



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIOENGINEERING

## LABORATORNÍ PRACOVIŠTĚ PRO MĚŘENÍ DVB-T2 MISO VYSÍLÁNÍ

LABORATORY WORKPLACE FOR MEASUREMENT OF DVB-T2 MISO BROADCASTING

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Vojtěch Bárta

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Ladislav Polák, Ph.D.

BRNO 2020

# Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Elektronika a komunikační technologie**

Ústav radioelektroniky

**Student:** Vojtěch Bárta

**ID:** 203188

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2019/20

## NÁZEV TÉMATU:

### Laboratorní pracoviště pro měření DVB-T2 MISO vysílání

#### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

V teoretické části práce prostudujte vlastnosti vysílacího a přijímacího řetězce standardu DVB-T2 pro zemské digitální vysílání druhé generace. Zaměřte se hlavně na diverzifní MISO vysílání. Na základě získaných teoretických znalostí navrhnete a realizujete kompletní laboratorní pracoviště pro vysílání a příjem TV signálu DVB-T2 využívající MISO konfiguraci. Navrhnete postup pro monitorování a vyhodnocení příjmů TV signálu.

V experimentální části práce provedte měření a analýzu DVB-T2 MISO signálu. Při měření uvažujte různé systémové parametry DVB-T2, přenosové scénáře a výkonové nevyvážení vysílačů. Výsledky laboratorních měření v rámci možností porovnejte s teoretickými předpoklady. Navrhnete laboratorní úlohu pro měření diverzifního příjmu TV signálu DVB-T2 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] POLAK, Ladislav, Ondrej KALLER a Tomas KRATOCHVIL. SISO/MISO performances in DVB-T2 and fixed TV channels. In: 2015 38th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP) [online]. IEEE, 2015, 2015, s. 768-771 [cit. 2019-05-08]. DOI: 10.1109/TSP.2015.7296369. ISBN 978-1-47-9-8498-5. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7296369/>

**Termín zadání:** 3.2.2020

**Termín odevzdání:** 4.6.2020

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

**prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.**  
předseda rady studijního programu

#### UPOZORNĚNÍ:

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

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce se zabývá měřením a analýzou DVB-T2 MISO vysílání. V teoretické části práce je popsán vysílací řetězec systému DVB-T2 na úrovni fyzické vrstvy. Pozornost je věnována pro oba SISO a MISO vysílací módy. V experimentální části práce je navrženo a realizováno vhodné měřicí pracoviště pro monitorování a analýzu DVB-T2 MISO vysílání v laboratorních podmínkách. Funkčnost navržené koncepce a zvolená měřicí metodika byla ověřena sadou experimentálních měření.

## **Klíčová slova**

DVB-T2, MISO, RF měření, BER, MER, výkonové nevyvážení, přenosové scénáře

## **Abstract**

This bachelor thesis deals with measurement and analysis of DVB-T2 MISO broadcasts. The theoretical part of the thesis describes the broadcasting chain of the DVB-T2 system at the level of the physical layers. Attention is paid to both SISO and MISO transmit modes. In the experimental part of the work is to design a measuring workplace for monitoring and analysis of DVB-T2 MISO transmission in laboratory conditions. The functionality of the proposed concept and chosen measuring methodology was verified by a set of experimental measurements.

## **Keywords**

DVB-T2, MISO, RF measurement, BER, MER, power imbalance, transmission scenarios

## **Bibliografická citace:**

BÁRTA, Vojtěch. *Laboratorní pracoviště pro měření DVB-T2 MISO vysílání* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-03]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/126090>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky. Vedoucí práce Ladislav Polák.

## **Prohlášení**

„Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci na téma Laboratorní pracoviště pro měření DVB-T2 MISO vysílání jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a 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:

.....  
podpis autora

## **Poděkování**

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

V Brně dne:

.....  
podpis autora

# OBSAH

Obsah .....	7
Seznam obrázků .....	9
Seznam Tabulek .....	11
Úvod .....	12
1. Standard DVB-T2 .....	13
1.1 Bitové prokládání, kódování a modulace .....	14
1.1.1 FEC kodér .....	14
1.1.2 Bitové prokládání .....	14
1.1.3 Mapování bitů do COFDM buněk .....	15
1.1.4 Rotovaná konstelace .....	16
1.1.5 Buňkové prokládání .....	17
1.1.6 Časové prokládání .....	17
1.2 Sestavení rámce DVB-T2 .....	18
1.3 Frekvenční prokládání .....	18
1.4 Generování COFDM symbolů .....	18
1.4.1 Rozptýlené nosné (SP) .....	19
1.4.2 Spojité nosné (CP) .....	21
1.4.3 Okrajové nosné (EP) .....	21
1.5 IFFT .....	21
1.6 PAPR redukce .....	21
1.7 Ochranný interval .....	22
1.8 Konfigurace systému .....	22
2. DVB-T2 MISO konfigurace .....	23
2.1 MISO podle Alamoutiho .....	23
2.2 Modifikované Alamoutiho kódování v DVB-T2 .....	24
2.3 Modifikace nosných pro MISO .....	27
2.3.1 Rozptýlené nosné .....	27
2.3.2 Spojité nosné .....	28
2.3.3 Okrajové nosné .....	29
3. Přenosové kanály .....	30

3.1	Dopplerův jev .....	30
3.2	Kanály bez Dopplerova posuvu .....	30
3.2.1	Pevný pozemní příjem .....	30
3.3	Kanály s Dopplerovým posuvem .....	31
3.3.1	Přenosný pozemní příjem .....	31
3.3.2	Mobilní přenosový příjem .....	31
4.	Laboratorní pracoviště pro měření DVB-T2 MISO vysílání .....	32
4.1	Měřicí přístroje .....	32
4.2	Postup zapojení .....	33
4.3	Postup nastavení R&S SFU a SFE .....	34
4.4	Měřené parametry .....	35
4.4.1	Bitová chybovost – BER .....	35
4.4.2	Modulační chybovost – MER .....	35
4.4.3	Odstup signálu od šumu – $C/N$ .....	35
5.	Laboratorní měření .....	36
5.1	Referenční měření – SISO vysílání .....	36
5.1.1	SISO vysílání – vyhodnocení měření .....	37
5.2	První scénář – MISO konfigurace, pevný příjem .....	39
5.2.1	Pevný příjem .....	39
5.2.2	Pevný příjem – výkonové nevyvážení vysílačů .....	43
5.3	Druhý scénář – MISO konfigurace, přenosný příjem .....	51
5.3.1	Přenosný příjem .....	51
5.3.2	Přenosný příjem – výkonové nevyvážení vysílačů .....	54
5.4	Třetí scénář – MISO konfigurace, mobilní příjem .....	58
5.4.1	Mobilní příjem .....	58
5.4.2	Mobilní příjem – výkonové nevyvážení vysílačů .....	61
5.5	Dosažené výsledky vs. stav poznání .....	65
6.	Závěr .....	66
	Literatura .....	67
	Seznam příloh .....	71
	Příloha 1: Návrh laboratorní úlohy .....	72
	Příloha 2: Vzorové vypracování laboratorní úlohy .....	79



# SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Zjednodušené blokové schéma standardu DVB-T2 (na základě [7]).....	13
Obr. 2 Blokové schéma BICM modulu (na základě [8]) .....	14
Obr. 3 FEC rámec DVB-T2 (na základě [7]).....	14
Obr. 4 Princip bitového prokládání FEC rámce (na základě [8]) .....	15
Obr. 5 Demultiplexování bitů do $N_{\text{sub}}$ větví (na základě [8]) .....	15
Obr. 6 Rotovaná a klasická konstelace s 16QAM modulací (na základě [11]) .....	16
Obr. 7 Vzor rozptýlených nosných PP1 – Single Input, Single Output (SISO) (na základě [8]) .....	20
Obr. 8 Ochranný interval GI (na základě [14]).....	22
Obr. 9 SISO konfigurace (na základě [2]) .....	22
Obr. 10 MISO konfigurace (na základě [2]).....	22
Obr. 11 Princip MISO podle Alamoutiho kódování (na základě [2]) .....	24
Obr. 12 Příjem MISO signálu v přijímači (na základě [2]) .....	24
Obr. 13 Modifikované Alamoutiho kódování (na základě [2]) .....	25
Obr. 14 Příjem signálů ze dvou vysílačů v SFN bez MISO konfigurace (na základě [2]) .....	26
Obr. 15 Příjem signálů ze dvou vysílačů v distribuovaném DVB-T2-MISO konfigurace (na základě [2]) .....	26
Obr. 16 Vzor rozptýlených nosných PP1 – MISO skupina 1 (na základě [7]).....	27
Obr. 17 Vzor rozptýlených nosných PP1 – MISO skupina 2 (na základě [7]).....	27
Obr. 18 Měřicí pracoviště pro měření DVB-T2 MISO signálu .....	32
Obr. 19 Nastavení SFU .....	34
Obr. 20 Nastavení SFE .....	34
Obr. 21 Měřené parametry – SISO vysílání.....	37
Obr. 22 První scénář – MISO konfigurace .....	39
Obr. 23 Měřené parametry – pevný příjem.....	40
Obr. 24 Konstelační diagramy 256QAM při $C/N = 30$ dB – pevný příjem.....	41
Obr. 25 RF spektra při $C/N = 30$ dB – pevný příjem.....	41
Obr. 26 Měřené parametry – výkonové nevyvážení vysílačů, AWGN kanál .....	44
Obr. 27 Konstelační diagramy 256QAM pro AWGN kanál při $C/N = 30$ dB – výkonové nevyvážení vysílačů .....	45

Obr. 28 RF spektrum pro AWGN kanál při $C/N = 30$ dB – výkonové nevyvážení vysílačů .....	45
Obr. 29 Měřené parametry – výkonové nevyvážení vysílačů, RC20 kanál.....	46
Obr. 30 Konstelační diagramy 256QAM pro RC20 kanál při $C/N = 30$ dB výkonové nevyvážení vysílačů .....	47
Obr. 31 RF spektrum pro RC20 kanál při $C/N = 30$ dB – výkonové nevyvážení vysílačů .....	47
Obr. 32 Měřené parametry – výkonové nevyvážení vysílačů, RL20 kanál.....	48
Obr. 33 Konstelační diagramy 256QAM pro RL20 kanál při $C/N = 30$ dB výkonové nevyvážení vysílačů .....	49
Obr. 34 RF spektrum pro RL20 kanál při $C/N = 30$ dB – výkonové nevyvážení vysílačů .....	49
Obr. 35 Přenosný příjem – MISO konfigurace .....	51
Obr. 36 Měřené parametry – přenosný příjem.....	52
Obr. 37 Konstelační diagramy 64QAM při $C/N = 30$ dB – přenosný příjem.....	53
Obr. 38 RF spektra při $C/N = 30$ dB – přenosný příjem.....	53
Obr. 39 Měřené parametry – přenosný příjem, výkonové nevyvážení vysílačů .....	55
Obr. 40 Konstelační diagramy 64QAM při $C/N = 30$ dB – výkonové nevyvážení vysílačů .....	56
Obr. 41 RF spektra při $C/N = 30$ dB – přenosný příjem, výkonové nevyvážení vysílačů .....	57
Obr. 42 Mobilní příjem – MISO konfigurace .....	58
Obr. 43 Měřené parametry – mobilní příjem .....	59
Obr. 44 Konstelační diagramy 16QAM při $C/N = 30$ dB – mobilní příjem.....	60
Obr. 45 RF spektra při $C/N = 30$ dB – mobilní příjem .....	60
Obr. 46 Měřené parametry – výkonové nevyvážení vysílačů, mobilní příjem.....	62
Obr. 47 Konstelační diagramy 16QAM při $C/N = 30$ dB – výkonové nevyvážení vysílačů .....	63
Obr. 48 RF spektra při $C/N = 30$ dB – mobilní příjem, výkonové nevyvážení vysílačů .....	64
Obr. 49 Srovnání hodnot $C/N$ pro QEF příjem pro výkonové nevyvážení $\Delta P_{TX2}$ ....	65

# SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Počet $N_{\text{sub}}$ v demultiplexeru (převzato z [8]).....	15
Tab. 2 Úhel natočení rotované konstelace v DVB-T2 [11] .....	17
Tab. 3 Parametry definující rozptýlené nosné (převzato z [8]) .....	19
Tab. 4 Amplitudy rozptýlených nosných (převzato z [8]).....	20
Tab. 5 Vzor rozptýlených nosných, který je použit pro každou povolenou kombinaci velikosti FFT a ochranného intervalu v módu SISO (na základě [8]) .....	20
Tab. 6 CP skupiny použité s jednotlivými OFDM módy [8].....	21
Tab. 7 Vzor rozptýlených nosných, který je použit pro každou povolenou kombinaci velikosti FFT a ochranného intervalu v MISO módu (na základě [7]).....	28
Tab. 8 Parametry hybridního slučovače TEROZ (dostupné z [32]).....	33
Tab. 9 Nastavené parametry – SISO vysílání .....	36
Tab. 10 Hodnoty $C/N$ potřebné pro dosažení QEF příjmu, SISO vysílání.....	38
Tab. 11 Nastavené parametry – pevný příjem .....	39
Tab. 12 Hodnoty $C/N$ potřebné pro dosažení QEF příjmu – pevný příjem .....	41
Tab. 13 Nastavené parametry – pevný příjem, výkonové nevyvážení vysílačů.....	43
Tab. 14 Hodnoty $C/N$ potřebné pro dosažení QEF příjmu při výkonovém nevyvážení vysílačů – AWGN kanál .....	45
Tab. 15 Hodnoty $C/N$ potřebné pro dosažení QEF příjmu při výkonovém nevyvážení vysílačů – RC20 kanál .....	47
Tab. 16 Hodnoty $C/N$ potřebné pro dosažení QEF příjmu při výkonovém nevyvážení vysílačů – RL20 kanál .....	49
Tab. 17 Nastavené parametry – přenosný příjem .....	51
Tab. 18 Hodnoty $C/N$ potřebné pro dosažení QEF příjmu – přenosný příjem .....	53
Tab. 19 Systémové parametry – přenosný příjem, výkonové nevyvážení vysílačů .	54
Tab. 20 Hodnoty $C/N$ potřebné pro dosažení QEF příjmu při výkonovém nevyvážení vysílačů – přenosný příjem .....	56
Tab. 21 Systémové parametry – mobilní příjem.....	58
Tab. 22 Hodnoty $C/N$ potřebné pro dosažení QEF příjmu – mobilní příjem .....	60
Tab. 23 Systémové parametry – mobilní příjem, výkonové nevyvážení vysílačů ...	61
Tab. 24 Hodnoty $C/N$ potřebné pro dosažení QEF příjmu při výkonovém nevyvážení vysílačů – mobilní příjem .....	63

# ÚVOD

Digital Video Broadcasting Project (DVB Project) je aliancí kolem 200 společností z celého světa [1]. Byla založena v roce 1993 za účelem vytvoření mezinárodního standardu pro digitální vysílání. Pojem DVB označuje sadu standardů, které jsou používány pro distribuci digitální TV. Zahrnuje digitální satelitní televizi (DVB-S), digitální kabelové televizi (DVB-C) a digitální pozemní televizi (DVB-T). Postupným vývojem došlo k zavedení jejich další generace DVB-S2/C2/T2 [1], [2].

