



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

LABORATORNÍ PRACOVISŤE PRO MĚŘENÍ VLASTNOSTÍ DVB-T2/T2-LITE

LABORATORY WORKPLACE FOR MEASURING PERFORMANCES OF DVB-T2/T2-LITE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Dominik Krejčíř

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Ladislav Polák, Ph.D.

BRNO 2019

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Elektronika a sdělovací technika**

Ústav radioelektroniky

Student: Dominik Krejčíř

ID: 195370

Ročník: 3

Akademický rok: 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

Laboratorní pracoviště pro měření vlastností DVB-T2/T2-Lite

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

V teoretické části práce detailně prostudujte vlastnosti vysílacího a přijímacího řetězce standardů DVB-T2 a DVB-T2-Lite pro zemské digitální a mobilní televizní vysílání. Zaměřte se zejména na klasické SISO vysílání. Navrhněte a realizujte vhodné laboratorní pracoviště pro měření vysílání a příjem ve standardech DVB-T2 a DVB-T2-Lite. Navrhněte postup pro monitorování a vyhodnocení co nejvíce objektivních parametrů.

V experimentální části práce proveďte měření, analýzu a podrobný rozbor vysílání a příjmu DVB-T2/T2-Lite a vyhodnoťte vliv systémových parametrů na celkovou výkonnost těchto systémů. Dosažené výsledky porovnejte s teoretickým předpokladem, případně nezávislým referenčním měřením. Navrhněte laboratorní úlohu pro měření vlastností systémů DVB-T2/T2-Lite a připravte vzorové vypracování navržené úlohy.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] FISCHER, Walter. Digital Video and Audio Broadcasting Technology: A Practical Engineering Guide. 3rd ed. Berlin: Springer, 2010. ISBN 978-3-642-11611-7.

[2] STROUHAL, Adam. Simulace RF přenosového kanálu pro DVB-T2. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2011. 70 s. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. Ladislav Polák.

Termín zadání: 4.2.2019

Termín odevzdání: 23.5.2019

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

Konzultant:

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

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá návrhem a realizací laboratorního pracoviště pro měření vlastností systému DVB-T2 a DVB-T2-Lite. Oba standardy pro digitální pozemní televizní vysílání jsou podrobně popsány. Při samotném měření je možné zjišťovat objektivní parametry a subjektivně hodnotit kvalitu signálu DVB-T2/T2-Lite. Navržený koncept byl ověřen sadou experimentálních měření, která jsou rozdělena do čtyř scénářů. Každé z nich je důkladně vyhodnoceno a srovnáno s teoretickým předpokladem. Měření umožňuje testovat a porovnávat parametry jednotlivých set-top boxů od různých výrobců.

Klíčová slova

DVB-T2, T2-Lite, SISO, FEC, BER, MER, přenosový scénář

Abstract

This thesis deals with proposal and realization an appropriate measurement workplace to measure performances of DVB-T2 and DVB-T2-Lite. Both systems for terrestrial digital video broadcasting are described. It is possible to measure objective parameters and evaluate the quality of DVB-T2/T2-Lite signal subjectively. The proposed concept was verified by a set of experimental measurements, which is divided into four scenarios. The measurement focuses to parameters of Set-Top-Boxes. The measurement allows to test and compare Set-Top-Boxes.

Keywords

DVB-T2, T2-Lite, SISO, FEC, BER, MER, transmission scenario

Bibliografická citace:

KREJČÍŘ, D. Laboratorní pracoviště pro měření vlastností DVB-T2/T2-Lite. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2019. 82s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Ladislav Polák, Ph.D.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Laboratorní pracoviště pro měření vlastností DVB-T2/T2-Lite jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrální práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

V Brně dne **16. 5. 2019**

.....

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Ladislavu Polákovi, Ph.D. za odborné vedení, účinnou pedagogickou pomoc, trpělivost a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne **16. 5. 2019**

.....
podpis autora

Obsah

Úvod.....	1
1. DVB-T2	2
1.2 Vstupní zpracování PLP toku	3
1.2.1 Mód přizpůsobení	3
1.2.2 Mód přizpůsobení datového toku.....	3
1.3 Prokládané kódování a modulace	4
1.3.1 FEC kódování	4
1.3.2 Bitové prokládání.....	6
1.3.3 Vytváření COFDM buněk.....	8
1.3.4 Buňkové prokládání	8
1.3.5 Časové prokládání.....	9
1.4 Sestavení DVB-T2 rámce	11
1.5 Frekvenční prokládání	12
1.6 Generování COFDM symbolů.....	12
1.6.1 Rozptýlené nosné	13
1.6.2 Spojité nosné.....	14
1.6.3 Okrajové nosné	15
1.7 IFFT	15
1.8 Rotovaná konstelace	16
1.9 PAPR redukce.....	17
1.10 Ochranný interval	17
1.11 Konfigurace systému	18
2. DVB-T2-Lite	19
3. Přenosové kanály	20
3.1 Dopplerův jev	20
3.2 Dopplerovo spektrum	20
3.3 Pevný pozemní příjem	21
3.3.1 Gaussův kanál (AWGN).....	21
3.3.2 Riceův kanál (RC20).....	21
3.3.3 Rayleighův kanál (RL20).....	21
3.4 Přenosný pozemní příjem	21

3.4.1 Přenosový kanál PI12.....	22
3.4.2 Přenosový kanál PO12	22
3.5 Mobilní přenosový příjem	22
3.5.1 Přenosový kanál RA6.....	22
3.5.2 Přenosový kanál TU6.....	22
4. Návrh měřicího pracoviště.....	23
4.1 Měřicí přístroje	23
4.2 Objektivní měřené parametry	24
4.2.1 Modulační chybovost (MER).....	24
4.2.2 Bitová chybovost (BER)	25
4.2.3 Poměr C/N.....	25
5. Měření.....	26
5.1 První scénář.....	27
5.1.1 Vyhodnocení měření	28
5.2 Druhý scénář	33
5.2.1 Vyhodnocení měření	34
5.3 Třetí scénář	38
5.3.1 Vyhodnocení měření	39
5.3.2 Vyhodnocení měření	42
5.4 Čtvrtý scénář	44
5.4.1 Vyhodnocení měření	45
5.4.2 Vyhodnocení měření	48
6. Výsledky měření pomocí STB.....	50
6.1 Měření STB pro první scénář.....	51
6.2 Měření STB pro čtvrtý scénář.....	54
7. Závěr	57

Seznam obrázků

Obr. 1 Blokové schéma standardu DVB-T2 (na základě [5]).....	2
Obr. 2 Blokové schéma vstupního zpracování PLP (na základě [5])	3
Obr. 3 Blokové schéma „Bitového prokládání, kódování a modulace“ (BICM)	4
Obr. 4 FEC rámec DVB-T2 (na základě [5]).....	4
Obr. 5 Princip bitového prokládání (na základě [5])	7
Obr. 6 První možnost mapování (na základě [5]).....	9
Obr. 7 Druhá možnost mapování (na základě [5]).....	10
Obr. 8 Třetí možnost mapování (na základě [5]).....	10
Obr. 9 Struktura DVB-T2 rámce (na základě [5])	11
Obr. 10 Příklad kombinace DVB-T2 a T2-Lite rámců (na základě [11]).....	11
Obr. 11 Vzor rozptýlených nosných PP1 (na základě [5])	13
Obr. 12 Rotovaná a normální konstelace s modulací 16QAM [13]	16
Obr. 13 Vložení cyklického prefixu [6].....	17
Obr. 14 Konfigurace SISO.....	18
Obr. 15 Konfigurace MISO	18
Obr. 16 Měřicí pracoviště pro měření DVB-T2/T2-Lite	23
Obr. 17 Ilustrace prvního scénáře	27
Obr. 18 Měření $BER_1 = f(C/N)$ pro první scénář	28
Obr. 19 Měření $BER_2 = f(C/N)$ pro první scénář.....	28
Obr. 20 Měření $MER = f(C/N)$ pro první scénář	28
Obr. 21 Měření Počet iterací = $f(C/N)$ pro první scénář.....	29
Obr. 22 Konstelační diagramy 256QAM pro první scénář při $C/N = 30$ dB.....	29
Obr. 23 RF spektrum pro AWGN kanál – první scénář při $C/N = 30$ dB.....	30
Obr. 24 RF spektrum pro RC20 kanál – první scénář při $C/N = 30$ dB.....	30
Obr. 25 RF spektrum pro RL20 kanál – první scénář při $C/N = 30$ dB.....	30
Obr. 26 Ilustrace druhého scénáře	33
Obr. 27 Měření $BER_1 = f(C/N)$ pro druhý scénář	34
Obr. 28 Měření $BER_2 = f(C/N)$ pro druhý scénář	34
Obr. 29 Měření $MER = f(C/N)$ pro druhý scénář	34
Obr. 30 Měření Počet LDPC iterací = $f(C/N)$ pro druhý scénář.....	35

Obr. 31	Konstelační diagramy 64QAM pro druhý scénář při $C/N = 30$ dB	35
Obr. 32	RF spektrum pro AWGN kanál – druhý scénář při $C/N = 30$ dB	36
Obr. 33	RF spektrum pro RC20 kanál – druhý scénář při $C/N = 30$ dB	36
Obr. 34	RF spektrum pro RL20 kanál – druhý scénář při $C/N = 30$ dB	36
Obr. 35	Ilustrace třetího scénáře	38
Obr. 36	Měření $BER_1 = f(C/N)$ pro třetí scénář	39
Obr. 37	Měření $BER_2 = f(C/N)$ pro třetí scénář	39
Obr. 38	Měření $MER = f(C/N)$ pro třetí scénář	39
Obr. 39	Měření Počet LDPC iterací = $f(C/N)$ pro třetí scénář	40
Obr. 40	Konstelační diagramy 16QAM pro třetí scénář při $C/N = 30$ dB	40
Obr. 41	RF spektrum pro AWGN kanál – třetí scénář při $C/N = 30$ dB	41
Obr. 42	RF spektrum pro TU6 kanál – třetí scénář při $C/N = 30$ dB	41
Obr. 43	RF spektrum pro RA6 kanál – třetí scénář při $C/N = 30$ dB	41
Obr. 44	Ilustrace pro čtvrtý scénář	44
Obr. 45	Měření $BER_1 = f(C/N)$ pro čtvrtý scénář	45
Obr. 46	Měření $BER_2 = f(C/N)$ pro čtvrtý scénář	45
Obr. 47	Měření $MER = f(C/N)$ pro čtvrtý scénář	45
Obr. 48	Měření Počet iterací LDPC = $f(C/N)$ pro čtvrtý scénář	46
Obr. 49	Konstelační diagramy 64QAM pro čtvrtý scénář při $C/N = 30$ dB	46
Obr. 50	RF spektrum pro AWGN kanál – čtvrtý scénář při $C/N = 30$ dB	47
Obr. 51	RF spektrum pro PI12 kanál – čtvrtý scénář při $C/N = 30$ dB	47
Obr. 52	RF spektrum pro PO12 kanál – čtvrtý scénář při $C/N = 30$ dB	47
Obr. 53	Měření Kvalita = $f(C/N)$ – plná čára a Síla = $f(C/N)$ – přerušovaná čára; pro AWGN kanál, první scénář	51
Obr. 54	Měření Kvalita = $f(C/N)$ – plná čára a Síla = $f(C/N)$ – přerušovaná čára; pro RC20 kanál, první scénář	51
Obr. 55	Měření Kvalita = $f(C/N)$ – plná čára a Síla = $f(C/N)$ – přerušovaná čára; pro RL20 kanál, první scénář	51
Obr. 56	Měření Kvalita = $f(\acute{U}tlum)$ – plná čára a Síla = $f(\acute{U}tlum)$ – přerušovaná čára; pro AWGN kanál, první scénář	52
Obr. 57	Měření Kvalita = $f(\acute{U}tlum)$ – plná čára a Síla = $f(\acute{U}tlum)$ – přerušovaná čára; pro RC20 kanál, první scénář	52

Obr. 58 Měření Kvalita = $f(\dot{U}tlum)$ – plná čára a Síla = $f(\dot{U}tlum)$ – přerušovaná čára; pro RL20 kanál, první scénář.....	52
Obr. 59 Měření Kvalita = $f(C/N)$ – plná čára a Síla = $f(C/N)$ – přerušovaná čára; pro AWGN kanál, čtvrtý scénář.....	54
Obr. 60 Měření Kvalita = $f(C/N)$ – plná čára a Síla = $f(C/N)$ – přerušovaná čára; pro PI12 kanál, čtvrtý scénář.....	54
Obr. 61 Měření Kvalita = $f(C/N)$ – plná čára a Síla = $f(C/N)$ – přerušovaná čára; pro PO12 kanál, čtvrtý scénář.....	54
Obr. 62 Měření Kvalita = $f(\dot{U}tlum)$ – plná čára a Síla = $f(C/N)$ – přerušovaná čára; pro AWGN kanál, čtvrtý scénář.....	55
Obr. 63 Měření Kvalita = $f(\dot{U}tlum)$ – plná čára a Síla = $f(C/N)$ – přerušovaná čára; pro PI12 kanál, čtvrtý scénář.....	55
Obr. 64 Měření Kvalita = $f(\dot{U}tlum)$ – plná čára a Síla = $f(C/N)$ – přerušovaná čára; pro PO12 kanál, čtvrtý scénář.....	55

Seznam tabulek

Tab. 1 Velikost dat pro dlouhý FEC rámeč [5].....	5
Tab. 2 Velikost dat pro krátký FEC rámeč [5]	5
Tab. 3 Hodnoty $Qldpc$ pro paritní prokládání [5]	6
Tab. 4 Twist parametr t_c [5].....	7
Tab. 5 Parametry bitového prokládání [5]	7
Tab. 6 Počet N_{sub} v demultiplexeru [5]	8
Tab. 7 Parametry časového prokládání [5]	10
Tab. 8 Parametry definující rozptýlené nosné [7].....	13
Tab. 9 Amplitudy rozptýlených nosných [7]	14
Tab. 10 Parametry spojitých nosných [7]	14
Tab. 11 Parametry COFDM [7]	15
Tab. 12 Úhel natočení rotované konstelace pro konkrétní modulace.....	17
Tab. 13 Rozdílné parametry DVB-T2/ DVB-T2-Lite	19
Tab. 14 Systémové parametry – první scénář.....	27
Tab. 15 Porovnání naměřených a teoretických hodnot pro první scénář.....	31
Tab. 16 Systémové parametry – druhý scénář	33
Tab. 17 Porovnání naměřených a teoretických hodnot pro druhý scénář.....	37
Tab. 18 Systémové parametry – třetí scénář.....	38
Tab. 19 Porovnání naměřených a teoretických hodnot pro třetí scénář.....	42
Tab. 20 Systémové parametry – čtvrtý scénář	44
Tab. 21 Porovnání naměřených a teoretických hodnot pro čtvrtý scénář.....	48

ÚVOD

Analogové televizní vysílání bylo plně nahrazeno digitálním, a to z důvodu stále rostoucích nároků provozovatelů televizních služeb i uživatelů. Kvůli vyčerpání kmitočtového spektra pro analogovou televizi není možné zavádět další celoplošné televize a naplnit tak požadavky provozovatelů na další kmitočty. Uživatelé také požadují lepší kvalitu obrazu a zvuku přijímaného signálu [1].

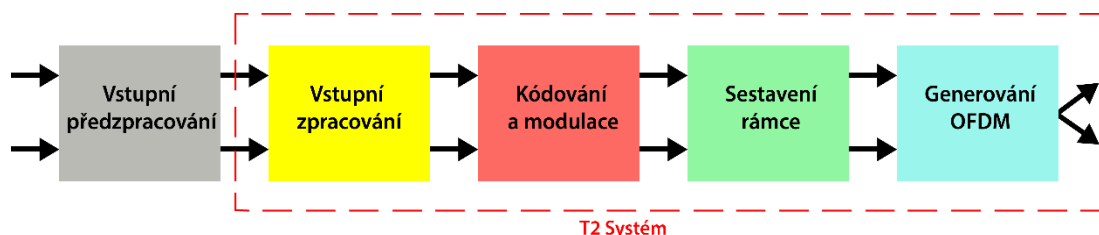
Proto bylo v 90. letech minulého století vytvořeno seskupení společností a organizací s názvem Digital Video Broadcasting (DVB), které mělo za cíl vytvořit mezinárodní standard pro digitální vysílání [1]. DVB se podle druhu přenosu dělí na tři základní standardy: DVB-Terrestrial (DVB-T) pro pozemní vysílání, DVB-Satellite (DVB-S) pro družicové vysílání a DVB-Cable (DVB-C) pro vysílání pomocí kabelu. Postupným vývojem došlo ke zdokonalování standardů a zavedení jejich dalších generací DVB-T2/S2/C2 [2]. Součástí DVB-T2 je standard T2-Lite, který se používá především v mobilních zařízeních – tabletech, mobilních telefonech apod.

Cílem této práce je detailně popsat standard DVB-T2, navrhnout vhodné měřicí pracoviště pro zjišťování objektivních parametrů, provést sadu experimentálních měření a následně i jejich vyhodnocení a porovnání s teoretickým předpokladem. Dalším úkolem je následně vytvořit laboratorní úlohu do výuky včetně zadání a vypracovaného vzorového protokolu.

Práce je členěna na šest hlavních kapitol. V první z nich je podrobně popsán standard DVB-T2, je zde ilustrován princip vysílacího řetězce pomocí blokového schématu. Druhá kapitola popisuje standard DVB-T2-Lite a následuje porovnání obou verzí. V navazující části jsou prostudovány jednotlivé modely přenosových kanálů, které se používají při měření. Je zde také zjednodušeně a stručně vysvětlen Dopplerův jev. Ve čtvrté kapitole je znázorněno laboratorní měřicí pracoviště a jsou popsány všechny použité přístroje a objektivní parametry, které slouží pro vyhodnocení kvality přijímaného signálu. Následuje rozsáhlý oddíl, jenž se zabývá samotným měřením rozděleným do čtyř scénářů. Ty jsou popsány, znázorněny a následně i vyhodnoceny. Samotné měření digitálního televizního signálu je prováděno v laboratorních podmínkách. Poslední část práce se zabývá měřením vlastností jednotlivých set-top boxů a jejich porovnáním.

1. DVB-T2

Standard DVB-T2 je druhou generací digitálního pozemního vysílání, která není slučitelná s předchozí verzí kvůli odlišnému zdrojovému a kanálovému kódování. DVB-T2 se, oproti standardu DVB-T, vyznačuje zvýšenou kapacitou datového toku, a to o 30 %. Využívá stávající domácí antény a vysílací sítě a má lepší podporu přenosových přijímačů (např. mobilní telefony, tablety) [3]. Pro komprimaci je využit formát High Efficiency Video Coding (HEVC/H.265), který umožňuje v porovnání s předešlým formátem H.264 při polovičním datovém toku přenášet stejné množství informací a zároveň zachovat kvalitu obrazu a zvuku. U H.265 se předpokládá nasazení pro Ultra High Definition (UHDTV), kde se počítá s rozlišením 4K (3840 x 2160p) [4]. U přijímače je nutná výměna demodulátoru a dekodéru podporujících standard DVB-T2. Zjednodušené blokové schéma architektury standardu je znázorněno na Obr. 1.



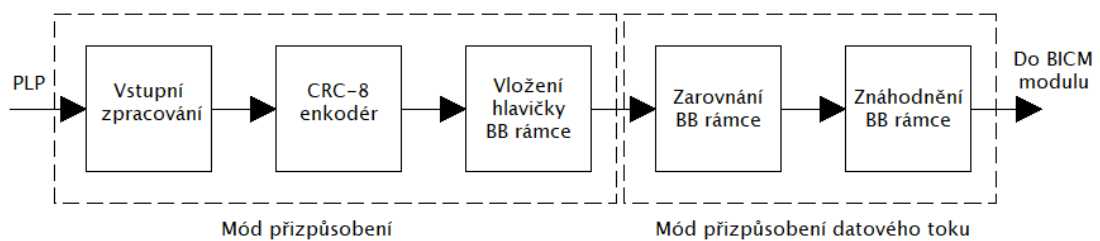
Obr. 1 Blokové schéma standardu DVB-T2 (na základě [5])

Další změnou oproti DVB-T je zavedení většího množství vstupních datových toků, nazývajících se Physical Layer Pipes (PLP). Počet PLP může teoreticky dosáhnout až 256 vrstev, které může systém DVB-T2 přenášet současně a nezávisle na sobě. Jednotlivé vrstvy mohou nést odlišný typ dat s různou robustností, s jiným kódováním, každá z nich může být modulována rozdílnou metodou a přenášena s různou bitovou rychlostí.

Jednotka pro vstupní předzpracování slouží k mapování transportních toků (Transport Stream, TS) anebo jednoho nebo více obecných toků (Generic Stream, GS), které nemají fixní velikost paketů jako TS paket, do jednotlivých PLP vrstev [6].

1.2 Vstupní zpracování PLP toku

Vstupní zpracování jednoho PLP je znázorněno na Obr. 2. Provádí se ve dvou krocích. Prvním z nich je mód přizpůsobení, kde se vstupní datové toky rozdělují do tzv. BB rámců (základní jednotka v DVB-T2 struktuře), na jehož začátek je přidána hlavička. Druhým krokem je mód přizpůsobení datového toku, kde dochází ke vzniku kompletního BB rámce s konstantní délkou a následně se provádí jeho znáhodnění [5].



Obr. 2 Blokové schéma vstupního zpracování PLP (na základě [5])

1.2.1 Mód přizpůsobení

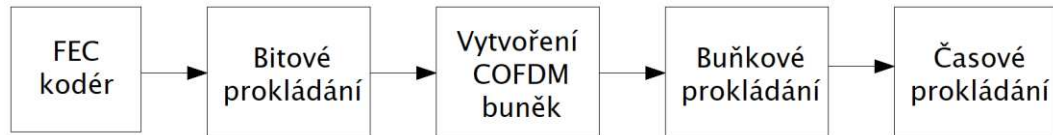
Blok vstupního zpracování, který slouží k zajištění konstantní bitové rychlosti, přidává informativní bity o hodinovém signálu modulátoru a odstraní nulových paketů (Null Packet Deletion – NPD), které jsou vkládány do transportního toku TS z důvodu zachování bitové rychlosti. Počet odstraněných paketů je uložen v bytu Deleted Null Packets (DNP). Cyklický redundantní enkodér (Cyclic Redundancy Check – CRC-8), který používá 8bitový kód, ověřuje integritu dat. Dále následuje vložení hlavičky BB rámce, jež obsahuje údaje z předchozích bloků a informace o datových tocích, např. jejich typ a počet [7].

1.2.2 Mód přizpůsobení datového toku

Blok „Zarovnání rámce BB“ vytváří kompletní BB rámec s konstantní délkou, která odpovídá určitému kódovému poměru Low Density Parity Check (LDPC) kodéru. Také přidává signalizační byty. Kompletní BB rámec musí být znáhodněn. Proto se využívá další blok, jenž pomocí pseudonáhodné binární sekvence (Pseudo Randomize Binary Sequence – PRBS) znáhodní celý BB rámec. PRBS je generována zpětnovazebním posuvným registrem a díky ní dosáhneme energetického rozptylu [7].

1.3 Prokládané kódování a modulace

Následně je popsán blok „Bitové prokládání, kódování a modulace“ (Bit Interleaving, Coding, Modulating – BICM), jehož schéma je znázorněno na Obr. 3.

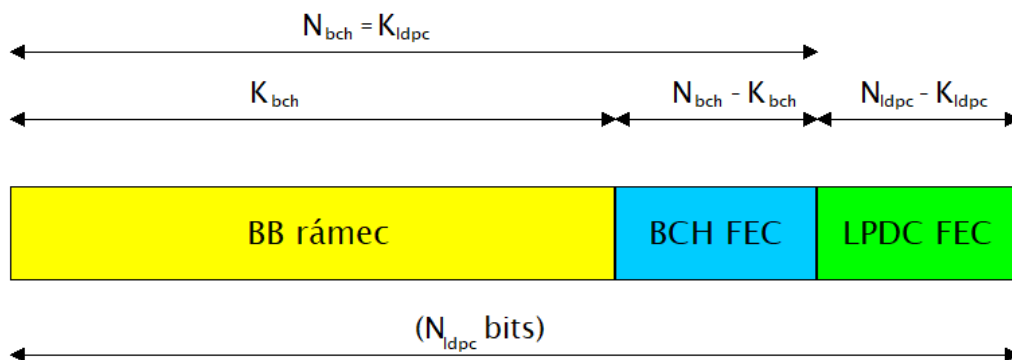


Obr. 3 Blokové schéma „Bitového prokládání, kódování a modulace“ (BICM)

1.3.1 FEC kódování

Dopředná chybová korekce (Forward Error Correction – FEC) má za úkol zabezpečit data proti chybám, k nimž může dojít během přenosu [6]. V DVB-T2 se, oproti DVB-T, používá pokročilejší metoda kódování, která je náročnější na výpočetní výkon a paměť. V DVB-T se používá samoopravný Reed-Solomonův kód. Označuje se jako vnější ochranný kód, který opravuje určitý počet bitů v bloku. Podrobněji je popsán v [8].

Pro vnější kódování v DVB-T2 se používá Bose-Chaudhuri-Hocquenghem (BCH), pro vnitřní Low Density Parity Check (LDPC) [5]. Po vytvoření nového rámce přidá každý typ kódování na konec předchozích dat své paritní bity, které slouží pro opravu chyb, a vznikne výsledný FEC rámec. Struktura FEC rámce je znázorněna na Obr. 4.



Obr. 4 FEC rámec DVB-T2 (na základě [5])

Tab. 1 Velikost dat pro dlouhý FEC rámeček [5]

Poměr	BB rámeček (Kbch)	BCH rámeček (Nbch)	BCH t-korekce chyb	LPDC rámeček
1/2	32 208	32 400	12	64 800
3/5	38 688	38 880	12	64 800
2/3	43 040	43 200	10	64 800
3/4	48 408	48 600	12	64 800
4/5	51 648	51 840	12	64 800
5/6	53 840	54 000	10	64 800

Tab. 2 Velikost dat pro krátký FEC rámeček [5]

Poměr	BB rámeček (Kbch)	BCH rámeček (Nbch)	BCH t-korekce chyb	LPDC rámeček
1/4	3 072	3 240	12	16 200
1/2	7 032	7 200	12	16 200
3/5	9 552	9 720	12	16 200
2/3	10 632	10 800	12	16 200
3/4	11 712	11 880	12	16 200
4/5	12 432	12 600	12	16 200
5/6	13 152	13 320	12	16 200

Podle způsobu kódování je dána velikost dat, která se dělí na dvě varianty. Krátký FEC rámeček má velikost 16 200 bitů, dlouhý rámeček 64 800 bitů. Velikost dat je dána kódovacím poměrem viz Tab. 1 a Tab. 2. Kód BCH patří do skupiny binárních lineárních blokových kódů. Kódování se provádí klasickým způsobem jako u všech cyklických kódů. Kód je generovaný polynomem o délce požadovaného kódu. U dlouhého FEC rámečku je to většinou 192 bitů a u kratšího 162 bitů. Délku určuje parametr t-korekce, který udává počet použitých polynomů řádu. LDPC používá pro generování kódu matici o velikosti (n, k) , kde n reprezentuje počet výsledných dat a k počet přidaných dat. Při dekódování se používá iterační metoda. Dekódování bezchybného přenosu je jednoduché, ale při vyšší chybovosti je nutné zvyšovat počet iterací dekodéru. Čím více chyb je v kódu obsaženo, tím víc iterací je potřeba, a kvůli tomu je potřeba i větší výpočetní výkon [9].

