BER respektíve MER na SDR parametre a výsledky okomentujte.
7. Podľa bodu 6 premerajte chybovosti MER a BER pred a po Viterbiho dekódovaní tak isto aj pre scenár čiastočného prekrytia. Do záveru taktiež pridajte graf závislostí MER a BER na SDR parametre pre čiastočné prekrytie a porovnajte ho s celkovým prekrytím. Nastavenie signálu LTE volte: Frekvencia = 782 MHz, Šírka pásma = 1,4 a 5 MHz, Úroveň = -75 až -45 dBm.
8. Zistite maximálnu hodnotu SDR parametra pri celkovom aj čiastočnom prekrytí aby bol splnený QEF príjem. Príjem QEF je splnený ak BER je menší alebo rovný 2×10^{-4} .

Použité meracie prístroje:



Obr. 2 Rozloženie prístrojov na pracovisku.

- Generátor LTE signálu - Arbitrary Signal Generator R&S SMU 200 with LTE
- TV Analyzátor - TV Analyzer R&S ETL
- Rozbočovač/Zlučovač
- Prepojovacie vodiče

Poznámky k meraniu:

Pri meraní je potrebné dávať pozor na nastavovanie výkonu LTE signálu. Signál je potrebné zväčšovať pomaly a postupne po malých krokoch aby nedošlo k poškodeniu prístrojov.

Záver:

Do záveru je potrebné okomentovať každý bod merania. V bodoch, ktoré si to vyžadujú je treba vyniesť hodnoty do grafu. Grafy treba medzi sebou porovnať a zhodnotiť.

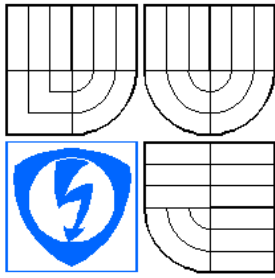
Kontrolné otázky:

1. Aké poznáme scenáre koexistencie medzi bezdrôtovými službami a čím sa vyznačujú?
2. Čo je to SDR parameter a čo vyjadruje?
3. Čo vyjadrujú objektívne parametri MER a BER, merané pri TV vysielaní v štandarde DVB-T?
4. Čo znamená QEF príjem a kedy je splnený?

Použitá a doporučená literatúra:

- [1] ROHDE-SCHWARZ; Coexistence Digital TV and LTE, Application Note 1MA176_3e, August 2010
- [2] POLÁK, L., KALLER, O., KLOZAR, L., ŠEBESTA, J., KRATOCHVÍL, T.: Koexistence služieb DVB-T2-Lite a LTE ve sdílených frekvenčních pásmech. Sdělovací technika, 8/2014.
- [3] DIGITÁLNÍ TELEVIZE; Vysílací síť 3 [on-line], 10/2007 [citované 2014-11-23]. Dostupné z <http://www.digitalnitemlevize.cz/informace/dvb-t/vysilaci-sit-3.html>

PRÍLOHA B



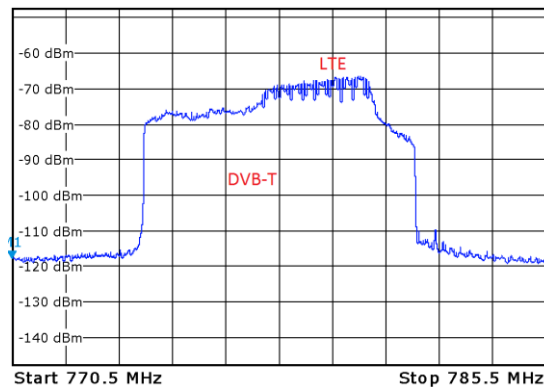
VYSOKÉ
UČENÍ
TECHNICKÉ
V BRNĚ

Meranie koexistencie medzi bezdrôtovými komunikačnými systémami DVB-T a LTE v uplinku

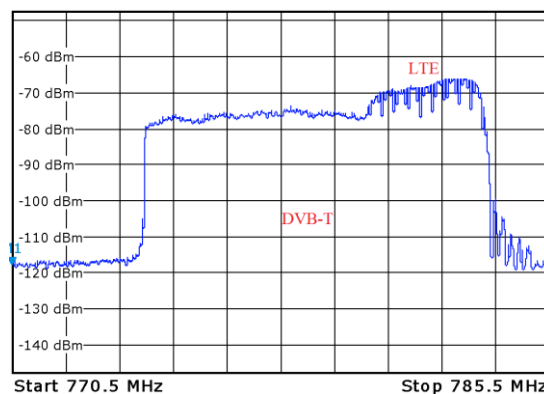
Vzorové vypracovanie protokolu

Vypracovanie:

1. V prvom bode sme sa zoznámili s meracími prístrojmi a celkovým zapojením pracoviska.
2. a 3. V týchto bodoch sme podľa návodu nastavili generátor LTE signálu a spektrálny analyzátor.
4. V tomto bode sme na spektrálnom analyzátore zobrazili spektrá LTE a DVB-T signálov v celkovom aj čiastočnom prekrytí.

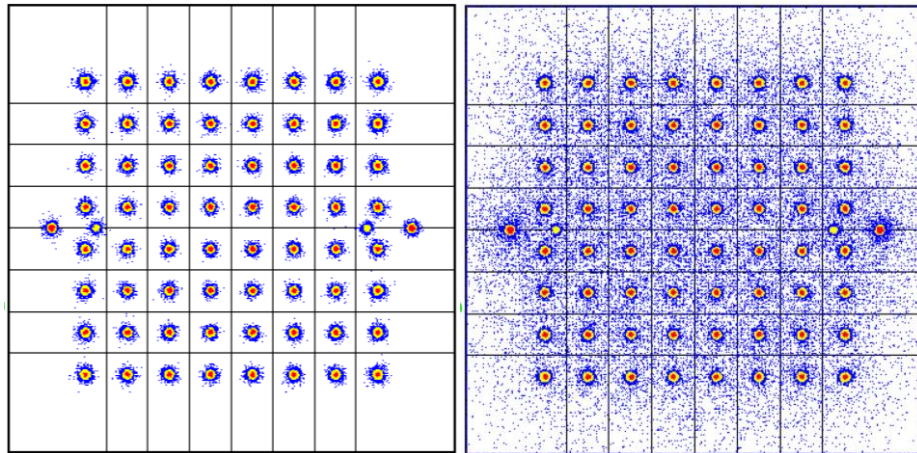


Obr. 1 Celkové prekrytie štandardov DVB-T a LTE.



Obr. 2 Čiastočné prekrytie štandardov DVB-T a LTE.

5. V piatom bode je znázornený konstelačný diagram pre nerušený a aj pre rušený TV príjem. Z konstelačných diagramov môžeme usúdiť, že je použitá modulácia 64QAM čo odpovedá televíznej norme.



Obr. 3 Konstelačný diagram bez rušenia (vľavo) a konstelačný diagram s rušením LTE (vpravo).

6. a 7. V týchto bodoch sme pri dvoch rôznych scenároch pozorovali závislosť veľkosti rušiacoho LTE signálu na parametre MER a BER. Pozorovali sme taktiež aj zmeny pri rôznej šírke pásma LTE signálu. Všetky údaje sú spracované v troch grafoch aby bolo možné dobre porovnať jednotlivé scenáre.