Standard DVB-T řešil problém vyčerpání radiofrekvenčního (RF) spektra, požadavek na větší počet programů, kvalitu obrazu a zvuku. Stále rostoucí požadavky vedly k vyvinutí digitálního pozemního systému druhé generace s názvem DVB druhé generace – Digital Video Broadcasting – Second Generation Terrestrial (DVB-T2) [1]. DVB-T2 je nástupcem standardu DVB-T, ale není s ním zpětně kompatibilní. Poprvé byl zveřejněn v roce 2008 a v současnosti patří mezi nejpokročilejší pozemní televizní systémy v Evropské Unii (EU). V porovnání s DVB-T je flexibilnější a disponuje s pokročilým přenosovým řetězcem signálového zpracování signálu. Jednou z jeho výhod je zvýšení kapacity datového toku o více než 30 % za stejných přenosových podmínek oproti DVB-T. Větší kapacitu přenosu lze využít k zajištění většího televizního obsahu, ale také pro přenos služby vyšší kvality, např. v rozlišení High Definition Television (HDTV) a Ultra High Definition (UHD) [3].

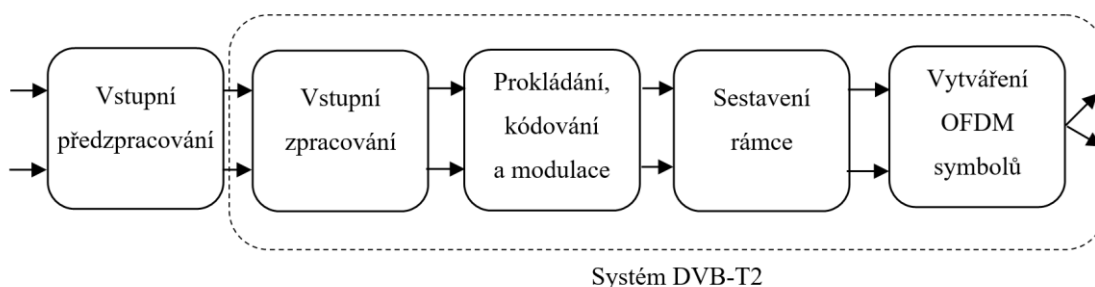
Cílem této práce je prozkoumat vlastnosti vysílacího a přijímacího řetězce standardu DVBT-T2 s hlavním zaměřením na diverzifikační Multiple Input, Single Output (MISO) vysílání. Dále navrhnout a realizovat kompletní laboratorní pracoviště pro vysílání a příjem TV signálu DVB-T2 využívající MISO konfiguraci. To bude následně sloužit pro měření a analýzu DVB-T2 MISO signálu v různých přenosových scénářích. A na závěr navrhnout laboratorní úlohu a vytvořit její vzorové vypracování.

Práce je členěna do 5 hlavních kapitol. V první kapitole je popsán standard DVB-T2. Další kapitola se detailně věnuje konfiguraci pro MISO v systému DVB-T2, což je jedna z nejperspektivnějších inovací ve standardu DVB-T2. Ve třetí kapitole jsou popsány typy přenosových kanálů. V následující kapitole je popis návrhu laboratorního měřicího pracoviště pro měření standardu DVB-T2 MISO konfigurace. Jsou zde popsány použité přístroje a měřené parametry, jež jsou ukazatelem kvality přijímaného signálu. V páté kapitole jsou prezentované a diskutované výsledky z laboratorních experimentálních měření. Následuje závěr a přílohy, které obsahují návrh a vzorové vypracování laboratorní úlohy pro měření DVB-T2 MISO vysílání.

# 1. STANDARD DVB-T2

Systém DVB-T2 byl standardizován v roce 2009. Norma ETSI EN 302 755 V1.1.1 popisuje základní přenosový systém druhé generace pro digitální zemské televizní vysílání. První řádné vysílání DVB-T2 bylo zahájeno ve Velké Británii v roce 2010. Mezi požadavky na DVB-T2 patří využití stávajících domácích antén DVB-T a přenosových sítí, navýšení přenosové kapacity minimálně o 30 %, rozšíření dosahu jedno-frekvenčních sítí (tzv. Single Frequency Network – SFN), podpora přenosných přijímačů a zavedení více vstupních datových toků [5].

U standardu DVB-T2 je ke komprimaci použit standard High Efficiency Video Coding (HEVC/H.265). V porovnání s předešlým standardem MPEG-4 AVC/H.264 umožňuje při zhruba polovičním datovém toku přenášet zvuk a obraz ve stejně kvalitě [6]. Zjednodušené blokové schéma DVB-T2 je znázorněné na Obr. 1.



Obr. 1 Zjednodušené blokové schéma standardu DVB-T2 (na základě [7])

Jednotka pro vstupní předzpracování (není přímo součástí systému DVB-T2) je určena pro mapování transportních toků (Transport Stream – TS) a jednoho nebo více obecných toků (Generic Stream – GS), které nemají fixní velikost paketu jako TS paket do základních vstupních datových toků systému. Jsou označovány jako fyzické vrstvy Physical Layer Pipes (PLPs).

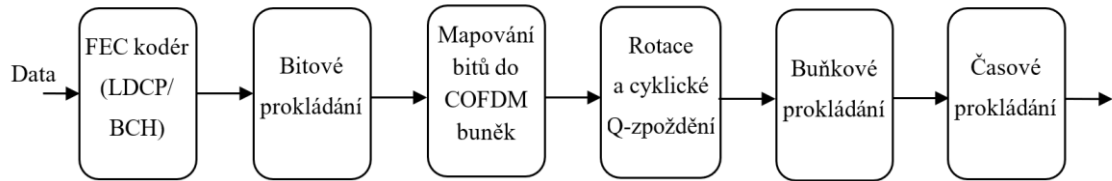
Počet PLP může teoreticky dosáhnout až 256 vrstev, které mohou být přenášeny současně a nezávisle na sobě pomocí systému DVB-T2. Každá jednotlivá vrstva může nést různý typ dat s odlišným kódováním, modulována rozdílnou metodou a přenášena různou bitovou rychlostí. Systém DVB-T2 se rozděluje na dva základní módy podle počtu vstupních PLP:

- Vstupní mód „A“: Pro vstupní TS je využit pouze jeden PLP.
- Vstupní mód „B“: Vstupní TS je rozdělen podle typu přenášených dat na několik PLP [5].

Bloková struktura vstupního zpracování jednoho PLP toku je rozdělena na dvě hlavní části: Přizpůsobení módu a přizpůsobení datového toku. V části přizpůsobení módu se vstupní datové toky zpracovávají a rozdělují do tzv. BB rámců (Base-Band frame), ke kterým přidává hlavičku. V druhé části dochází k vytváření kompletních BB rámců s konstantní délkou a na závěr se provede jeho znáhodnění [7]. Podrobnější popis struktury vstupního zpracování jednoho PLP toku lze najít v [5], [12].

## 1.1 Bitové prokládání, kódování a modulace

V této části práce bude podrobněji popsán blok „Bitové prokládání, kódování a modulace – Bit Interleaved Coding and Modulation (BICM).



Obr. 2 Blokové schéma BICM modulu (na základě [8])

### 1.1.1 FEC kodér

Dopředná chybová korekce (Forward Error Correction – FEC) má za cíl zabezpečení dat proti chybám, které mohou vzniknout během přenosu. V DVB-T2 se pro vnitřní kódování používá Low Density Parity Check (LDPC) a pro vnější kódování je aplikován Bose-Chaudhuri-Hocquenghem (BCH) [5]. Paritní bity zabezpečení BCH a LDPC se připojí za BB rámec a vznikne konečný FEC rámec [7]. Podrobnější popis je k nalezení v [5].



Obr. 3 FEC rámec DVB-T2 (na základě [7])

Podle způsobu kódování je rámec FEC rozdělen na dvě varianty. Dlouhý rámec má velikost 64 800 bitů a krátký rámec (používá se pro DVB-T2-Lite [12]) 16 200 bitů. Velikost dat závisí na zvoleném LDPC kódovém poměru. Pro dlouhý rámec se využívá poměry 1/2, 3/5, 2/3, 3/4, 4/5 a 5/6. Pro krátký rámec se používá 1/4, 1/2, 3/5, 2/3, 3/4, 4/5, 5/6. Podrobnější popis FEC kodéru lze najít v [5].

### 1.1.2 Bitové prokládání

Na výstupu kodéru LDPC musí být provedeno bitové prokládání. Bitové prokládání je složeno ze dvou nezávislých prokládání. První z nich je paritní prokládání a poté následuje bitové prokládání celého FEC rámce, princip je znázorněn na Obr. 4. Paritní prokládání je definováno vztahem [8]:

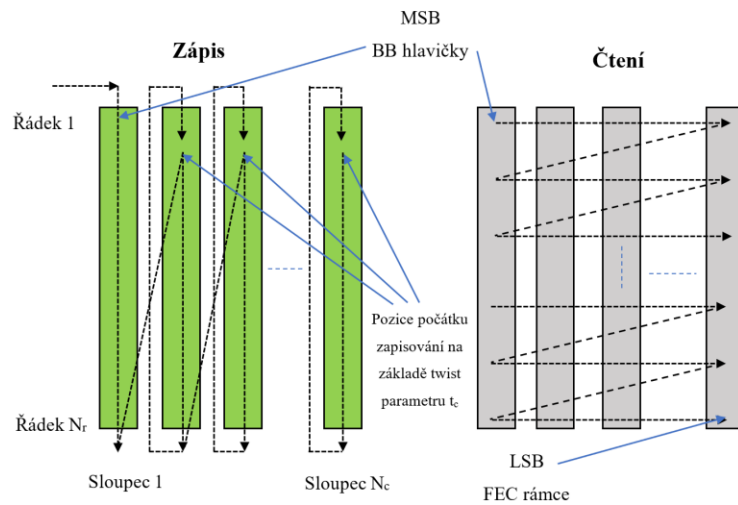
$$u_{k_{ldpc}} + 360t + s = \lambda_{k_{ldpc}} + Q_{ldpc} \cdot s + t \quad (1)$$

$$0 \leq s \leq 360; 0 \leq t \leq Q_{ldpc},$$

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

Výstupní data se zapisují do jednotlivých sloupců a čtení poté probíhá po řádcích. Při zapisování je počáteční pozice ve sloupci určena tzv. twist parametrem  $t_c$  [8]. Pouze

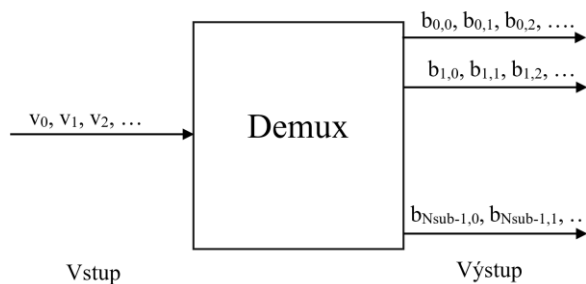
u modulace Quadrature Phase Shift Keying (QPSK) se prokládání nepoužívá. Zde se u LDPC poměrů 1/3 a 2/5 používá pouze prokládání paritních bitů [5]. Bitové prokládání je podrobněji popsáno v [5].



Obr. 4 Princip bitového prokládání FEC rámce (na základě [8])

### 1.1.3 Mapování bitů do COFDM buněk

Po bitovém prokládání je každý FEC rámec mapován do tzv. COFDM (Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing) buněk. Vstupní posloupnost bitů je zpočátku v demultiplexeru namapována do paralelních větví, tzv. buňkových slov (viz Obr. 5). Velikost těchto slov je určena parametrem  $N_{\text{sub}}$ , počet  $N_{\text{sub}}$  větví je uveden v Tab. 1. Následně jsou jednotlivé buňky mapovány do dané konstelace [7].