1.3.2 Bitové prokládání

Výstupní datový tok z LDPC kodéru je bitově prokládán. Nejprve probíhá paritní prokládání a následně bitové prokládání celého FEC rámce. Paritní prokládání je dáno následujícím vztahem [7]:

$$u_{k_{ldpc}} + 360t + s = \lambda_{k_{ldpc}} + Q_{ldpc} \cdot s + t$$

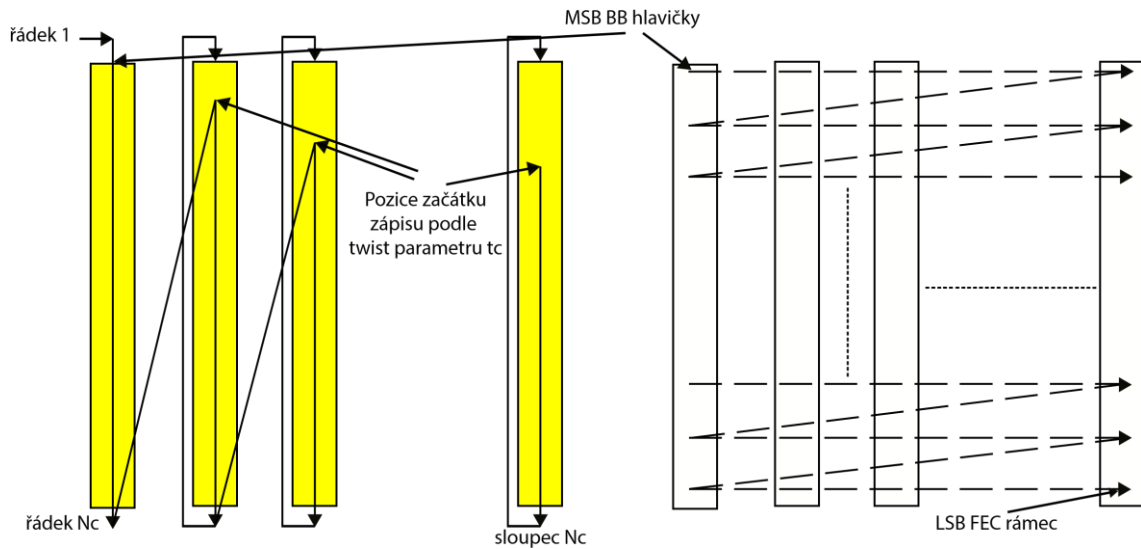
$$0 \leq s \leq 360; 0 \leq t \leq Q_{ldpc}, \quad (1)$$

kde $u_{k_{ldpc}}$ je výstup paritního prokládání, $\lambda_{k_{ldpc}}$ je výstup z LDPC kodéru, Q_{ldpc} je délka kódovaného bloku, která závisí na kódovacím poměru a je definována v Tab. 3.

Tab. 3 Hodnoty Q_{ldpc} pro paritní prokládání [5]

LDPC kód	Q_{ldpc} pro krátký rámec	Q_{ldpc} pro normální rámec
1/4	36	-
1/2	25	90
3/5	18	72
2/3	15	60
3/4	12	45
4/5	10	36
5/6	8	30

Následuje bitové prokládání celého FEC rámce, jehož princip je znázorněn na Obr. 5. Výstupní data z paritního prokládání jsou postupně zapisována do jednotlivých sloupců a poté se čtou po řádcích. Twist parametr t_c označuje počáteční pozici sloupce při zapisování dat (viz Tab. 4). Bitové prokládání se používá u všech modulací vyjma QPSK, kde se u LDPC poměrů 1/3 a 2/5 používá jen prokládání paritních bitů. U ostatních kódovacích poměrů se bitové prokládání nepoužívá, jelikož jednotlivé symboly jsou od sebe relativně vzdálené a jeden symbol je tvořen pouze dvěma bity, proto bitové prokládání postrádá smysl [6]. Další parametry bitového prokládání jsou popsány v Tab. 5.



Obr. 5 Princip bitového prokládání (na základě [5])

Tab. 4 Twist parametr t_c [5]

Modulace	Sloupce N_c	N_{ldpc}	Twist parametr t_c															
			0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
16QAM	8	64 800	0	0	2	4	4	5	7	7	-	-	-	-	-	-	-	-
		16 200	0	0	0	1	7	20	20	21	-	-	-	-	-	-	-	-
64QAM	12	64 800	0	0	2	2	3	4	4	5	5	7	8	9	-	-	-	-
		16 200	0	0	0	2	2	2	3	3	3	6	7	7	-	-	-	-
256QAM	16	64 800	0	2	2	2	2	3	7	15	16	20	22	22	27	27	28	32
	8	16 200	0	0	0	1	7	20	20	21	-	-	-	-	-	-	-	-

Tab. 5 Parametry bitového prokládání [5]

Modulace	Řádky N_r		Sloupce N_c
	$N_{ldpc}=64\ 800$	$N_{ldpc}=16\ 200$	
16QAM	8100	2025	8
64QAM	5400	1350	12
256QAM	4050	-	16
	-	2025	8

1.3.3 Vytváření COFDM buněk

Po bitovém proložení je každý FEC rámeček mapován a kódován do FEC bloků. V demultiplexeru se FEC rámce nejprve mapují do paralelních, tzv. buňkových slov, jejichž velikost pro jednotlivé modulace je dána parametrem N_{sub} (viz Tab. 6). Následně jsou tyto buňky mapovány do určité konstelace [5].

Tab. 6 Počet N_{sub} v demultiplexeru [5]

Modulace	N_{ldpc}	N_{sub}
QPSK	Vše	2
16QAM	Vše	8
64QAM	Vše	12
256QAM	64 800	16
	16 200	8

Kromě QPSK a 256QAM jsou buňky o velikosti N_{sub} rozděleny do dvou buněk o velikosti $N_{\text{MOD}} = N_{\text{sub}} / 2$ na výstupu demultiplexeru. Do konstelačního diagramu se mapují postupně. U QPSK a 256QAM modulace se mapují přímo do konstelačního diagramu. Buňky takto namapované v konstelačním diagramu se nazývají Coding Orthogonal Frequency Divison Multiplexing (COFDM) buňky [10].

1.3.4 Buňkové prokládání

Buňkový prokladač rovnoměrně rozloží COFDM buňky do FEC bloku. Díky tomu dojde k vylepšení spektra a zabezpečení proti shlukovým chybám. Výstupem prokladače je vektor, jenž je vyjádřen následujícím vztahem [5]:

$$d_{r,L_r(q)} = q_{r,q}, \text{ kde } q = 0,1 \dots, N_{\text{cells}} - 1, \quad (2)$$

kde $L_r(q)$ je permutační funkce, která je aplikována na r -tý FEC blok určitého bloku časového prokladače (Time Interleaver – TI) a N_{cells} je počet buněk ve FEC bloku.

Permutační funkce je dána vztahem [5]:

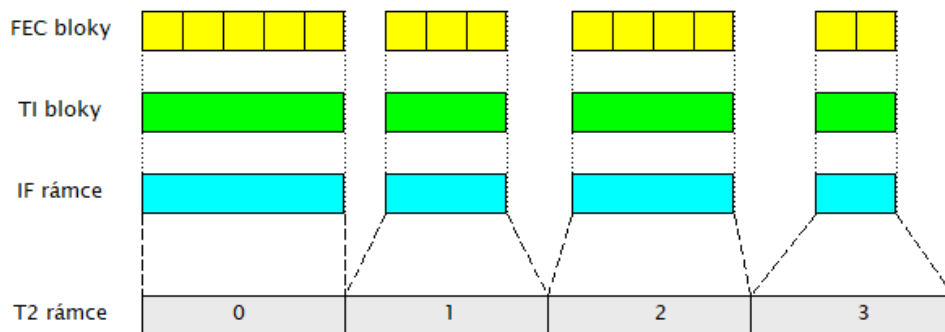
$$L_r(q) = [L_0(q) + P(r)] \bmod N_{\text{cells}}, \quad (3)$$

kde $L_0(q)$ je základní permutační funkce použitá na první FEC blok daného TI bloku, $P(r)$ je posunovací hodnota použitá na FEC blok s indexem r daného TI bloku.

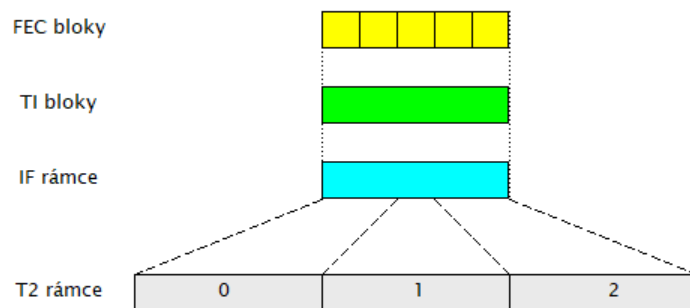
1.3.5 Časové prokládání

FEC bloky z buňkového prokládání se seskupují do Interleaving Frame (IF) rámců, které jsou mapovány do T2 rámců. V IF rámci může být různý počet FEC bloků. Jejich počet je v bitovém poli o délce 10 bitů s názvem PLP_NUM_BLOCKS. Maximální počet FEC bloků na IF rámec je 1024. IF rámec se dále dělí na TI bloky.

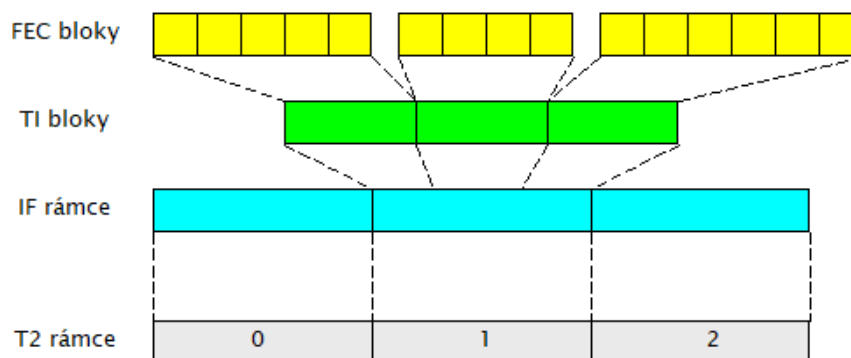
K dispozici jsou 3 typy časového prokládání. První možností je, že každý IF rámec obsahuje jeden TI blok a je mapován do jednoho T2 rámcu (viz Obr. 6). Další typ je takový, že každý IF rámec obsahuje jeden TI blok, který je mapován do více T2 rámců (viz Obr. 7). Poslední možností je do IF rámce seskupit více TI bloků a mapovat do jednoho T2 rámcu (viz Obr. 8). Princip časového prokládače je obdobný jako u bitového. Jednotlivé buňky jsou zapisovány do sloupců a čtou se po řádcích. V Tab. 7 jsou uvedeny potřebné parametry pro časové prokládání [7].



Obr. 6 První možnost mapování (na základě [5])



Obr. 7 Druhá možnost mapování (na základě [5])



Obr. 8 Třetí možnost mapování (na základě [5])

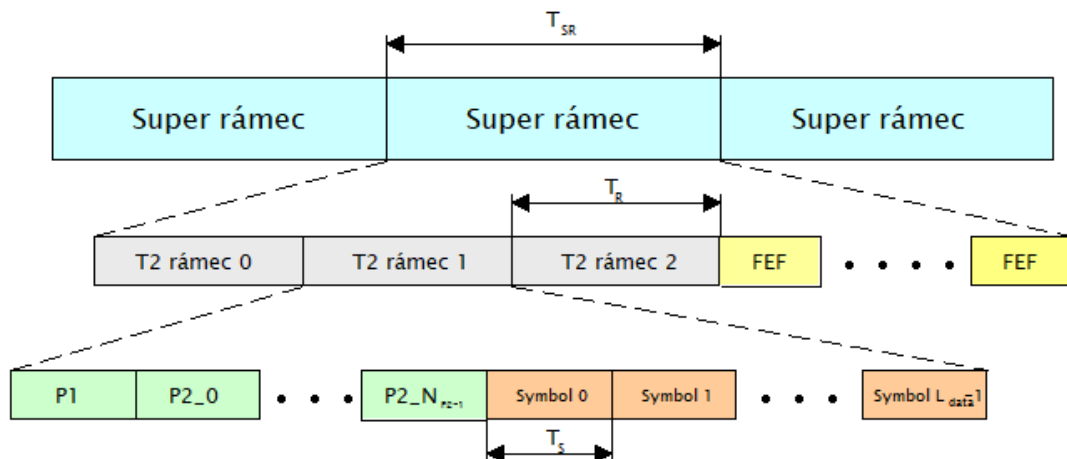
Tab. 7 Parametry časového prokládání [5]

Délka LDPC bloku N_{ldpc}	Modulace	Počet buněk v LDPC bloku N_{cells}	Počet řádků N_r
64 800	256QAM	8100	1 20
	64QAM	10 800	2160
	16QAM	16 200	3240
	QPSK	32 400	6480
16 200	256QAM	2025	405
	64QAM	2700	540
	16QAM	4050	810
	QPSK	8100	1620

1.4 Sestavení DVB-T2 rámce

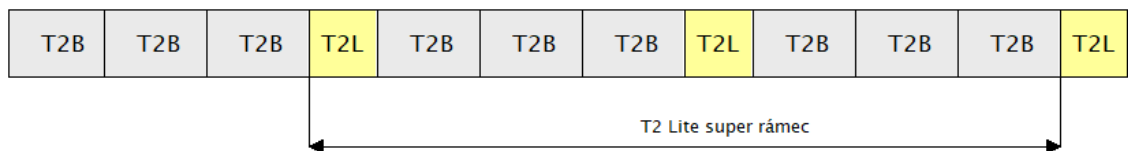
Sestavení DVB-T2 rámce má za úkol shromáždit časově proložené buňky každé vrstvy PLP a buňky L1 signalizace. Shromáždí je do polí aktivních COFDM buněk odpovídajících každému COFDM symbolu [6]. Tak dojde k vytvoření celkové struktury celého rámce, která je znázorněná na Obr. 9. Nejvyšší jednotkou struktury je super rámec, který se dělí na T2 rámce, jejichž délka trvání je 250 ms, a ty jsou následně tvořeny COFDM symboly [5].

Super rámec může také obsahovat Future Extension Frame (FEF) blok, který slouží pro další rozšíření služeb, např. TV vysílání ve standardu DVB-T2-Lite. Proto je tedy možné vysílat zároveň signál ve standardu DVB-T2 i T2-Lite. Rozdíl je v délce T2 rámce ve standardu T2-Lite, a to 1 sekunda [11].



Obr. 9 Struktura DVB-T2 rámce (na základě [5])

Signál T2-Lite může být vysílán buď samostatně bez FEF části, nebo jako T2-Lite, který je součástí FEF bloku. Na Obr. 10 je příklad kombinace T2B (T2-Base) signálu a ve FEF části T2L (T2-Lite) signálu. Super rámec musí obsahovat nejméně dva T2 rámce, FEF bloků může být jeden i více.



Obr. 10 Příklad kombinace DVB-T2 a T2-Lite rámců (na základě [11])

1.5 Frekvenční prokládání

Účelem frekvenčního prokladače je prokládání datové buňky každého COFDM symbolu. Mapuje datové buňky z rámců N_{data} do dostupných datových nosných každého COFDM symbolu. K prokládání se používá prokládací vektor $x_{m,l} = (a_{m,l,0}, a_{m,l,1}, a_{m,l,2}, \dots, a_{m,l,3})$, který je pro OFDM mód 32K definován následovně [5]:

$$\begin{aligned} a_{m,l,H(p)} &= x_{m,l,p} \text{ pro sudé symboly,} \\ a_{m,l,p} &= x_{m,l,H(p)} \text{ pro liché symboly.} \end{aligned} \quad (4)$$

Pro ostatní OFDM módy (1K, 2K, 4K, 16K) platí [5]:

$$\begin{aligned} a_{m,l,p} &= x_{m,l,H_0(p)} \text{ pro sudé symboly,} \\ a_{m,l,p} &= x_{m,l,H_1(p)} \text{ pro liché symboly,} \end{aligned} \quad (5)$$

kde $x_{m,l,p}$ je datová buňka, která vstupuje do frekvenčního prokladače, m je index T2 rámce, l je index COFDM symbolu, p je index datové nosné v COFDM symbolu, $H(p)$, $H_0(p)$ a $H_1(p)$ jsou permutační funkce založené na sekvenci R_i , ty jsou pro každý OFDM mód jiné [7]. Permutační funkce jsou podrobněji popsány v [5].

1.6 Generování COFDM symbolů

Pro modulaci transportního toku se používá ortogonální frekvenčně dělený multiplex OFDM, který obsahuje velký počet subnosných vln, jež jsou ortogonální, tzn. že maximum každé nosné se překrývá s minimy ostatních. V kombinaci s FEC v základním pásmu se značí jako kódovaný OFDM (COFDM). Při přenosu jsou COFDM symboly sdružené do rámce, kde jsou skládány vedle sebe v horizontální ose. Podélná osa představuje frekvenci. Posloupnost nosných je zobrazena ve vertikálním směru. Znázorněny jsou aktivní nosné s konstantní frekvenční pozicí, které jsou modulovány užitečnými informacemi včetně protichybového zabezpečení. Dále jsou ukázány i další pilotní nosné, jež slouží pro synchronizaci (rozptýlené a spojitě) [8].

1.6.1 Rozptýlené nosné

Slouží pro odhad kmitočtové charakteristiky přenosového kanálu. Nemají stálou pozici a jsou rozptýleny přes celé spektrum. Standard zavádí až osm různých variant rozmístění nosných Pilot Pattern (PP). PP1 má nejhustší rozmístění pilotních nosných, varianta PP8 pak nejřidší [6]. Aby se daná nosná k stala rozptýlenou, musí splnit následující podmínku [5]:

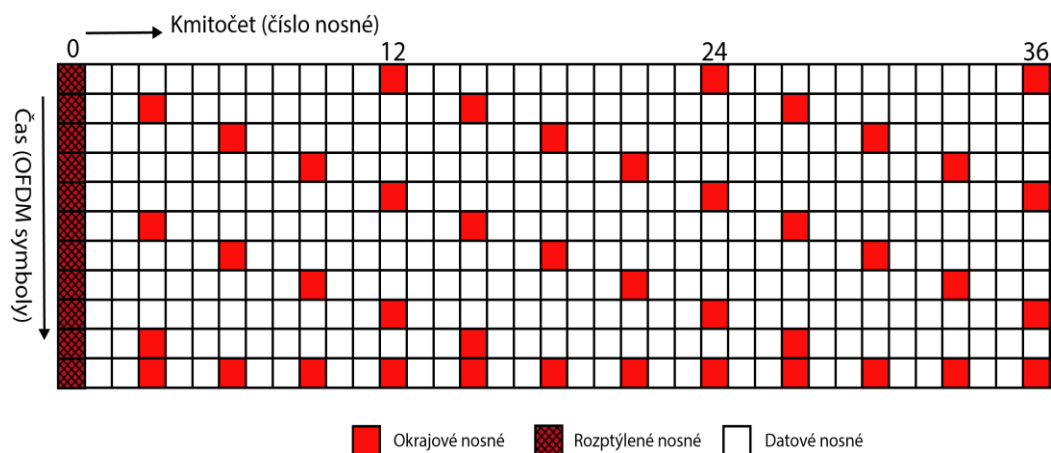
$$k \cdot \text{mod}(D_x \cdot D_y) = D_x \cdot (t \cdot \text{mod}(D_y))$$

$$k = [K_{min}: K_{max}], t = [N_{p2}; L_t - 1], \quad (6)$$

kde K_{min} značí první aktivní subnosnou, K_{max} značí poslední aktivní subnosnou, N_{p2} je počet P2 symbolů v T2 rámci, L_t je celkový počet symbolů, D_x a D_y jsou parametry, které jsou definovány v Tab. 8.

Tab. 8 Parametry definující rozptýlené nosné [7]

Vzor pilotních nosných	Oddělení pilotních nosných (D_x)	Počet symbolů v jednom vzoru (D_y)
PP1	3	4
PP2	6	2
PP3	6	4
PP4	12	2
PP5	12	4
PP6	24	2
PP7	24	4
PP8	6	16



Obr. 11 Vzor rozptýlených nosných PP1 (na základě [5])

Tab. 9 Amplitudy rozptýlených nosných [7]

Vzor pilotních nosných	Amplituda (A_{SP})	Ekvivalentní zesílení (dB)
PP1, PP2	4/3	2,5
PP3, PP4	7/4	4,9
PP5, PP6, PP7, PP8	7/3	7,4

Modulace rozptýlených nosných je dána podle vztahu [5]:

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}\{c_{m,l,k}\} &= 2A_{SP} \left(\frac{1}{2} - r_{l,k}\right) \\ \operatorname{Im}\{c_{m,l,k}\} &= 0, \end{aligned} \quad (7)$$

kde A_{SP} je amplituda, která je definována v Tab. 9, c je hodnota pilotní nosné, m je index rámece, l je index symbolu, k je index nosné a r je referenční sekvence.

1.6.2 Spojité nosné

Spojité nosné slouží pro frekvenční a časovou synchronizaci. Jsou vloženy do každého symbolu kromě P1 a P2 symbolů a symbolu uzavírajícího rámeček. Jejich pozice a počet závisí na použitém OFDM módu. Umístění spojitých nosných je dáno pomocí tzv. Continual Pilot (CP) skupin v závislosti na režimu OFDM [5]. CP skupiny pro použité módy OFDM jsou popsány v Tab. 10.

Tab. 10 Parametry spojitých nosných [7]

OFDM módy	CP skupiny	$K_{\text{mód}}$
1K	CP ₁	1632
2K	CP ₁ , CP ₂	1632
4K	CP ₁ , CP ₂ , CP ₃	3264
8K	CP ₁ , CP ₂ , CP ₃ , CP ₄	6528
16K	CP ₁ , CP ₂ , CP ₃ , CP ₄ , CP ₅	13 056
32K	CP ₁ , CP ₂ , CP ₃ , CP ₄ , CP ₅ , CP ₆	NA

1.6.3 Okrajové nosné

Okrajové nosné se nacházejí ve všech symbolech kromě P2 a P1 symbolů. Jsou umístěny na okrajích aktivních nosných a jejich účelem je doplňovat rozptýlené nosné až na okraj spektra a umožnit tak frekvenční interpolaci [10]. Modulace okrajových nosných se provádí stejně jako u těch rozptýlených.

1.7 IFFT

Po vložení pilotních nosných jsou kompletní COFDM symboly ve frekvenční oblasti, nyní je třeba je převést do oblasti časové. K tomu se využívá rychlá inverzní Fourierova transformace (ang. Inverse Fast Fourier Transform, IFFT). Podle délky FFT jsou dány parametry uvedené v Tab. 11. Vysílaný signál je organizován do rámců, které mají délku periody T_F a skládá se z COFDM symbolů. Každý symbol je tvořen K_{total} nosnými, které jsou přenášeny s periodou T_S . Ta se skládá ze dvou částí. První z nich je užitečná část T_U a druhá představuje ochranný interval o délce Δ [7].

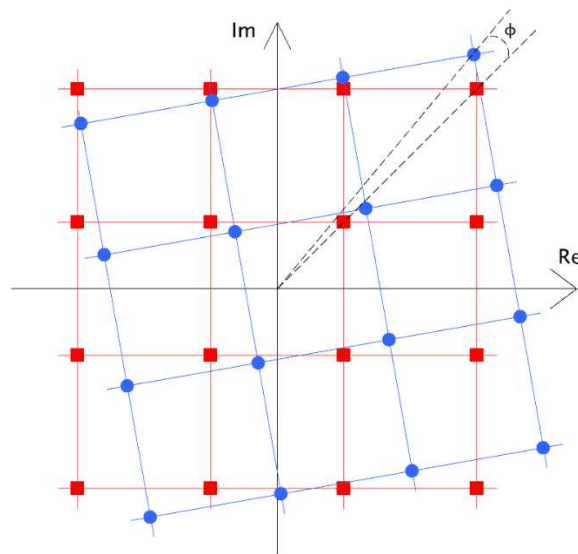
Tab. 11 Parametry COFDM [7]

Parametr	1K	2K	4K	8K	16K	32K
Počet aktivních nosných v normálním módu K_{total}	853	1705	3409	6817	13 633	27 265
Počet aktivních nosných v rozšířeném módu	NA	NA	NA	6913	13 921	27 841
Doplňkové nosné v rozšířeném módu	0	0	0	96	288	596
IFFT	1024	2048	4096	8192	16 384	32 768
Doba symbolu T_U [μ s]	112	224	448	896	1792	3584
Rozestup nosných [kHz]	8,929	4,464	2,232	1,116	0,558	0,2279
Šířka pásma v normálním módu [MHz]	7,61	7,61	7,61	7,61	7,61	7,61
Šířka pásma v rozšířeném módu [MHz]	NA	NA	NA	7,71	7,77	7,77

1.8 Rotovaná konstelace

Ve standardu DVB-T2 je přidána také nová technika konstelace, která se nazývá rotovaná. Patří mezi hlavní inovace tohoto standardu [12]. Při nerotované konstelaci potřebuje přijímač obě složky, tj. soufázovou (In-phase, I) a kvadrurní (Q). Ty jsou potřeba, abychom zjistili, jaké informace jsou přenášeny. Kromě toho jsou obě složky postihnuty stejnými ztrátami, když se šíří signál přes pozemní přenosový kanál [13].

Při modulaci s rotovanou konstelací se v komplexní rovině aplikuje určitý úhel natočení jednotlivých bodů a každá složka I nebo Q má dostatek informací o tom, který symbol byl přenesen. Rotovaná konstelace je znázorněna na Obr. 12, kde je zobrazen příklad konstelačního diagramu modulace 16QAM. Po natočení se prokládání provádí jen přes složku Q (imaginární část signálu). Díky tomu může dojít k samostatnému přenosu I a Q složky na různých nosných a v různém čase.



Obr. 12 Rotovaná a normální konstelace s modulací 16QAM [13]

Pokud je jedna ze složek poškozena, nebo je ovlivněna hlubokým selektivním únikem, další složka může být použita k získání informací. Tato technika zlepšuje odolnost přijímače pro přenos signálů prostředím s hlubokými úniky [13].

Zvýšení účinnosti demodulování při použití rotované konstelace závisí na volbě optimálního úhlu natočení ϕ . Ten závisí na zvolené modulaci a typu přenosového kanálu. Ve standardu DVB-T2 byl však vybrán úhel natočení nezávisle na použitém kanálu. Úhly jsou optimální pro určitý typ kanálu. V Tab. 12 jsou uvedeny hodnoty

úhlů, které jsou dobrým kompromisem pro všechny možné typy přenosových kanálů v DVB-T2 [13].