Tab. 1 Namerané hodnoty pre scenár celkového prekrytia so šírkou pásma LTE 1,4 MHz.

| P(LTE) [dBuV] | B(LTE) [MHz] | P(TV) [dBuV] | B(TV) [MHz] | SDR | BER before Viterbi | BER before RS | BER after RS | MER |
|---------------|--------------|--------------|-------------|----------|--------------------|---------------|--------------|----------|
| -75 | 1,4 | -50,7 | 8 | -16,7304 | 2,00E-07 | 3,20E-09 | 0,00E+00 | 3,26E+01 |
| -72 | 1,4 | -50,7 | 8 | -13,7304 | 1,60E-07 | 3,00E-09 | 0,00E+00 | 3,21E+01 |
| -69 | 1,4 | -50,7 | 8 | -10,7304 | 1,10E-06 | 4,70E-09 | 0,00E+00 | 3,11E+01 |
| -66 | 1,4 | -50,7 | 8 | -7,73038 | 6,70E-05 | 9,50E-09 | 0,00E+00 | 2,96E+01 |
| -63 | 1,4 | -50,7 | 8 | -4,73038 | 8,50E-04 | 1,80E-08 | 0,00E+00 | 2,79E+01 |
| -60 | 1,4 | -50,7 | 8 | -1,73038 | 3,90E-03 | 4,90E-06 | 0,00E+00 | 2,64E+01 |
| -57 | 1,4 | -50,7 | 8 | 1,26962 | 9,50E-03 | 5,10E-04 | 0,00E+00 | 2,52E+01 |
| -54 | 1,4 | -50,7 | 8 | 4,26962 | 1,80E-02 | 1,10E-02 | 1,30E-03 | 2,40E+01 |

Tab. 2 Namerané hodnoty pre scenár celkového prekrytia so šírkou pásma LTE 5 MHz.

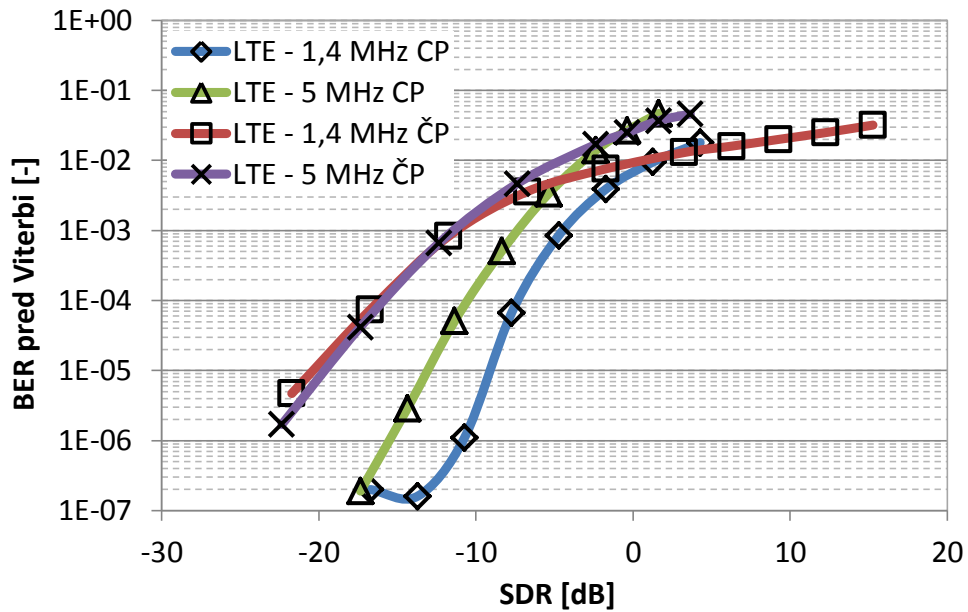
| P(LTE) [dBuV] | B(LTE) [MHz] | P(TV) [dBuV] | B(TV) [MHz] | SDR | BER before Viterbi | Ber before RS | BER after RS | MER |
|------------------|-----------------|-----------------|----------------|----------|--------------------------|------------------|-----------------|----------|
| -70 | 5 | -50,6 | 8 | -17,3588 | 1,90E-07 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 3,11E+01 |
| -67 | 5 | -50,6 | 8 | -14,3588 | 2,90E-06 | 4,00E-09 | 0,00E+00 | 2,97E+01 |
| -64 | 5 | -50,6 | 8 | -11,3588 | 5,10E-05 | 1,30E-08 | 0,00E+00 | 2,78E+01 |
| -61 | 5 | -50,6 | 8 | -8,3588 | 5,10E-04 | 2,40E-08 | 0,00E+00 | 2,55E+01 |
| -58 | 5 | -50,6 | 8 | -5,3588 | 3,40E-03 | 1,20E-07 | 0,00E+00 | 2,32E+01 |
| -55 | 5 | -50,6 | 8 | -2,3588 | 1,40E-02 | 4,50E-05 | 0,00E+00 | 2,12E+01 |
| -53 | 5 | -50,6 | 8 | -0,3588 | 2,70E-02 | 2,10E-03 | 1,00E-09 | 2,02E+01 |
| -51 | 5 | -50,6 | 8 | 1,6412 | 4,70E-02 | 7,90E-03 | 2,20E-03 | 1,94E+01 |

Tab. 3 Namerané hodnoty pre scenár čiastočného prekrytia so šírkou pásma LTE 1,4 MHz.

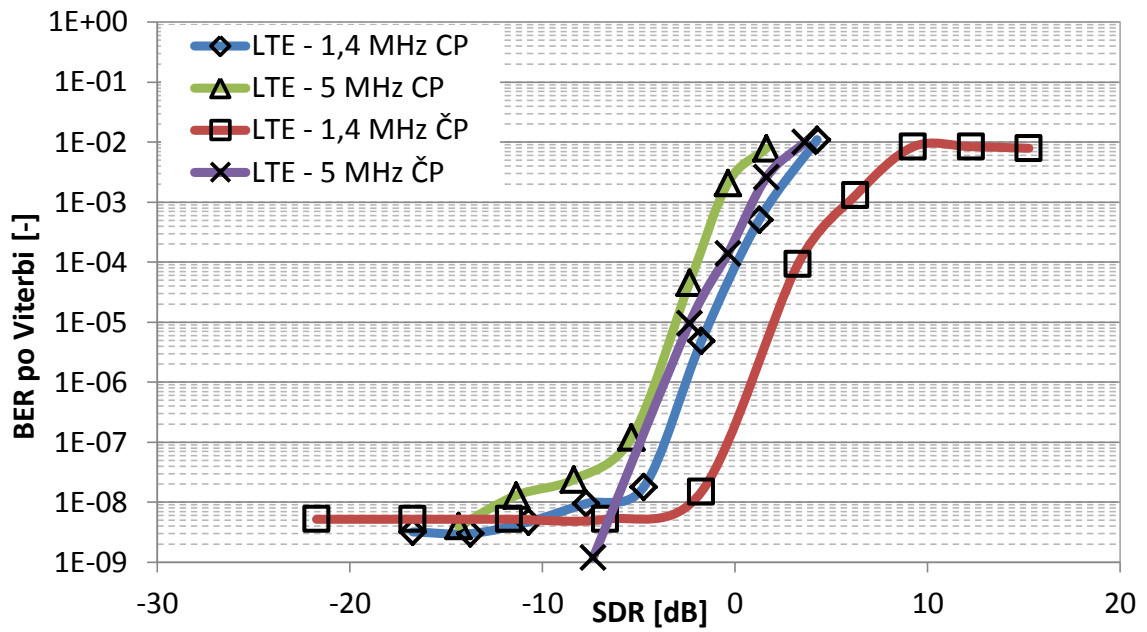
| P(LTE) [dBuV] | B(LTE) [MHz] | P(TV) [dBuV] | B(TV) [MHz] | SDR | BER before Viterbi | Ber before RS | BER after RS | MER |
|------------------|-----------------|-----------------|----------------|----------|--------------------------|------------------|-----------------|----------|
| -80 | 1,4 | -50,7 | 8 | -21,7304 | 4,70E-06 | 5,20E-09 | 0,00E+00 | 3,28E+01 |
| -75 | 1,4 | -50,7 | 8 | -16,7304 | 7,40E-05 | 5,20E-09 | 0,00E+00 | 3,19E+01 |
| -70 | 1,4 | -50,7 | 8 | -11,7304 | 8,30E-04 | 5,20E-09 | 0,00E+00 | 3,04E+01 |
| -65 | 1,4 | -50,7 | 8 | -6,73038 | 3,60E-03 | 5,20E-09 | 0,00E+00 | 2,89E+01 |
| -60 | 1,4 | -50,7 | 8 | -1,73038 | 7,60E-03 | 1,50E-08 | 0,00E+00 | 2,73E+01 |
| -55 | 1,4 | -50,7 | 8 | 3,26962 | 1,30E-02 | 9,20E-05 | 0,00E+00 | 2,48E+01 |
| -52 | 1,4 | -50,7 | 8 | 6,26962 | 1,60E-02 | 1,30E-03 | 1,90E-04 | 2,32E+01 |
| -49 | 1,4 | -50,7 | 8 | 9,26962 | 2,00E-02 | 8,40E-03 | 9,00E-04 | 2,15E+01 |
| -46 | 1,4 | -50,7 | 8 | 12,26962 | 2,50E-02 | 8,40E-03 | 2,30E-03 | 2,02E+01 |
| -43 | 1,4 | -50,7 | 8 | 15,26962 | 3,20E-02 | 7,90E-03 | 6,00E-03 | 1,91E+01 |

Tab. 4 Namerané hodnoty pre scenár čiastočného prekrytia so šírkou pásma LTE 5 MHz.