Obr. 5 Demultiplexování bitů do  $N_{\text{sub}}$  větví (na základě [8])

Tab. 1 Počet  $N_{\text{sub}}$  v demultiplexeru (převzato z [8])

Modulace	Délka LDPC bloku ( $N_{\text{ldpc}}$ )	Počet větví $N_{\text{sub}}$
QPSK	Vše	2
16QAM	Vše	8
64QAM	Vše	12
256QAM	64 800	16
	16 200	8

V případě QPSK ( $N_{\text{ldpc}} = 64\,800$  a  $16\,200$ ) a 256QAM ( $N_{\text{ldpc}} = 64\,800$ ) je velikost buněk  $N_{\text{MOD}} = N_{\text{sub}}$ . Mimo QPSK a 256QAM jsou buňky o velikosti  $N_{\text{sub}}$  rozděleny do dvou dílčích buněk o velikosti  $N_{\text{MOD}} = N_{\text{sub}}/2$  a jsou mapovány postupně do konstelačního diagramu. U modulací QPSK a 256QAM se naopak buňky mapují přímo do konstelačního diagramu a takto namapované buňky se nazývají COFDM [5]. Podrobněji je mapování buněk popsáno v [5].

### 1.1.4 Rotovaná konstelace

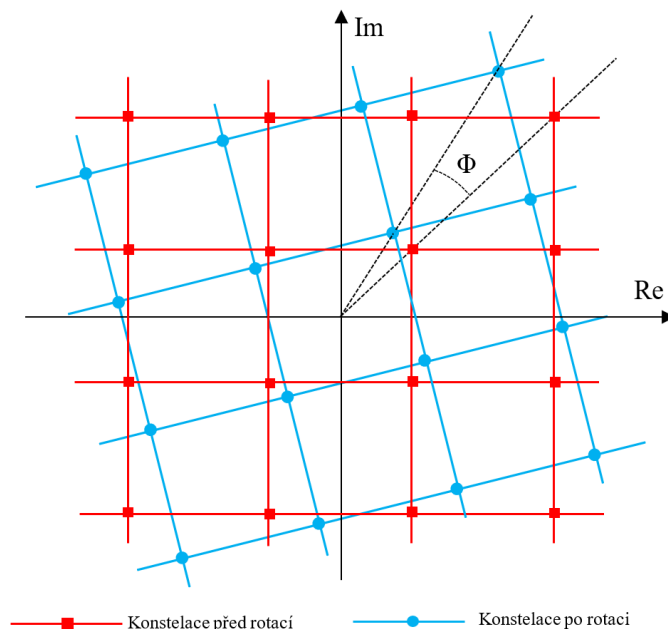
Standard DVB-T2 umožňuje použít i techniku tzv. rotované konstelace, která je jednou z hlavních inovací v systému DVB-T2.

V klasické nerotované konstelaci potřebuje přijímač jak soufázovou složku I (In-phase), tak kvadrurní složku Q (Quadrature). Pomocí těchto složek se identifikuje, jaké informace jsou přenášeny [10].

Při použití rotované konstelace je v komplexní rovině aplikován určitý úhel natočení konstelačního diagramu, pak má složka I a složka Q dostatek informací o tom, který ze symbolů byl přenesen. Na Obr. 13 je znázorněn rotovaný konstelační diagram modulace 16QAM [11].

Rotační konstelace přichází se zpožděním složky Q. Tím je způsobeno, že složky Q jsou posunuty do další COFDM buňky. Zásluhou kombinace rotované konstelace a Q zpoždění jsou nyní složky I a Q oddělené procesem prokládání, čímž může dojít k samostatnému přenosu I a Q složky na různých frekvencích, různých nosných a v různém čase [10].

Když dojde k poškození nebo k ovlivnění hlubokým selektivním únikem jedné z I/Q složek, tak druhá složka může být použita k obnovení informací. Výsledkem této techniky je zlepšení odolnosti signálu pro přenos informací v kanále s hlubokými úniky [11].



Obr. 6 Rotovaná a klasická konstelace s 16QAM modulací (na základě [11])



Dalším parametrem u rotované konstelace je úhel natočení  $\Phi$ . Úhel závisí na zvolené modulaci a typu přenosového kanálu, nicméně ve standardu DVB-T2 byl úhel natočení vybrán nezávisle na použitém přenosovém kanálu. V Tab. 2 jsou shrnuté hodnoty úhlů pro jednotlivé modulace. Ačkoliv jsou tyto úhly pouze optimální pro konkrétní typ modulace, vždy představují zlepšení oproti nerotované konstelaci [11].

Tab. 2 Úhel natočení rotované konstelace v DVB-T2 [11]

Modulace	Úhel natočení $\Phi$ [°]
<b>QPSK</b>	29
<b>16QAM</b>	16,8
<b>64QAM</b>	8,6
<b>256QAM</b>	atan (1/16)

### 1.1.5 Buňkové prokládání

Pseudo náhodný buňkový prokladač (Cell Interleaver – CI) slouží k rovnoměrnému šíření COFDM buněk v FEC bloku, což vede k zajištění nekorelovaného rozdělení zkreslení kanálu v přijímači, vylepšení spektra signálu a zabezpečení proti shlukovým chybám. Výstupem CI je vektor definován vztahem [5], [8]:

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

kde  $N_{cells}$  je počet výstupních datových buněk v jednom FEC bloku a  $L_r(q)$  je permutační funkce aplikována na FEC blok  $r$  určitého časového prokladače (Time Interleaver – TI). Permutační funkce je vyjádřena vztahem [8]:

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

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

### 1.1.6 Časové prokládání

Bloky FEC z buňkového prokládání se shromažďují do jednotlivých prokládacích rámců (Interleaving Frame – IF), které se mapují do jednoho nebo více T2 rámců. V každém IF rámcu může být dynamicky proměnný počet FEC bloků. Jejich počet se může pohybovat od minimální hodnoty 0 až do maximální hodnoty 1 023, tudíž maximální počet FEC bloků na IF rámec je 1 024.

Existují 3 způsoby časového prokládání pro každý PLP signál. První možností je, že každý IF rámec obsahuje jeden blok TI a je mapován do jednoho T2 rámcu, druhou možností je, že IF rámec obsahuje jeden blok TI a je mapován do více než jednoho T2 rámcu. Poslední možností je, že každý IF rámec je mapován přímo na jeden T2 rámec a IF rámec je rozdělen do několika TI bloků a každý může být využit až do plné paměti TI bloku, čímž se zvyšuje maximální bitová rychlost pro PLP [8]. Podrobnější popis a obrázky jednotlivých způsobů časového prokládání lze nalézt v [5], [11].

## 1.2 Sestavení rámce DVB-T2

Jeho úkolem je složit časově proložené COFDM buňky z každé vrstvy PLP a buňky, které nesou data L1 signalizace. Složí je do aktivních polí buněk každého COFDM symbolu. Tímto dochází k vytvoření celkové struktury rámce. Nejvyšší jednotkou je tzv. Super rámec, ten se dále dělí na T2 rámce, jejichž maximální délka trvání je 250 ms, a ty se dále dělí na jednotlivé COFDM symboly [5], [9].

Future Extension Frame (FEF) je blok, který může být součástí Super rámce a slouží pro další rozšíření služeb, např. TV vysílání ve standardu DVB-T2-lite [12]. Použití FEF bloku je volitelné [9].

T2 rámec je složen z P1 symbolu, jednoho či více symbolů P2 a z datových symbolů COFDM [5]. Podrobnější popis lze nalézt v [5], [12].

## 1.3 Frekvenční prokládání

Cílem frekvenčního prokladače je proložení COFDM buněk uvnitř každého COFDM symbolu. Tyto buňky mapuje do datových nosných každého COFDM symbolu. K tomu je použit prokládací vektor  $x_{m,l} = (x_{m,l,0}, x_{m,l,1}, \dots, x_{m,l,N_{data}-1})$ . Pro OFDM mód 32K je definován takto [8], [12]:

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

Pro ostatní módy (1K, 2K, 4K, 16K) platí [9]:

$$\begin{aligned} a_{m,l,p} &= x_{m,l,H0(p)} \text{ pro sudé symboly,} \\ a_{m,l,p} &= x_{m,l,H1(p)} \text{ pro liché symboly,} \end{aligned} \quad (5)$$

kde  $m$  je index T2 rámce,  $l$  je index COFDM symbolu,  $p$  je index datové nosné v COFDM symbolu,  $x_{m,l,p}$  je datová buňka vstupující do frekvenčního prokladače,  $H(p)$ ,  $H_0(p)$  a  $H_1(p)$  jsou permutační funkce založené na sekvenci  $R_i$  a pro každý OFDM mód jsou jiné [7]. Podrobnější popis permutační funkce je možné najít v [8].

## 1.4 Generování COFDM symbolů

Z důvodu mnohacestného šíření signálu, který je způsoben odrazy od překážek (např. budov), může docházet k tzv. mezisymbolovým interferencím (Inter Symbol Interference – ISI) [5], [13]. Proto byla vybrána modulační metoda COFDM. Tato metoda má dobrou spektrální účinnost a je odolná proti mnohacestnému šíření [5]. Základním principem je, že je využit velký počet nosných vln a jednotlivé nosné jsou po celé šířce pásma rozdělené ortogonálně, tzn. maximum každé nosné se překrývá s minimem ostatních. Z frekvenčního prostoru jsou symboly převedeny do časového prostoru pomocí inverzní rychlé Fourierovy transformace (Inverse Fast Fourier Transform – IFFT) [2], [13].

Aktivní nosné obsahují datové nosné, na ně se modulují užitečná data, a pilotní nosné. Pilotní nosné se dělí na rozptýlené nosné (Scattered Pilots – SP), spojité nosné (Continual Pilots – CP), okrajové nosné (Edge Pilots – EP), P2 nosné nebo nosné ukončující rámec (Frame-Closing Pilots – FCP). Nosné mohou být použity pro synchronizaci rámce,

frekvenční synchronizaci, časovou synchronizaci, odhad kanálu, identifikaci přenosového režimu a také mohou být použity pro sledování fázového šumu [5]. Podrobnější popis nosných bude v následujících podkapitolách.

### 1.4.1 Rozptýlené nosné (SP)

Rozptýlené nosné se používají pro odhad kmitočtové charakteristiky přenosového kanálu. Nemají stálou pozici, takže jsou rozptýlené přes celé spektrum. U systému DVB-T2 existuje až osm variant rozložení nosných, tzv. Pilot Pattern (PP). Varianta PP1 má nejhustší rozložení a varianta PP8 naopak nejřidší rozložení pilotních nosných [5]. K tomu, aby se nosná  $k$  stala rozptýlenou musí splňovat tuto podmínku [8]:

$$\begin{aligned} k \cdot \text{mod}(D_x \cdot D_y) &= D_x \cdot (l \cdot \text{mod}(D_y)), \\ k &= [K_{min}; K_{max}], l = [N_{p2}; L_f - 1], \end{aligned} \quad (6)$$

kde  $K_{min}$  je první aktivní subnosnou,  $K_{max}$  je poslední aktivní subnosnou,  $N_{p2}$  je počet P2 symbolů v T2 rámci,  $L_f$  je celkový počet symbolů, parametry  $D_x$  a  $D_y$  jsou definovány v Tab. 3.

Tab. 3 Parametry definující rozptýlené nosné (převzato z [8])

Pilotní vzor	Oddělení pilotních nosných – $D_x$	Počet symbolů tvořících jeden vzor – $D_y$
PP1	3	4
PP2	6	2
PP3	6	4
PP4	12	2
PP5	12	4
PP6	24	2
PP7	24	4
PP8	6	16

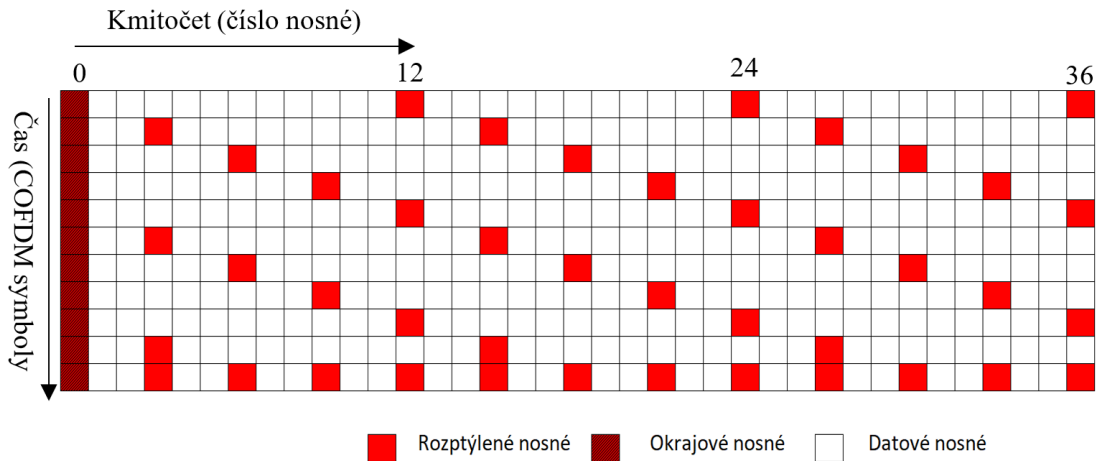
Hodnota modulace jednotlivých rozptýlených nosných je dána vztahem [7]:

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

kde  $A_{SP}$  je amplituda (definována v Tab. 4),  $c$  je výsledná hodnota pilotní nosné,  $m$  je index rámce,  $l$  je index symbolu,  $k$  je index nosné a  $r$  je referenční sekvence.