Tab. 12 Úhel natočení rotované konstelace pro konkrétní modulace

Modulace	Úhel natočení φ [°]
QPSK	29
16QAM	16,8
64QAM	8,6
256QAM	$\text{Atan}(1/16)$

1.9 PAPR redukce

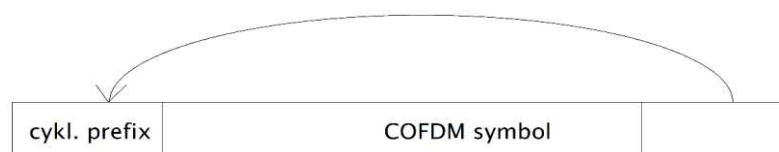
Poměr špičkového a středního výkonu signálu udává veličina Peak to Average Power Ratio (PAPR). Poměr se dá v DVB-T2 redukovat pomocí dvou metod.

První z nich je Active Constellation Extension (ACE), která redukuje PAPR pomocí přidání vnějších konstelačních bodů v kmitočtové oblasti.

Druhá metoda je rezervace tónů, ta redukuje PAPR pomocí přímého ořezání špiček signálu v časové oblasti. Obě metody je možné použít současně, avšak metodu ACE nelze použít u rotované konstelace [6].

1.10 Ochranný interval

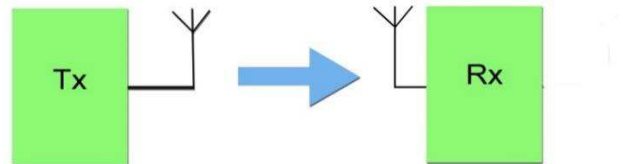
Díky odrazům od různých objektů, např. budov, může vysílaný signál dorazit k přijímači s různým zpožděním. Proto se zavádí ochranný interval (Guard Interval, GI), který se přidává mezi každý vyslaný symbol. GI je doba, během níž se nepřenáší užitečný signál, ale zabraňuje rušivému vlivu zpožděných signálů [6]. Délka ochranného intervalu je dána jako díl periody vysílaného signálu, po kterou nepřijímá další signál. Platí, že čím kratší ochranný interval, tím slabší ochrana. GI neobsahuje pouze nulové symboly, ale také konec následujícího symbolu, tzv. cyklický prefix, který je znázorněn na Obr. 13.



Obr. 13 Vložení cyklického prefixu [6]

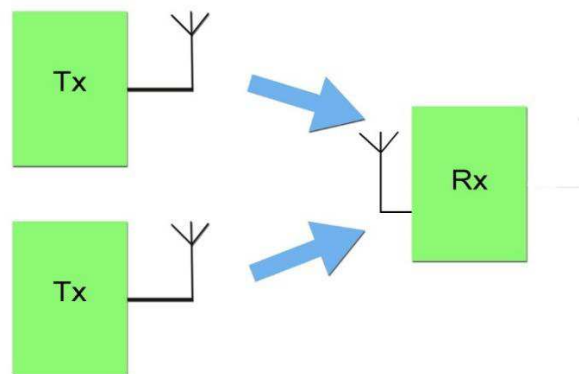
1.11 Konfigurace systému

Ve standardu DVB-T2 je možné použít odlišné konfigurace systému. Jednou z nich je konfigurace single input – single output (SISO), kde se uvažuje jeden RF signál, který je vysílán jedním vysílačem a na přijímací straně je poté přijímán jedním přijímačem.



Obr. 14 Konfigurace SISO

Druhou možností konfigurace je systém multiple input – single output (MISO), kdy vysílání probíhá minimálně ze dvou vysílačů. Prvním vysílačem jsou vysílána stejná data jako při použití SISO konfigurace. Na druhý vysílač, jenž pracuje na stejném kmitočtu, vstupují data, která jsou kódována pomocí Alamoutiho kódování. To patří mezi blokové časoprostorové kódy (více informací viz [14]). Nevýhodou tohoto režimu je potřeba dvojnásobného množství pilotních nosných.



Obr. 15 Konfigurace MISO

Podle zadání práce se uvažuje pouze konfigurace SISO.

2. DVB-T2-LITE

DVB-T2-Lite je odlehčený profil systému DVB-T2, který je určen k tomu, aby umožnil jednodušší implementaci přijímače pro aplikace s nízkou kapacitou, jako např. mobilní vysílání (zejména v mobilních telefonech a tabletech), ale také může být přijímáno i stacionárními přijímači. Je navržen tak, aby se snížila složitost DVB-T2 systému a aby se zmenšila spotřeba energie v mobilních zařízeních. Je založen na principu signálového zpracování v základním standardu DVB-T2 s vyloučením některých složitějších režimů. Proto umožňuje i efektivnější návrh přijímačů [6].

Rozdíly oproti DVB-T2 jsou následující. Maximální bitová rychlost je 4 Mbit/s. T2-Lite zavádí omezení paměti časového interleaveru přibližně na polovinu. Snížila se rychlost zpracování FEC rámců. A z toho důvodu, že FEC rámeček má velikost pouze 16 200 bitů (krátký rámeček). Ve FEC řetězci byly přidány dva nové kódovací poměry, a to $1/3$ a $2/5$, spolu s jejich příslušnými bity v demultiplexeru. Tyto poměry jsou převzaty ze standardu DVB-S2 [6]. Modulace 256QAM se nepoužívá s kódovými poměry $2/3$ a $3/4$ ani s rotovanou konstelací. U rozptýlených nosných se neuplatňuje vzor pilotních nosných PP8. OFDM módy 32K a 1K nejsou v T2-Lite zahrnuty. V Tab. 13 jsou uvedeny rozdílné parametry u obou standardů.

Tab. 13 Rozdílné parametry DVB-T2/ DVB-T2-Lite

	DVB-T2	T2-Lite
Kódovací poměry pro krátký FEC rámeček	$1/4, 1/2, 3/5, 2/3, 3/4, 4/5, 5/6$	$1/3, 2/5, 1/2, 3/5, 2/3, 3/4$
Kódovací poměry pro dlouhý FEC rámeček	$1/2, 3/5, 2/3, 3/4, 4/5, 5/6$	Nepoužívá se
Délka FEC rámečku	64 800, 16 200	16 200
Bitová rychlost	Maximálně 50 Mbit/s	Omezena na 4 Mbit/s
OFDM módy	1K, 2K, 4K, 8K, 16K, 32K	2K, 4K, 8K, 16K
Použití 256QAM	Používá se se všemi kód. poměry	Nepoužívá se s rotovanou konstelací a u poměrů $2/3$ a $3/4$

3. PŘENOSOVÉ KANÁLY

Pozemní televizní vysílání je provozováno na kmitočtech od 470 MHz až do 690 MHz, což odpovídá pásmu Ultra High Frequency waves (UHF).

Pozemní přenosová cesta je vystavena několika interferenčním vlivům. Nejčastěji se informace přenáší pomocí přímé vlny, která se však může odrážet od různých překážek, jako jsou domy, průmyslové stavby a další [8]. Podle přenosového scénáře se také dělí modely přenosových kanálů na pevný příjem (Fixed reception), přenosný příjem (Portable reception) a mobilní příjem (Mobile reception). Pokud se přijímač pohybuje, dochází navíc k Dopplerovu jevu.

3.1 Dopplerův jev

Pokud se přijímač pohybuje od vysílače, dochází k Dopplerovu posuvu kmitočtu. Kmitočtový posun je závislý na rychlosti, kterou se přijímač pohybuje. Může být kompenzován automatickým doladováním kmitočtu (Automatic Frequency Correction, AFC). Pokud se přijímač pohybuje velmi vysokou rychlostí, hovoříme o mobilním příjmu. Při nižší rychlosti, např. při chůzi, se tento příjem označuje jako přenosný [8].

3.2 Dopplerovo spektrum

Nejjednodušší případ Dopplerova spektra je tzv. Pure Doppler, které pro přenos signálu využívá jen jednu přímou cestu. Spektrum signálu se pouze posune na jednu, nebo druhou stranu, a kromě malé deformace, kdy vyšší kmitočty jsou posunuty více, zůstává charakteristika bez větších změn [15]. Rozdíl nastává, pokud využíváme Dopplerovo spektrum typu Rice, kde se šíří kromě přímé cesty také odrazy, které jsou postihnuty Dopplerovým posunem [15]. Spektrum Dopplerových posunů všech odrazů má v kmitočtové oblasti tvar připomínající písmeno U a je označováno jako Jakes [6]. Jiný známý typ Dopplerova spektra je Gauss, který má přesně opačný průběh. Dalším typem je Rayleigh. Vzniká podobným způsobem jako Rice, rozdíl je v tom, že přijímaný signál není tvořen z přímé cesty. Spektrum je tvořeno pouze z odražených signálů s Dopplerovým posunem [6].

3.3 Pevný pozemní příjem

Pro pevný pozemní příjem je charakteristická statická poloha přijímače. Přenosová cesta se vyznačuje přímou vlnou včetně odražených signálů a je definována pomocí modelů přenosových kanálů a to Gaussovým, Riceovým a Rayleighovým kanálem.

3.3.1 Gaussův kanál (AWGN)

Jedná se o přenosový kanál, u něž jsou přijímač a vysílač v přímém dohledu, signál se šíří pouze přímou vlnou bez odrazů a je ovlivněn aditivním bílým Gaussovským šumem (AWGN). Tento přenosový kanál zajišťuje nejlepší přenosové podmínky příjmu signálu [16].

3.3.2 Riceův kanál (RC20)

Vychází z Gaussova přenosového kanálu. Počítá však s případnými odrazy, např. od budov [6]. Odrazy poté způsobují nárůst mezisymbolových interferencí (Intersymbol Interference – ISI), které způsobují větší degradaci signálu [16]. Model Riceova kanálu se značí RC20 a je tvořen jednou přímou a 20 nepřímými cestami. Parametry přenosového kanálu lze nalézt v [17].

3.3.3 Rayleighův kanál (RL20)

Může nastat i situace, kdy je narušená přímá viditelnost mezi vysílačem a přijímačem. Pro simulaci takové situace se používá Rayleighův kanál, který zahrnuje pouze odražené signály, tzn. příjem signálu je možný jen díky odrazům. Rayleighův kanál představuje nejhorší podmínky pro přenos signálu [16]. Tento model je označován jako RL20, je tvořen 20 nepřímými cestami. Parametry přenosového kanálu lze nalézt v [17].

3.4 Přenosný pozemní příjem

Přijímač se pohybuje vzhledem k přijímači malou rychlostí, jde řádově o jednotky km/h, např. při chůzi. Přenosová cesta se vyznačuje mnohacestným šířením a je definována pomocí modelů přenosového kanálu PI12 a PO12. Parametry pro přenosové kanály lze nalézt v [18].

3.4.1 Přenosový kanál PI12

Kanál Portable Indoor (PI) je definován pro přenos pozemního příjmu uvnitř budov s rychlostí pohybu přijímače 3 km/h. Model tohoto přenosového kanálu se značí PI12 a je tvořen 12 cestami, z nichž první je přímá cesta s Dopplerovým spektrem Rice-Gauss a další jsou nepřímé cesty s Dopplerovým spektrem Rayleigh-Gauss [6].

3.4.2 Přenosový kanál PO12

Kanál Portable Outdoor (PO) je definován pro přenos signálu vně budovy s rychlostí pohybu přijímače 3 km/h. Model kanálu se značí PO12 a je tvořen 12 cestami. Jednotlivé parametry jsou stejné jako u předchozího kanálu PI12, jen s tím rozdílem, že jednotlivé cesty mají rozdílný útlum a zpoždění [6].

3.5 Mobilní přenosový příjem

U mobilního příjmu se rychlost přijímače vůči vysílači pohybuje od 30 do 100 km/h. Přenosová cesta se opět vyznačuje mnohacestným šířením a je definována pomocí modelů kanálu TU6 a RA6.

3.5.1 Přenosový kanál RA6

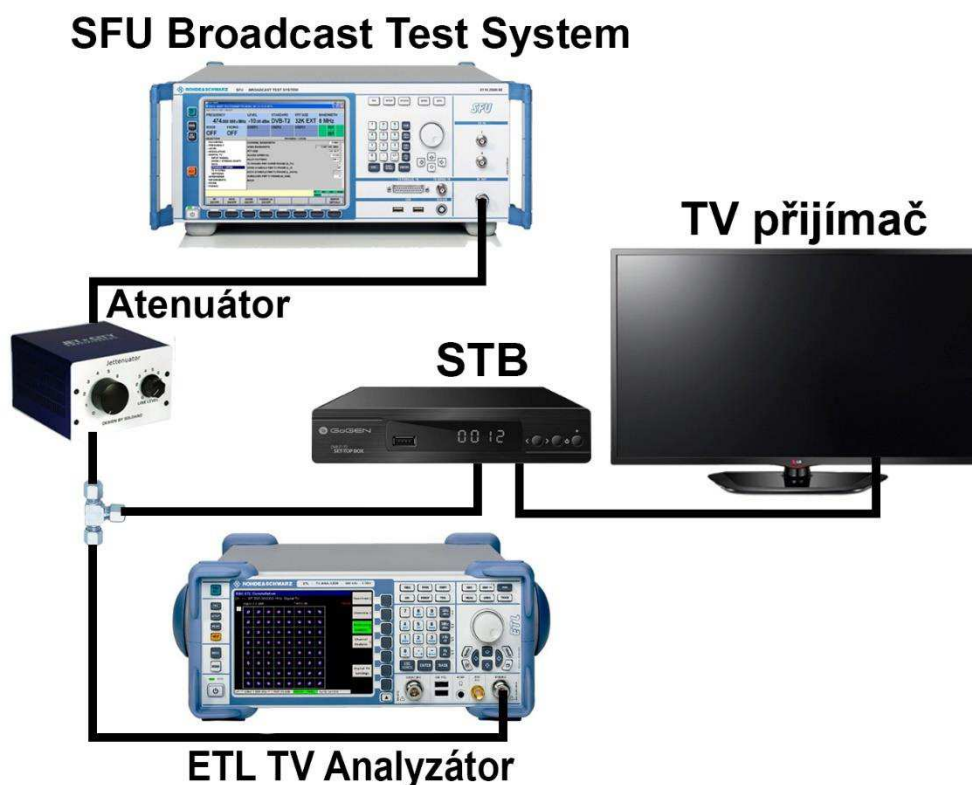
Kanál Rural Area (RA) je definován pro šíření signálu ve venkovním prostředí, kdy rychlost pohybu přijímače je 100 km/h. Model kanálu se značí RA6 a je tvořen 6 cestami s malým zpožděním a malými výkonovými ztrátami. První cesta je přímá a má Dopplerovo spektrum s Riceovou distribucí, pro ostatní cesty se využívá cesta šíření signálu s Rayleighovou distribucí [17].

3.5.2 Přenosový kanál TU6

Kanál Typical Urban (TU) je určen pro urbanizované prostředí. Model kanálu se značí TU6 a je tvořen 6 cestami s velkým rozptylem zpoždění a relativně silnými výkonovými úrovněmi. Všechny cesty jsou tvořeny Dopplerovým spektrem s Rayleighovou distribucí. Přesné parametry těchto přenosových kanálů lze nalézt v [17].

4. NÁVRH MĚŘICÍHO PRACOVISTĚ

V následující kapitole je popsáno měřicí pracoviště pro měření DVB-T2/T2-Lite tak, aby bylo možné sledovat co nejvíce objektivních parametrů. Pracoviště bude sestaveno v Laboratoři digitální a televizní techniky na Ústavu radioelektroniky. Blokové schéma navrženého měřicího pracoviště je znázorněno na Obr. 16.



Obr. 16 Měřicí pracoviště pro měření DVB-T2/T2-Lite

4.1 Měřicí přístroje

Rohde & Schwarz® SFU Broadcast Test System

Přístroj ke generování referenčního digitálního televizního signálu podle standardu DVB-T2/C2/S2 a také audio signálu. Obsahuje i modul k emulaci rozmanitých přenosových podmínek pomocí modelů různých přenosových kanálů, které jsou popsány v předchozí kapitole.

Rohde & Schwarz® ETL TV Analyzer

Televizní analyzátor R&S ETL TV je multifunkční přístroj, který měří nejen parametry televizního a rádiového signálu, ale pracuje jako analyzátor videa a RF spektra signálu. Může také analyzovat transportní tok televizního vysílání.

Set-top box (STB) a TV přijímač

Set-top box (STB) je zařízení, které se připojuje mezi anténu a TV přijímač. Slouží k převodu digitálního TV signálu na signál, který je schopný zpracovat TV přijímač.

Set-top boxy se rozlišují podle typu TV signálu, pro který jsou určeny, tedy na pozemní, kabelové a satelitní. Tuner je součástí STB a slouží k samotnému zpracování přijímaného TV signálu a následnému zobrazení získaného obrazu a zvuku. Digitální tunery DVB-T2 lze najít i v mobilních zařízeních [21].

Atenuátor JFW 75BR-014

Slouží k zesílení nebo naopak k zeslabení vysílaného signálu, jehož parametry se budou měřit na ETL analyzátoru.

4.2 Objektivní měřené parametry

Při analýze digitálního TV signálu se soustředíme zejména na měření objektivních parametrů jako modulační chybovost (Modulation Error Rate, MER) a bitovou chybovost (Bit Error Rate, BER), které jsou závislé na poměru Carrier-to-Noise (C/N). Ten se nastavuje na SFU generátoru. Na televizním přijímači budeme sledovat kvalitu obrazu při měnící se úrovni signálu z generátoru.

Objektivní parametry změřené na přístroji ETL tak budeme porovnávat i se subjektivními parametry, které budeme pozorovat na TV přijímači.

4.2.1 Modulační chybovost (MER)

Patří mezi nejzákladnější měřené objektivní parametry v oblasti bezdrátových komunikací. Údaj nese informaci o úrovni šumu, který zasahuje do přenášeného signálu. Šum způsobuje zkreslení hodnoty fáze a amplitudy pro jednotlivé nosné vlny. Pokud překročíme určité hodnoty, tuner TV přijímače posoudí úroveň signálu

špatně a dojde ke zkreslenému a špatnému vyhodnocení přenášené informace. Proto se v praxi neobejdeme bez znalosti tohoto parametru, abychom zajistili stabilní příjem. MER se udává v jednotkách dB a platí, že čím vyšší je jeho hodnota, tím menší je hodnota rušení [19].

4.2.2 Bitová chybovost (BER)

Bitová chybovost je považována za nejdůležitější parametr pro vyhodnocení kvality digitálního signálu. Informuje o podílu chybných bitů z celkového počtu přenesených bitů za určitý časový interval [19]. Při měření signálu DVB-T2 se parametr BER měří před a za dekodérem LDPC. Hodnota BER po LDPC dekódování musí být rovna nebo menší než 1×10^{-7} . Tato hraniční hodnota je považována za signál, který obsahuje maximálně jednu chybu, tzv. Quasi Error Free (QEF).

4.2.3 Poměr C/N

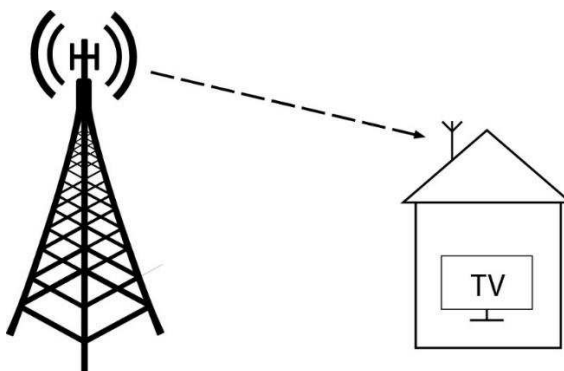
Poměr Carrier-to-Noise (C/N) vyjadřuje poměr mezi úrovní nosné vlny a šumem. Udává, o kolik je úroveň užitečného signálu větší než šum, který se přenáší společně s užitečnou informací. Šum je nežádoucí signál a má většinou přírodní původ, a to díky atmosféře nebo teplu [19]. Parametr C/N se tedy vyjadřuje jako poměr, který se udává v jednotkách dB. Požadavky na tento parametr se liší vzhledem k použité modulaci, kódovacímu poměru a podmínkám, za kterých daný signál přenášíme.

5. MĚŘENÍ

Měření bylo provedeno v Laboratoři digitální a televizní techniky. Bylo k němu využito měřicí pracoviště popsané v předchozí kapitole. Na základě dokumentace [20] byly uvažovány čtyři scénáře, které představují situace z reálného světa, při kterých se vysílá digitální TV signál ve standardu DVB-T2 a odlehčené verzi T2-Lite. Scénáře jsou ilustrovány a popsány v jednotlivých podkapitolách, v nichž jsou uvedeny grafické závislosti následujících parametrů: BER před a po LDPC dekódováním, modulační chybovost a počet LDPC iterací, které jsou závislé na proměnné C/N. Také je uvedena hodnota C/N, která udává hraniční mez, při které je možné demodulovat vysílaný signál, tzv. QEF příjem. U každého scénáře se také pozorovala kvalita přijímaného TV signálu, a to pomocí STB a TV přijímače, které byly dostupné v laboratoři. Pro všechny scénáře byla vybrána a nastavena jednotná frekvence a to 514 MHz. Dále budeme pro zjednodušení popisu v následující kapitole používat pro jednotlivé měřené parametry následující zkratky: bitová chybovost před LDPC dekódováním (BER_1), bitová chybovost po LDPC dekódování (BER_2) a modulační chybovost (MER), dále pak vysílač (TX) a přijímač (RX).

5.1 První scénář

První scénář představuje střešní příjem ve velké oblasti Single Frequency Network (SFN) pro celostátní pokrytí. Popsaná situace je znázorněna na Obr. 17. V tomto případě je doporučeno použít OFDM mód o velikosti 32K extended. Tento OFDM mód se používá pro příjem na střeše, jelikož je vysoce citlivý na Dopplerův posuv. Ochranný interval GI je nastaven na poměr 1/8, aby nedocházelo k vlastní interferenci signálu. Další systémové parametry jsou pospány v Tab. 14. Jako přenosová cesta vysílaného signálu je využít AWGN kanál s přímým signálem, kanál RC20 s přímým šířením signálu a s odrazy. Jako poslední jsme využívali kanál RL20, který signál přenáší jen nepřímými cestami.

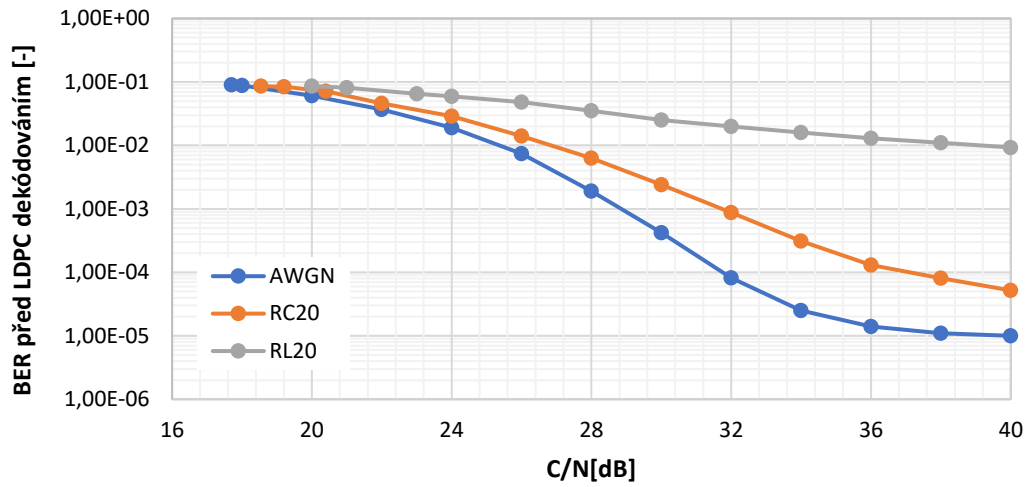


Obr. 17 Ilustrace prvního scénáře

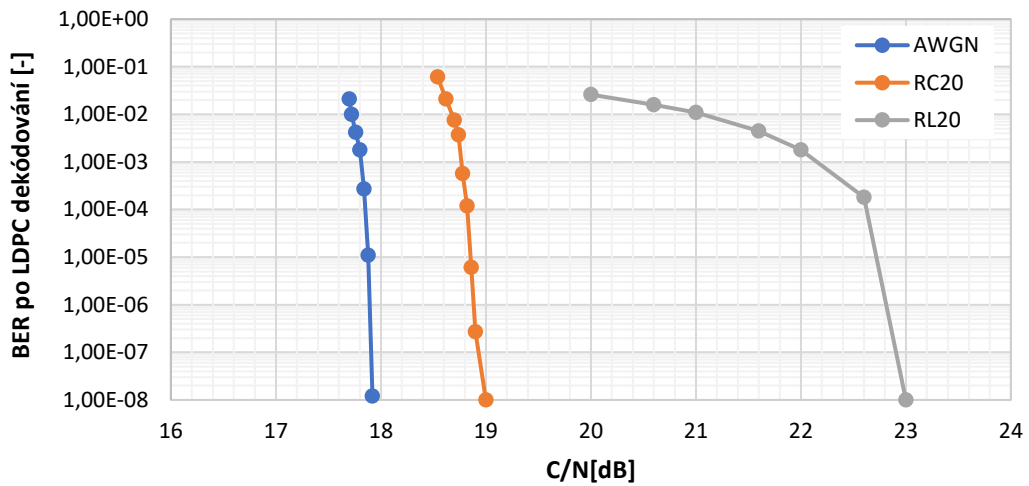
Tab. 14 Systémové parametry – první scénář

OFDM mód	32K
Přenosový mód	Extended
Rozptýlené nosné	PP2
GI interval	1/8 (448 μ s)
Modulace	256QAM
Kódovací poměr	2/3
Přenosová rychlost	33,4 Mbit/s

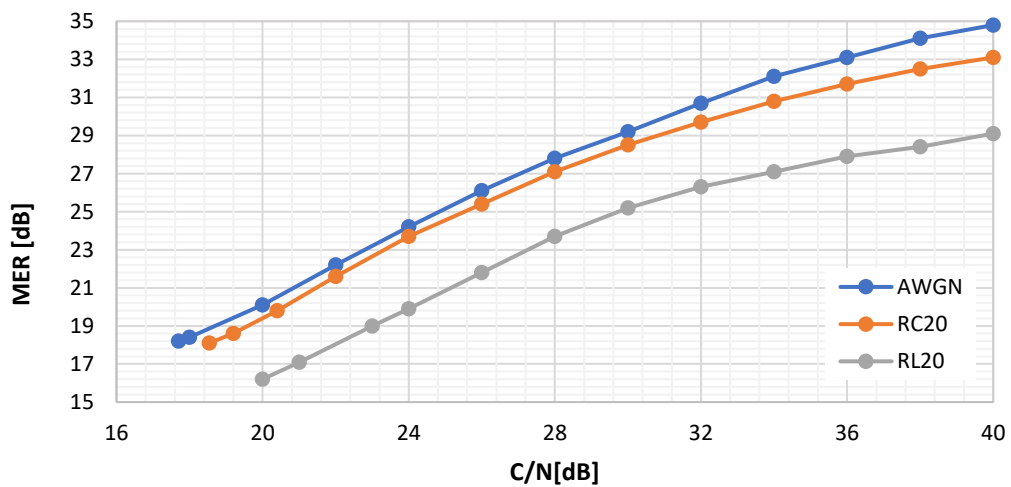
5.1.1 Vyhodnocení měření



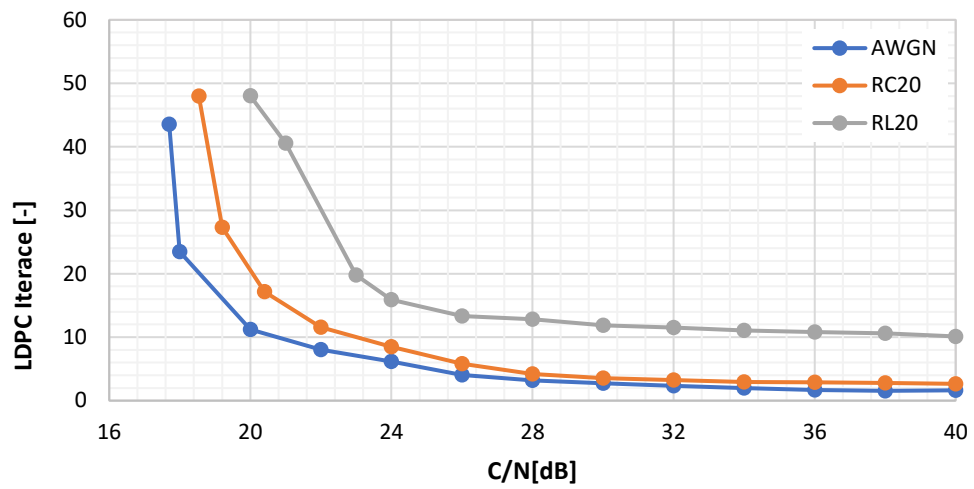
Obr. 18 Měření $BER_1 = f(C/N)$ pro první scénář