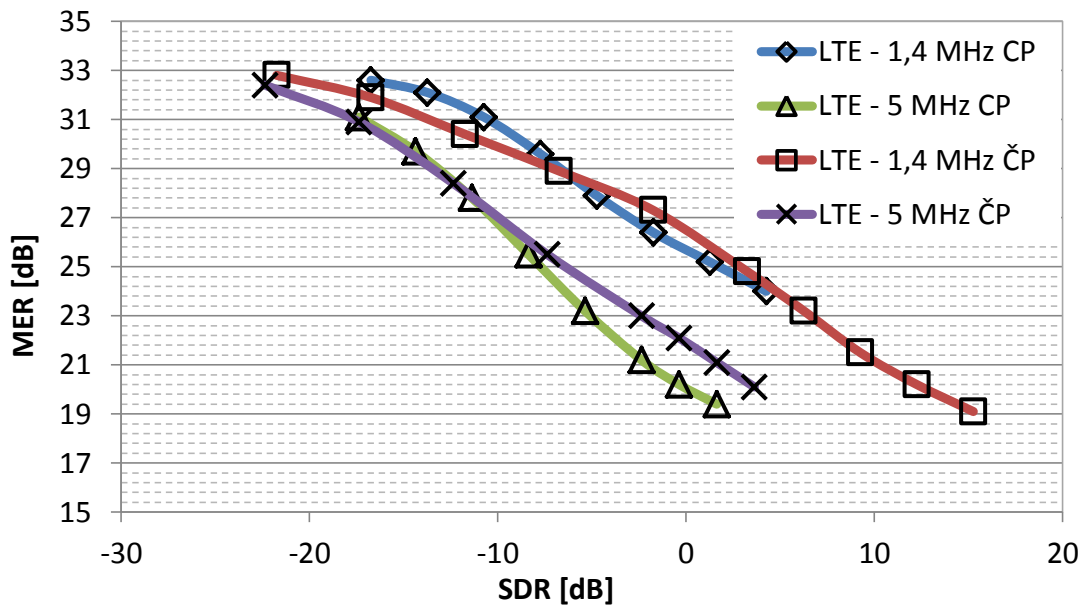
| P(LTE) [dBuV] | B(LTE) [MHz] | P(TV) [dBuV] | B(TV) [MHz] | SDR | BER before Viterbi | Ber before RS | BER after RS | MER |
|---------------|--------------|--------------|-------------|----------|--------------------|---------------|--------------|----------|
| -75 | 5 | -50,6 | 8 | -22,3588 | 1,70E-06 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 3,24E+01 |
| -70 | 5 | -50,6 | 8 | -17,3588 | 4,20E-05 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 3,09E+01 |
| -65 | 5 | -50,6 | 8 | -12,3588 | 6,60E-04 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 2,84E+01 |
| -60 | 5 | -50,6 | 8 | -7,3588 | 4,70E-03 | 1,20E-09 | 0,00E+00 | 2,55E+01 |
| -55 | 5 | -50,6 | 8 | -2,3588 | 1,70E-02 | 9,60E-06 | 0,00E+00 | 2,30E+01 |
| -53 | 5 | -50,6 | 8 | -0,3588 | 2,50E-02 | 1,40E-04 | 0,00E+00 | 2,21E+01 |
| -51 | 5 | -50,6 | 8 | 1,6412 | 3,70E-02 | 2,60E-03 | 1,00E-07 | 2,11E+01 |
| -49 | 5 | -50,6 | 8 | 3,6412 | 4,60E-02 | 1,00E-02 | 1,40E-03 | 2,01E+01 |



Obr. 4 Graf bitovej chybovosti BER v závislosti na SDR parametre pred Viterbiho dekodérom.



Obr. 5 Graf bitovej chybovosti BER v závislosti na SDR parametre po Viterbiho dekodéry.



Obr. 6 Graf modulačnej chybovosti MER v závislosti na SDR parametre.

8. V tomto bode sme hľadali úroveň SDR parametru pri ktorom je ešte splnený QEF príjem. Zaujímala nás hodnota bitovej chybovosti BER po Viterbiho dekodéry, ktorá sa mala čo najviac priblížiť hodnote $2 \cdot 10^{-4}$ avšak ju neprekročiť. Maximálne hodnoty SDR parametru pri ktorom je ešte QEF príjem splnený sú uvedené v tabuľke .

Tab. 5 Maximálne hodnoty parametru SDR pri ktorých je ešte splnený QEF príjem.

| Šírka pásma LTE signálu [MHz] | Okrajový dotyk SDR [dB] | Celkové prekrytie SDR [dB] | Čiastočné prekrytie SDR [dB] |
|-------------------------------|-------------------------|----------------------------|------------------------------|
| 1,4 | 43,8 | 1,1 | 4,1 |
| 3 | 41 | 0,5 | 2,5 |
| 5 | 38,3 | -0,9 | -0,4 |

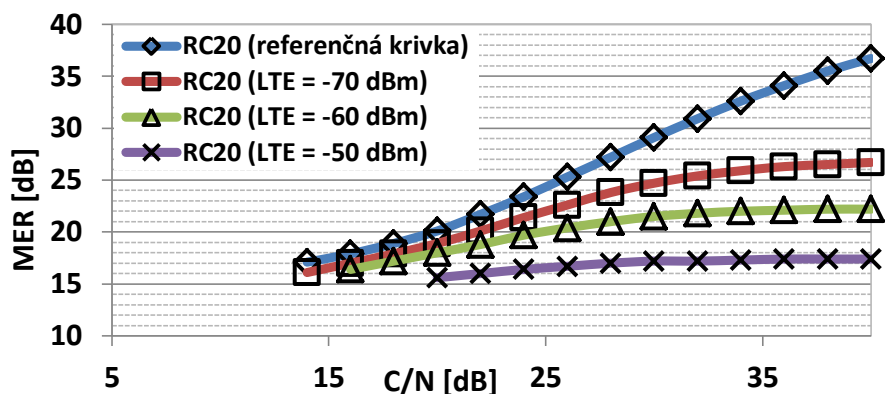
Záver:

V tejto laboratórnej úlohe sme si zaznačili spektrá signálov pre jednotlivé koexistencie. Môžeme na nich vidieť jednotlivé prekrytie. Pozorovali sme aj konstelačný diagram pri nerušenom a rušenom prijme TV signálu. Z nameraných hodnôt sme zostrojili grafy. Pri hodnotách BER je vidieť, že so zvyšujúcim sa SDR sa zvyšuje aj bitová chybovosť. Je taktiež vidieť, že celkové prekrytie ruší signál viac ako čiastočné. Pri čiastočnom prekrytí nie je pozorovateľný veľký vplyv šírky pásma LTE signálu na hodnotu BER. Pri celkovom prekrytí však LTE so šírkou pásma 10 MHz ovplyvňuje signál DVB-T viac ako signál LTE so šírkou pásma 1,4 MHz. Takýto priebeh môžeme pozorovať aj po oprave bitov v dekodéry Viterbi avšak hodnoty BER sú oveľa menšie. Pri meraní MER je vidieť, že pri zvyšovaní SDR sa znižuje hodnota MRE. Zase platí, že hodnoty MER pre celkové prekrytie sú menšie teda viacej rušené ako pri čiastočnom prekrytí. Rozdiely medzi šírkami rušiacoho LTE signálu nie sú vysoké. V poslednom bode bola zostavená tabuľka QEF príjmu. Je vidieť, že čím väčšia je šírka LTE signálu tým menšia hodnota SDR stačí na to aby QEF príjem už splnený nebol. Samozrejme veľký vplyv má aj typ koexistencie. Celkové prekrytie ruší TV signál najviac a okrajový dotyk najmenej.