Tab. 4 Amplitudy rozptýlených nosných (převzato z [8])

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



Obr. 7 Vzor rozptýlených nosných PP1 – Single Input, Single Output (SISO) (na základě [8])

Tab. 5 Vzor rozptýlených nosných, který je použit pro každou povolenou kombinaci velikosti FFT a ochranného intervalu v módu SISO (na základě [8])

Velikost FFT	Ochranný interval						
	1/128	1/32	1/16	19/256	1/8	19/128	1/4
32K	PP7	PP4 PP6	PP2 PP8 PP4	PP2 PP8 PP4	PP2 PP8	PP2 PP8	n/a
16K	PP7	PP7 PP4 PP6	PP2 PP8 PP4 PP5	PP2 PP8 PP4 PP5	PP2 PP3 PP8	PP2 PP3 PP8	PP1 PP8
8K	PP7	PP7 PP4	PP8 PP4 PP5	PP8 PP4 PP5	PP2 PP3 PP8	PP2 PP3 PP8	PP1 PP8
4K, 2K	n/a	PP7 PP4	PP4 PP5	n/a	PP2 PP3	n/a	PP1
1K	n/a	n/a	PP4 PP5	n/a	PP2 PP3	n/a	PP1

## 1.4.2 Spojité nosné (CP)

CP jsou používány pro časovou a frekvenční synchronizaci. Spojité nosné jsou vkládány do každého symbolu, výjimku tvoří symboly P1 a P2 a symbol uzavírající rámec. Od typu použitého módu OFDM se odvíjí pozice a počet spojitých nosných [7]. CP skupiny pro módy OFDM jsou v Tab. 6.

Tab. 6 CP skupiny použité s jednotlivými OFDM módy [8]

OFDM mód	CP skupiny	$K_{\text{mod}}$
1K	CP <sub>1</sub>	1 632
2K	CP <sub>1</sub> CP <sub>2</sub>	1 632
4K	CP <sub>1</sub> CP <sub>2</sub> CP <sub>3</sub>	3 264
8K	CP <sub>1</sub> CP <sub>2</sub> CP <sub>3</sub> CP <sub>4</sub>	6 528
16K	CP <sub>1</sub> CP <sub>2</sub> CP <sub>3</sub> CP <sub>4</sub> CP <sub>5</sub>	13 056
32K	CP <sub>1</sub> CP <sub>2</sub> CP <sub>3</sub> CP <sub>4</sub> CP <sub>5</sub> CP <sub>6</sub>	NA

## 1.4.3 Okrajové nosné (EP)

EP jsou vloženy na okrajích aktivních nosných a jsou v každém symbolu, vyjma P1 a P2 symbolů. Mají za úkol doplňovat rozptýlené nosné, aby byla umožněna frekvenční interpolace až po okraj spektra [5], [8].

## 1.5 IFFT

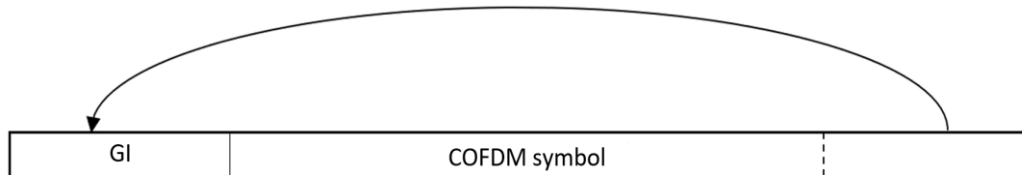
Po přidání pilotních nosných jsou zkompletovány COFDM symboly. Všechny tyto procesy jsou prováděny ve frekvenční oblasti, avšak pro finální zpracování signálu je potřeba vše převést do časové oblasti. K tomu je použita rychlá inverzní Fourierova transformace, která je aplikována na každý symbol COFDM [14]. Podrobnější popis IFFT je možné najít v [5].

## 1.6 PAPR redukce

Peak-to-Average-Power-Ratio (PAPR) udává poměr špičkového a středního výkonu. PAPR je nežádoucí u výkonových koncových zesilovačů, které aby dosáhly vysoké účinnosti pracují v pásmu nelineární části převodní charakteristiky. Ve standardu DVB-T2 jsou umožněny dva způsoby redukce. U Active Constellation Extension (ACE) se redukce provádí přidáním vnějších konstelačních bodů ve frekvenční oblasti. Tato metoda nelze použít v případě, kdy je použita rotovaná konstelace. Druhým způsobem je Tone Reservation (TR), zde se redukce PAPR provádí pomocí přímého ořezání špiček signálu v časové oblasti [5], [8].

## 1.7 Ochranný interval

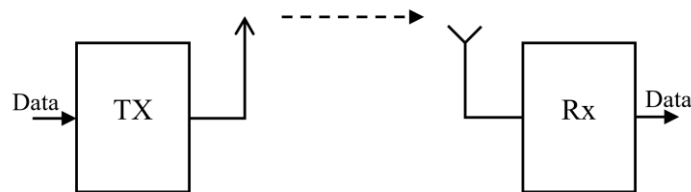
Kvůli odrazům vlny od objektů (budov) se signál dostává k přijímači nepřímými cestami, tudíž ortogonalita mezi nosiči již není splněna, což vede k ISI. Aby se zamezilo vzájemnému ovlivňování jednotlivých COFDM symbolů, je vložen mezi přenos každého symbolu tzv. ochranný interval (Guard Interval – GI). Účelem vložení GI je zavedení odolnosti proti šíření zpoždění, souvisejících odrazů a ozvěny. Koncová část každého symbolu se zkopíruje na začátek symbolu, viz Obr. 8 [14].



Obr. 8 Ochranný interval GI (na základě [14])

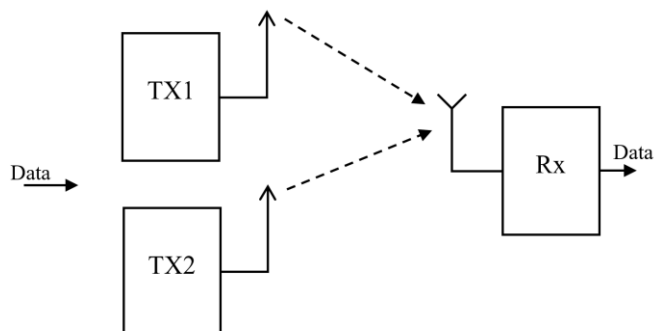
## 1.8 Konfigurace systému

Ve standardu DVB-T2 je možné použít různé přenosové módy. Mezi ně patří základní konfigurace Single Input, Single Output (SISO). V této konfiguraci je RF signál vysílán jedním vysílačem a přijímán jedním přijímačem [2].



Obr. 9 SISO konfigurace (na základě [2])

Další možností je konfigurace MISO. Zde vysílání probíhá minimálně ze dvou vysílačů, přičemž prvním vysílačem jsou vysílána stejná data jako při konfiguraci SISO. Druhý vysílač, pracující na stejném kmitočtu, vysílá komplexně sdružená data, která jsou kódována pomocí Alamoutiho kódování, s invertovanými rozptýlenými pilotními nosnými. Nevýhodou MISO konfigurace je potřeba dvojnásobného množství rozptýlených pilotních nosných [2].



Obr. 10 MISO konfigurace (na základě [2])

## 2. DVB-T2 MISO KONFIGURACE

V místě příjmu signálů nejméně ze dvou vysílačů (s podobnou intenzitou polí) často dochází k degeneraci přijímaného signálu, což vede k tzv. hlubokým únikům. Nejnáchylnější je k tomu mobilní (přijímač se pohybuje poměrně vysokou rychlostí) a přenosný (přijímač se pohybuje nižší rychlostí) scénář [15].

Jednou z nejperspektivnějších inovací ve standardu DVB-T2 je technika vícenásobného vstupu s jedním výstupem (Multiple Input, Single Output – MISO). To znamená, že jsou použity minimálně dvě vysílací antény, které nešíří stejný vysílaný signál [16]. Vysílače vysílají na stejném kmitočtu, signál druhého vysílače je mírně modifikován. Využívá se Alamoutiho kódování, což způsobuje, že vysílače se navzájem nebudou rušit, zatímco v SISO konfiguraci je při použití dvou vysílačů značné vzájemné rušení. Nevýhodou je, že je zapotřebí dvojnásobné hustoty rozptýlených pilotních nosných [15]. Technikou MISO lze ve standardu DVB-T2 potlačit výše zmíněné úniky.

Ve srovnání se základní konfigurací jednoho vstupu a jednoho výstupu (Single Input, Single Output – SISO) může technika MISO redukovat destruktivní interference a zlepšovat pokrytí jednofrekvenčních sítí SFN [16].

### 2.1 MISO podle Alamoutiho

Alamoutiho kód je nejjednodušším časoprostorovým blokovým kódem. V základní formě se předpokládá použití 2 vysílacích antén (označených jako TX1, TX2) a 1 přijímací antény (RX).

Vstupní modulované signály  $s_1$  a  $s_2$  jsou mapovány do dvou vysílacích antén TX1 a TX2 pomocí Alamoutiho matice:

$$\begin{bmatrix} s_1 & -s_2^* \\ s_2 & s_1^* \end{bmatrix} \quad (8)$$

kde symbol \* označuje komplexní sdruženost. Řádky matice reprezentují buňky vysílané v jednotlivých anténách, sloupce reprezentují 2 po sobě jdoucí časové intervaly. Například vysílací anténou TX1 je nejprve poslán symbol  $s_1$  a v intervalu, který poté následuje, je poslán symbol  $-s_2^*$  [17]. To umožní přijímači znovu oddělit dva sousední symboly pomocí matematických operací [2].

Důležitou vlastností Alamoutiho kódu je jeho ortogonalita. Skalární součin 1. řádku a 2. řádku matice je roven nule:

$$(s_1, -s_2^*) \cdot (s_2, s_1^*) = 0, \quad (9)$$

protože:

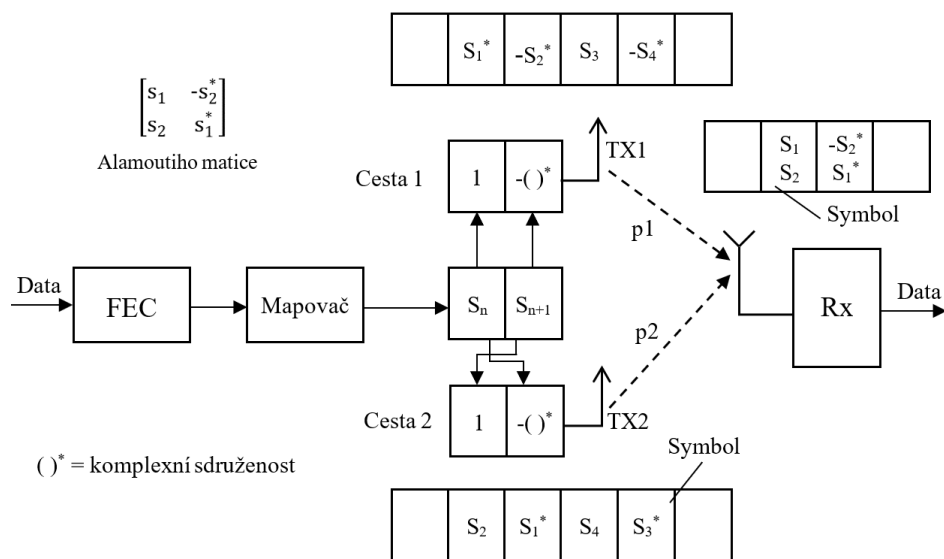
$$s_1 s_2^* - s_2^* s_1 = 0. \quad (10)$$

Přijatý signál v 1. intervalu je:

$$r_1 = p_1 s_1 + p_2 s_2 + n_1, \quad (11)$$

kde  $p_1$  je přenos mezi TX1 a RX,  $p_2$  je přenos mezi TX2 a RX a  $n_1$  představuje aditivní šum. Analogicky pro signál v 2. intervalu:

$$r_2 = -p_1 s_2^* + p_2 s_1^* + n_2. \quad (12)$$



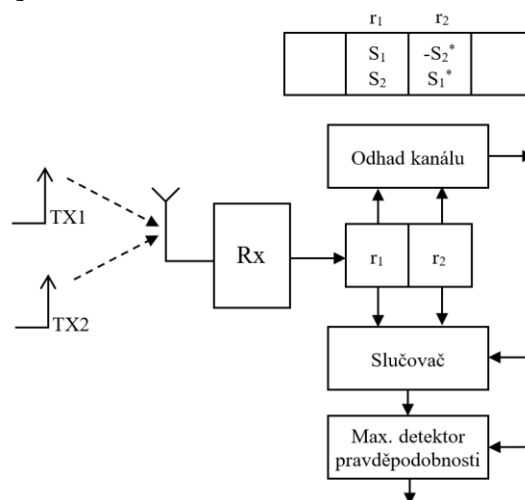
Obr. 11 Princip MISO podle Alamoutiho kódování (na základě [2])

## 2.2 Modifikované Alamoutiho kódování v DVB-T2

Standard DVB-T2 využívá modifikované Alamoutiho kódování. Na anténě TX1, buňky  $c_1, c_2, c_3, c_4, \dots$  jsou nezměněny, ale na anténě TX2 jsou buňky pozměněné, viz Obr. 13. To má tu výhodu, že systém DVB-T2 lze snadno redukovat na SISO pouhým vynecháním druhé přenosové cesty [2]. Modifikovaná Alamoutiho matice:

$$\begin{bmatrix} c_1 & c_2 \\ c_2^* & -c_1^* \end{bmatrix} \quad (13)$$

Musí být známa funkce přenosu kanálu z vysílací antény TX1 a TX2 do přijímače RX, tj. je nutné provést odhad kanálu na všech vysílacích a přijímacích cestách [2]. Odhad kanálu se provádí na párech buněk dvou sousedních pomocných nosných. To znamená, že MISO konfigurace bude nejlépe fungovat, pokud budou mít tyto sousední pomocné nosné podobné úniky [18].