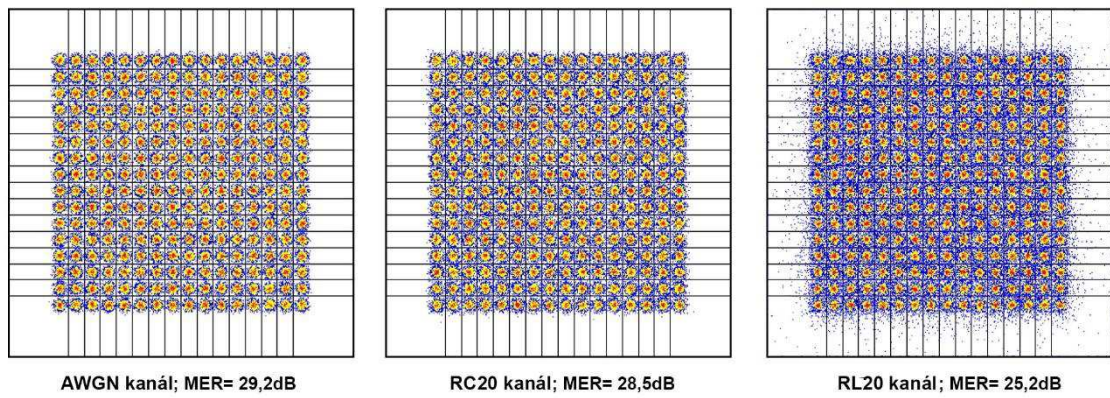
Obr. 19 Měření $BER_2 = f(C/N)$ pro první scénář



Obr. 20 Měření $MER = f(C/N)$ pro první scénář



Obr. 21 Měření Počet iterací = $f(C/N)$ pro první scénář



Obr. 22 Konstelační diagramy 256QAM pro první scénář při $C/N = 30$ dB

Tab. 15 Porovnání naměřených a teoretických hodnot pro první scénář

Model přenosového kanálu	C/N [dB]		
	AWGN	RC20	RL20
ITU-R BT.2254-1	17,8	18,1	20,1
ETL TV Analyzátor	18	19	22,8
STB 1 - Thomson	18	19	22
STB 2 - Emos	19	22	22
STB 3 - Icecrypt	19	22	22

Při porovnání hodnot bitových chybovostí BER před a po LDPC dekódování, které jsou podmíněny poměrem C/N , je z grafických závislostí $BER_1 = f(C/N)$ a $BER_2 = f(C/N)$ (viz Obr. 18 a Obr. 19) patrné, že nejlepší výsledky byly dosaženy v případě využití kanálu AWGN. Důvodem je to, že kanál AWGN předpokládá pouze přímou cestu mezi TX a RX, což se jeví jako nejvhodnější podmínky pro přenos TV signálu. Hodnota C/N pro tzv. QEF příjem ($BER_2 \leq 1 \times 10^{-7}$) pro kanál AWGN je zajištěna již při $C/N \geq 18$ dB. V případě kanálového modelu RC20, který kromě přímé cesty mezi vysílačem a přijímačem předpokládá i odrazy od různých objektů, je nutné pro dosažení menších BER hodnot zvýšit hodnoty C/N . Pro dosažení QEF příjmu pro kanál RC20 je $C/N \geq 19$ dB. Z toho vyplývá, že negativní vlivy způsobené odrazy jsou částečně kompenzovány právě přímou cestou mezi TX a RX. Nejnáročnější podmínky pro přenos TV signálu představuje kanálový model RL20. To proto, že kanál modeluje případ takového přenosového scénáře, kdy mezi TX a RX neexistuje přímá viditelnost a na anténu RX se dostanou pouze odražené signály. Podmínky pro QEF příjem byly tedy splněné při $C/N \geq 22,8$ dB.

Ke stejným závěrům jsme dospěli i při analýze hodnot MER (viz Obr. 20). Ze zobrazených křivek MER je vidět, že kanály AWGN a RC20 emulují velmi podobné podmínky pro přenos a naměřené hodnoty MER se odlišují až při vyšším nastavovaném poměru C/N . Avšak právě v kanále RL20 jsou nejnáročnější podmínky pro vysílání a příjem TV signálu.

Křivky počtu LDPC iterací versus C/N (viz Obr. 21) zachycují počet nutných LDPC iterací dekódování pro jeden FEC rámec při uvažování různých kanálových modelů. Z výsledku vyplývá, že signál s nižším C/N potřebuje více aplikovat LDPC dekódování pro opravu chyb v daném FEC rámci. Výsledky opět reflektují, že

přenosové prostředí s vlastnostmi RL20 klade nejvyšší nároky na vlastnosti RX. Znova jsou závislosti u přenosových kanálů AWGN a RC20, které využívají i přímou cestu mezi TX a RX, velmi podobné a připomínají exponenciální průběh. Naopak závislost pro RL20 kanál vykazuje zvýšené počty nutných LDPC iterací již při vysokých hodnotách C/N . Navíc analyzátor dovoval naměřit data jen do $C/N = 26$ dB.

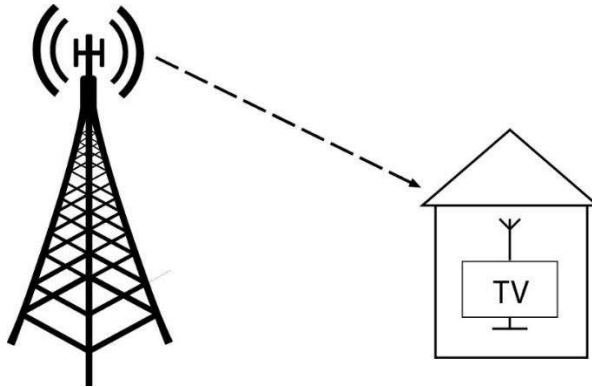
Vlivy přenosových kanálů na konstelační diagram (256QAM) a na tvary RF spektra TV signálu pro $C/N = 30$ dB jsou pro jednotlivé modely přenosových kanálů zachyceny na Obr. 22, Obr. 23, Obr. 24 a Obr. 25.

V Tab. 15 jsou uvedeny teoretické hodnoty pro QEF příjem podle dokumentace ITU-R BT.2254-1 [20] a hodnoty naměřené pomocí analyzátoru a také pomocí jednotlivých set-top boxů. Jak je uvedeno, tak se jednotlivé naměřené a teoretické poměry C/N liší o 1 dB s výjimkou modelu RL20. To je nejspíše způsobeno samotným analyzátozem, jelikož ve srovnání s STB se hodnoty liší maximálně o 2 dB. Samotné STB byly schopné dosáhnout QEF příjmu při velice podobném C/N pro všechny modely kanálů. STB1 – Thomson byl však v porovnání s ostatními schopen zpracovat signál i při nižším C/N než další dva STB, u kterých bylo potřeba C/N zvýšit o 1 až 3 dB (viz Tab. 15).

5.2 Druhý scénář

Druhý scénář předpokládá, že prutová anténa pro příjem TV signálu je volně přenositelná a TV přijímač není v pohybu. Jedná se o tzv. fixed indoor příjem. Typické systémové parametry jsou popsány v Tab. 16.

Jako přenosové cesty vysílaného signálu jsou opět využity kanály AWGN, RC20 a RL20.

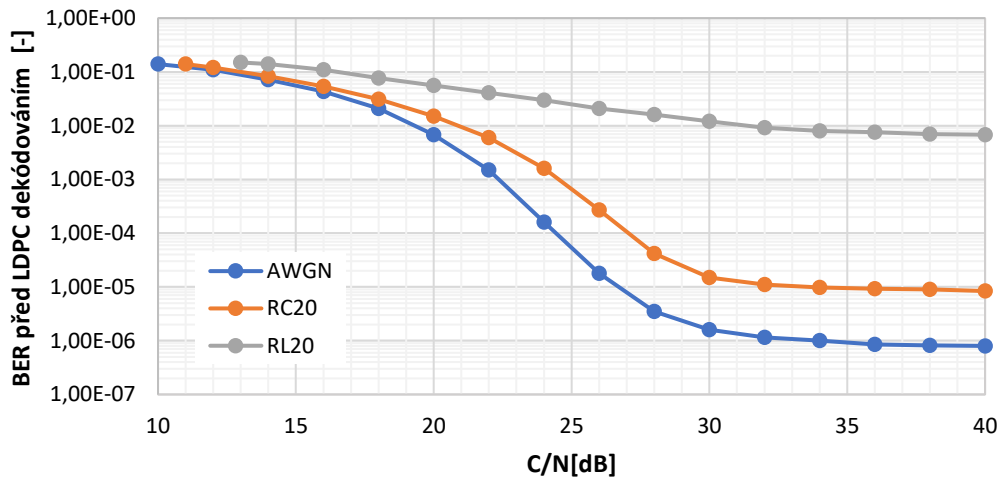


Obr. 26 Ilustrace druhého scénáře

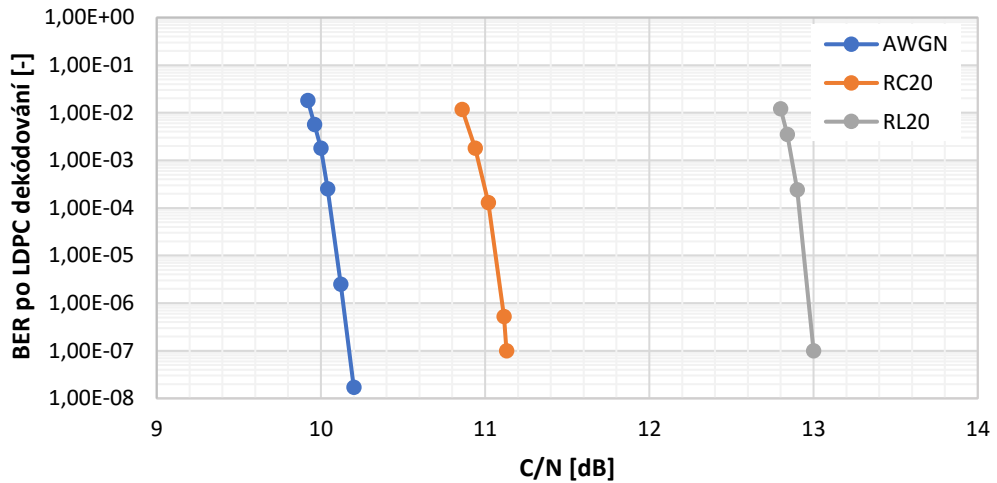
Tab. 16 Systémové parametry – druhý scénář

OFDM mód	16K
Přenosový mód	Extended
Rozptýlené nosné	PP3
GI interval	1/8
Modulace	64QAM
Kódový poměr	1/2
Přenosová rychlost	13,1 Mbit/s

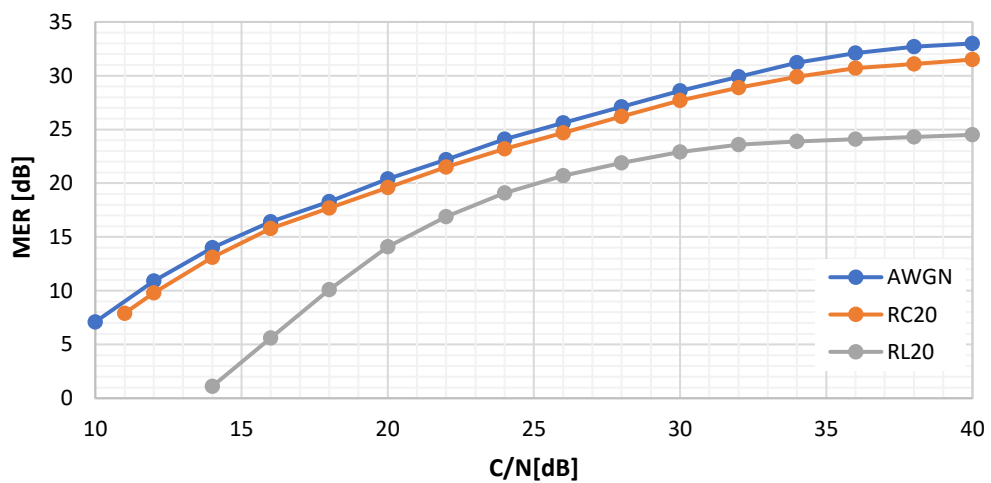
5.2.1 Vyhodnocení měření



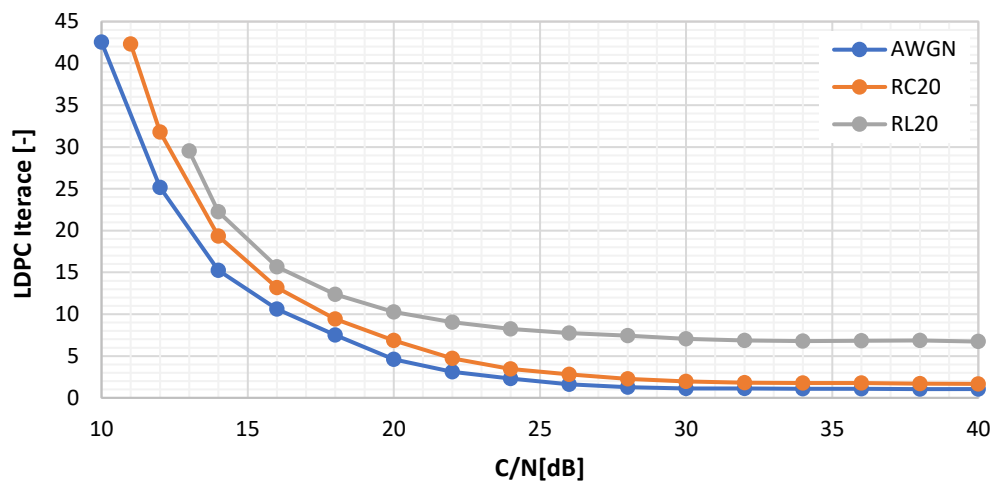
Obr. 27 Měření $BER_1 = f(C/N)$ pro druhý scénář



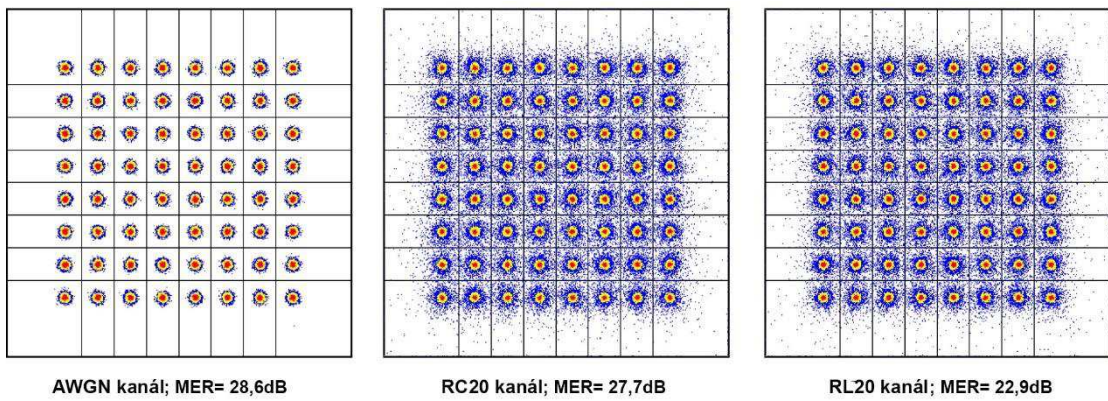
Obr. 28 Měření $BER_2 = f(C/N)$ pro druhý scénář



Obr. 29 Měření $MER = f(C/N)$ pro druhý scénář



Obr. 30 Měření Počet LDPC iterací = $f(C/N)$ pro druhý scénář



Obr. 31 Konstelační diagramy 64QAM pro druhý scénář při $C/N = 30$ dB

Tab. 17 Porovnání naměřených a teoretických hodnot pro druhý scénář

Model přenosového kanálu	C/N [dB]		
	AWGN	RC20	RL20
ITU-R BT.2254	9,9	10,2	11,9
ETL TV Analyzátor	10	11	13
STB 1 - Thomson	10	13	13
STB 2 - Emos	10	11	12
STB 3 - Icecrypt	10	11	13

Při srovnání hodnot BER zaručuje nejlepší podmínky pro přenos TV signálu opět model kanálu AWGN. Hodnota C/N pro QEF příjem je dosažena již při $C/N \geq 10$ dB. Při použití kanálového modelu RC20 musíme pro QEF příjem zvýšit hodnoty C/N a to o 1 dB. V případě užití kanálového modelu RL20 je dosaženo QEF příjmu při $C/N \geq 13$ dB. Podle teoretických předpokladů z literatury [20] se naměřené hodnoty C/N pro QEF příjem liší maximálně o 1 dB.

Následně i ze závislosti MER (viz Obr. 29) můžeme konstatovat, že kanály AWGN a RC20 emulují tytéž podmínky pro přenos, jelikož se hodnoty MER liší maximálně o 1 dB. Tento rozdíl může být způsoben nepřímými cestami kanálového modelu RC20, avšak přímá cesta mezi TX a RX odrazy dostatečně kompenzuje, křivky pro AWGN a RC20 jsou téměř shodné. Na rozdíl od nich se pro kanál RL20 značně snížila dosažená chybovost MER.

Podobně se projeví i LDPC iterace závislé na C/N (Obr. 30). Pro kanály, které využívají přímou cestu mezi TX a RX, jsou téměř shodné. Kanál RL20 však vyžaduje větší počet iterací již při vyšší hodnotě C/N . Od hodnoty cca $C/N \leq 20$ dB exponenciálně roste počet iterací pro všechny modely přenosových kanálů.

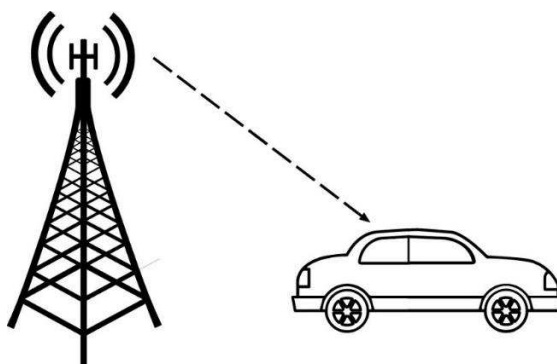
Vliv přenosových kanálů na konstelační diagram (256QAM) zachycuje Obr. 31. Tvary RF spekter TV signálu pro jednotlivé přenosové kanály při $C/N = 30$ dB jsou zobrazeny na Obr. 32, Obr. 33 a Obr. 34.

V Tab. 17 jsou srovnány teoretické a naměřené hodnoty pro QEF příjem. Jak můžeme vidět, výsledky získané z analyzátoru se od teoretického předpokladu liší maximálně o 1 dB. Při porovnání jednotlivých STB vyplývá, že nejvíce se teoretickým hodnotám přiblížil STB 2 – Emos. Ostatní set-top boxy se však příliš neodlišují, proto jsou pro tento scénář vhodné všechny použité STB.

5.3 Třetí scénář

Následující scénář popisuje situaci, kdy TV signál je přijímán pomocí mobilního zařízení. Proto se uvažuje vysílání TV signálu právě ve standardu DVB-T2-Lite, při němž je použit výhradně krátký FEC rámeček. Díky flexibilitě standardu DVB-T2 pro oddělenou modulaci a kódové rychlosti lze využít multiplexu pro různé vysílání. Konkrétně pro mobilní TV přenos na jedné straně a přenos HDTV na straně druhé [20]. Nejprve tedy budeme předpokládat scénář s menší přenosovou rychlostí pro mobilní příjem. Systémové parametry jsou pospány v Tab. 18.

Přenosová cesta mezi vysílačem a přijímačem je popsána dvěma modely přenosových kanálů. Prvním je RA6, který představuje situaci, kdy se přijímač pohybuje rychlostí cca 100 km/h. Druhý přenosový kanál, TU6, předpokládá rychlost přijímače 50 km/h. Pro referenční měření byl použit model přenosového kanálu AWGN.

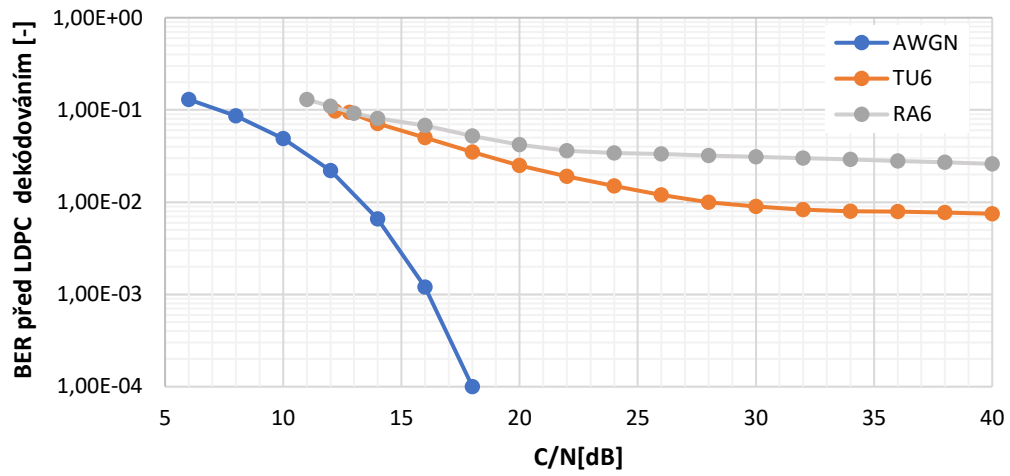


Obr. 35 Ilustrace třetího scénáře

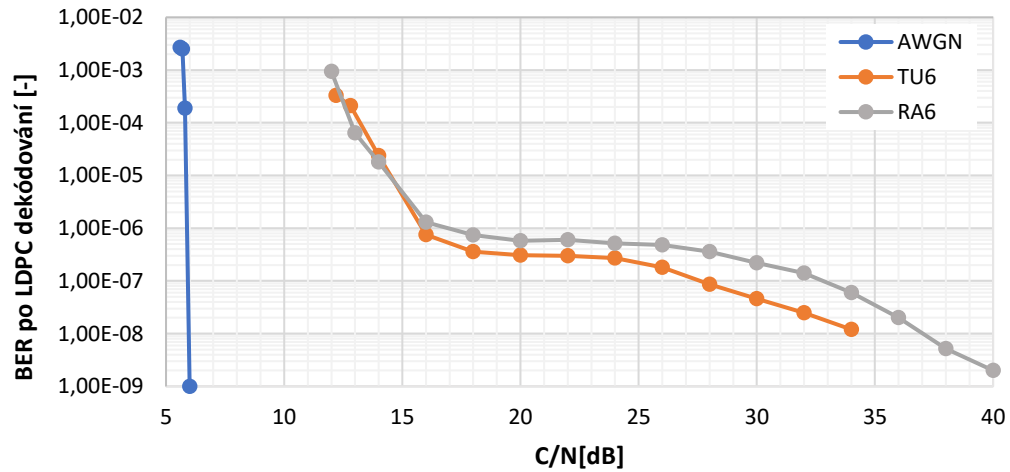
Tab. 18 Systémové parametry – třetí scénář

OFDM mód	8K
Přenosový mód	Extended
Rozptýlené nosné	PP1
GI interval	$\frac{1}{4}$
Modulace	16QAM
Kódový poměr	$\frac{1}{2}$
Přenosová rychlost	11,2 Mbit/s

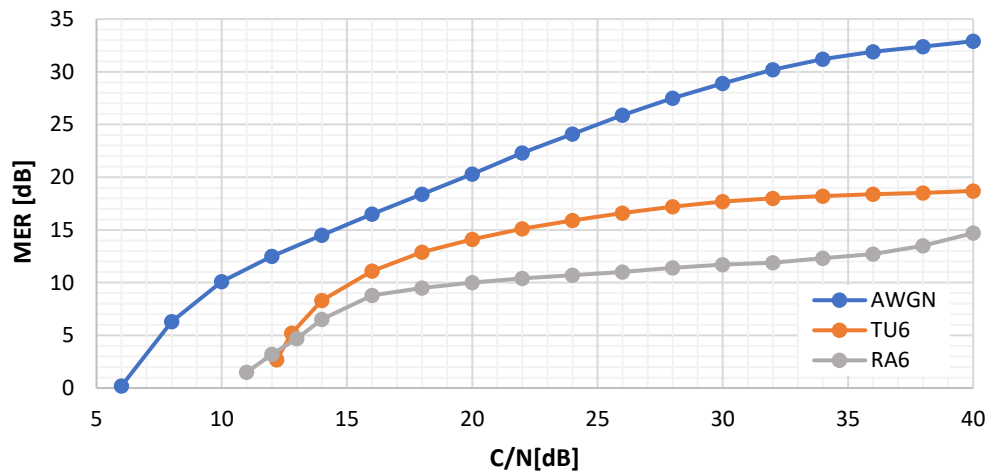
5.3.1 Vyhodnocení měření



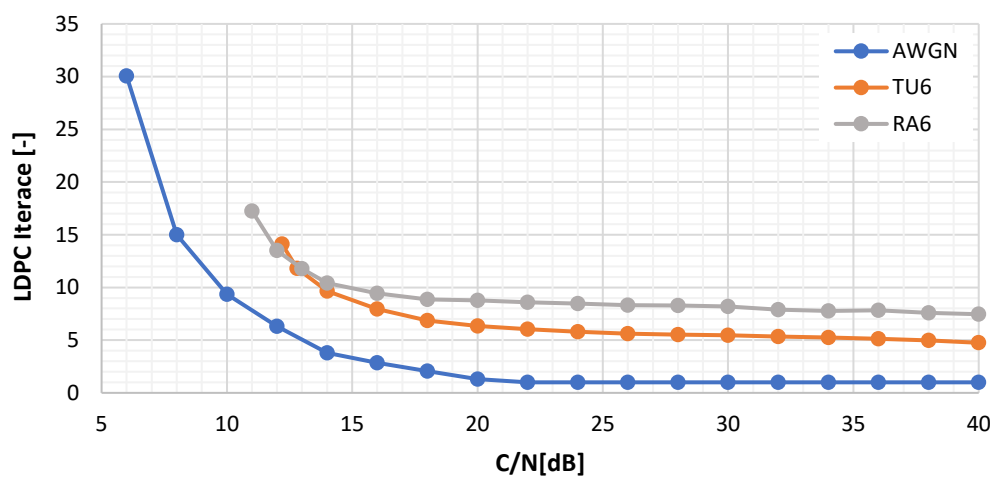
Obr. 36 Měření $BER_1 = f(C/N)$ pro třetí scénář



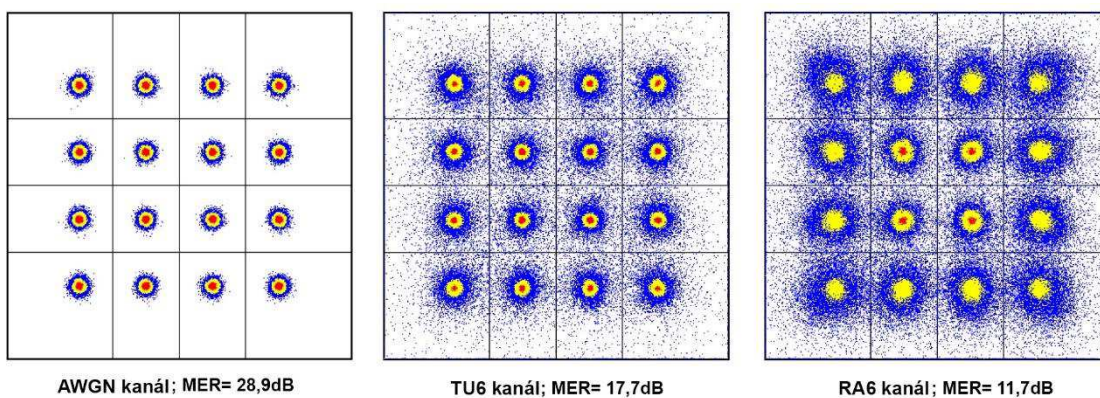
Obr. 37 Měření $BER_2 = f(C/N)$ pro třetí scénář



Obr. 38 Měření $MER = f(C/N)$ pro třetí scénář



Obr. 39 Měření Počet LDPC iterací = $f(C/N)$ pro třetí scénář



Obr. 40 Konstelační diagramy 16QAM pro třetí scénář při $C/N = 30$ dB

Tab. 19 Porovnání naměřených a teoretických hodnot pro třetí scénář

Model přenosového kanálu	C/N [dB]		
	AWGN	TU6	RA6
ITU-R BT.2254	6	NA	NA
ETL TV Analyzátor	6	19	20
STB 1 - Thomson	6	17	-
STB 2 - Emos	5	11	12
STB 3 - Icecrypt	6	17	-

5.3.2 Vyhodnocení měření

Pro měření scénáře pro mobilní příjem, kdy rychlost přijímače vzhledem k vysílači dosahuje vyšších rychlostí, jsme uvažovali přenos TV signálu ve standardu T2-Lite, který je výhradně určen pro tento typ přenosu. Nejspíše jsme nedosáhli dostatečné kvality signálu na TV přijímači, a proto byl obraz značně zdeformován.