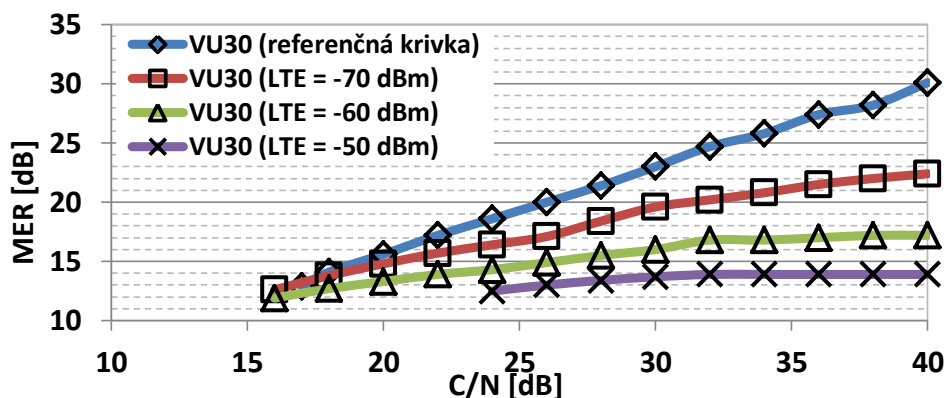
PRÍLOHA C

Výber zaujímavých grafov zo všetkých meraní

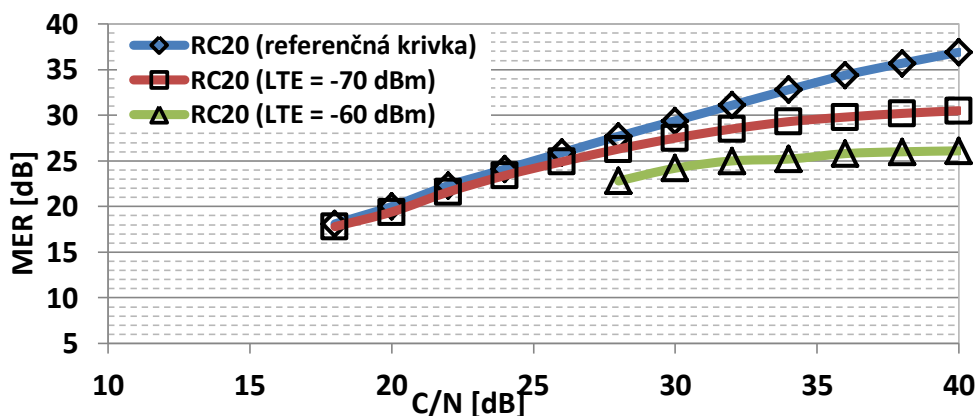
Celkové prekrytie



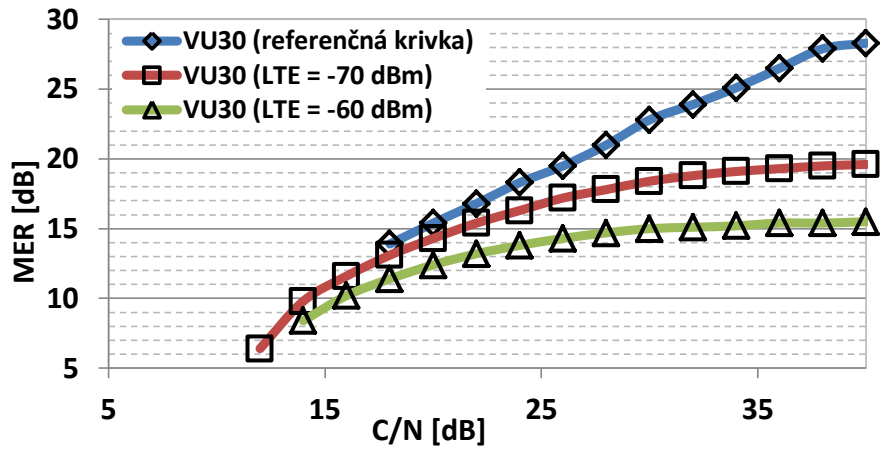
Obr. 1 Závislosť MER na C/N pri koexistencii statického prijmu DVB-T signálu s únikovým kanálom RC20 so signálom LTE s rôznou úrovňou a šírkou pásma 1,4 MHz.



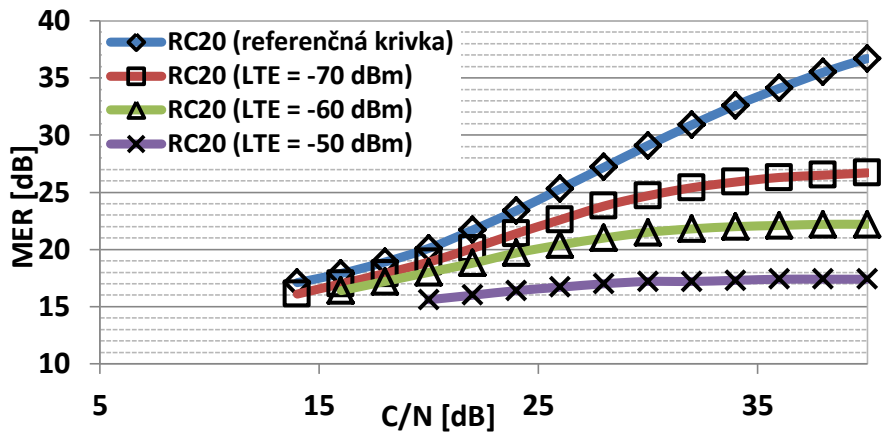
Obr. 2 Závislosť MER na C/N pri koexistencii mobilného prijmu DVB-T signálu s únikovým kanálom VU30 so signálom LTE s rôznou úrovňou a šírkou pásma 1,4 MHz.



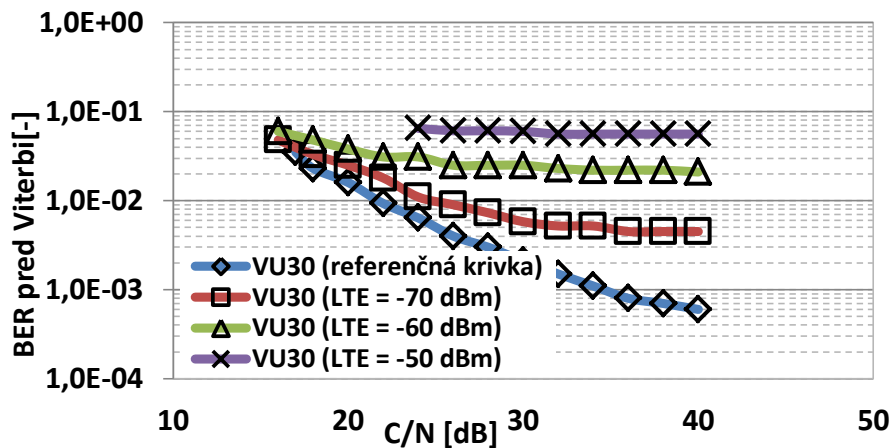
Obr. Závislosť MER na C/N pri koexistencii statického prijmu DVB-T2 signálu s únikovým kanálom RC20 so signálom LTE s rôznou úrovňou a šírkou pásma 1,4 MHz.