Obr. 12 Příjem MISO signálu v přijímači (na základě [2])



## Zpracování MISO signálu v přijímači (na základě [2]):

Alamoutiho matice:

$$\begin{bmatrix} s_1 & -s_2^* \\ s_2 & s_1^* \end{bmatrix} \quad (8)$$

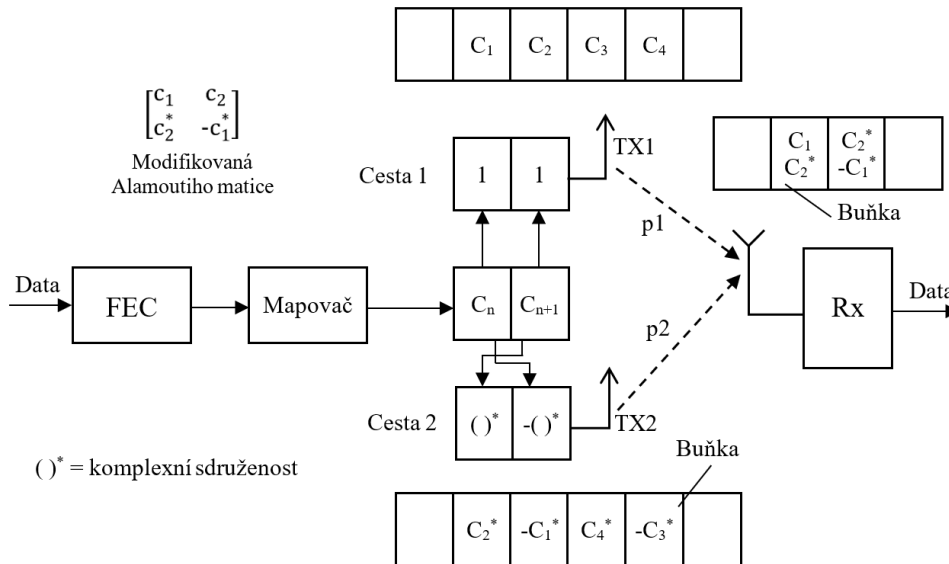
kde 1. řádek matice je cesta<sub>1</sub>, druhý řádek matice je cesta<sub>2</sub>, první sloupec je časový interval t<sub>1</sub> a druhý sloupec je časový interval t<sub>2</sub>.

Přijaté symboly:

$$\begin{aligned} r_1 &= s_1 + s_2 \\ r_2 &= -s_2 + s_1 \end{aligned} \quad (14)$$

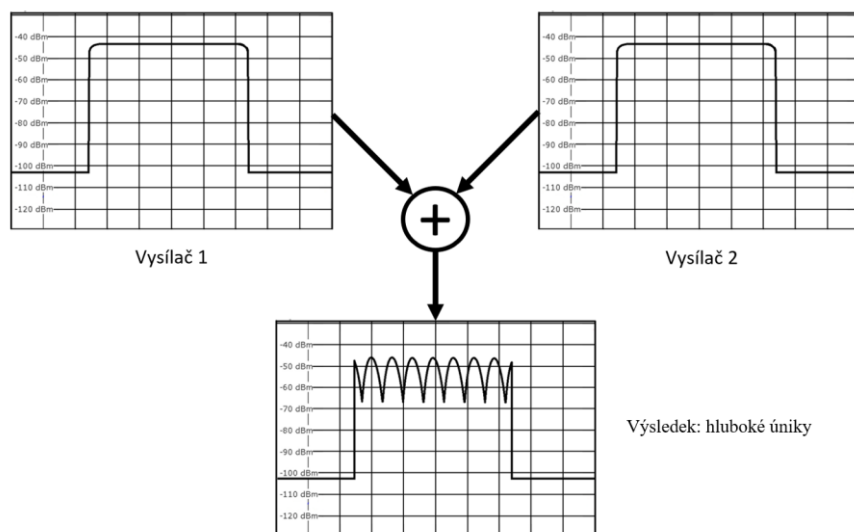
Slučovací pravidlo v přijímači:

$$\begin{aligned} s_1 &\cong r_1 + r_2^* = (s_1 + s_2) + (-s_2^* + s_1^*)^* = s_1 + s_1 = 2s_1; \\ s_2 &\cong r_1 - r_2^* = (s_1 + s_2) - (-s_2^* + s_1^*)^* = s_2 + s_2 = 2s_2; \end{aligned} \quad (15)$$

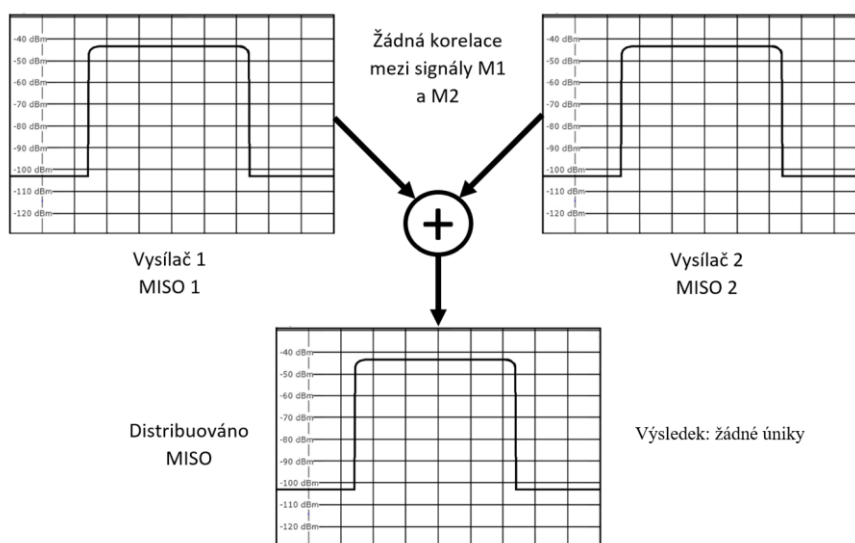


Obr. 13 Modifikované Alamoutiho kódování (na základě [2])

V případě DVB-T2 využívající MISO konfiguraci se nepoužívá časoprostorové diverzity, ale prostorově frekvenční diverzity (na základě sousedních buněk ve spektru), tzn. při přenosu z antény TX2, jsou sousední páry nosičů vysílány pozměněné ve srovnání s těmi vysílanými na anténě TX1. Velkou výhodou tohoto modifikovaného Alamoutiho kódování v DVB-T2 je to, že signály z vysílací antény TX1 a TX2 již nejsou korelované. To umožňuje vyhnout se únikům převládajícím v DVB-T2, především při použití distribuovaného MISO v SFN, viz Obr. 15 [2].



Obr. 14 Příjem signálů ze dvou vysílačů v SFN bez MISO konfigurace (na základě [2])



Obr. 15 Příjem signálů ze dvou vysílačů v distribuovaném DVB-T2-MISO konfigurace (na základě [2])

## 2.3 Modifikace nosných pro MISO

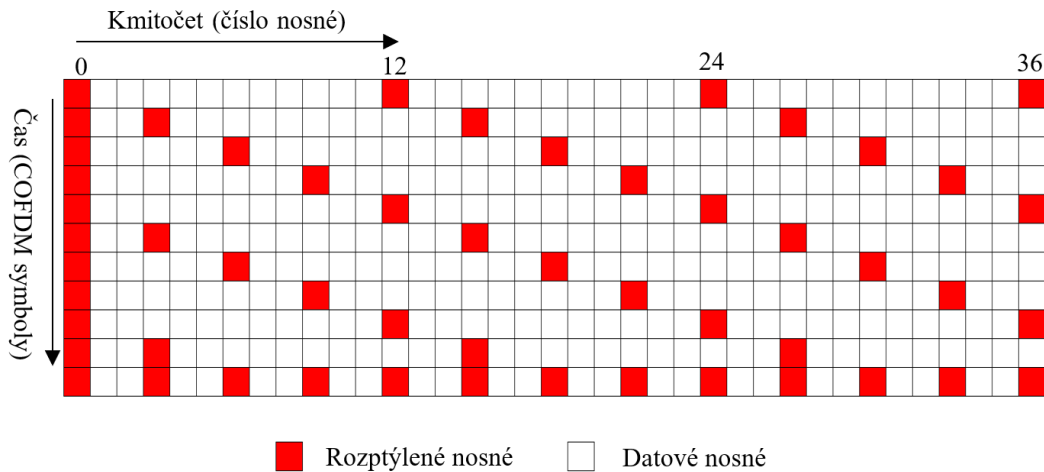
V režimu MISO jsou nosné modifikovány v signálu vysílaném z jakéhokoli vysílače v MISO skupina 2. Umístění a amplitudy nosných je pro vysílače z MISO skupina 1 i MISO skupina 2 stejné jako v režimu SISO [9]. Jednou z hlavních funkcí nosné v tomto systému je, že má provést odhad kanálu, jedná se zejména o rozptýlené nosné [19].

### 2.3.1 Rozptýlené nosné

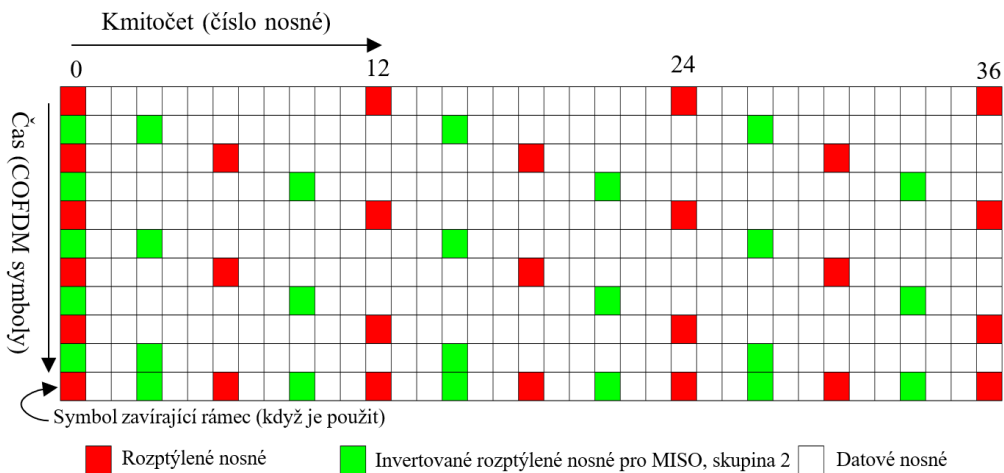
Ve srovnání s MISO skupina 1 jsou rozptýlené nosné z vysílačů v MISO skupina 2 invertovány na alternativní nosiče s rozptýlenými nosnými [9].

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}\{c_{m,l,k}\} &= 2(-1)^{k/D_x} A_{SP} \left(\frac{1}{2} - r_{l,k}\right), \\ \operatorname{Im}\{c_{m,l,k}\} &= 0, \end{aligned} \quad (16)$$

kde  $A_{SP}$  je amplituda,  $c$  je výsledná hodnota pilotní nosné,  $m$  je index rámcce,  $l$  je index symbolu,  $k$  je index nosné a  $r$  je referenční sekvence.



Obr. 16 Vzor rozptýlených nosných PP1 – MISO skupina 1 (na základě [7])



Obr. 17 Vzor rozptýlených nosných PP1 – MISO skupina 2 (na základě [7])

Tab. 7 Vzor rozptýlených nosných, který je použit pro každou povolenou kombinaci velikosti FFT a ochranného intervalu v MISO módu (na základě [7])

Velikost FFT	Ochranný interval						
	1/128	1/32	1/16	19/256	1/8	19/128	1/4
<b>32K</b>	PP8 PP4 PP6	PP8 PP4	PP2 PP8	PP2 PP8	n/a	n/a	n/a
<b>16K</b>	PP8 PP4 PP5	PP8 PP4 PP5	PP3 PP8	PP3 PP8	PP1 PP8	PP1 PP8	n/a
<b>8K</b>	PP8 PP4 PP5	PP8 PP4 PP5	PP3 PP8	PP3 PP8	PP1 PP8	PP1 PP8	n/a
<b>4K, 2K</b>	n/a	PP4 PP5	PP3	n/a	PP1	n/a	n/a
<b>1K</b>	n/a	n/a	PP1	n/a	PP1	n/a	n/a

V porovnání se SISO módem (viz Tab. 5) lze vidět, že MISO mód má oproti SISO módu více zakázaných ochranných intervalů, které lze použít. U ochranného intervalu 1/128 má MISO mód více možností použití rozptýlených nosných, ale u ostatních ochranných intervalů má SISO mód více možností použití rozptýlených nosných.

V režimu MISO není možné použít ochranný interval 1/4. Proto ve velkých SFN sítích je MISO proveditelné pouze pokud je použit FFT mód vyšší než 8K [18].

### 2.3.2 Spojité nosné

Spojité nosné z vysílačů MISO skupina 2, dopadající na nosiče s rozptýlenou nosnou, jsou ve srovnání s MISO skupina 1, invertovány na nosiče, pro které jsou rozptýlené nosné invertovány. Spojité nosné na nosičích bez rozptýlených nosných nejsou invertovány [9].

$$\operatorname{Re}\{c_{m,l,k}\} = \begin{cases} 2(-1)^{\frac{k}{D_x}} A_{CP} \left(\frac{1}{2} - r_{l,k}\right) & k \bmod D_x = 0 \\ 2A_{CP} \left(\frac{1}{2} - r_{l,k}\right) & \text{v opačném} \\ & \text{případě} \end{cases}$$

$$\operatorname{Im}\{c_{m,l,k}\} = 0, \quad (17)$$

kde  $A_{CP}$  je amplituda,  $c$  je výsledná hodnota pilotní nosné,  $m$  je index rámce,  $l$  je index symbolu,  $k$  je index nosné a  $r$  je referenční sekvence.

### 2.3.3 Okrajové nosné

Okrajové nosné z vysílačů MISO skupina 2 jsou invertovány ve srovnání s MISO skupina 1 na lichých OFDM symbolech [8].

$$\begin{aligned}\operatorname{Re}\{c_{m,l,k}\} &= 2(-1)^l A_{SP} \left(\frac{1}{2} - r_{l,k}\right), \\ \operatorname{Im}\{c_{m,l,k}\} &= 0,\end{aligned}\tag{18}$$

kde  $A_{SP}$  je amplituda,  $c$  je výsledná hodnota pilotní nosné,  $m$  je index rámce,  $l$  je index symbolu,  $k$  je index nosné a  $r$  je referenční sekvence.