Pro referenční měření byl použit model přenosového kanálu AWGN, který opět vykazuje nejlepší přenosové podmínky pro šíření TV signálu. Pro simulaci samotného mobilního příjmu byly použity kanálové modely TU6 a RA6.

Při porovnání naměřených hodnot pomocí ETL TV Analyzátoru, STB a teoretických předpokladů z dokumentace ITU-R BT.2254 [20] se nepodařilo nalézt teoretické hodnoty pro kanály TU6 a RA6 (v Tab. 19 značeno jako NA). Při použití STB1 a STB3 nebylo možné naměřit hodnoty pro QEF příjem (v Tab. 19 značeno jako „-“). Nejspíše je to způsobeno tím, že oba set-top boxy pracují na odlišném principu dekódování přijímaného signálu, a proto nebyly schopné zobrazit přijímanou videosekvenci.

Z naměřených objektivních parametrů, konkrétně BER_1 a BER_2 , a z jejich grafických závislostí (viz Obr. 36 a Obr. 37) je zřejmé, že nejlepší přenosové podmínky pro mobilní příjem poskytuje právě kanál TU6, který simuluje situaci, kdy se vysílač pohybuje vzhledem k přijímači rychlostí 50 km/h. Díky menší rychlosti přijímače je tedy i menší Dopplerův posuv, a ten má následně menší vliv na přenášený TV signál. QEF příjem pro kanál TU6 je zajištěn při $C/N \geq 28$ dB. Při použití kanálového modelu RU6 lze vidět, že hodnoty BER_1 a BER_2 jsou značně vyšší než v předchozím případě. To je způsobeno tím, že tento model přenosového kanálu počítá s rychlostí přijímače až 100 km/h, tedy i Dopplerův posuv má větší

vliv na přenášený TV signál. Poměr C/N pro QEF příjem se tedy značně zvýšil, a to až na $C/N \geq 34$ dB.

Stejný závěr můžeme učinit i z grafických závislostí $MER = f(C/N)$ (viz Obr. 38), kde největší rozdíl hodnot MER je až 6 dB. Z křivek počtu LDPC iterací versus C/N (viz Obr. 39) je patrné, že LDPC dekódováním se přijímač snaží chyby opravit již při nižších hodnotách C/N , a počet iterací tak stále roste. Výsledky opět reflektují, že nejnáročnější podmínky na přenos signálu emuluje tentokrát model RA6.

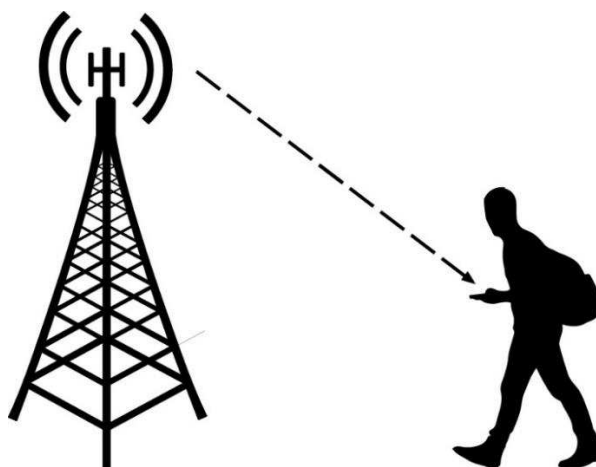
Vliv přenosových kanálů na konstelační diagram (16QAM) zachycuje Obr. 40. Tvary RF spekter TV signálu pro jednotlivé přenosové kanály při $C/N = 30$ dB jsou zobrazeny na Obr. 41, Obr. 42 a Obr. 43.

V Tab. 19 jsou uvedeny naměřené a teoretické hodnoty C/N pro QEF příjem. Teoretické hodnoty v [20] jsou však uvedeny pouze pro referenční kanál AWGN. Naměřené hodnoty pomocí všech přístrojů odpovídají teoretickému předpokladu pro tento model přenosového kanálu. Při použití modelu RA6 nebyly STB1 – Thomson a STB3 – Icecrypt schopné dekódovat přijímaný TV signál a kvalita obrazu byla značně pod úroveň QEF příjmu, proto zde nejsou naměřené poměry C/N . Na TV přijímači byl pozorovaný obraz značně zdeformovaný a následně došlo k výpadku TV signálu. Naopak STB2 – Emos byl schopen zobrazit přijímaný signál i při daleko nižším C/N . Nejspíše je to způsobeno tím, že je oproti ostatním STB schopný lépe dekódovat přijímaný signál. Proto lze konstatovat, že pro mobilní příjem je tento STB2 – Emos nejvhodnější.

5.4 Čtvrtý scénář

Čtvrtý scénář navazuje na scénář předchozí, nyní budeme předpokládat vyšší datový tok. Opět se uvažuje vysílání TV signálu právě ve standardu DVB-T2-Lite. Jsme však omezeni volbou OFDM módu, GI intervalem a vzorem rozptýlených nosných. Tyto systémové parametry jsou společné pro oba režimy a musí se vhodně nastavit tak, aby byly kompromisem pro oba typy vysílání, tj. pro vysílání s malou přenosovou rychlostí i pro vysílání s velkou přenosovou rychlostí. Zbylé systémové parametry nastavíme následovně: modulace 64QAM a kódový poměr 2/3 [20].

Mezi vysílačem a přijímačem bude přenosová cesta popsána opět dvěma modely přenosových kanálů. První bude kanál PI12, který představuje vysílání signálu uvnitř budov, druhý pak PO12, jenž předpokládá vysílání pro venkovní použití v zastavěné oblasti. Pro referenční měření byl opět použit model přenosového kanálu AWGN.

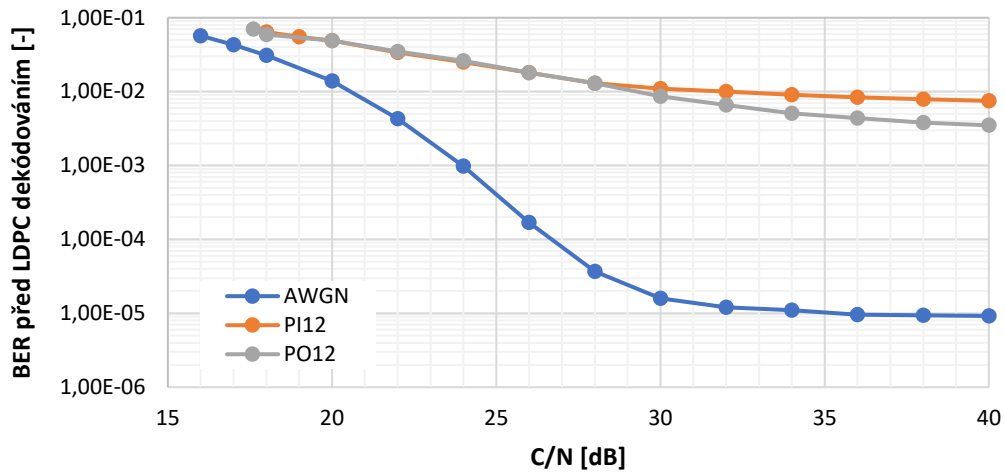


Obr. 44 Ilustrace pro čtvrtý scénář

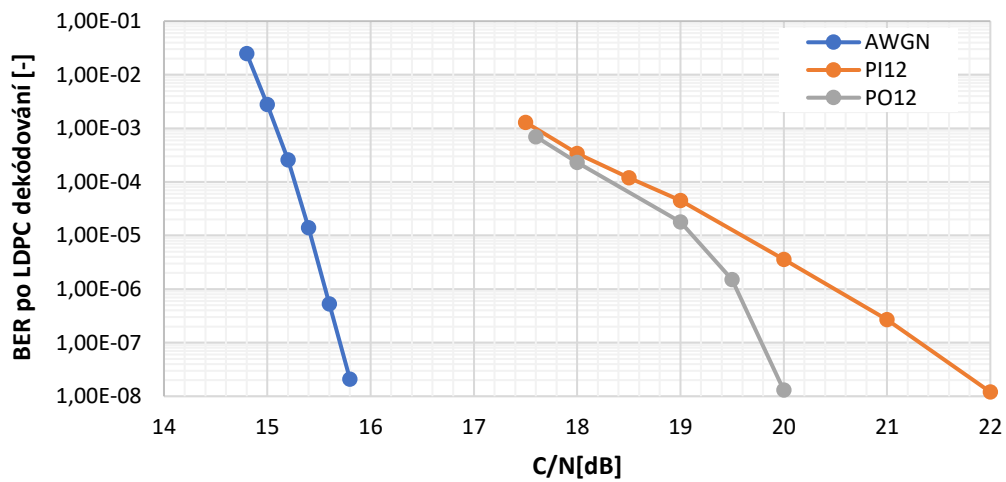
Tab. 20 Systémové parametry – čtvrtý scénář

OFDM mód	8K
Přenosový mód	Extended
Rozptýlené nosné	PP1
GI interval	$\frac{1}{4}$
Modulace	64QAM
Kódový poměr	2/3
Přenosová rychlost	22,4 Mbit/s

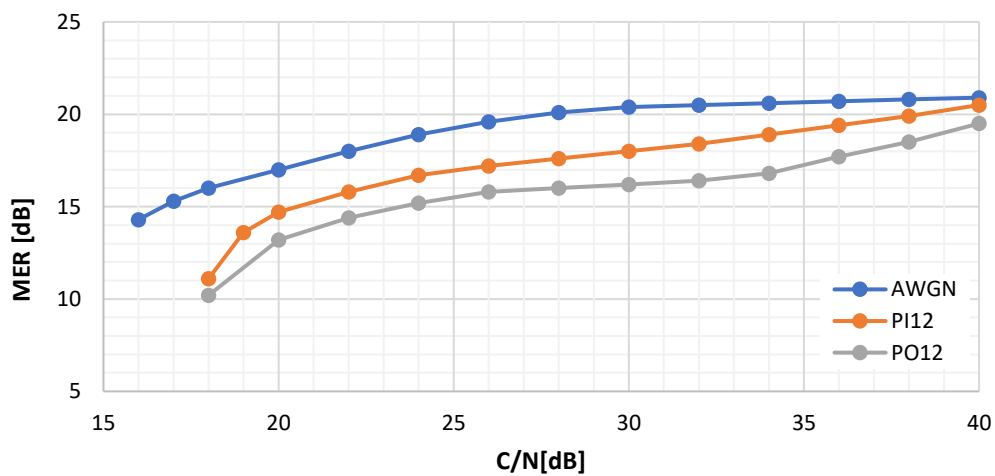
5.4.1 Vyhodnocení měření



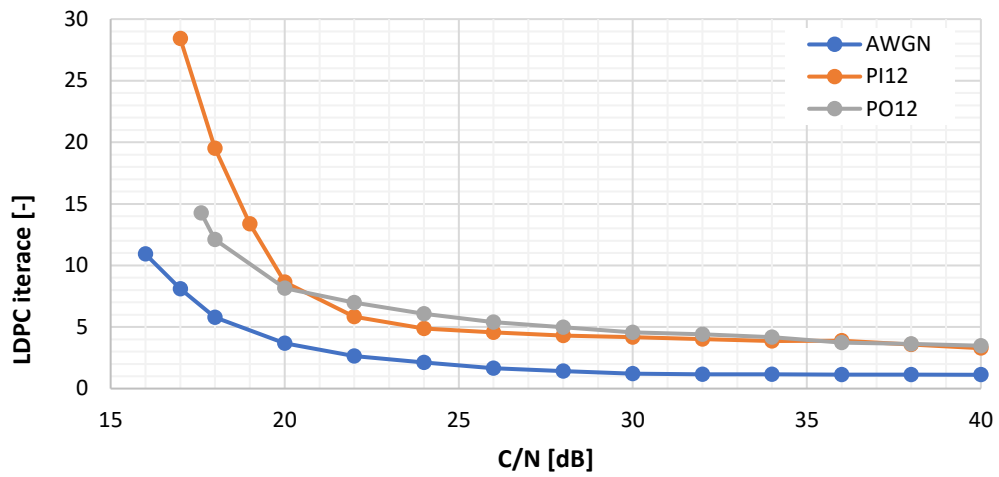
Obr. 45 Měření $BER_1 = f(C/N)$ pro čtvrtý scénář



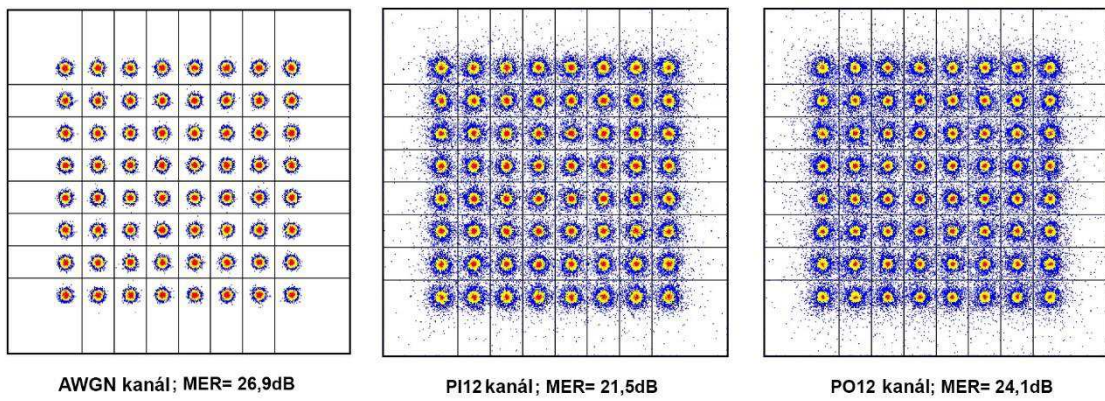
Obr. 46 Měření $BER_2 = f(C/N)$ pro čtvrtý scénář



Obr. 47 Měření $MER = f(C/N)$ pro čtvrtý scénář



Obr. 48 Měření Počet iterací LDPC = $f(C/N)$ pro čtvrtý scénář



Obr. 49 Konstelační diagramy 64QAM pro čtvrtý scénář při $C/N = 30$ dB

Tab. 21 Porovnání naměřených a teoretických hodnot pro čtvrtý scénář

Model přenosového kanálu	C/N [dB]		
	AWGN	PO12	PI12
ITU-R BT.2254	13,5	NA	NA
ETL TV Analyzátor	15,6	19,5	21,3
STB 1 - Thomson	14	21	20
STB 2 - Emos	13	19	18
STB 3 - Icecrypt	14	20	17

5.4.2 Vyhodnocení měření

Čtvrtý scénář navazuje na scénář předchozí. Tentokrát předpokládáme přenosný příjem TV signálu, kdy se přijímač pohybuje rychlostí 3 km/h. Pro referenční měření byl použit model přenosového kanálu AWGN, který opět vykazuje nejlepší přenosové podmínky pro šíření TV signálu. Pro měření samotného scénáře byly využity dva modely přenosových kanálů, jeden pro venkovní přenos a druhý pro přenos uvnitř budov. Z výsledných grafických závislostí BER_1 a BER_2 (viz Obr. 45 a Obr. 46) je patrné, že přenosové kanály emulují velice podobné podmínky pro přenos, jelikož naměřené hodnoty se od sebe moc neodlišují. Pro kanál PO12 můžeme vyhodnotit QEF příjem při $C/N \geq 19,5$ dB. V případě kanálového modelu PI12 je QEF příjem dosažen při $C/N \geq 21,3$ dB. Hodnota C/N se zvýšila o 1,8 dB. Můžeme tedy říci, že kanál pro venkovní příjem emuluje lepší přenosové podmínky, a to díky tomu, že ve venkovním prostředí nedochází k tolika odrazům od zdí a dalších překážek jako uvnitř budov.

Velmi podobné výsledky jsou patrné i z grafických závislostí MER (viz Obr. 47), na nichž je vidět, že model přenosového kanálu PO12 dosahuje při vyšším poměru C/N značně vyšších hodnot MER. Grafická závislost počet iterací LDPC = $f(C/N)$ (viz Obr. 48) opět ukazuje, že modely přenosových kanálů jsou si velice podobné a vyšší počty iterací se v obou případech zvyšovaly až po snížení hodnot $C/N < 20$ dB.

Vliv přenosových kanálů na konstelační diagram (64QAM) je zachycen na Obr. 49. Tvary RF spekter TV signálu pro jednotlivé přenosové kanály při $C/N = 30$ dB jsou zobrazeny na Obr. 50, Obr. 51 a Obr. 52.

Naměřené a teoretické hodnoty C/N pro QEF příjem uvedené v Tab. 21 se pro kanál AWGN odlišují maximálně o 2 dB. Pro modely kanálů PI12 a PO12 nejsou uvedeny teoretické předpoklady v [20]. Z Tab. 21 je patrné, že mírně lepší hodnoty pro QEF příjem byly dosaženy při použití kanálové modelu PI12. Nejspíše je to způsobeno tím, že STB jsou navrženy právě pro vnitřní použití, a byly tedy schopné lépe dekodovat přijímaný signál než při použití kanálového modelu PO12.

Při porovnání jednotlivých STB a analyzátoru jsou si naměřené poměry C/N velmi podobné. Přitom STB2 – Emos opět dosahoval nejlepších výsledků pro příjem TV signálu, avšak hodnoty zbylých STB se lišily maximálně o 2 dB.

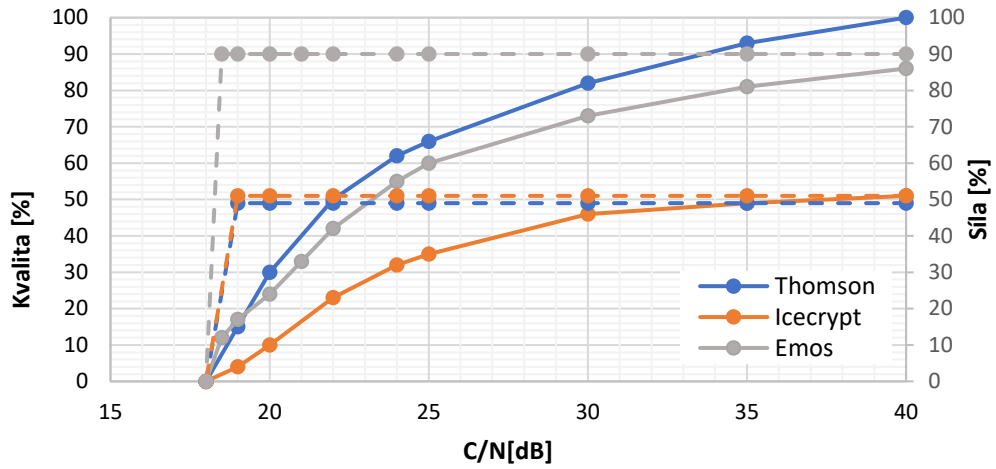
6. VÝSLEDKY MĚŘENÍ POMOCÍ STB

Tato kapitola je zaměřena na proměření přijímaného TV signálu pomocí jednotlivých STB, které byly k dispozici. Pro vyhodnocení měření jsou použity ukazatele kvalita signálu a síla signálu, které ukazují STB.

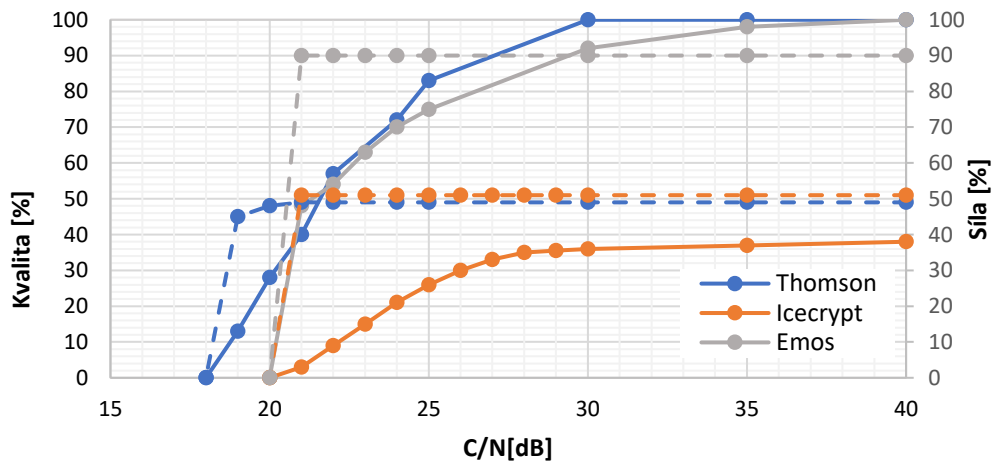
Při měření byly použity tři set-top boxy od různých výrobců – Thomson, Icecrypt a Emos. Měření je zaměřeno na kvalitu a sílu přijímaného signálu a jeho závislost na změně poměru C/N a na měnícím se útlumu, který se zvětšoval pomocí atenuátoru.

Měření bylo provedeno pro první scénář, který reprezentuje příjem signálu ve standardu DVB-T2. Druhé měření bylo pro čtvrtý scénář, který představuje příjem signálu ve standardu DVB-T2-Lite.