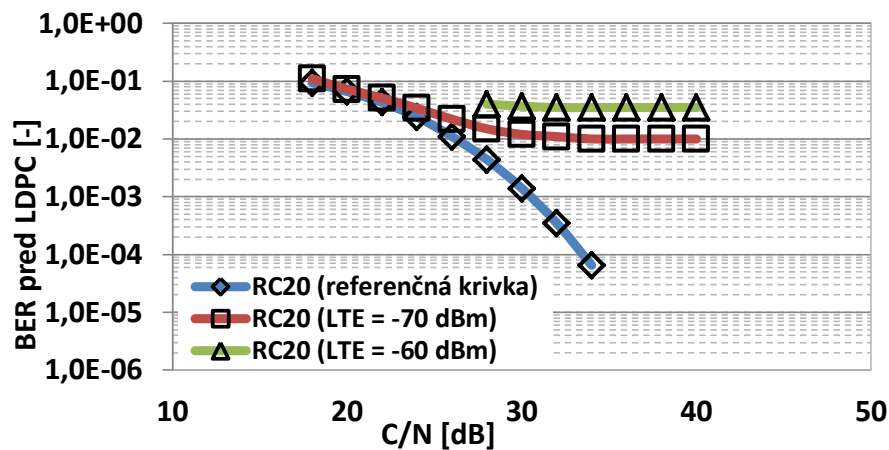
Obr. 4 Závislosť MER na C/N pri koexistencii mobilného prijmu DVB-T2 signálu s únikovým kanálom VU30 so signálom LTE s rôznou úrovňou a šírkou pásma 1,4 MHz.



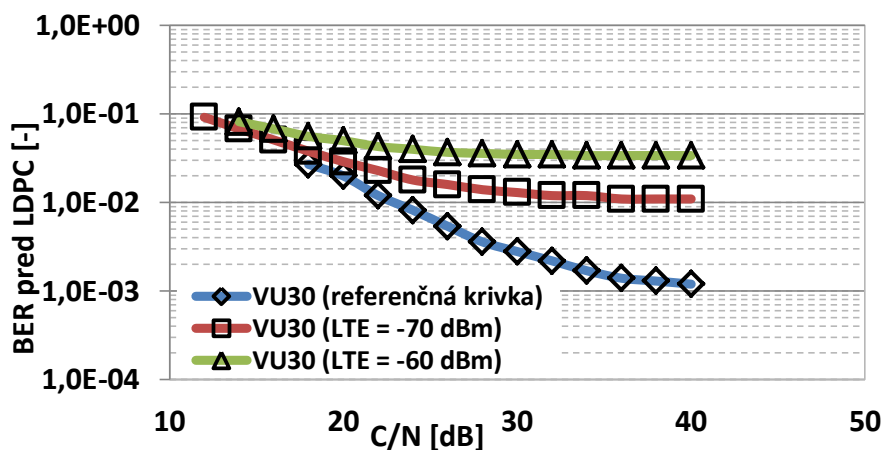
Obr. 5 Závislosť BER na C/N pri koexistencii statického prijmu DVB-T signálu s únikovým kanálom RC20 so signálom LTE s rôznou úrovňou a šírkou pásma 1,4 MHz.



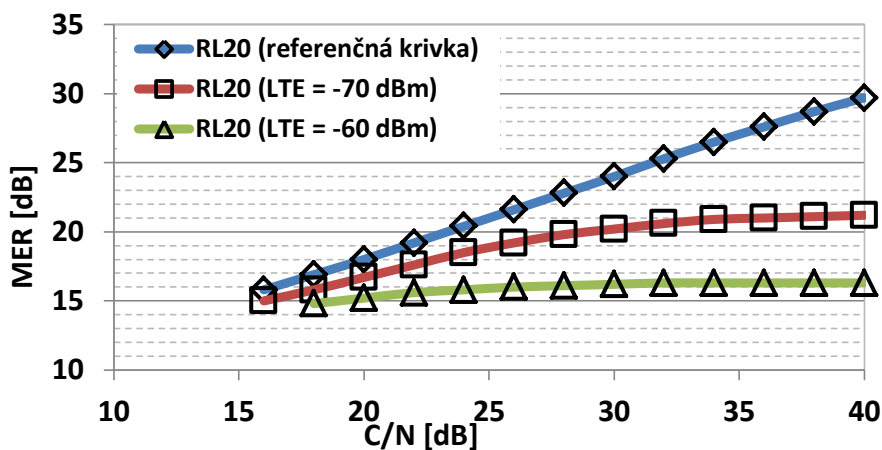
Obr. 6 Závislosť BER na C/N pri koexistencii mobilného prijmu DVB-T signálu s únikovým kanálom VU30 so signálom LTE s rôznou úrovňou a šírkou pásma 1,4 MHz.



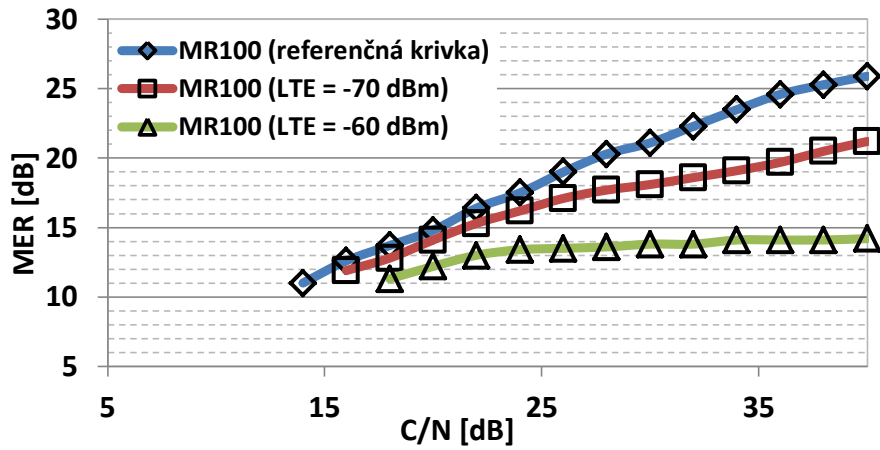
Obr. 7 Závislosť BER na C/N pri koexistencii statického príjmu DVB-T2 signálu s únikovým kanálom RC20 so signálom LTE s rôznou úrovňou a šírkou pásma 1,4 MHz.



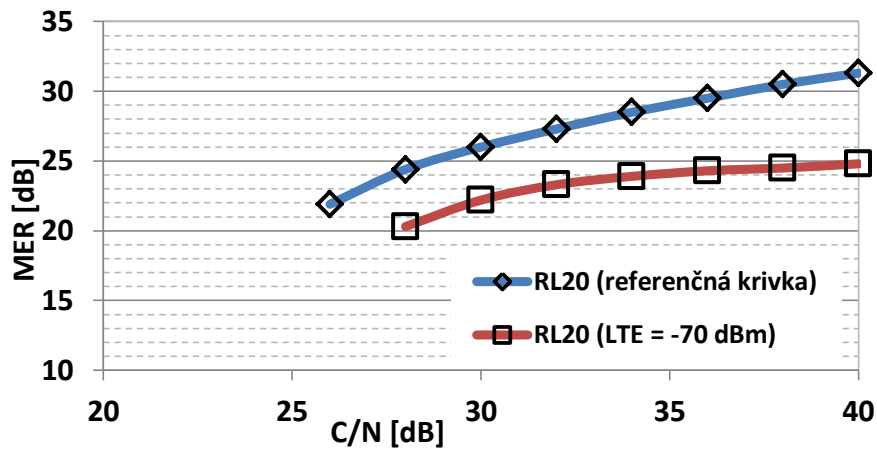
Obr. 8 Závislosť BER na C/N pri koexistencii mobilného príjmu DVB-T2 signálu s únikovým kanálom VU30 so signálom LTE s rôznou úrovňou a šírkou pásma 1,4 MHz.