Umístění a amplitudy nosných v MISO jsou stejné jako v režimu SISO pro vysílače z obou MISO skupin, ale jsou také přidány další nosné P2 [7].

## 3. PŘENOSOVÉ KANÁLY

Pozemní televizní vysílání je provozováno na frekvencích v rozmezí od 470 MHz do 694 MHz, což je pásmo Ultra krátkých vln (Ultra High Frequency – UHF) [20].

Přenosové kanály se podle přenosového scénáře dělí na pevný příjem (fixed reception), přenosný příjem (portable reception) a mobilní příjem (mobile reception). V případě pohybu přijímače dochází navíc k tzv. Dopplerovu jevu [21].

### 3.1 Dopplerův jev

V případě pohybu přijímače od vysílače dojde k Dopplerovu posuvu kmitočtu. Je závislý na rychlosti pohybu přijímače a může být kompenzován automatickým doladováním kmitočtu (Automatic Frequency Correction – AFC) [5].

### 3.2 Kanály bez Dopplerova posuvu

#### 3.2.1 Pevný pozemní příjem

Charakteristickým znakem je neměnná poloha přijímače. Přenosová cesta je vymezena pomocí modelů přenosových kanálů [5].

##### 3.2.1.1 Gaussův kanál (AWGN)

V tomto modelu se signál mezi vysílačem a přijímačem šíří pouze jednou přímou cestou bez jakýchkoliv odrazů. Signál je pouze zašuměn aditivním Gaussovským šumem (Additive White Gaussian Noise – AWGN). Gaussův kanál představuje nejlepší podmínky pro příjem signálu [23].

##### 3.2.1.2 Riceův kanál (RC20)

Vychází z Gaussova přenosového kanálu, ale v tomto typu přenosového kanálu se navíc počítá s případnými odrazy, např. od budov. Tento případ je v praxi nejrozšířenější. Odrazy mají za následek vznik ISI, což vede k poklesu kvality signálu [23]. Tento model je označován RC20. Je tvořen jednou přímou a 20 nepřímými cestami. Parametry přenosového kanálu lze nalézt v [24]. Podrobnější popis RC20 kanálu lze nalézt v [5].

##### 3.2.1.3 Rayleighův kanál (RL20)

Pro simulace situace, kdy je zhoršena přímá viditelnost mezi vysílačem a přijímačem, se používá Rayleighův kanál. Tento kanál obsahuje pouze odražené signály, příjem je uskutečnitelný pouze díky odrazům (echo) a představuje nejhorší podmínky pro příjem signálu. Je označován RL20, obsahuje 20 nepřímých cest. Parametry Rayleighova kanálu jsou dostupné v [24]. Podrobnější popis RL20 kanálu je možné najít v [5].

## **3.3 Kanály s Dopplerovým posuvem**

### **3.3.1 Přenosný pozemní příjem**

„Přenosný“ znamená, že zařízení lze bez obtíží přenést z jednoho bodu do druhého. Příjímač se vůči vysílači pohybuje velmi nízkou rychlostí, jedná se o jednotky km/h, což odpovídá např. pomalejší chůzi. Takový scénář je možné emulovat pomocí modelů přenosového kanálu Portable Indoor (PI12) a Portable Outdoor (PO12) [25].

#### **3.3.1.1 Portable Indoor (PI12)**

Tento kanál přenosného pozemního příjmu je definován pro přenos signálu uvnitř budovy s rychlostí pohybu přijímače 3 km/h. Je značen PI12, tvoří ho 12 cest, přičemž první cesta je přímá cesta s Dopplerovým spektrem Rice-Gauss a ostatní cesty jsou s Dopplerovým spektrem Rayleigh-Gauss [26].

#### **3.3.1.2 Portable Outdoor (PO12)**

Kanál Portable Outdoor má obdobné vlastnosti jako kanál Portable Indoor, s tím rozdílem, že PO12 je definován pro přenos vně budovy a jednotlivé cesty mají rozdílné zpoždění a útlum [26].

### **3.3.2 Mobilní přenosový příjem**

„Mobilní“ znamená, že příjem signálu probíhá při velké rychlosti v autech, vlacích, autobusech atd. Příjímač se vůči vysílači pohybuje v rozmezí od 30 do 100 km/h. Přenosová cesta je definována pomocí kanálů Typical Urban (TU6) a Rural Area (RA6) [25].

#### **3.3.2.1 Typical Urban (TU6)**

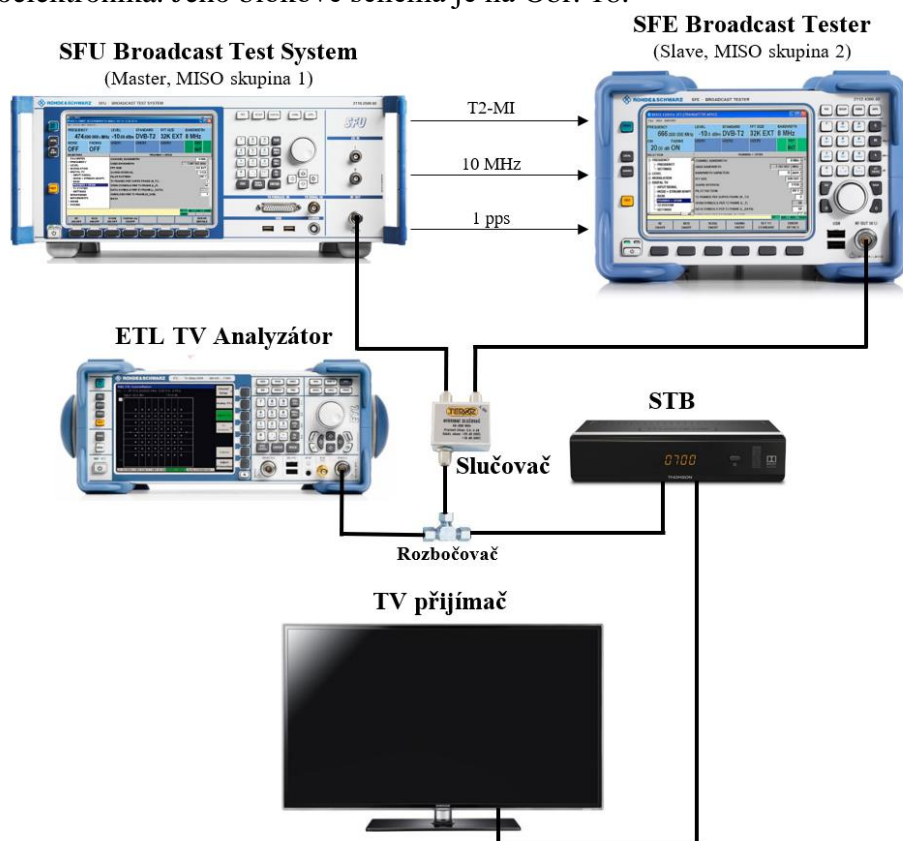
Kanál Typical Urban je určen pro šíření signálu v městských oblastech. Tento model je značen TU6, je tvořen 6 cestami, mají velký rozptyl ve zpoždění a relativně silný výkon. Každá cesta je tvořena Dopplerovým spektrem Rayleigh. Rychlost přijímače vůči vysílači je 50 km/h. [14], [24].

#### **3.3.2.2 Rural Area (RA6)**

Kanál Rural Area je určen pro šíření signálu ve venkovských oblastech. Je značen RA6 a je tvořen 6 cestami s relativně malým zpožděním a malým výkonem. První cesta je přímá (má nulové zpoždění a útlum) a má Dopplerovo spektrum Rice. Ostatní cesty využívají pro šíření signálu Dopplerovo spektrum Rayleigh. Rychlost pohybu přijímače je rovna 100 km/h [14], [24].

## 4. LABORATORNÍ PRACOVNÍŠTĚ PRO MĚŘENÍ DVB-T2 MISO VYSÍLÁNÍ

V této kapitole je popsáno laboratorní pracoviště navržené pro vysílání a příjem TV signálu DVB-T2 využívající MISO konfiguraci. Pracoviště bylo sestaveno v Laboratoři digitální, televizní a rozhlasové systémy, který se nachází na Ústavu radioelektronika. Jeho blokové schéma je na Obr. 18.



Obr. 18 Měřicí pracoviště pro měření DVB-T2 MISO signálu

### 4.1 Měřicí přístroje

#### Rohde & Schwarz® SFU Broadcast Test System

R&S® SFU (Single Frequency Unit) umožňuje generovat DVB-T/H/T2/T2-Lite RF signály. Používá se jako zdroj referenčního signálu. Tento přístroj taky umožňuje použít různé modely kanálů, které dokážou emulovat různé přenosové podmínky [27]. Při použití MISO konfigurace je přístroj nastaven jako MASTER, MISO skupina 1. Všechny systémové parametry se nastavují na vysílači MASTER, které jsou spojeny s určitou videosekvencí. Pro změnu systémových parametrů se musí vygenerovat nová videosekvence s požadovanými parametry. Pro správné vygenerování DVB-T2 MISO signálu je potřebné zajistit dokonalou synchronizaci mezi vysílačem MASTER a SLAVE (viz Obr. 18). To je zajištěno pomocí interního generátoru T2-MI, který poskytuje referenční signál o frekvenci 10 MHz [28].



### **Rohde & Schwarz® SFE Broadcast Tester**

R&S® SFE, podobně jako R&S® SFU, umožňuje na základě zvolených systémových parametrů vygenerovat DVB-T/T2/T2-Lite RF signály [29]. Pro správnou funkčnost při použití MISO konfigurace je přístroj nastaven jako SLAVE, MISO skupina 2 [28].

### **Rohde & Schwarz® ETL TV Analyzátor**

R&S® ETL TV analyzátor kombinuje funkčnost analyzátoru TV a FM (rádio) signálů, videa a spektrálního analyzátoru RF signálu do jednoho přístroje. Umožňuje také analyzovat transportní tok televizního vysílání a měřit parametry jako modulační a bitovou chybovost. Zároveň lze zobrazit konstelační diagram přenášeného signálu [30].

### **Set-top box (STB) a TV přijímač**

Set-top-box (STB) je hardwarové zařízení, které se zapojuje mezi anténu a TV přijímač. Slouží na příjem a dekódování TV signálu na analogovém televizoru (neobsahující tuner pro příjem digitálního TV signálu). Součástí STB je TV tuner, který slouží ke zpracování přijatého signálu a po jeho dekódování je multimediální obsah TV signálu zobrazen na TV přijímači.

Pro zpracování signálu není vždy potřebný STB. Většina dnešních TV už obsahuje tuner a po připojení antény dokáže zpracovat přijímaný TV signál [31].

Při měření byl použit STB Thomson THT712. Obsahuje DVB-T/T2 tuner a podporuje standard ke kompresi videosignálu H.265 (HEVC) v rozlišení Full HD (1920x1080p). Obsahuje konektory HDMI, SCART, USB a Ethernet (LAN) přípojku.

### **Hybridní slučovač TEROZ**

Používá se ke sloučení RF signálů. Konkrétně v tomto případě ke sloučení signálů z generátorů MASTER a SLAVE. Parametry tohoto slučovače jsou uvedeny v Tab. 8.

Tab. 8 Parametry hybridního slučovače TEROZ (dostupné z [32])

Frekvenční pásmo [MHz]	40-862
Průchozí útlum [dB]	3,5-4
Oddělovací útlum [dB]	11

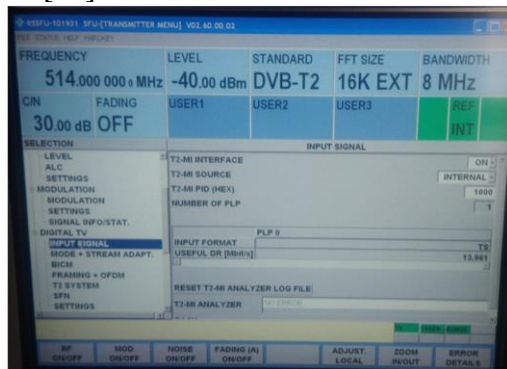
## **4.2 Postup zapojení**

Jak je znázorněno na Obr. 18, přístroje R&S SFU a SFE jsou propojeny pomocí 3 vodičů, které zajišťují synchronizaci mezi přístroji. Následně je potřeba sloučit RF signály z SFU a SFE. Dále je sloučený RF signál veden do rozbočovače odkud je větven do ETL TV analyzátoru pro měření parametrů signálu DVB-T2 a do STB (TV přijímače) pro subjektivní hodnocení kvality TV signálu.