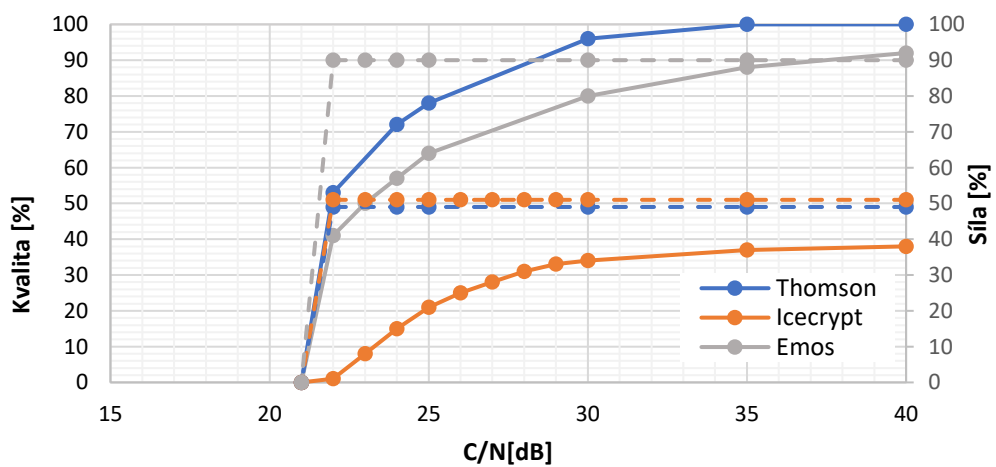
6.1 Měření STB pro první scénář



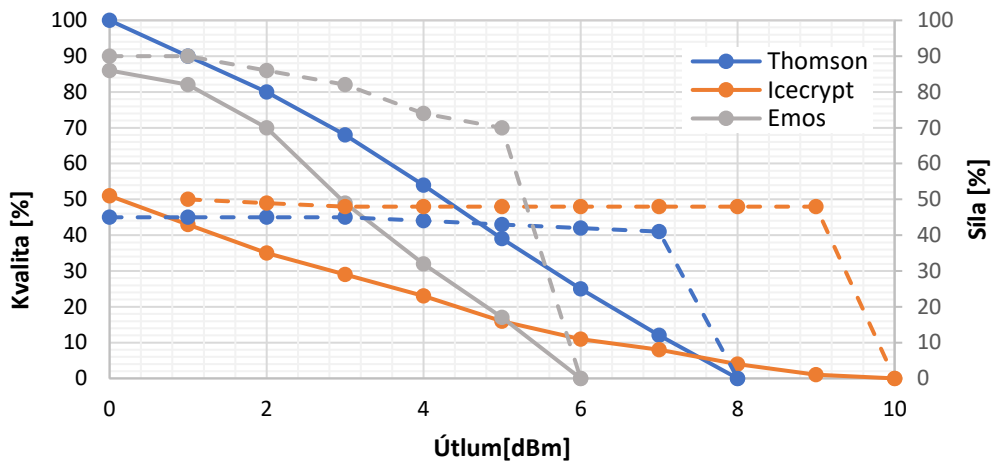
Obr. 53 Měření Kvalita = $f(C/N)$ – plná čára a Síla = $f(C/N)$ – přerušovaná čára; pro AWGN kanál, první scénář



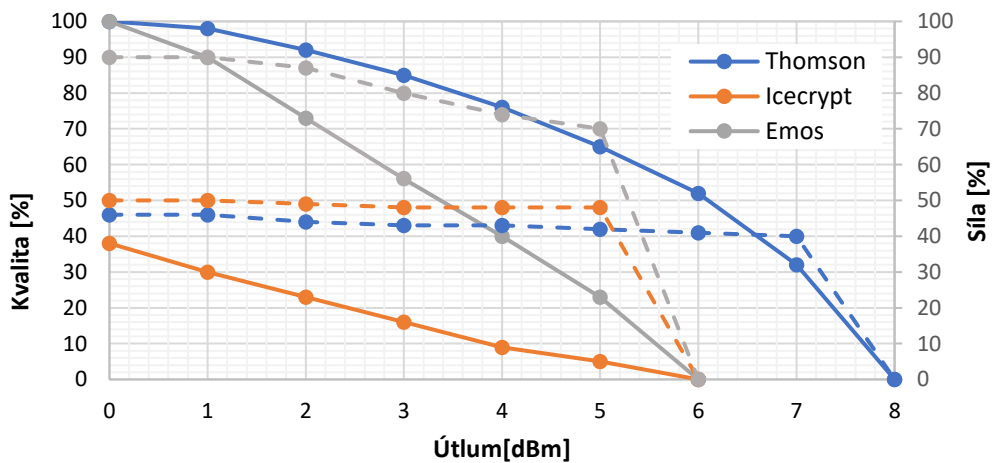
Obr. 54 Měření Kvalita = $f(C/N)$ – plná čára a Síla = $f(C/N)$ – přerušovaná čára; pro RC20 kanál, první scénář



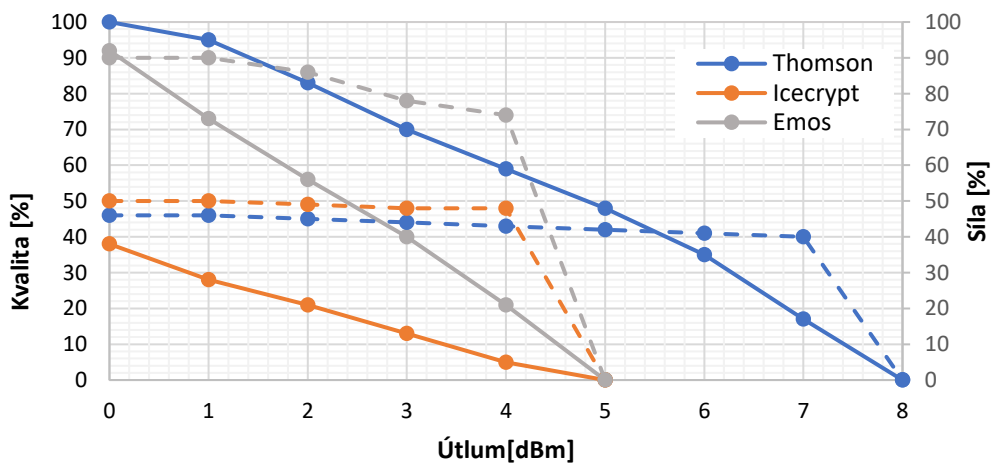
Obr. 55 Měření Kvalita = $f(C/N)$ – plná čára a Síla = $f(C/N)$ – přerušovaná čára; pro RL20 kanál, první scénář



Obr. 56 Měření Kvalita = $f(\text{Útlum})$ – plná čára a Síla = $f(\text{Útlum})$ – přerušovaná čára; pro AWGN kanál, první scénář



Obr. 57 Měření Kvalita = $f(\text{Útlum})$ – plná čára a Síla = $f(\text{Útlum})$ – přerušovaná čára; pro RC20 kanál, první scénář



Obr. 58 Měření Kvalita = $f(\text{Útlum})$ – plná čára a Síla = $f(\text{Útlum})$ – přerušovaná čára; pro RL20 kanál, první scénář

Měřením kvality přijímaného signálu v závislosti na zvětšujícím se poměru C/N se pro AWGN kanál projevil STB1 – Thomson, poté STB3 – Emos a následně STB2 – Icecrypt (viz Obr. 53). Podobné výsledky lze pozorovat i při měření, kdy byly použity kanálové modely RC20 a RL20 (viz Obr. 54, Obr. 55)

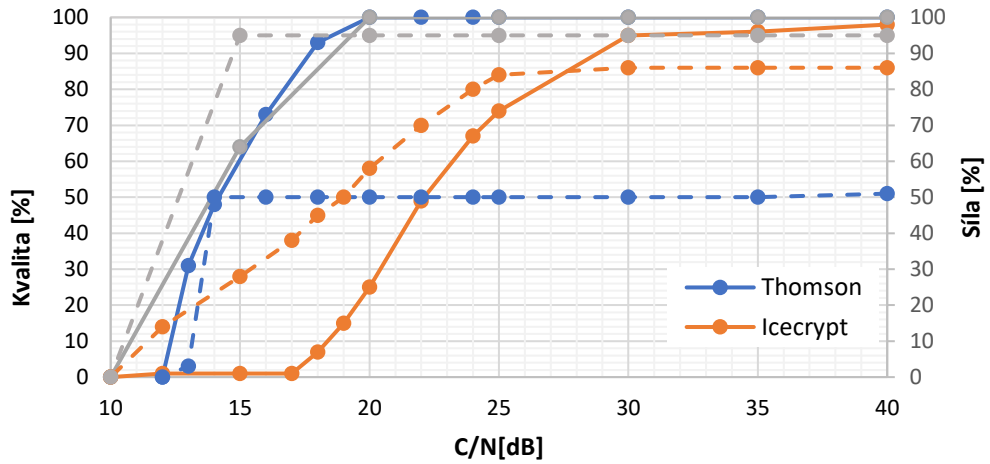
Pro tyto kanály jsou zobrazeny i závislosti síly signálu na měnícím se poměru C/N (viz Obr. 53, Obr. 54 a Obr. 55), kde je možné vidět, že nejvyšší procentuální síly signálu dosahoval STB3 – Emos, a to až 90 %. STB1 – Thomson a STB2 – Icecrypt dosahovaly hodnoty síly signálu značně menší, a to 50 %. Lze pozorovat, že síla signálu je konstantní až do chvíle, než signál úplně vypadne.

Při měření kvality TV signálu, která se měnila se zvětšujícím se útlumem, dosahoval nejlepších výsledků opět STB1 – Thomson, a to při použití všech přenosových kanálů (viz Obr. 56, Obr. 57 a Obr. 58). STB3 – Emos vykazoval také značnou kvalitu signálu, ale jeho citlivost na zvětšující se útlum byla větší než při použití STB1 – Thomson. Nejhorších výsledků měření dosáhl STB2 – Icecrypt. Pro první přenosový kanál sice dovolil nejvyšší hodnoty útlumu, ale při použití přenosových kanálů využívajících nepřímou cestu jeho kvalita signálu značně poklesla. TV příjem vypadl již při podobném útlumu jako u STB2 – Emos.

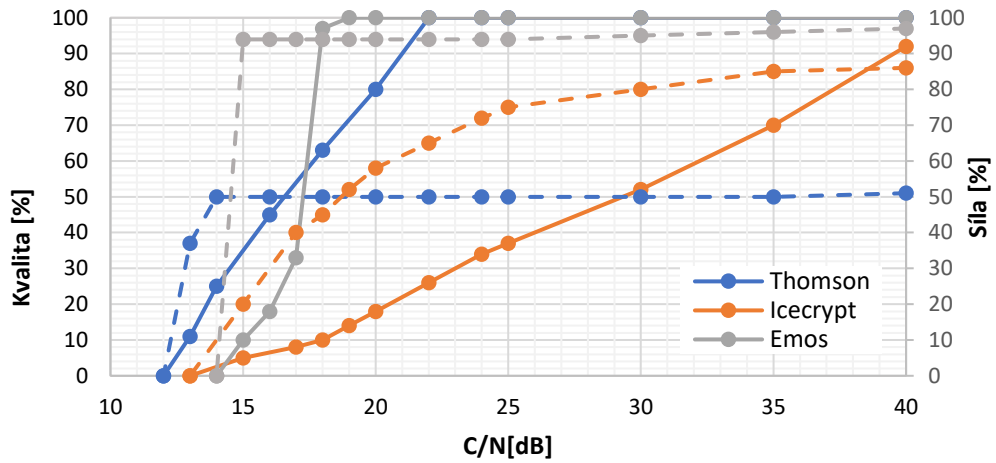
Při pozorování síly signálu závislé na měnícím se útlumu je možné vyhodnotit STB1 – Thomson jako nejlepší, jelikož dosahuje menší hodnoty síly signálu v %, ale přijímaný signál vypadne až při hodnotě útlumu 8 dBm a při použití všech přenosových kanálů. Při použití kanálového modelu AWGN není STB 2 – Icecrypt schopen dekodovat přijímaný signál až při hodnotě útlumu 10 dBm (viz Obr. 56). Avšak při použití dalších kanálů dosáhne síla signálu nulové hodnoty již při útlumu rovném 5-6 dBm. Podobných výsledků je dosaženo i při použití STB3 – Emos.

Celkově se při tomto přenosovém scénáři choval nejlépe STB1 – Thomson, který je jednak schopen vyšší kvality přijímaného signálu i při nižší hodnotě C/N a jednak umožňuje zachovat vyšší kvalitu a sílu signálu i při vyšším vloženém útlumu.

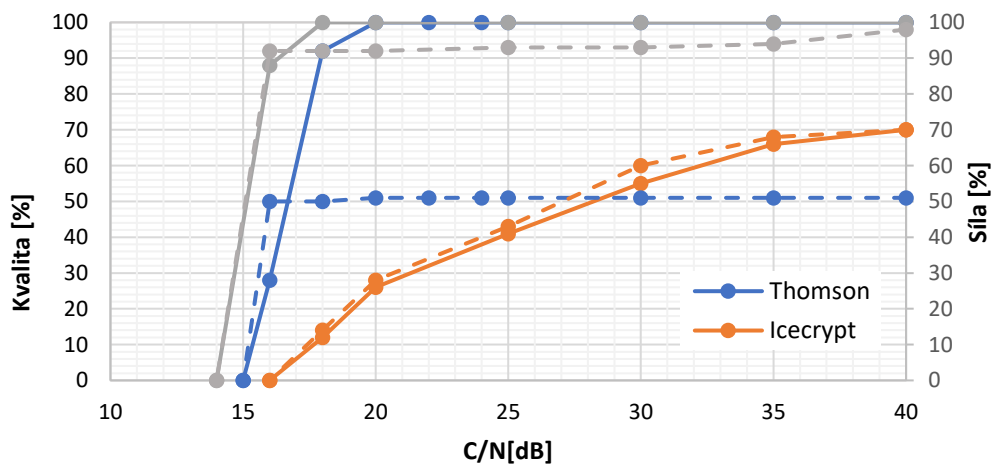
6.2 Měření STB pro čtvrtý scénář



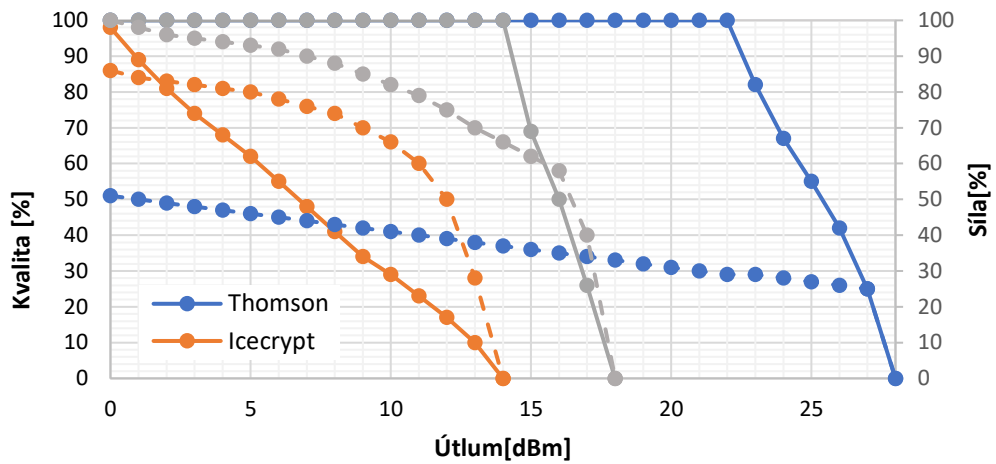
Obr. 59 Měření Kvalita = $f(C/N)$ – plná čára a Síla = $f(C/N)$ – přerušovaná čára; pro AWGN kanál, čtvrtý scénář



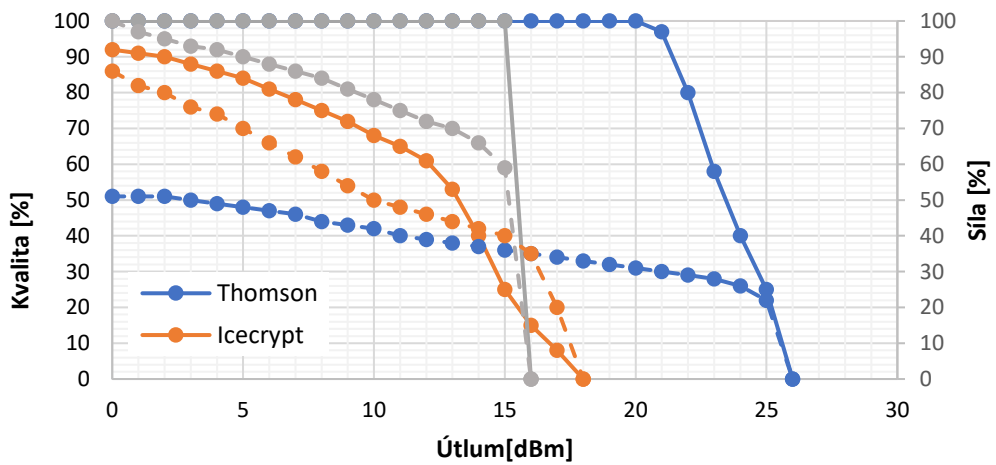
Obr. 60 Měření Kvalita = $f(C/N)$ – plná čára a Síla = $f(C/N)$ – přerušovaná čára; pro PI12 kanál, čtvrtý scénář



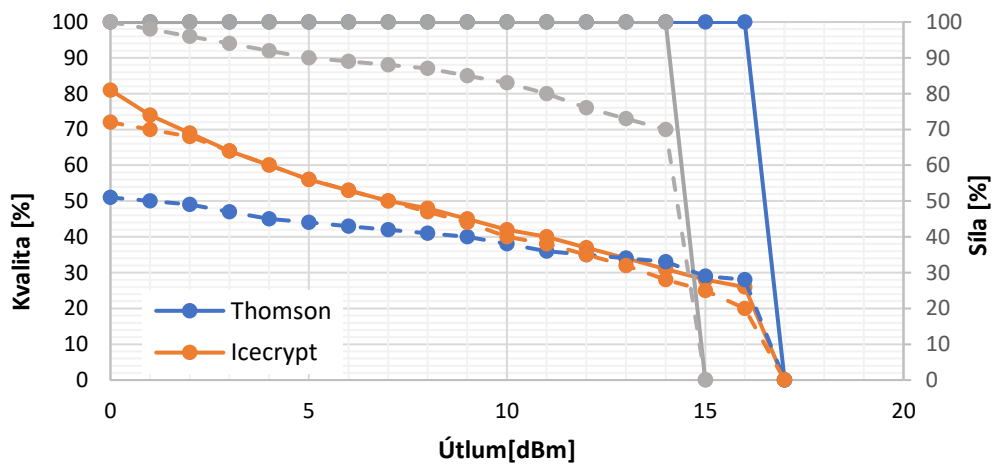
Obr. 61 Měření Kvalita = $f(C/N)$ – plná čára a Síla = $f(C/N)$ – přerušovaná čára; pro PO12 kanál, čtvrtý scénář



Obr. 62 Měření Kvalita = $f(\dot{U}tlum)$ – plná čára a Síla = $f(C/N)$ – přerušovaná čára; pro AWGN kanál, čtvrtý scénář



Obr. 63 Měření Kvalita = $f(\dot{U}tlum)$ – plná čára a Síla = $f(C/N)$ – přerušovaná čára; pro P112 kanál, čtvrtý scénář



Obr. 64 Měření Kvalita = $f(\dot{U}tlum)$ – plná čára a Síla = $f(C/N)$ – přerušovaná čára; pro PO12 kanál, čtvrtý scénář

Z grafických závislostí kvality signálu na zvětšujícím se C/N (viz Obr. 59, Obr. 60 a Obr. 61) je patrné, že se opět nejlépe projevil STB1 – Thomson, který přijímá a zobrazuje signál se 100% kvalitou až do hodnoty $C/N = 20$ dB. Teprve poté kvalita signálu značně klesá. Stejně se chová i STB3 – Emos, který je také schopen dosahovat vysoké kvality signálu i při menších C/N . Naopak STB2 – Icecrypt již od vysokého poměru C/N vykazuje nižší kvalitu, a ta se neustále snižuje. Výsledky závislostí se velice podobají pro všechny kanálové modely (AWGN, PI12 a PO12).

Pro všechny modely přenosových kanálů jsou uvedeny závislosti síly signálu na proměnném C/N (viz Obr. 59, Obr. 60 a Obr. 61). Je patrné, že největší sílu signálu zajistí STB3 – Emos. Dále STB1 – Thomson, jenž je schopen udržet sílu signálu konstantní až do hodnoty C/N , při které dojde k výpadku signálu. STB2 – Icecrypt dosahoval vyšší síly signálu, která značně klesala se snižujícím se C/N .

Při měření kvality TV signálu, která se měnila v závislosti na měnícím se útlumu, dosahoval opět nejlepších výsledků STB1 – Thomson, jehož závislost pro všechny použité modely přenosové kanály je velice podobná. Do $C/N = 20$ dB je tento set-top box schopen zpracovat TV signál ve 100% kvalitě, až po této hranici kvalita signálu rychle klesá. STB3 – Emos se chová velice podobně, ale kvalita signálu rapidně klesá již při $C/N \geq 10$ dB. Nejhůře je na to ovšem STB2 – Icecrypt, který je schopen dosáhnout velké kvality signálu, ale jen při malém útlumu. Pak se se zvětšujícím útlumem kvalita značně snižuje. Při použití kanálu RC20 je dosažená kvalita signálu nejnižší z těchto tří použitých kanálových modelů.

Při porovnání síly signálu, která se měnila s měnícím se útlumem, lze konstatovat, že nejlepších výsledků dosahoval STB1 – Thomson, a to při použití všech tří kanálových modelů. STB2 – Icecrypt a STB3 – Emos již nedosahovaly tak vysoké síly signálu, ale dokázaly odolat většímu útlumu. Při použití kanálového modelu PI12 (viz Obr. 64) dokázaly všechny tři STB zobrazit signál s dostatečnou silou při velkém útlumu cca 15 dBm. To je dáno tím, že STB jsou vyráběny a navrženy právě pro vnitřní použití.

7. ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo detailně popsat a prostudovat standardy pro digitální televizní vysílání DVB-T2 a DVB-T2-Lite a navrhnout vhodné laboratorní pracoviště pro měření vysílání a příjmu při použití těchto dvou standardů. Dále bylo nutné provést detailní měření, analýzu a vyhodnocení vlivu systémových parametrů na tyto systémy. V neposlední řadě bylo cílem navrhnout laboratorní úlohu pro měření vlastností systémů DVB-T2/T2-Lite a připravit vzorové vypracování navržené úlohy.

Úvodní kapitoly bakalářské práce jsou věnovány podrobnému teoretickému popisu standardu pro digitální pozemní vysílání druhé generace DVB-T2. Pozornost byla zaměřena na popis kompletního vysílacího řetězce DVB-T2. Následně byl popsán i standard DVB-T2-Lite. Základní vlastnosti a odlišnosti obou standardů byly porovnány. Dále byly prostudovány a popsány jednotlivé modely přenosových kanálů.

Bylo navrženo měřicí pracoviště, které slouží pro měření digitálního TV vysílání DVB-T2/T2-Lite. Byly popsány všechny měřicí přístroje na pracovišti a následně i jednotlivé objektivní parametry, které se používají k vyhodnocení kvality TV signálu. Pro důkladné měření byly zvoleny čtyři scénáře. Ty představují některé situace, při kterých probíhá vysílání TV signálu. Dva scénáře se zabývají statickým příjmem v klasickém standardu DVB-T2, další dva jsou zaměřeny na přenosný a mobilní příjem právě ve standardu T2-Lite. Všechna laboratorní měření byla provedena v Laboratoři digitální televizní a rozhlasové techniky na Ústavu radioelektroniky.

Jednotlivé scénáře jsou vždy v úvodu krátce popsány. Je uvedena stručná definice celé situace, kterou daný scénář představuje, jaké systémové parametry byly nastaveny a také jaké modely přenosových kanálů byly při měření použity. Následují grafické závislosti naměřených hodnot bitových chybovostí před a po LDPC dekódování na poměrové hodnotě C/N . Obdobně jsou zpracovány také grafy závislosti MER a počtu LDPC iterací na poměru C/N . Součástí jednotlivých měření jsou konstelační diagramy a RF spektra pro použité přenosové kanály, které byly vytisknuty při hodnotě $C/N = 30$ dB. Následují grafické závislosti pro jednotlivé kanály, v nichž se srovnává kvalita měření podle ETL analyzátoru s hodnotami naměřenými z výstupu dvou set-top boxů. Tyto závislosti jsou uvedeny pro všechny sledované objektivní parametry.

V neposlední řadě bylo vypracováno také vyhodnocení celého konkrétního scénáře, pro který byly hodnoty naměřeny.

Následuje měření se set-top boxy, při němž byly zvoleny dva scénáře z předchozí kapitoly. K měření byly použity tři STB z Laboratoře digitální televizní a rozhlasové techniky. Bylo otestováno, jaké kvality příjmu TV signálu jsou tyto přístroje schopny dosáhnout v závislosti na zmenšujícím se C/N a zvětšujícím se útlumu. Všechny charakteristiky byly stručně shrnuty a okomentovány.

Do předmětu Digitální televizní a rozhlasové systémy byla navržena laboratorní úloha. Byl vypracován vzorový protokol s podrobným návodem na měření. Oba dokumenty jsou uvedeny v příloze bakalářské práce. Účelem úlohy je seznámit studenty se systémovými parametry, které mají při TV vysílání vliv na samotnou kvalitu příjmu, a také s objektivními parametry, jež slouží k popisu měřeného signálu. Měření se zaměřuje na dvě situace, a to na statický příjem, který využívá signál ve standardu DVB-T2, a přenosný, jenž představuje vysílání signálu ve standardu T2-Lite. Jsou zde použity modely přenosových kanálů AWGN, RC20, RL20, PI12, PO12. Během měření získají studenti základní představu o tvaru spektra vysílaného signálu pro jednotlivé přenosové kanály a o konstelačních diagramech při různých typech modulace.

Část této bakalářské práce byla prezentována na soutěži Student EEICT 2019 [22].

Literatura

- [1] LEGÍŇ, M. *Televizní technika DVB-T*. Praha: BEN – technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-204-3.
- [2] FISHER, W. *Digital Video and Audio Broadcasting Technology*, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008, ISBN 978-3-540-76357-4.
- [3] ŘÍČNÝ, V. *Druhá generace standardu digitální pozemní televize DVB-T2* [online].[cit.2018-12-02]. Dostupné z: <https://www.lupa.cz/clanky/druha-generace-standardu-digitalni-pozemni/>
- [4] ŘÍČNÝ, V. *Jaký kompresní standard použije Česko u budoucího vysílání Ultra HD v DVB-T2?* [online]. [cit. 2018-12-02]. Dostupné z: <https://www.lupa.cz/clanky/jaky-kompresni-standard-pouzije-cesko-u-budouciho-vysilani-ultra-hd-v-dvb-t2/>
- [5] ETSI EN 302 755 V1.1.1. (2009-09) *Digital Video Broadcasting (DVB); Frame structure channel coding and modulation for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2)* September 2009.
- [6] STROUHAL, A. *Simulace RF přenosového kanálu pro DVB-T2*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2011. 70s. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. Ladislav Polák.
- [7] ETSI EN 302 775 V1.2.1. (2010-10) *Digital Video Broadcasting (DVB); Frame structure channel coding and modulation for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2)*
- [8] KRATOCHVÍL, T. *Digitální televizní systémy*. Elektronické texty. Brno: FEKT VUT v Brně, 2007.
- [9] TV Freak. *Zakulisi DVB - teorie a technické informace* [online]. 13.7. 2009 [cit. 2018-10-14]. Dostupné z: <https://www.tvfreak.cz/zakulisi-dvb-teorie-a-technicke-informace/2988-6>

- [10] GOLUBEV, M. *Analýza přenosu mobilního digitálního televizního vysílání DVB-T2 Lite a NGH*, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 105s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.
- [11] ETSI EN 302 755 V1.3.1. (2011-11) *Digital Video Broadcasting (DVB); Frame structure channel coding and modulation for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2)*
- [12] POLÁK, L., KRATOCHVÍL, T., *Performance of the Rotated Constellation in DVB-T2*, Department of Radio Electronics, Brno University of Technology, 2012.
- [13] PEREZ-CALDERÓN, D., ORIA, C., GARCÍA, J., LÓPEZ, P., BAENA, V., LACADENA, I. *Rotated Constellations for DVB-T2*. Sevilla: Electronic Engineering Department, University of Seville, 2010.
- [14] ŠVIRÁK, M.: *Elektrovue.cz: Časoprostorové blokové kódování při rádiovém přenosu ve vnitřním prostředí budov* [online]. [cit. 2018-12-02]. Dostupné z: <http://www.elektrovue.cz/clanky/03022/index.html>
- [15] Wing-TV. *D4- Laboratory Tests Results. Project report*. CELTIC participants in project Wing-TV, 2005.
- [16] POLÁK, L., *Simulace mnohacestného šíření vícecestavových modulací*, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2009.
- [17] ETSI TR 101 290 V1.2.1 (2001-05). *Digital Video Broadcasting (DVB), Measurement guidelines for DVB systems*. Technical Report ETSI, 2001.
- [18] POLÁK, L., KRATOCHVÍL, T. *Simulation and Measurement of the Transmission Distortions of the Digital Television DVB-T/H, Part 3: Transmission in Fading Channels*. Brno: Brno University of Technology, 2010.
- [19] KŘÍŽ, David. *Na jaké parametry si musíte dát pozor při příjmu digitálního televizního signálu* [online]. 25. 1. 2010 [cit. 2018-12-09]. Dostupné z: <https://www.lupa.cz/clanky/na-jake-parametry-si-musite-dat-pozor-u-dvb-t/>
- [20] ITU-R, *Frequency and network planning aspects of DVB-T2*, Report ITU-R BT.2254-11 2013.

- [21] DIGITÁLNÍ TELEVIZE, *DVB-T2 Set-Top-Box* [online]. Dostupné z: <https://www.digitalnitelevice.cz/informace/dvb-t/set-top-box.html>
- [22] KREJČÍŘ, D. *Laboratory workplace for measurig performances of DVB-T2 /T2-Lite systems*, Student EEICT 2019. str. 93-96.