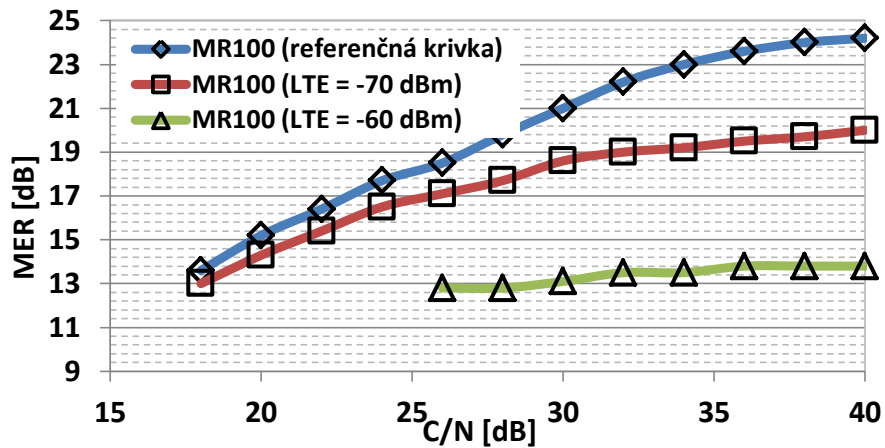
Obr. 9 Závislosť MER na C/N pri koexistencii statického príjmu DVB-T signálu s únikovým kanálom RL20 so signálom LTE s rôznou úrovňou a šírkou pásma 10 MHz.



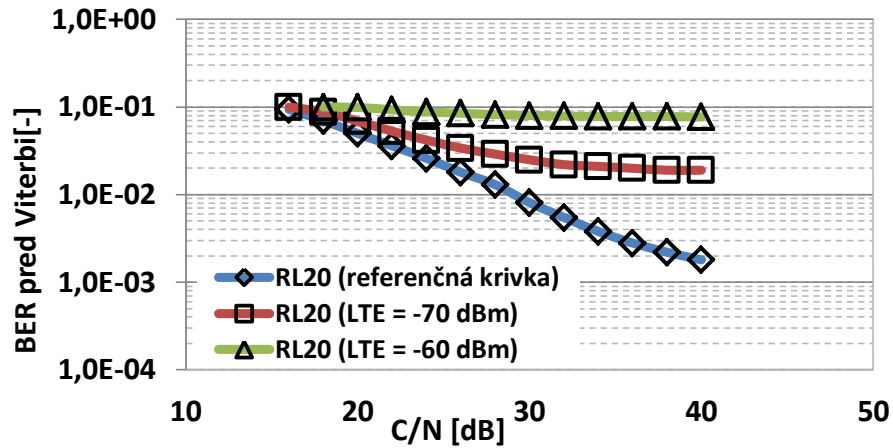
Obr. 10 Závislosť MER na C/N pri koexistencii mobilného príjmu DVB-T signálu s únikovým kanálom MR100 so signálom LTE s rôznou úrovňou a šírkou pásma 10 MHz.



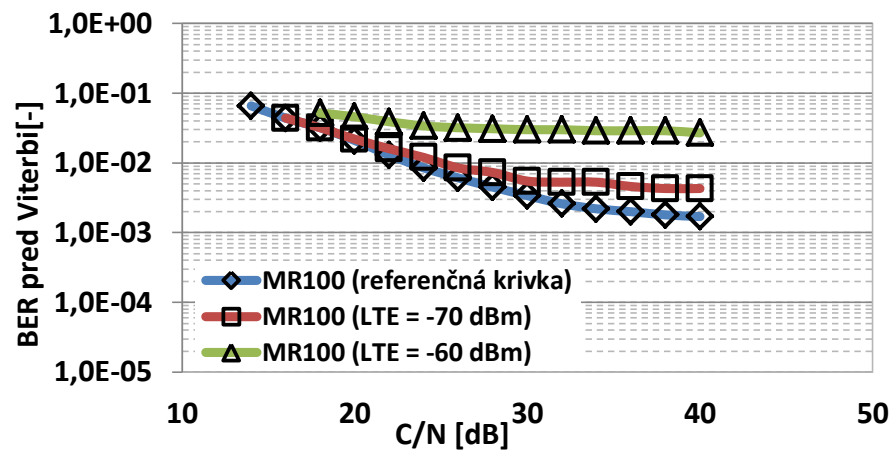
Obr. 11 Závislosť MER na C/N pri koexistencii statického príjmu DVB-T2 signálu s únikovým kanálom RL20 so signálom LTE s rôznou úrovňou a šírkou pásma 10 MHz.



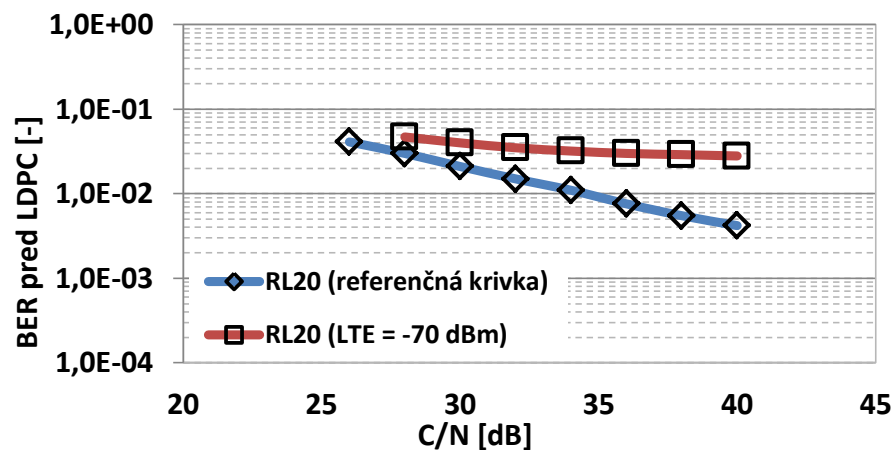
Obr. 12 Závislosť MER na C/N pri koexistencii mobilného príjmu DVB-T2 signálu s únikovým kanálom MR100 so signálom LTE s rôznou úrovňou a šírkou pásma 10 MHz.



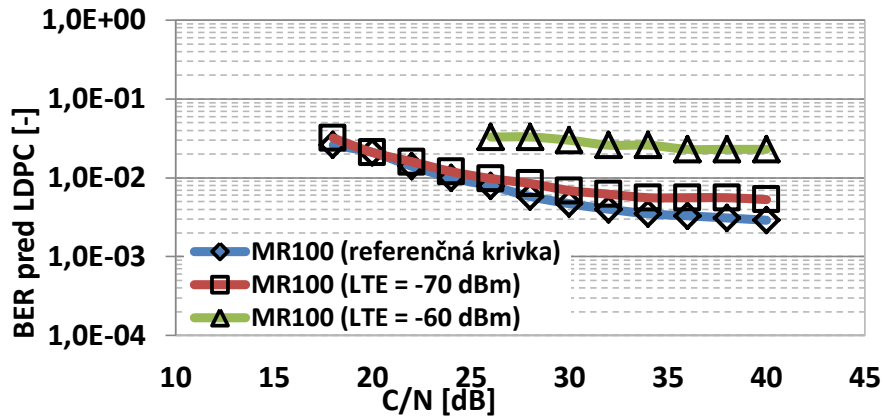
Obr. 13 Závislosť BER na C/N pri koexistencii statického prijmu DVB-T signálu s únikovým kanálom RL20 so signálom LTE s rôznou úrovňou a šírkou pásma 10 MHz.



Obr. 14 Závislosť BER na C/N pri koexistencii mobilného prijmu DVB-T signálu s únikovým kanálom MR100 so signálom LTE s rôznou úrovňou a šírkou pásma 10 MHz.