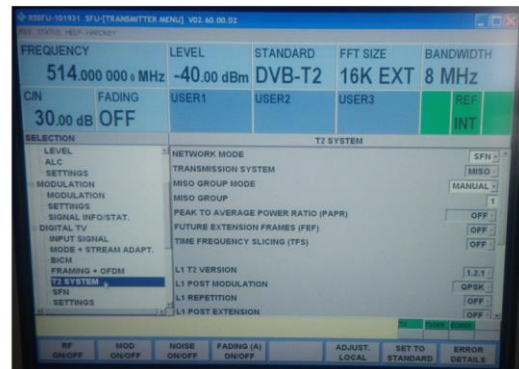
## 4.3 Postup nastavení R&S SFU a SFE

### Nastavení SFU (MASTER)

- Na přístroji se zvolí vhodný výstupní výkon, aktivuje se DVB-T2 kódér se stejnou frekvencí a se stejnou šířkou pásma jako na SFE a na TV analyzátoru.
- V nastavení vstupního signálu se nastaví T2-MI INTERFACE na ON a nastaví se T2-MI zdroj (T2-MI SOURCE) na INTERNAL (viz Obr. 19 a)).
- V záložce T2 SYSTÉM se vybere vhodná MISO skupina (MISO GROUP 1) (viz Obr. 19 b)).
- V sekci TSGEN (vpravo dole) se vybere vhodný T2-MI MISO transportní tok [28].



a) Nastavení parametrů



b) Nastavení MISO skupiny

Obr. 19 Nastavení SFU

### Nastavení SFE (SLAVE)

- Na přístroji se zvolí vhodný výstupní výkon, aktivuje se DVB-T2 kódér se stejnou frekvencí a se stejnou šířkou pásma jako na SFU a na TV analyzátoru.
- V nastavení vstupního signálu se nastaví T2-MI INTERFACE na ON, T2-MI zdroj (T2-MI SOURCE) na EXTERNAL.
- V záložce T2 SYSTÉM se vybere vhodná MISO skupina (MISO GROUP 2).
- V nastavení hardwaru se zdroj signálu (SOURCE) nastaví na EXT [28].



Obr. 20 Nastavení SFE

Poměr  $C/N$  se při měření MISO konfigurace nastavuje jak na SFU generátoru, tak na SFE generátoru. Podrobný popis nastavení lze najít v [28].

Pozn.: Z důvodu epidemiologické situace v České republice nebylo možné pořídit kvalitnější fotodokumentaci nastavení přístrojů.

## 4.4 Měřené parametry

Hlavními parametry, které se měří u digitálního TV signálu jsou bitová chybovost (Bit Error Ratio – BER) a modulační chybovost (Modulation Error Ratio – MER). Hodnoty těchto parametrů závisí na odstupu signálu od šumu (Carrier-to-Noise – C/N).

Tyto parametry budou měřeny pomocí TV analyzátoru a na TV přijímači bude možné posoudit kvalitu příjmu subjektivně.

### 4.4.1 Bitová chybovost – BER

Bitová chybovost je jedním ze základních parametrů pro vyhodnocení četnosti chyb v daném signále. Je definována jako poměr počtu chybně přijatých bitů k celkovému počtu přenesených bitů za určitý časový interval [33].

$$BER = \frac{n_e}{N_B}, \quad (19)$$

kde  $N_B$  je počet celkově přijatých bitů a  $n_e$  udává počet chybně přijatých bitů ve stejném časovém intervalu.

Při analýze signálu DVB-T2 se parametr bitové chybovosti měří před a za dekodérem LDPC. Pokud pro parametr BER po LDPC dekodování je splněna tato podmínka:

$$BER \text{ po LDPC dekodování} \leq 1 \cdot 10^{-7}, \quad (20)$$

tak to znamená, že při příjmu TV signálu, se v průběhu jedné hodiny, objeví maximálně jedna chyba v daném signále, tzv. Quasi-Error Free (QEF) [2].

### 4.4.2 Modulační chybovost – MER

MER je jedním ze základních měřených parametrů v oblasti bezdrátových komunikací [34]. Udává informaci o úrovni šumu v signále, který způsobuje zkreslení hodnoty amplitudy a fáze každé jednotlivé nosné vlny, čímž ji znehodnocuje. Pokud se překročí určitá mez, tuner TV přijímače zhodnotí úroveň signálu chybně a ke zpracování dodá zkreslené hodnoty, čímž dojde ke špatnému vyhodnocení přenášené informace [35].

Modulační chybovost se měří v jednotkách dB. Čím vyšší je její hodnota (v dB), tím menší je vliv rušení [35].

### 4.4.3 Odstup signálu od šumu – C/N

Poměr  $C/N$  je definován jako poměr přijatého modulovaného výkonu nosné vlny k přijatému šumovému výkonu. Je měřítkem toho, o kolik je úroveň užitečného signálu větší, než šum přenášený společně s užitečnou informací. Vysoké poměry  $C/N$  poskytují lepší kvalitu příjmu a vyšší spolehlivost funkčnosti komunikačního spoje  $C/N$  [35].

Hodnoty parametru  $C/N$  se udávají v jednotkách dB. Požadavky na poměr  $C/N$  se liší podle použité modulace, kódového poměru a podmínek pro přenos signálu. Udává mezní hodnotu, při které je ještě možné demodulovat přijímaný signál, tzv. QEF příjem [35].

## 5. LABORATORNÍ MĚŘENÍ

Měření bylo realizováno v Laboratoři digitální, televizní a rozhlasové techniky za použití měřicího pracoviště, které je popsáno v kapitole 4. Byly vybrány 3 scénáře, které ztvárňují reálné situace, ke kterým dochází při vysílání digitálního TV signálu.

V jednotlivých podkapitolách jsou prezentovány systémové parametry pro TV vysílání pro různé scénáře a použité přenosové kanály. Dále jsou prezentované měřené parametry závislé na parametru  $C/N$ , a to  $BER$  před LDPC dekódováním a  $BER$  po LDPC dekódování, modulační chybovost  $MER$  a počet LDPC iterací. Pomocí STB a TV přijímače se subjektivně pozorovala kvalita přijímaného signálu.

Všechny scénáře byly měřené při nastavené frekvenci 514 MHz. Pro zjednodušení popisu a zhodnocení měření budeme pro měřené objektivní parametry používat zkratky:  $BER_1$  – bitová chybovost před LDPC dekódováním,  $BER_2$  – bitová chybovost po LDPC dekódování,  $MER$  – modulační chybovost, TX – vysílač a RX – přijímač. V případě MISO konfigurace jako TX1 bude označen MASTER a jako TX2 bude označen SLAVE. Příklad, kdy bude mít TX1 a TX2 stejnou úroveň signálu bude označen jako výkonové vyvážení vysílačů. Příklad, kdy budou mít vysílače rozdílnou úroveň signálu bude označeno jako výkonové nevyvážení vysílačů.

### 5.1 Referenční měření – SISO vysílání

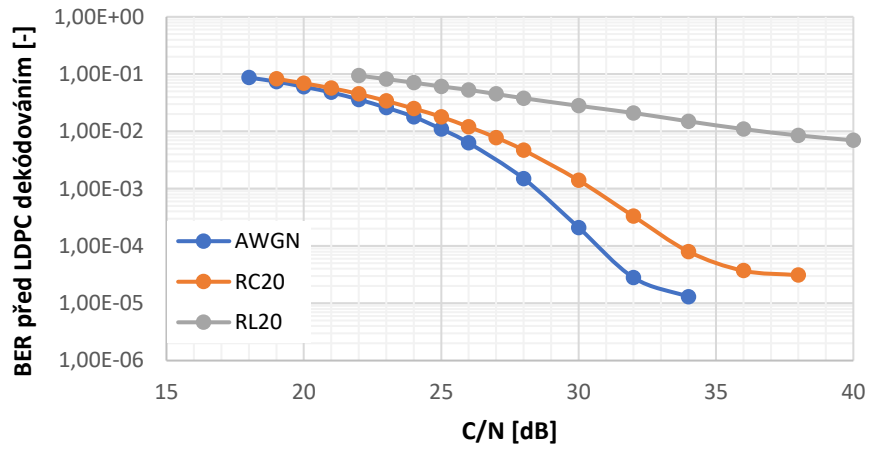
Jako první bylo provedeno referenční měření pro ověření konfigurace klasické SISO konfigurace. Byl použit OFDM mód 32K Extended, ochranný interval 1/8 a úroveň signálu na výstupu TX byla nastavena na -50 dBm, hodnota měřená na vstupu TV analyzátoru ETL-TV byla -53,7 dBm. Další parametry jsou v Tab. 9.

U vysílaného signálu je přenosové prostředí emulováno modelem kanálu AWGN, u kterého se signál šíří pouze přímou cestou, RC20 kanál, který navíc počítá s případnými odrazy a v poslední řadě RL20 kanál, ve kterém se signál šíří pouze formou odrazů (echo).

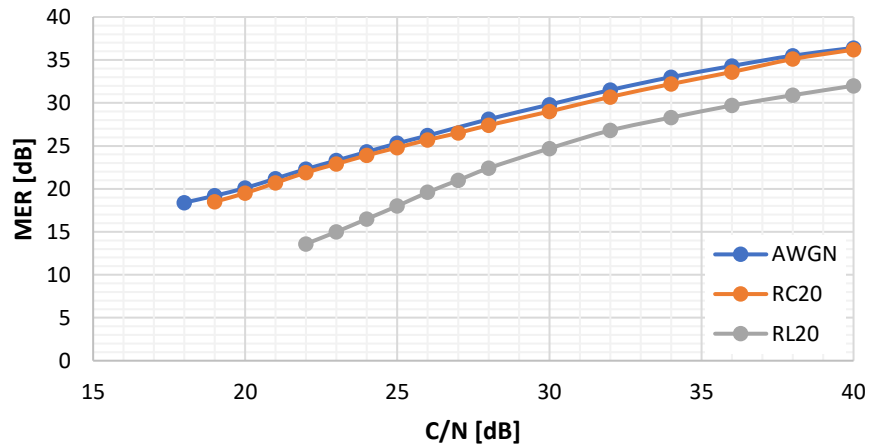
Tab. 9 Nastavené parametry – SISO vysílání

<b>OFDM mód</b>	32K
<b>Přenosový mód</b>	Extended
<b>Rozptýlené nosné</b>	PP2
<b>Ochranný interval</b>	1/8
<b>Modulace</b>	256QAM
<b>Kódový poměr</b>	2/3
<b>Úroveň signálu (nastaveno)</b>	-50 dBm
<b>Úroveň signálu (naměřeno)</b>	-53,7 dBm
<b>Rotovaná konstelace</b>	ANO
<b>Použité modely kanálů</b>	AWGN RC20 RL20
<b>Šířka pásma</b>	8 MHz
<b>Frekvence</b>	514 MHz

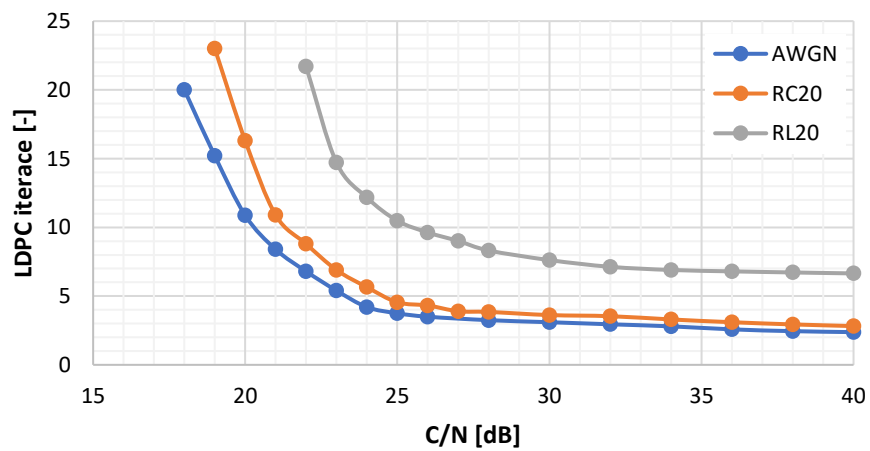
### 5.1.1 SISO vysílání – vyhodnocení měření



a)  $BER_1 = f(C/N)$



b)  $MER = f(C/N)$



c)  $LDPC\ iterace = f(C/N)$

Obr. 21 Měřené parametry – SISO vysílání

Tab. 10 Hodnoty  $C/N$  potřebné pro dosažení QEF příjmu, SISO vysílání

Model přenosového kanálu	QEF – měřeno pomocí ETL TV analyzátoru			Pozorování výpadku obrazu na TV přijímači		
	AWGN	RC20	RL20	AWGN	RC20	RL20
$C/N_{\text{změř}} [\text{dB}]$	18	19	22	17,9	18,9	21
$C/N_{\text{teor.}} [\text{dB}] [18]$	17,8	18,1	22,8	-	-	-

Na základě porovnání hodnot bitové chybovosti  $BER_1$ , která je závislá na poměru  $C/N$  (viz Obr. 21 a)) je zřejmé, že nejlepších výsledků bylo dosaženo v kanále AWGN. Je to z toho důvodu, že u kanálu AWGN se předpokládá pouze přímá cesta mezi TX a RX, což představuje nejlepší podmínky pro přenos TV signálu. Hodnota  $C/N$  pro QEF příjem ( $BER_2 \leq 1 \cdot 10^{-7}$ ) byla pro AWGN kanál zjištěna při  $C/N \geq 18$  dB. U kanálu RC20, který navíc kromě přímé cesty mezi TX a RX počítá s případnými odrazy od různých objektů, byla hodnota pro QEF zjištěna při  $C/N \geq 19$  dB. Z toho plyne, že pokles úrovně TV vysílání, který je způsoben odrazy, je částečně kompenzován právě přímou cestou mezi vysílačem a přijímačem. Kanálový model RL20 představuje nejhorší podmínky pro přenos TV signálu. Je to z toho důvodu, že tento model nemá žádnou přímou cestu mezi TX a RX, tudíž k přenosu dochází pouze díky odrazům. Hodnota  $C/N$  pro QEF příjem byla zjištěna při  $C/N \geq 22$  dB. Srovnání s teoretickým předpokladem podle dokumentace ITU-R BT.2254-3 [18] je uvedeno v Tab. 10. Naměřené hodnoty se téměř neodlišují od teoretických hodnot. Největší odchylka je 0,9 dB a je zaznamenána u RC20 kanálu.