Seznam příloh

Příloha 1 – Vzorový protokol	63
Příloha 2 – Vypracovaný protokol.....	69
Příloha 3 – Naměřené hodnoty jsou uloženy na přiloženém CD	

Příloha 1 - Vzorový protokol

Digitální televizní a rozhlasové systémy (MDTV, LDTV)

Laboratorní úloha č. X

MĚŘENÍ VLASTNOSTÍ DVB-T2/T2-LITE

Účelem úlohy je seznámit se s obsluhou měřicího přijímače R&S ETL TV Analyzer a vyzkoušet si měření parametrů signálu při příjmu vysílání DVB-T2 a DVB-T2-Lite. Během měření získají studenti základní představu o systémových parametrech a jejich vlivu na vysílaný signál měřené objektivními parametry, tj. chybovost BER před opravou chyb LDPC dekódováním, chybovost po opravě LDPC dekódováním, počet LDPC iterací, modulační chybovosti MER. Studenti také zjistí, jaké informace je díky těmto údajům možné získat o přijímaném signálu a jak je lze ovlivnit. Měření bude provedeno pro dva scénáře, které představují reálné situace, při nichž dochází k příjmu TV signálu. Jedná se o fixed indoor příjem a přenosný příjem.

Teoretický úvod

V oblasti televizního vysílání stále rostou nároky provozovatelů televizních služeb i uživatelů. Došlo k vyčerpání kmitočtového spektra pro analogovou televizi a není tak možné zavádět nové celoplošné televize a naplnit tak požadavky provozovatelů. Proto bylo vytvořeno seskupení společností s názvem Digital Video Broadcasting (DVB). Podle možnosti vysílání TV signálu je DVB reprezentován třemi hlavními standardy: pozemním (DVB-T/T2/T2-Lite), družicovým (DVB-S/S2) a kabelovým (DVB-C/C2).

Standard DVB-T2 je druhou generací digitálního pozemního vysílání, která není slučitelná s předchozí generací kvůli odlišnému zdrojovému a kanálovému kódování. Oproti standardu DVB-T se zvýšila kapacita datového toku o 30 % [1]. Pro komprimaci se využívá formát HEVC/H.265 (High Efficiency Video Coding, HEVC) [2]. U H.265 se předpokládá nasazení pro Ultra High Definition (UHDTV).

Další zásadní změnou je zavedení většího množství vstupních datových toků, nazývajících se Physical Layer Pipes (PLP). Jejich počet může teoreticky dosáhnout až 256 vrstev. Jednotlivé PLP vrstvy mohou nést rozdílný typ dat s různou robustností, s odlišným kódováním, každá z nich může být modulována jinou metodou a přenášena s různou bitovou rychlostí. Umožňuje také flexibilní nastavení systémových parametrů a díky tomu také lepší využití radiofrekvenčního (RF) spektra [3].

Odlišnost je také v kanálovém kódování, u něhož je použito efektivnější FEC kódování. Přidáním nové vnitřní modulace 256QAM se navýšil maximální bitový tok o cca 25 %. Maximální teoretický bitový tok vzrostl na 50,3 Mbit/s, což představuje oproti 31,6 Mbit/s u DVB-T nárůst o cca 37 %. Přibyly další kódové poměry 3/5 a 4/5 a byly přidány nové OFDM módy 1K, 4K, 16K a 32K. Také lze použít přenosový systém typu MISO (multiple input single output), rotaci konstelačního diagramu a možné je i použití rozšířených 8K 16K a 32K OFDM módů [3].

DVB-T2-Lite je odlehčený profil systému DVB-T2, který je určen k tomu, aby umožnil jednodušší implementaci přijímače pro aplikace s velmi malou kapacitou, jako např. mobilní vysílání (zejména v mobilních telefonech a tabletech). Je navržen tak, aby se snížila složitost DVB-T2 systému a také, aby se zmenšila spotřeba energie při zpracování TV signálu v mobilních zařízeních. Z tohoto důvodu má tzv. Forward Error Correction (FEC) rámeček velikost pouze 16 200 bitů oproti standardu DVB-T2, u něž má FEC rámeček velikost 64 800 bitů. Je založen na principu zpracování v základním standardu DVB-T2, ale jsou vyloučeny některé kombinace systémových parametrů [3]. Například modulace 256QAM se nepoužívá s kódovými poměry 2/3 a 3/4. Naopak byly přidány dva nové kódové poměry a to 1/3 a 2/5. Použití tzv. rotované konstelace se s tímto typem modulace nedoporučuje. V T2-Lite nejsou zahrnuty ani tzv. Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) módy 32K a 1K. Také se nepoužívá vzor pilotních nosných (tzv. Pilot Pattern) PP8 [3].

Pro generování TV signálu ve standardu DVB-T2 je použit R&S® SFU Broadcast Test System, který obsahuje i modul pro emulaci různých přenosových podmínek pomocí kanálových modelů [3]. Dále je použit R&S® ETL-TV Analyzátor, který slouží pro měření objektivních parametrů televizního signálu. Součástí pracoviště je atenuátor pro zesílení nebo zeslabení vysílaného signálu. Pomocí set-top boxu (STB) se přijímá a zpracovává signál DVB-T2, který je následně zobrazen na TV přijímači.

Podle přenosového scénáře jsou k dispozici různé modely přenosových kanálů, které emulují daný scénář, většinou jsou to pevný, přenosný a mobilní příjem. Pro pevný pozemní příjem se přenosová cesta vyznačuje přímou vlnou včetně odražených signálů a je definována pomocí modelů přenosových kanálů, a to Gaussovým, Riceovým a Rayleighovým kanálem [4]. Přenosný příjem naopak předpokládá, že přijímač se pohybuje vzhledem k vysílači malou rychlostí, řádově v jednotkách km/h, jde např. o chůzi. Přenosová cesta se vyznačuje mnohacestným šířením a je definována pomocí modelů přenosového kanálu Portable Indoor (PI12) a Portable Outdoor (PO12). Kanálové modely RC20, RL20 PI12 a PO12 se značí příslušnou zkratkou a číslem, které konkrétně u jmenovaných modelů představuje počet nepřímých cest [4]. Pokud se přijímač pohybuje vyšší rychlostí, mluvíme o mobilním příjmu, kdy rychlost přijímače vůči vysílači se pohybuje od 30 do 100 km/h. Přenosová cesta se opět vyznačuje mnohacestným šířením a je definována pomocí modelů přenosových kanálů Typical Urban (TU6) a Rural Area (RA6) [4].

Tab. X. 1. Rozdílné parametry DVB-T2/ DVB-T2-Lite

	DVB-T2	T2-Lite
Kódovací poměry pro krátký FEC rámeček	1/4, 1/2, 3/5, 2/3, 3/4, 4/5, 5/6	1/3, 2/5, 1/2, 3/5, 2/3, 3/4
Kódovací poměry pro dlouhý FEC rámeček	1/2, 3/5, 2/3, 3/4, 4/5, 5/6	Nepoužívá se
Délka FEC rámečku	64 800, 16 200	16 200
Bitová rychlost	Maximálně 50 Mbit/s	Omezena na 4 Mbit/s
OFDM módy	1K, 2K, 4K, 8K, 16K, 32K	2K, 4K, 8K, 16K
Použití 256QAM	Používá se se všemi kód. poměry	Nepoužívá se s rotovanou konstelací a u poměrů 2/3 a 3/4

Zadání a postup měření

1. Seznamte se s měřicím pracovištěm a obsluhou SFU generátoru, ETL TV analyzátoru a nastavením STB a TV přijímače. Návody ke všem přístrojům jsou součástí pracoviště laboratorní úlohy.
2. Měření je zaměřeno na objektivní parametry (MER, BER₁, BER₂, LDPC iterace), ty budete pozorovat na ETL TV analyzátoru. Pro každý model RF kanálu proměřte všechny objektivní parametry a vyhodnoťte Quasi Error Free (QEF) příjem (BER₂ < 1×10⁻⁷). Také si pomocí STB zobrazte sloupcové grafy „kvalita“ a „signál“ a zjistěte, které objektivní parametry ovlivňují tyto hodnoty.
3. První měření proveďte pro tzv. fixed indoor příjem. Změřte všechny zadané objektivní parametry pro všechny používané modely přenosových kanálů (postupně AWGN, RC20, RL20). Změřte také hodnotu C/N pro tzv. QEF příjem. Pozorujte vysílanou videosekvenci na TV přijímači a pomocí hodnot z STB (kvalita a signál) zjistěte a zaznamenejte hodnotu C/N, při níž je dostatečná kvalita příjmu a obraz je plynulý. Porovnejte obě hodnoty C/N, které jste zjistili, i s teoretickým předpokladem.

4. Nastavte na SFU generátoru systémové parametry: Level 50 dBuV, 32K mode (extended), modulace 64QAM, kódový poměr 2/3, ochranný interval GI 1/16. Postupně měňte velikost hodnoty C/N. Před samotným měřením se ujistěte, že RF je ve stavu ON (dolní menu). Pro proměření AWGN kanálu ponechejte *Fading* ve stavu OFF a pro kanály RC20 a RL20 jej přepněte do stavu ON.

Postup pro SFU: Stisk tlačítka Setup – FAVORITES – FREQUENCY – TX: FREQUENCY: FREQUENCY (zadejte 514 MHz) – TX: LEVEL (zadejte 50 dBuV). Pomocí myši postupně nastavte další parametry: MODULATION – TRANSMISSION STANDARD (zadejte DVB-T2).

DIGITAL TV – BICM – FEC FRAME (zadejte **normal**); CODE RATE (zadejte 2/3); CONSTELLATION (zadejte 64QAM) – CONSTELLATION ROTATION (zadejte off) – FRAMING + OFDM – FFT SIZE (zadejte 32K Extended); GUARD INTERVAL (zadejte 1/16); PILOT PATTERN (zadejte PP4).

NOISE – NOISE (nastavte ADD); AWGN (nastavte na ON); AWGN – C/N (postupně změňte hodnotu od 40 do cca 10 dB s krokem 2 dB).

FADING – FADING (nastavte ON); PROFILE – STANDARD (vyberte DVB); PARAMETER SET (vyberte nejprve RC20 ANX B a pak RL20 ANX B).

U modelu RL20 ANX B je potřeba nastavit rychlost (v SFU jako speed) z 20 m/s na 0 m/s u všech přenosových cest.

5. Nastavte na ETL analyzátoru stejnou frekvenci jako na SFU generátoru. Nalad'te také kanál na STB se stejnou frekvencí a videosekvenci zobrazte na TV přijímači.

Postup pro ETL: tlačítko FREQ – zadejte 514 MHz – enter

6. Pomocí ETL analyzátoru změřte bitovou chybovost před a po LDPC dekódování. Na analyzátoru značeny jako: BER before LDPC pro BER₁ a BER before BCH pro BER₂, modulační chybovost (MER) a LDPC iterace (na

analyzátoru anglicky LDPC Iterations). Tyto parametry proměřte pro hodnoty C/N , které budete měnit na SFU generátoru od 40 do cca 10 dB (krok 2 dB).

7. Zaměřte se také na vyhodnocení tzv. Quasi Error Free (QEF) příjmu ($BER_2 \leq 1 \times 10^{-7}$). Proto při vyšších hodnotách BER_2 tyto důkladně proměřte i s menší změnou C/N tak, aby se výsledný QEF příjem dal co nejobektivněji vyhodnotit.
8. Na ETL TV analyzátoru také zobrazte a nakreslete RF spektrum vysílaného signálu pro všechny modely přenosových kanálů, a to právě při $C/N = 30$ dB. Také zobrazte konstelační diagramy při stejné hodnotě C/N . **Vhodně okomentujte zobrazené průběhy a diagramy a proveďte porovnání pro jednotlivé modely přenosových kanálů.**

Postup pro ETL analyzátor: Stisk tlačítka MEAS – Modulation Analysis – Const Diagram. Pro zobrazení spektra: stisk tlačítka MEAS – Spectrum.

9. Pomocí dostupných STB zjistěte hodnoty nastavovaného C/N pomocí pozorování videosekvence na TV přijímači. QEF příjem představuje takovou videosekvenci, ve které se objeví během pozorování po delší dobu právě jedna chyba. Pozorujte přijímaný signál úměrně dlouho dobu (max. 30 sekund), hodnoty si poznamenejte pro všechny dostupné STB a porovnejte je s hodnotami z ETL TV analyzátoru a dokumentace ITU-R BT.2254 [2]. **Vhodně okomentujte a vyhodnoťte, který STB je nejlepší a proč.**
10. Nyní budete měřit druhý scénář, který se zaměřuje na přenosný příjem, při němž se přijímač pohybuje malou rychlostí vzhledem k přijímači. Vysílaný TV signál je právě ve standardu DVB-T2-Lite. Opět změřte všechny objektivní parametry a zaměřte se na hodnoty C/N pro QEF příjem. Postup měření pro tento scénář je totožný jako pro předchozí scénář. Odlišnosti v nastavení SFU a ETL jsou popsány níže.
11. Nastavte na SFU generátoru systémové parametry: Level 50 dB μ V, 8K mode (extended), modulace 64QAM, kódový poměr 2/3, ochranný interval GI 1/4. Pilot Pattern 1, postupně měňte velikost hodnoty C/N . Proměřte příslušné parametry jako v předchozím případě (od bodu 4) pro kanály PI12 a PO12. Pro proměření AWGN kanálu ponechejte *Fading* ve stavu OFF a pro kanály PI12 a PO12 jej přepněte do stavu ON.

ETL TV analyzátor přepněte do měřícího módu *mobile!*

Postup pro SFU: Stisk tlačítka Setup – FAVORITES – FREQUENCY – TX: FREQUENCY: FREQUENCY (zadejte 514 MHz) – TX: LEVEL (zadejte 50 dB μ V). Pomocí myši postupně nastavte další parametry: MODULATION – TRANSMISSION STANDARD (zadejte DVB-T2).

DIGITAL TV – BICM – FEC FRAME (zadejte **short**); CODE RATE (zadejte 2/3); CONSTELLATION (zadejte 64QAM) – FRAMING + OFDM – FFT SIZE (zadejte 8K Extended); GUARD INTERVAL (zadejte 1/4); PILOT PATTERN (zadejte PP1).

NOISE – NOISE (nastavte ADD); AWGN (nastavte na ON); AWGN – C/N (postupně změňte hodnotu od 40 do cca 16 dB).

FADING – FADING (nastavte ON); PROFILE – STANDARD (vyberte DVB); PARAMETER SET (vyberte PI12 a PO12).

Postup pro ETL: Stisk Tlačítka MEAS – Special Settings – System optimization (vyberte *Mobile*). Po dokončení měření přepněte ETL TV Analyzátor zpět do módu *Slow/Laboratory*.

12. Stejně jako v bodě 9 zjistíte hodnoty C/N pro QEF příjem u všech dostupných STB a okomentujte jednotlivé výsledky.
13. Vyneste grafické závislosti všech objektivních parametrů a srovnajte jednotlivé kanály vždy pro daný scénář. Zobrazte konstelační diagramy a v závěru okomentujte, jak se odlišují. Také zobrazte a nakreslete RF spektra pro všechny modely přenosových kanálů a vhodně je okomentujte. Vyhodnoťte také, kdy je při přenosu signálu dosažen QEF příjem pro jednotlivá měření, a porovnejte s teoretickým předpokladem z dokumentace ITU-R BT.2254 [2].

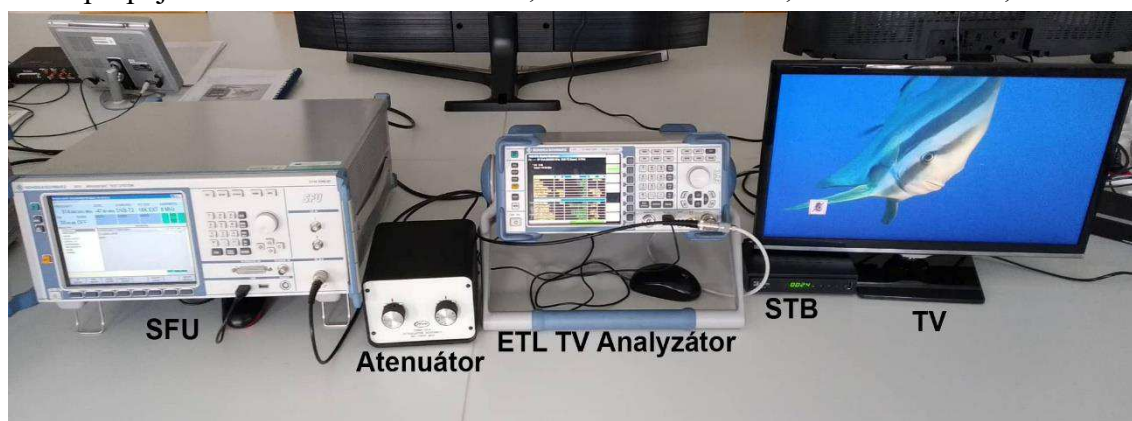
Poznámky k měření

1. Měření obsahuje dva scénáře. První představuje případ, kdy je anténa pro příjem TV signálu volně přenositelná a TV přijímač není v pohybu. Jedná se o tzv. fixed indoor příjem. Druhý scénář popisuje situaci, kdy příjem TV signálu je přijímán pomocí mobilního zařízení, tedy přijímač je v pohybu. TV signál je vysílán ve standardu T2-Lite, který je právě pro tuto situaci určen.

Použité měřicí přístroje

STB	digitální televizní přijímač DVB-T2 + dálkové ovládání
TV	televizní přijímač Samsung + dálkové ovládání
ETL	měřicí přijímač R&S® ETL-K202 TV Analyzer
SFU	laboratorní vysílač DVB-/T2 R&S® SFU Broadcast Test System
Atenuátor	JFW 75BR-014

propojovací vodiče 3 x BNC-BNC, 1 x BNC – anténní, 1 x T člen BNC, HDMI



Obr. X.1: Rozmístění přístrojů laboratorního pracoviště – úloha č. X

Závěr

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

Kontrolní otázky

1. Co vyjadřují sloupcové grafy „úroveň“ a „kvalita“ přijímaného signálu při vyhledávání kanálů pomocí přijímače DVB-T2, tzv. set-top boxu?
2. Jaký je zásadní rozdíl mezi standardem DVB-T2 a jeho odlehčenou verzí T2-Lite a jaké má typické využití?
3. Jaké hodnoty musí dosáhnout BER po LDPC dekodování, aby byly splněny podmínky pro QEF příjem?

Použitá a doporučená literatura

- [1] Fisher, W. *Digital Television and Audio Broadcasting Technology*, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008, ISBN 978-3-540-76357-4.
- [2] ITU-R, *Frequency and network planning aspects of DVB-T2*, Report ITU-R BT.2254-11 2013.
- [3] STROUHAL, A. *Simulace RF přenosového kanálu pro DVB-T2*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2011. 70s. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. Ladislav Polák.
- [4] POLÁK, L., *Simulace mnohacestného šíření vícecestavých modulací*, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2009.

Příloha 2 - Vypracovaný protokol

 VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ	Předmět Digitální a rozhlasové systémy	
	Jméno Krejčíř Dominik	
	Ročník 2.	Studijní skupina M2EST/02
	Spolupracoval	Měřeno dne
Kontroloval	Hodnocení	Odevzdáno dne
Číslo úlohy X.	Název úlohy Měření vlastností DVB-T2/T2-Lite	

Zadání

1. Seznamte se s měřícím pracovištěm a obsluhou SFU generátoru, ETL TV analyzátoru a nastavením STB a TV přijímače. Návody ke všem přístrojům jsou součástí pracoviště laboratorní úlohy.
2. Měření je zaměřeno na objektivní parametry (MER, BER₁, BER₂, LDPC iterace), ty budete pozorovat na ETL TV analyzátoru. Pro každý model RF kanálu proměřte všechny objektivní parametry a vyhodnoťte Quasi Error Free (QEF) příjem (BER₂ < 1×10⁻⁷). Také si pomocí STB zobrazte sloupcové grafy „kvalita“ a „signál“ a zjistěte, které objektivní parametry ovlivňují tyto hodnoty.
3. První měření proveďte pro tzv. fixed indoor příjem. Změřte všechny zadané objektivní parametry pro všechny používané modely přenosových kanálů (postupně AWGN, RC20, RL20). Změřte také hodnotu C/N pro tzv. QEF příjem. Pozorujte vysílanou videosekvenci na TV přijímači a pomocí hodnot z STB (kvalita a signál) zjistěte a zaznamenejte hodnotu C/N, při níž je dostatečná kvalita příjmu a obraz je plynulý. Porovnejte obě hodnoty C/N, které jste zjistili, i s teoretickým předpokladem.
4. Nastavte na SFU generátoru systémové parametry: Level 50 dBuV, 32K mode (extended), modulace 64QAM, kódový poměr 2/3, ochranný interval GI 1/16. Postupně měňte velikost hodnoty C/N. Před samotným měřením se ujistěte, že RF je ve stavu ON (dolní menu). Pro proměření AWGN kanálu ponechejte *Fading* ve stavu OFF a pro kanály RC20 a RL20 jej přepněte do stavu ON.

Postup pro SFU: Stisk tlačítka Setup – FAVORITES – FREQUENCY – TX: FREQUENCY: FREQUENCY (zadejte 514 MHz) – TX: LEVEL (zadejte 50 dBuV). Pomocí myši postupně nastavte další parametry: MODULATION – TRANSMISSION STANDARD (zadejte DVB-T2).

DIGITAL TV – BICM – FEC FRAME (zadejte **normal**); CODE RATE (zadejte 2/3); CONSTELLATION (zadejte 64QAM) – CONSTELLATION ROTATION (zadejte off) – FRAMING+OFDM – FFT SIZE (zadejte 32K Extended); GUARD INTERVAL (zadejte 1/16); PILOT PATTERN (zadejte PP4).

NOISE – NOISE (nastavte ADD); AWGN (nastavte na ON); AWGN – C/N (postupně změňte hodnotu od 40 do cca 10 dB s krokem 2 dB).

FADING – FADING (nastavte ON); PROFILE – STANDARD (vyberte DVB); PARAMETER SET (vyberte nejprve RC20 ANX B a pak RL20 ANX B).

U modelu RL20 ANX B je potřeba nastavit rychlost (v SFU jako speed) z 20 m/s na 0 m/s u všech přenosových cest.

5. Nastavte na ETL analyzátoru stejnou frekvenci jako na SFU generátoru. Nalad'te také kanál na STB se stejnou frekvencí a videosekvenci zobrazte na TV přijímači.

Postup pro ETL: tlačítko **FREQ** – zadejte 514 MHz – enter

6. Pomocí ETL analyzátoru změřte bitovou chybovost před a po LDPC dekódování (na analyzátoru značeny jako: BER before LDPC pro BER_1 a BER before BCH pro BER_2), modulační chybovost (MER) a LDPC iterace (na analyzátoru anglicky LDPC Iterations). Tyto parametry proměřte pro hodnoty C/N , které budete měnit na SFU generátoru od 40 do cca 10 dB (krok 2 dB).
7. Zaměřte se také na vyhodnocení tzv. Quasi Error Free (QEF) příjmu ($BER_2 \leq 1 \times 10^{-7}$). Proto při vyšších hodnotách BER_2 tyto důkladně proměřte i s menší změnou C/N tak, aby se výsledný QEF příjem dal co nejobektivněji vyhodnotit.
8. Na ETL TV analyzátoru také zobrazte a nakreslete RF spektrum vysílaného signálu pro všechny modely přenosových kanálů, a to právě při $C/N = 30$ dB. Také zobrazte konstelační diagramy při stejné hodnotě C/N . **Vhodně okomentujte zobrazené průběhy a diagramy a proveďte porovnání pro jednotlivé modely přenosových kanálů.**

Postup pro ETL analyzátor: Stisk tlačítka **MEAS** – Modulation Analysis – Const Diagram. Pro zobrazení spektra: stisk tlačítka **MEAS** – Spectrum.

9. Pomocí dostupných STB zjistěte hodnoty nastavovaného C/N pomocí pozorování videosekvence na TV přijímači. QEF příjem představuje takovou videosekvenci, ve které se objeví během pozorování po delší dobu právě jedna chyba. Pozorujte přijímaný signál úměrně dlouho dobu (max. 30 sekund), hodnoty si poznamenejte pro všechny dostupné STB a porovnejte je s hodnotami z ETL TV analyzátoru a dokumentace ITU-R BT.2254 [2]. **Vhodně okomentujte a vyhodno'te, který STB je nejlepší a proč.**
10. Nyní budete měřit druhý scénář, který se zaměřuje na přenosný příjem, při němž se přijímač pohybuje malou rychlostí vzhledem k vysílači. Vysílaný TV signál je právě ve standardu DVB-T2-Lite. Opět změřte všechny objektivní parametry a zaměřte se na hodnoty C/N pro QEF příjem. Postup měření pro tento scénář je totožný jako pro předchozí scénář. Odlišnosti v nastavení SFU a ETL jsou popsány níže.

11. Nastavte na SFU generátoru systémové parametry: Level 50 dB μ V, 8K mode (extended), modulace 64QAM, kódový poměr 2/3, ochranný interval GI 1/4. Pilot Pattern 1, postupně měňte velikost hodnoty C/N. Proměřte příslušné parametry jako v předchozím případě (od bodu 4) pro kanály PI12 a PO12. Pro proměření AWGN kanálu ponechejte *Fading* ve stavu OFF a pro kanály PI12 a PO12 jej přepněte do stavu ON.

ETL TV analyzátor přepněte do měřícího módu *mobile*!

Postup pro SFU: Stisk tlačítka Setup – FAVORITES – FREQUENCY – TX: FREQUENCY: FREQUENCY (zadejte 514 MHz) – TX: LEVEL (zadejte 50 dB μ V). Pomocí myši postupně nastavte další parametry: MODULATION – TRANSMISSION STANDARD (zadejte DVB-T2).

DIGITAL TV – BICM – FEC FRAME (zadejte **short**); CODE RATE (zadejte 2/3); CONSTELLATION (zadejte 64QAM) – FRAMING+OFDM – FFT SIZE (zadejte 8K Extended); GUARD INTERVAL (zadejte 1/4); PILOT PATTERN (zadejte PP1).

NOISE – NOISE (nastavte ADD); AWGN (nastavte na ON); AWGN – C/N (postupně změňte hodnotu od 40 do cca 16 dB).

FADING – FADING (nastavte ON); PROFILE – STANDARD (vyberte DVB); PARAMETER SET (vyberte PI12 a PO12).

Postup pro ETL: Stisk tlačítka MEAS – Special Settings – System optimization (vyberte *Mobile*). Po dokončení měření přepněte ETL TV Analyzátor zpět do módu *Slow/Laboratory*.

12. Stejně jako v bodě 9 zjistěte hodnoty C/N pro QEF příjem pro všechny dostupné STB a okomentujte jednotlivé výsledky.
13. Vyneste grafické závislosti všech objektivních parametrů a srovnajte jednotlivé kanály vždy pro daný scénář. Zobrazte konstelační diagramy a v závěru okomentujte, jak se odlišují. Také zobrazte a nakreslete RF spektra pro všechny modely přenosových kanálů, vhodně je okomentujte a porovnejte s teoretickým předpokladem z dokumentace ITU-R BT.2254 [2].