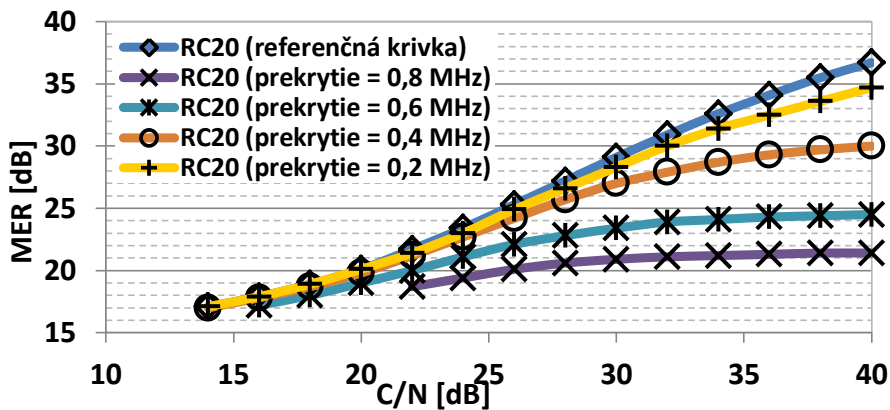


Obr. 15 Závislosť BER na C/N pri koexistencii statického prijmu DVB-T2 signálu s únikovým kanálom RL20 so signálom LTE s rôznou úrovňou a šírkou pásma 10 MHz.

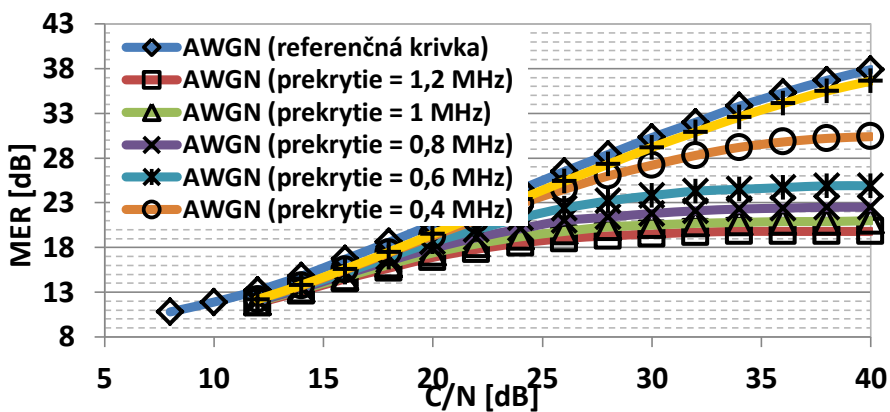


Obr. 16 Závislosť BER na C/N pri koexistencii mobilného príjmu DVB-T2 signálu s únikovým kanálom MR100 so signálom LTE s rôznou úrovňou a šírkou pásma 10 MHz.

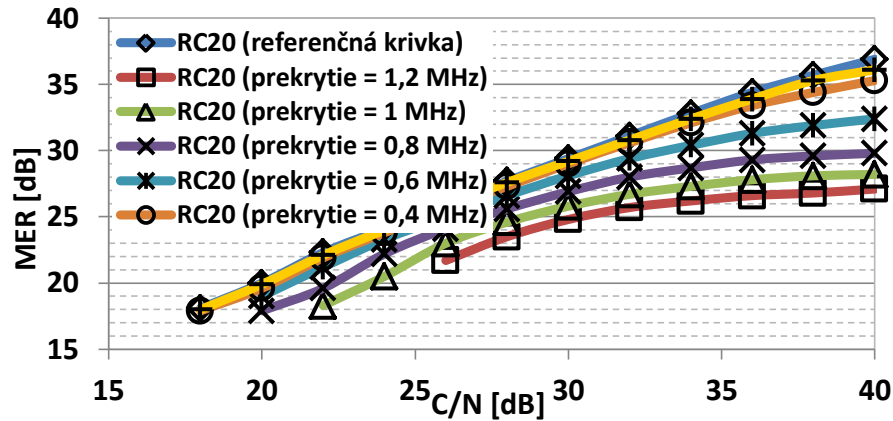
Čiastočné prekrytie



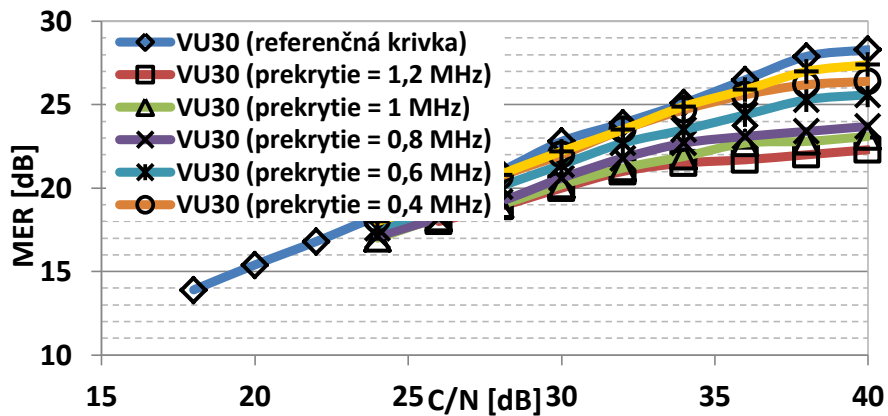
Obr. 17 Závislosť MER na C/N pri koexistencii statického príjmu DVB-T signálu s únikovým kanálom RC20 so signálom LTE = -50 dBm so šírkou pásma 1,4 MHz pri rôznom prekrytí spektier.



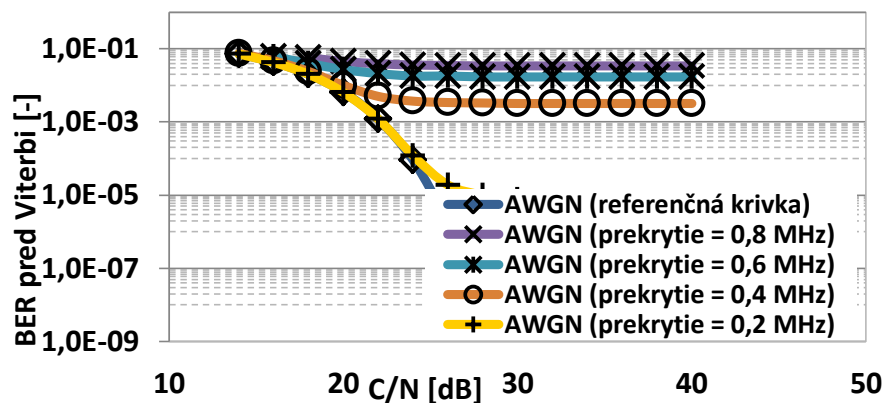
Obr. 18 Závislosť MER na C/N pri koexistencii mobilného príjmu DVB-T signálu s AWGN kanálom so signálom LTE = -50 dBm so šírkou pásma 1,4 MHz pri rôznom prekrytí spektier.



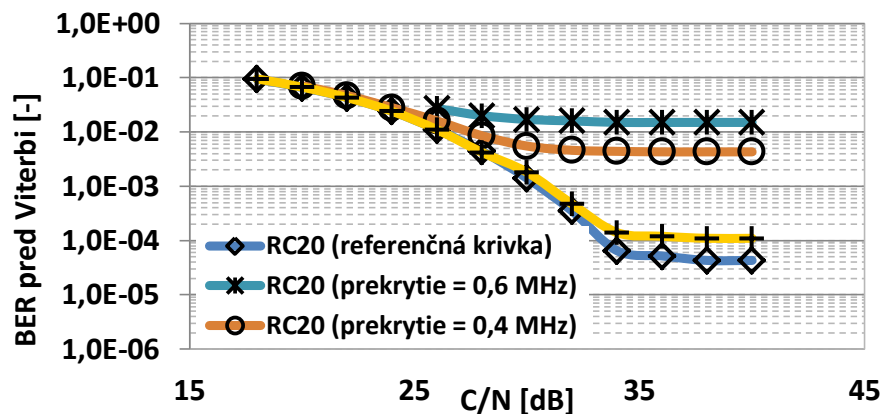
Obr. 19 Závislosť MER na C/N pri koexistencii statického príjmu DVB-T2 signálu s únikovým kanálom RC20 so signálom LTE = -60 dBm so šírkou pásma 1,4 MHz pri rôznom prekrytí spektier.