Vypracování

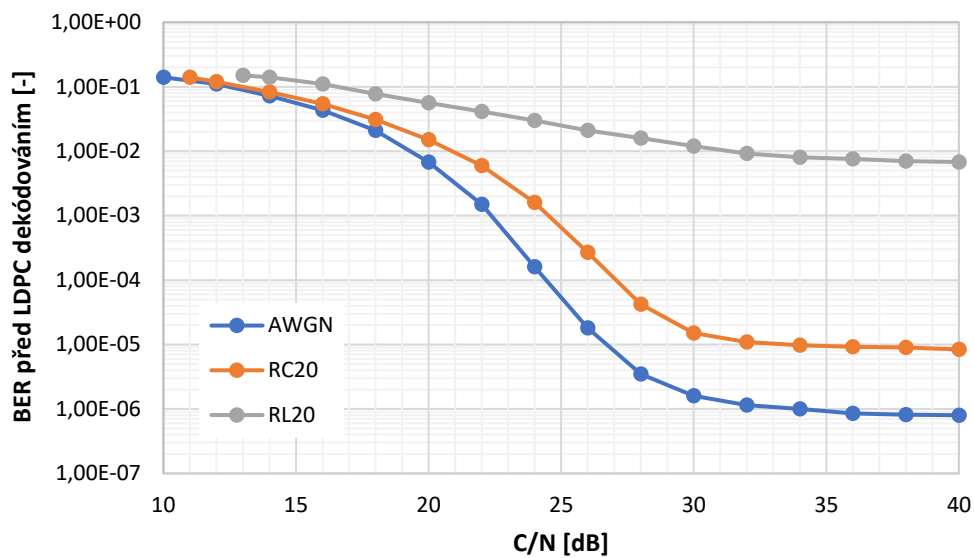
Měření pro fixed indoor příjem

Tabulka 1 Naměřené hodnoty objektivních parametrů BER₁ a BER₂

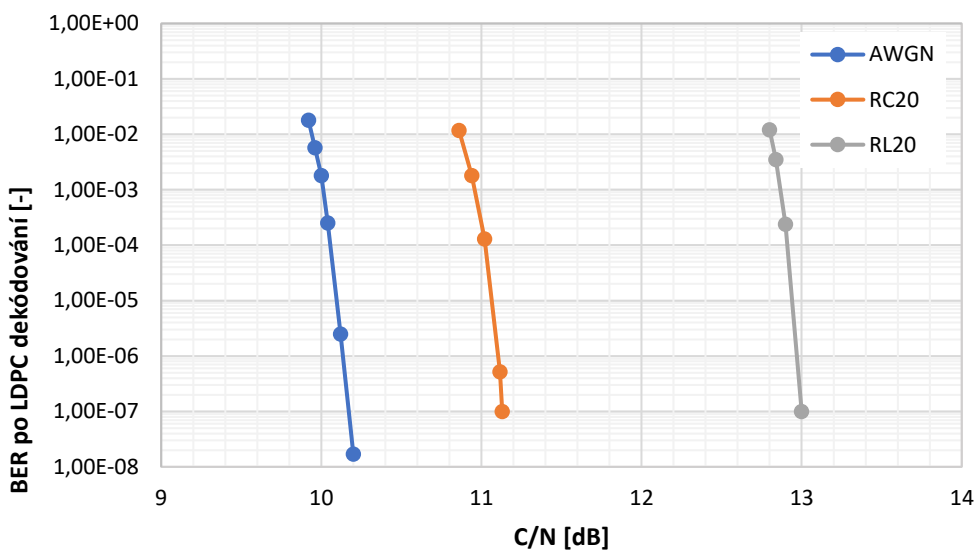
C/N [dB]	AWGN		C/N [dB]	RC20		C/N [dB]	RL20	
	BER ₁	BER ₂		BER ₁	BER ₂		BER ₁	BER ₂
40	8,00E-07	0,00E+00	40	8,40E-06	0,00E+00	40	6,80E-03	0,00E+00
38	8,20E-07	0,00E+00	38	9,00E-06	0,00E+00	38	7,00E-03	0,00E+00
36	8,50E-07	0,00E+00	36	9,20E-06	0,00E+00	36	7,60E-03	0,00E+00
34	1,00E-06	0,00E+00	34	9,80E-06	0,00E+00	34	8,00E-03	0,00E+00
32	1,15E-06	0,00E+00	32	1,10E-05	0,00E+00	32	9,20E-03	0,00E+00
30	1,60E-06	0,00E+00	30	1,50E-05	0,00E+00	30	1,20E-02	0,00E+00
28	3,50E-06	0,00E+00	28	4,20E-05	0,00E+00	28	1,60E-02	0,00E+00
26	1,80E-05	0,00E+00	26	2,70E-04	0,00E+00	26	2,10E-02	0,00E+00
24	1,60E-04	0,00E+00	24	1,60E-03	0,00E+00	24	3,00E-02	0,00E+00
22	1,50E-03	0,00E+00	22	6,00E-03	0,00E+00	22	4,10E-02	0,00E+00
20	6,80E-03	0,00E+00	20	1,50E-02	0,00E+00	20	5,60E-02	0,00E+00
18	2,10E-02	0,00E+00	18	3,10E-02	0,00E+00	18	7,70E-02	0,00E+00
16	4,30E-02	0,00E+00	16	5,40E-02	0,00E+00	16	1,10E-01	0,00E+00
14	7,20E-02	0,00E+00	14	8,30E-02	0,00E+00	14	1,40E-01	0,00E+00
12	1,10E-01	0,00E+00	12	1,20E-01	0,00E+00	13	1,50E-01	8,00E-07
10,2	1,20E-01	1,70E-08	11,13	1,20E-01	1,00E-07	12,9	1,50E-01	7,40E-04
10,12	1,30E-01	2,50E-06	11,11	1,30E-01	5,20E-07	12,88	1,50E-01	1,90E-03
10,04	1,30E-01	2,50E-04	11,02	1,30E-01	1,30E-04	12,86	1,50E-01	2,50E-03
10	1,40E-01	1,80E-03	11	1,40E-01	2,60E-04	12,84	1,60E-01	4,20E-03
9,96	1,40E-01	5,70E-03	10,94	1,40E-01	1,80E-03	12,82	1,60E-01	9,80E-03
9,92	1,50E-01	1,80E-02	10,86	1,50E-01	1,18E-02	12,8	1,60E-01	1,20E-02

Tabulka 2 Naměřené hodnoty objektivních parametrů MER a LDPC iterace

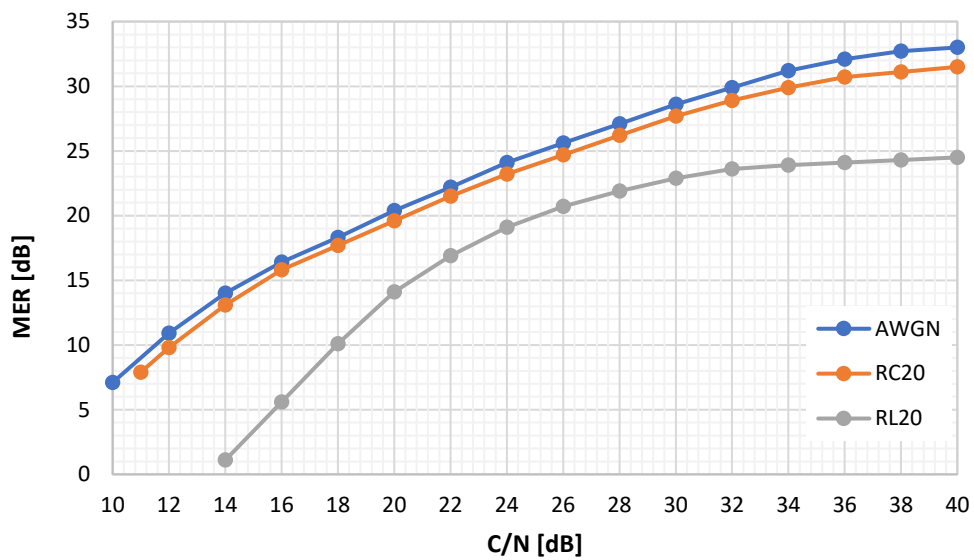
C/N [dB]	AWGN		C/N [dB]	RC20		C/N [dB]	RL20	
	MER [dB]	LDPC iterace		MER [dB]	LDPC iterace		MER [dB]	LDPC iterace
40	33	1,05	40	31,5	1,67	40	24,5	6,73
38	32,7	1,06	38	31,1	1,69	38	24,3	6,87
36	32,1	1,09	36	30,7	1,77	36	24,1	6,82
34	31,2	1,07	34	29,9	1,77	34	23,9	6,8
32	29,9	1,11	32	28,9	1,81	32	23,6	6,87
30	28,6	1,13	30	27,7	1,96	30	22,9	7,05
28	27,1	1,29	28	26,2	2,28	28	21,9	7,42
26	25,6	1,63	26	24,7	2,82	26	20,7	7,75
24	24,1	2,31	24	23,2	3,46	24	19,1	8,23
22	22,2	3,11	22	21,5	4,73	22	16,9	9,03
20	20,4	4,61	20	19,6	6,85	20	14,1	10,26
18	18,3	7,51	18	17,7	9,41	18	10,1	12,36
16	16,4	10,61	16	15,8	13,17	16	5,6	15,65
14	14	15,25	14	13,1	19,34	14	1,1	22,26
12	10,9	25,17	12	9,8	31,77	13	-	29,51
10	7,1	42,54	11	7,9	42,32			



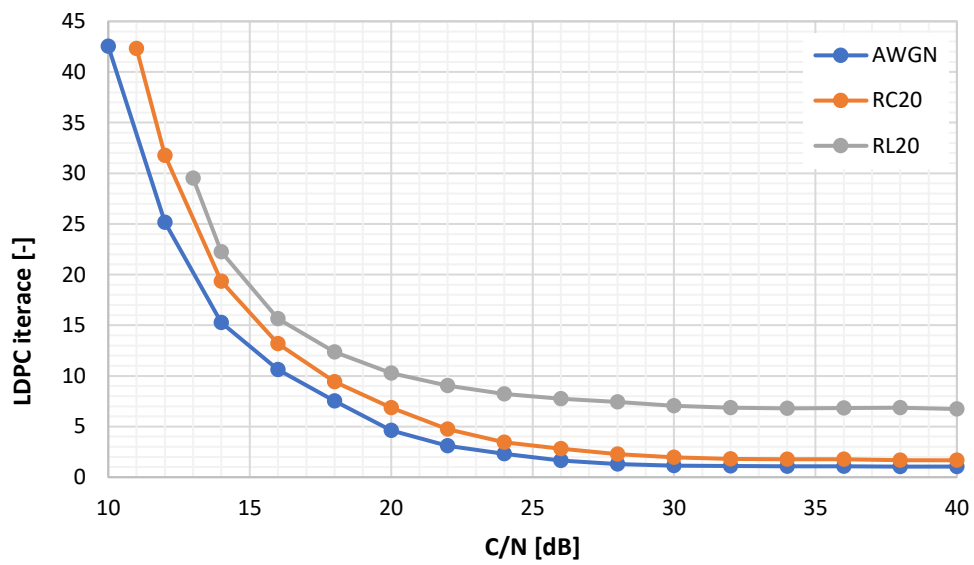
Obrázek 1 Měření $BER_1 = f(C/N)$ pro fixed indoor příjem



Obrázek 2 Měření $BER_2 = f(C/N)$ pro fixed indoor příjem



Obrázek 3 Měření MER = $f(C/N)$ pro fixed indoor příjem



Obrázek 4 Měření LDPC iterace = $f(C/N)$ pro fixed indoor příjem

Tabulka 3 Porovnání teoretických a naměřených hodnot C/N pro QEF příjem

Model přenosového kanálu	C/N [dB]		
	AWGN	RC20	RL20
ITU-R BT.2254	9,9	10,2	11,9
Analyzátor	10	11	13
STB 1 – Thomson	10	13	13
STB 2 – Emos	10	11	12
STB 3 – Icecrypt	10	11	13

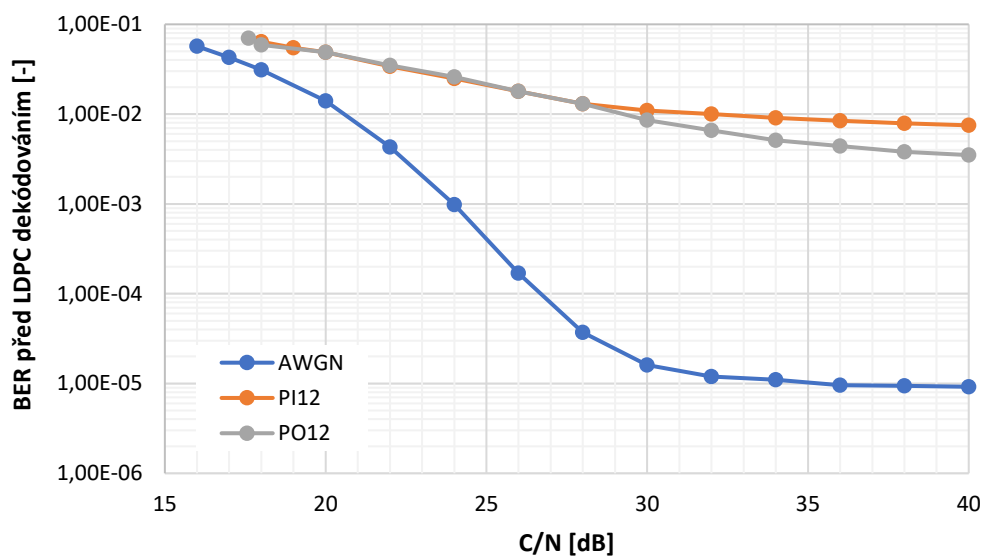
Měření pro přenosný příjem

Tabulka 4 Naměřené hodnoty objektivních parametrů BER₁ a BER₂

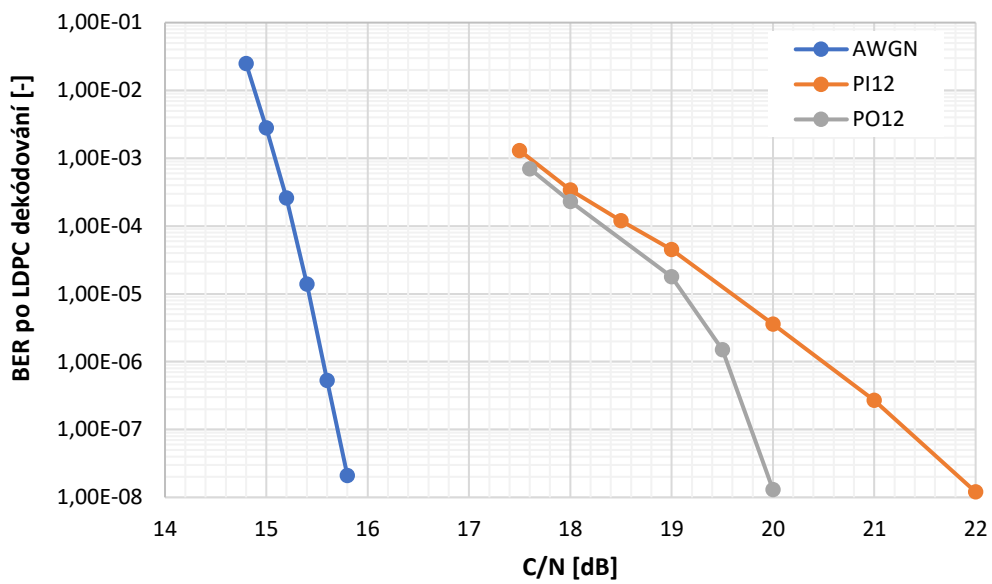
C/N [dB]	AWGN		C/N [dB]	PI12		C/N [dB]	RL20	
	BER ₁	BER ₂		BER ₁	BER ₂		BER ₁	BER ₂
40	9,20E-06	0,00E+00	40	7,50E-03	0,00E+00	40	3,50E-03	0,00E+00
38	9,40E-06	0,00E+00	38	7,90E-03	0,00E+00	38	3,80E-03	0,00E+00
36	9,60E-06	0,00E+00	36	8,40E-03	0,00E+00	36	4,40E-03	0,00E+00
34	1,10E-05	0,00E+00	34	9,10E-03	0,00E+00	34	5,10E-03	0,00E+00
32	1,20E-05	0,00E+00	32	1,00E-02	0,00E+00	32	6,60E-03	0,00E+00
30	1,60E-05	0,00E+00	30	1,10E-02	0,00E+00	30	8,60E-03	0,00E+00
28	3,70E-05	0,00E+00	28	1,30E-02	0,00E+00	28	1,30E-02	0,00E+00
26	1,70E-04	0,00E+00	26	1,80E-02	0,00E+00	26	2,20E-02	0,00E+00
24	9,80E-04	0,00E+00	24	2,50E-02	0,00E+00	24	2,60E-02	0,00E+00
22	4,30E-03	0,00E+00	22	3,40E-02	1,20E-08	22	4,50E-02	0,00E+00
20	1,40E-02	0,00E+00	21	4,10E-02	2,70E-07	20	4,90E-02	1,30E-08
18	3,10E-02	0,00E+00	20	4,90E-02	3,60E-06	19,5	6,50E-02	1,50E-06
17	4,30E-02	0,00E+00	19	5,70E-02	4,50E-05	19	6,60E-02	1,80E-05
16	5,70E-02	0,00E+00	18,5	6,10E-02	1,20E-04	18	5,90E-02	2,30E-04
15,8	6,00E-02	2,10E-08	18	6,40E-02	3,40E-04	17,6	7,00E-02	7,00E-04
15,6	6,30E-02	5,30E-07	17,5	8,10E-02	1,30E-03			
15,4	6,60E-02	1,40E-05						
15,2	6,90E-02	2,60E-04						
15	7,40E-02	2,80E-03						
14,8	8,80E-02	2,50E-02						

Tabulka 5 Naměřené hodnoty objektivních parametrů MER a LDPC iterace

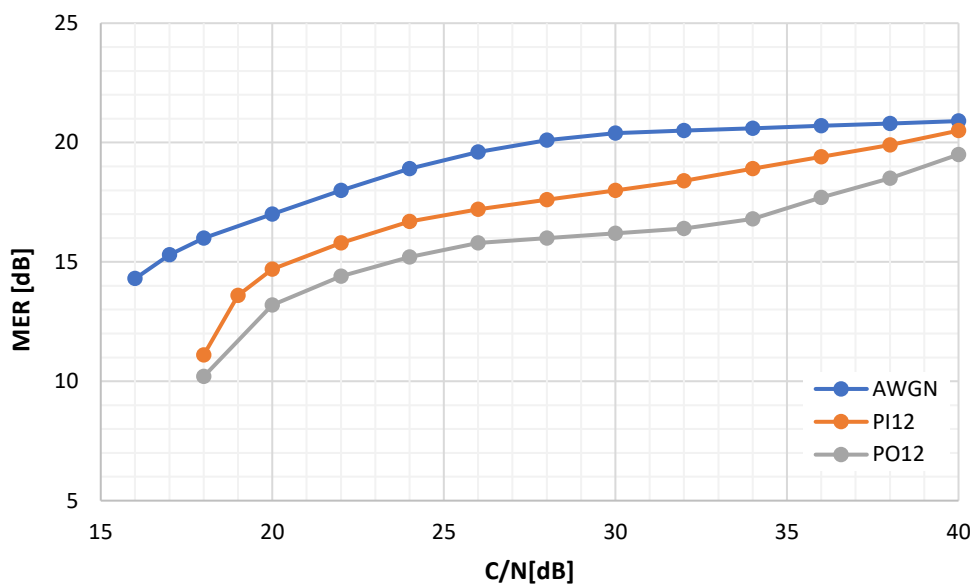
C/N [dB]	AWGN		C/N [dB]	PI12		C/N [dB]	PO12	
	MER [dB]	LDPC iterace		MER [dB]	LDPC iterace		MER [dB]	LDPC iterace
40	20,9	1,12	40	20,5	3,28	40	19,5	3,48
38	20,8	1,14	38	19,9	3,57	38	18,5	3,64
36	20,7	1,14	36	19,4	3,88	36	17,7	3,74
34	20,6	1,15	34	18,9	3,87	34	16,8	4,17
32	20,5	1,16	32	18,4	4,01	32	16,4	4,42
30	20,4	1,21	30	18	4,18	30	16,2	4,56
28	20,1	1,43	28	17,6	4,31	28	16	4,97
26	19,6	1,65	26	17,2	4,56	26	15,8	5,39
24	18,9	2,12	24	16,7	4,88	24	15,2	6,08
22	18	2,64	22	15,8	5,85	22	14,4	6,97
20	17	3,68	20	14,7	8,65	20	13,2	8,16
18	16	5,79	19	13,6	13,38	18	10,2	12,1
17	15,3	8,1	18	11,1	19,51	17,6	9,5	14,26
16	14,3	10,92	17		28,42			



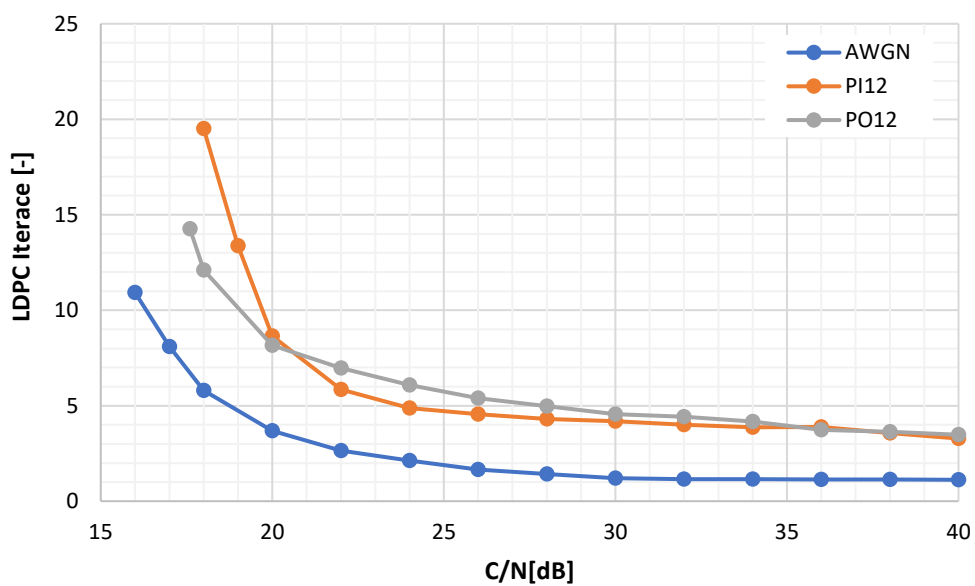
Obrázek 8 Měření $BER_1 = f(C/N)$ pro přenosný příjem



Obrázek 9 Měření $BER_2 = f(C/N)$ pro přenosný příjem



Obrázek 10 Měření MER = $f(C/N)$ pro fixed portable příjem



Obrázek 11 Měření LDPC iterace = $f(C/N)$ pro přenosný příjem

Tabulka 6 Porovnání teoretických a naměřených hodnot C/N pro QEF příjem

Model přenosového kanálu	C/N [dB]		
	AWGN	PO12	PI12
ITU-R BT.2254	13,5	-	-
Analyzátor	15,6	19,5	21,3
STB 1 – Thomson	14	21	20
STB 2 – Emos	13	19	18
STB 3 – Icecrypt	14	20	17

Použité měřicí přístroje

STB	digitální televizní přijímač DVB-T2 + dálkové ovládání
TV	televizní přijímač Samsung + dálkové ovládání
ETL	měřicí přijímač R&S® ETL-K202 TV Analyzer
SFU	laboratorní vysílač DVB-/T2 R&S® SFU Broadcast Test System
Atenuátor	JFW 75BR-014
	propojovací vodiče 3 x BNC-BNC, 1 x BNC – anténní, 1 x T člen BNC, HDMI

Závěr

Nejprve byly naměřeny hodnoty objektivních parametrů pro tzv. fixed indoor příjem. Využívaly se tři modely přenosových kanálů a to AWGN, RC20 a RL20. Jednotlivé závislosti byly vyneseny do grafů. Při porovnání BER₁ (Obrázek 1) zaručuje nejlepší podmínky pro přenos TV signálu model kanálu AWGN. Hodnota C/N pro QEF příjem je dosažena pro $C/N \geq 10$ dB. Při použití kanálového modelu RC20 musíme pro QEF příjem hodnoty C/N zvýšit, a to o 1 dB. V případě užití kanálového modelu RL20 je dosaženo QEF příjmu při $C/N \geq 13$ dB. Následně i ze závislosti MER (Obrázek 3) můžeme konstatovat, že kanály AWGN a RC20 emulují tytéž podmínky pro přenos, jelikož se hodnoty MER liší maximálně o 1 dB. Podobně se projeví i LDPC iterace (Obrázek 4) závislé na C/N. Pro kanály AWGN a RC20 jsou křivky velmi podobné. Jednotlivé křivky opět připomínají exponenciální průběh. Od hodnoty cca $C/N \geq 20$ dB exponenciálně roste počet iterací pro všechny modely přenosových kanálů. Tvary RF spekter TV signálu pro přenosové kanály zobrazuje Obrázek 5, Obrázek 6 a Obrázek 7. Tabulka 3 srovnává teoretické a naměřené hodnoty pro QEF příjem. Jak můžeme vidět, výsledky dosažené z analyzátoru se od teoretického předpokladu liší maximálně o 1 dB. Ze srovnání jednotlivých STB vyplývá, že nejvíce se teoretickým hodnotám přiblížil STB 2 – Emos. Ostatní set-top boxy se však příliš neodlišují, proto jsou pro tento scénář vhodné všechny použité STB.

Další měření bylo provedeno pro přenosný příjem. Tentokrát se využívaly modely přenosových kanálů AWGN, PI12 a PO12. Pro referenční měření byl použit právě kanál AWGN, který vykazuje nejlepší přenosové podmínky pro šíření TV signálu. Pro měření samotného přenosného příjmu byly využity dva modely přenosových kanálů. Jeden určen pro venkovní přenos a druhý pro přenos uvnitř budov. Z výsledných grafických závislostí BER₁ a BER₂ (Obrázek 8 a Obrázek 9) je patrné, že přenosové kanály emulují velice podobné podmínky pro přenos, jelikož naměřené hodnoty se od sebe příliš

neodlišují. Pro kanál PO12 můžeme vyhodnotit QEF příjem při $C/N \geq 19,5$ dB. V případě kanálového modelu PI12 je QEF příjem dosažen při $C/N \geq 21,4$ dB. Můžeme tedy říci, že kanál pro venkovní příjem emuluje lepší přenosové podmínky, a to díky tomu, že ve venkovním prostředí nedochází k tolika odrazům od překážek jako uvnitř budov. Podobné výsledky jsou patrné i z grafických závislostí MER (Obrázek 10), na nichž je vidět, že model přenosového kanálu PO12 dosahuje při vyšším poměru C/N značně vyšších hodnot MER. V případě grafické závislosti počet iterací LDPC = $f(C/N)$ (Obrázek 11) je patrné, že vyšší počty iterací se v obou případech zvyšovaly až po snížení hodnot $C/N < 20$ dB. Tvary RF spekter TV signálu pro přenosové kanály zobrazuje Obrázek 12, Obrázek 13 a Obrázek 14.

Naměřené a teoretické hodnoty C/N pro QEF příjem uvádí Tabulka 6, pro kanál AWGN se odlišují od teoretického předpokladu maximálně o 2 dB. Pro modely kanálů PI12 a PO12 nejsou uvedeny teoretické předpoklady. Při porovnání jednotlivých STB a analyzátoru jsou naměřené poměry C/N velmi podobné. Přitom STB2 – Emos opět dosahoval nejlepších výsledků pro příjem TV signálu, avšak hodnoty zbylých STB se lišily maximálně o 2 dB.