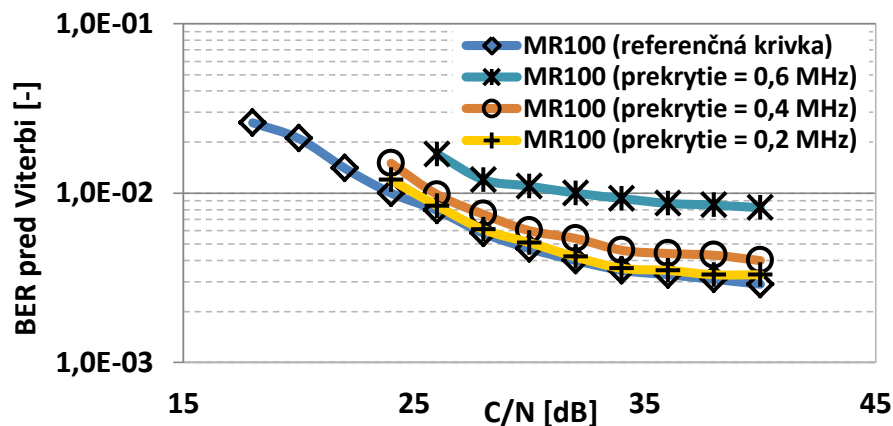
Obr. 20 Závislosť MER na C/N pri koexistencii mobilného príjmu DVB-T2 signálu s únikovým kanálom MR100 so signálom LTE = -60 dBm so šírkou pásma 1,4 MHz pri rôznom prekrytí spektier.



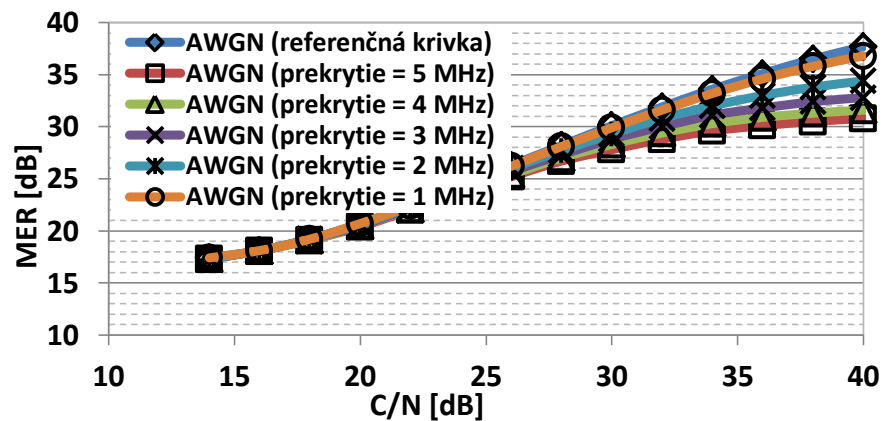
Obr. 21 Závislosť BER na C/N pri koexistencii statického príjmu DVB-T signálu s AWGN kanálom so signálom LTE = -50 dBm so šírkou pásma 1,4 MHz pri rôznom prekrytí spektier.



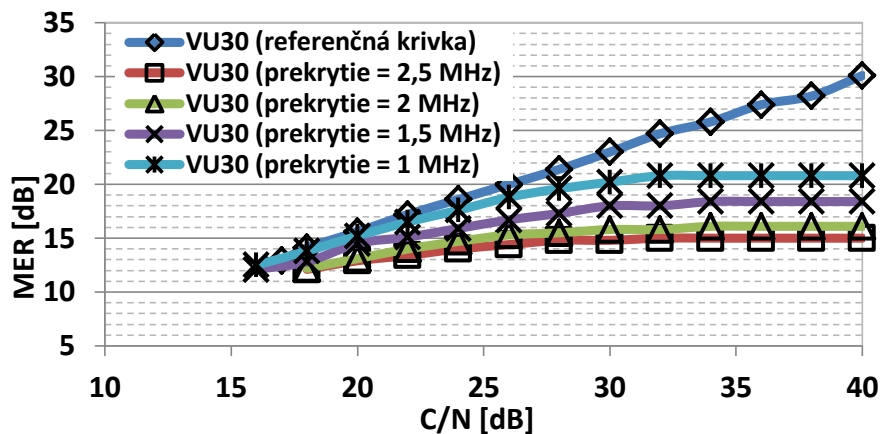
Obr. 22 Závislosť BER na C/N pri koexistencii statického prijmu DVB-T2 signálu s únikovým kanálom RC20 so signálom LTE = -50 dBm so šírkou pásma 1,4 MHz pri rôznom prekrytí spektier.



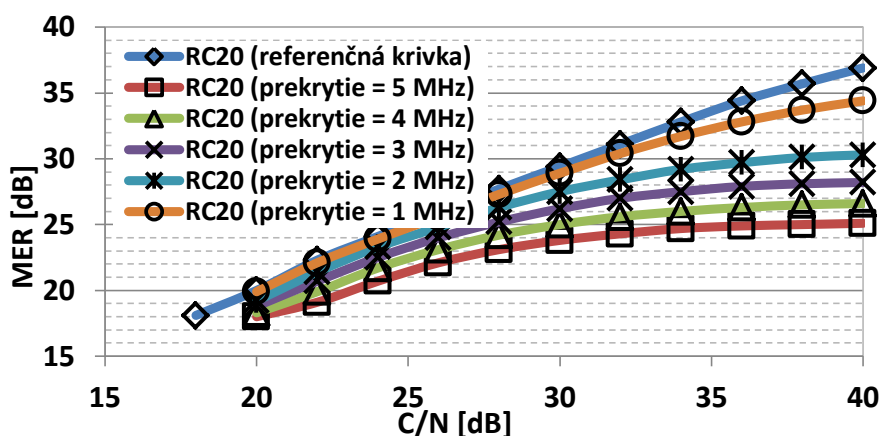
Obr. 23 Závislosť BER na C/N pri koexistencii mobilného prijmu DVB-T2 signálu s únikovým kanálom MR100 so signálom LTE = -60 dBm so šírkou pásma 1,4 MHz pri rôznom prekrytí spektier.



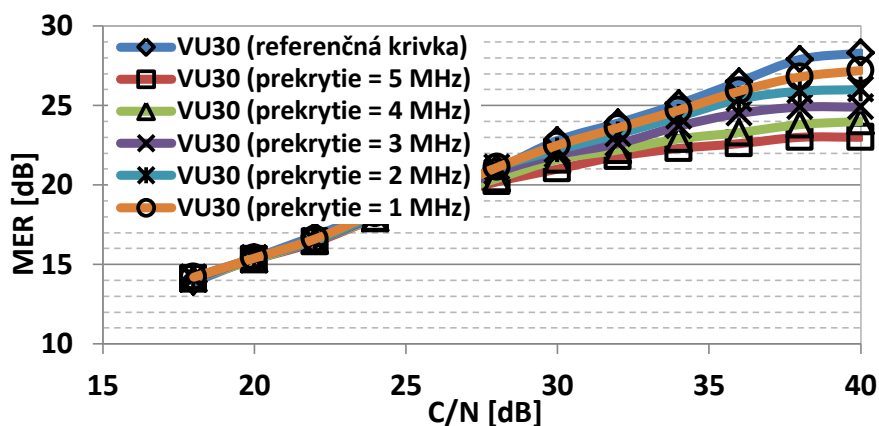
Obr. 24 Závislosť MER na C/N pri koexistencii statického prijmu DVB-T signálu s AWGN kanálom so signálom LTE = -70 dBm so šírkou pásma 10 MHz pri rôznom prekrytí spektier.



Obr. 25 Závislosť MER na C/N pri koexistencii mobilného príjmu DVB-T signálu únikovým kanálom VU30 so signálom LTE = -50 dBm so šírkou pásma 10 MHz pri rôznom prekrytí spektier.



Obr. 26 Závislosť MER na C/N pri koexistencii statického príjmu DVB-T2 signálu únikovým kanálom RC20 so signálom LTE = -70 dBm so šírkou pásma 10 MHz pri rôznom prekrytí spektier.



Obr. 27 Závislosť MER na C/N pri koexistencii mobilného príjmu DVB-T2 signálu únikovým kanálom VU30 so signálom LTE = -70 dBm so šírkou pásma 10 MHz pri rôznom prekrytí spektier.