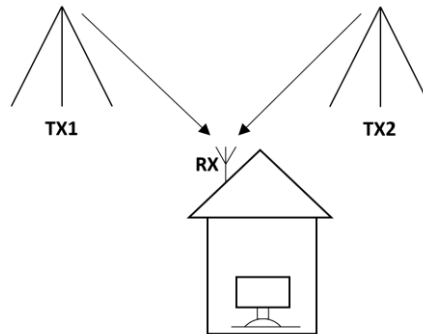
Při analýze hodnot  $MER$  (viz Obr. 21 b)) dojdeme ke stejnému závěru, jako při analýze hodnot  $BER_1$ . Ze zobrazených závislostí  $MER$  lze vidět, že kanály AWGN a RC20 představují podobné podmínky pro přenos TV signálu. Pro všechny hodnoty  $C/N$  se naměřené hodnoty  $MER$  téměř neodlišují. Opět u RL20 je vidět, že tento kanálový model má nejnáročnější podmínky pro vysílání a příjem TV signálu.

Závislost počtu LDPC iterací na poměru  $C/N$ , zobrazuje počet nutných opakování LDPC iterací pro opravu přenášeného signálu. Z výsledku měření (viz Obr. 21 c)) vyplývá, že u signálu s vyšším poměrem  $C/N$  je zapotřebí menší počet LDPC iterací pro opravu chyb v daném FEC rámci. Výsledky opět demonstrují, že model přenosového kanálu RL20 klade nejvyšší nároky na příjem signálu. Závislosti u AWGN a RC20 jsou znovu velmi podobné. U kanálového modelu RL20 jsou naměřeny vyšší počty nutných LDPC iterací už i při vysokých hodnotách  $C/N$ .

Při subjektivním pozorování kvality TV signálu na TV přijímači bylo vyhodnocováno, při jakém poměru  $C/N$  dojde k vypadnutí obrazu. Pro AWGN kanál bylo dosaženo hodnoty  $C/N = 17,9$  dB, pro RC20 kanál  $C/N = 18,9$  dB a u kanálu RL20 obraz vypadl již při 21 dB. Hodnoty se téměř shodují s hodnotami  $C/N$  pro QEF příjem. Největší rozdíl je zaznamenán u kanálu RL20, kdy k výpadku obrazu došlo při hodnotě  $C/N$  o 1 dB nižší než pro QEF příjem.

## 5.2 První scénář – MISO konfigurace, pevný příjem

Ve všech následujících měřeních je uvažována MISO konfigurace systému.



Obr. 22 První scénář – MISO konfigurace

### 5.2.1 Pevný příjem

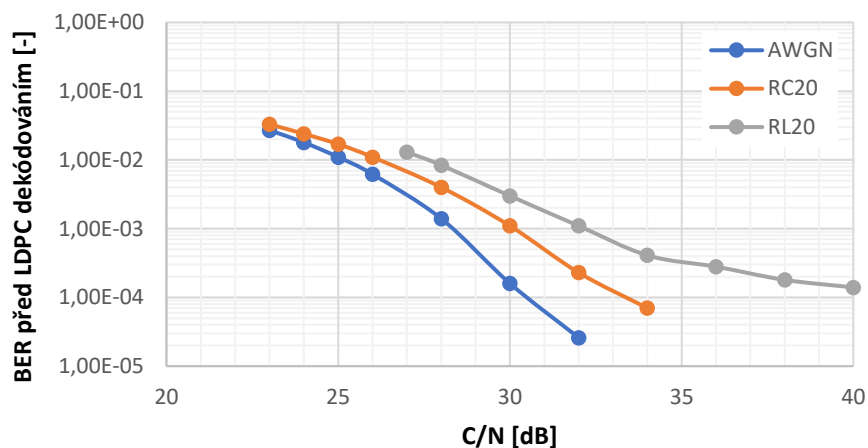
V tomto měření se uvažuje tzv. pevný (fixed) příjem, tzn. přijímač má neměnnou polohu. Je použit OFDM mód 32K Extended, ochranný interval 1/16 a modulace 256QAM. V tomto případě je uvažováno výkonové vyvážení vysílačů, tzn. úroveň signálu je jak na vysílači TX1, tak na vysílači TX2 nastavena na stejnou úroveň, tj. -40 dBm. Po sloučení signálu z TX1 a TX2, útlum kabelů a slučovače způsobí, že skutečná hodnota úrovně signálu bude přibližně o 7 dB nižší, tj. -47 dBm. Byla zvolena vyšší úroveň signálu, aby byly vykompenzovány ztráty na kabelech a slučovači a bylo možné měřit různé výkonové nevyvážení vysílačů. Poměr  $C/N$  je v tomto případě měněn současně na obou vysílačích.

Jako přenosové cesty vysílaného signálu bylo u vysílače TX1 využito kanálových modelů AWGN, RC20 a RL20. U vysílače TX2, jako i v případě dalších měření, byl použit jen kanálový model AWGN. Je to z toho důvodu, že přístroj SFE umožňuje vybrat pouze kanálový model AWGN.

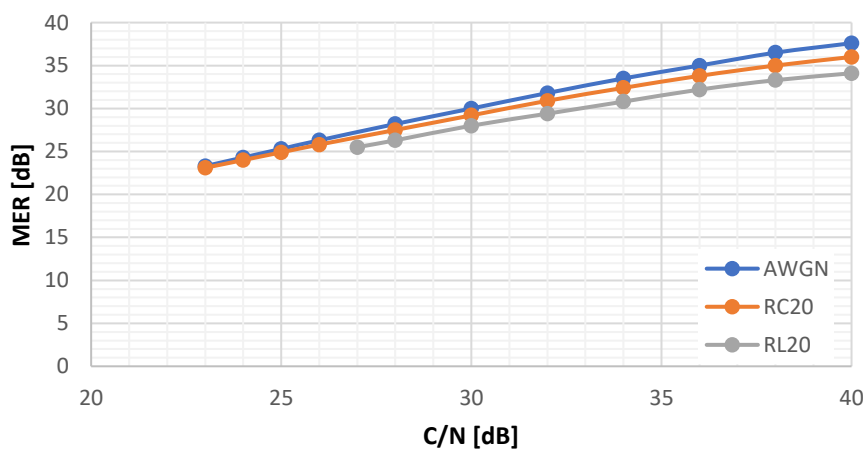
Tab. 11 Nastavené parametry – pevný příjem

<b>OFDM mód</b>	32K
<b>Přenosový mód</b>	Extended
<b>Rozptýlené nosné</b>	PP2
<b>Ochranný interval</b>	1/16
<b>Modulace</b>	256QAM
<b>Kódový poměr</b>	5/6
<b>Nastavená úroveň signálu TX1</b>	-40 dBm
<b>Nastavená úroveň signálu TX2</b>	-40 dBm
<b>Rotovaná konstelace</b>	ANO
<b>Použité modely kanálů</b>	AWGN RC20 RL20
<b>Šířka pásma</b>	8 MHz
<b>Frekvence</b>	514 MHz

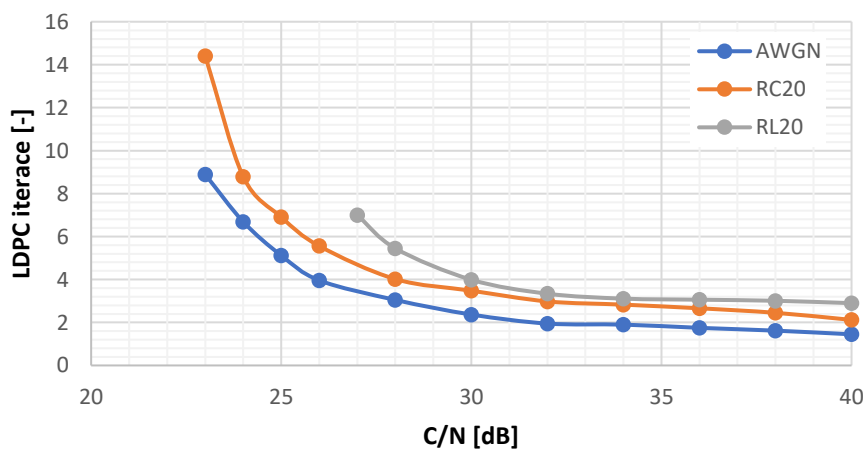
### 5.2.1.1 Vyhodnocení měření – pevný příjem



a)  $BER_1 = f(C/N)$



b)  $MER = f(C/N)$



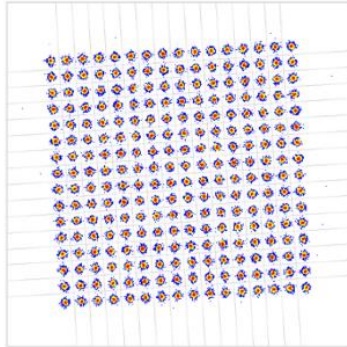
c)  $LDPC\ iterace = f(C/N)$

Obr. 23 Měření parametry – pevný příjem

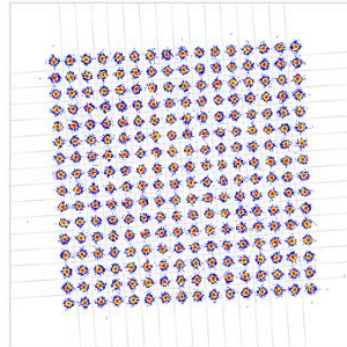


Tab. 12 Hodnoty  $C/N$  potřebné pro dosažení QEF příjmu – pevný příjem

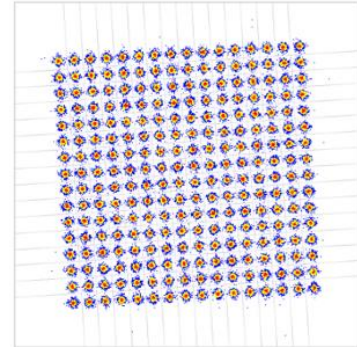
Model přenosového kanálu	QEF – měřeno pomocí ETL TV analyzátoru			Pozorování výpadku obrazu na TV přijímači		
	AWGN	RC20	RL20	AWGN	RC20	RL20
$C/N_{\text{změř. [dB]}}$	23	23	25	22	22	23



AWGN kanál; MER = 29,2 dB

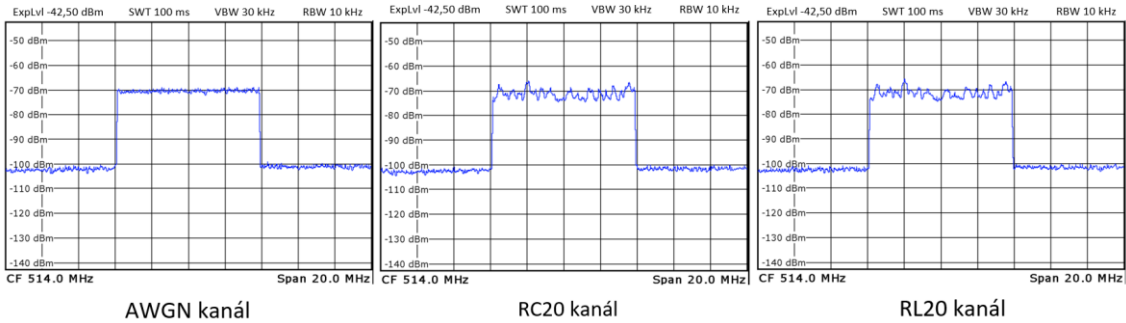


RC20 kanál; MER = 28,8 dB



RL20 kanál; MER = 27,5 dB

Obr. 24 Konstelační diagramy 256QAM při  $C/N = 30$  dB – pevný příjem



Obr. 25 RF spektra při  $C/N = 30$  dB – pevný příjem

Při porovnání hodnot  $BER_I$  (viz Obr. 23 a)) i při MISO konfiguraci vysílání garantuje nejlepší podmínky pro přenos TV signálu AWGN kanál. Hodnota pro QEF příjem je dosažena při  $C/N = 23$  dB. V případě uvažování přenosového kanálu RC20 bylo dosaženo QEF příjmu při stejné hodnotě  $C/N$ . U kanálu RL20 bylo QEF příjmu dosaženo při  $C/N = 25$  dB, viz Tab. 12.

I na základě závislostí  $MER$  (viz Obr. 23 b)) lze říct, že kanály AWGN a RC20 opět představují velmi podobné podmínky pro přenos TV signálu. Hodnoty  $MER$  se odlišují maximálně o 1 dB. U kanálu RL20 se oproti SISO konfiguraci zvýšily hodnoty parametru  $MER$ . Je to způsobené tím, že na vysílači SLAVE je nastaven AWGN kanál, který částečně kompenzuje nepřímé cesty kanálu RL20.

Při vyhodnocení výsledku měření LDPC iterace vs.  $C/N$  (viz Obr. 23 c)) lze dojít ke stejným výsledkům jako při  $MER$ . Grafické průběhy kanálů, které využívají přímou cestu mezi TX a RX, jsou téměř identické. Průběh závislosti LDPC iterace =  $f(C/N)$  u kanálu RL20 je při vysokém poměru  $C/N$  podobný jako u kanálu AWGN a RC20, ale zhruba pro hodnoty  $C/N$  nižší než 30 dB vyžaduje přenosový kanál větší počet LDPC iterací.

Vlivy jednotlivých modelů přenosových kanálů na konstelační diagram 256QAM a na tvar RF spektra TV signálu při  $C/N = 30$  dB, jsou zobrazeny na Obr. 24 a Obr. 25. U kanálu AWGN lze vidět, že na RF spektru nejsou téměř viditelné žádné úniky, ale na RF spektru kanálu RC20 a RL20 jsou již úniky patrnější.

U kanálu AWGN dochází k vypadnutí obrazu na TV přijímači při  $C/N = 22$  dB, při použití kanálu RC20 obraz opět vypadne při  $C/N = 22$  dB a u kanálu RL20 při  $C/N = 23$  dB.

## 5.2.2 Pevný příjem – výkonové nevyvážení vysílačů

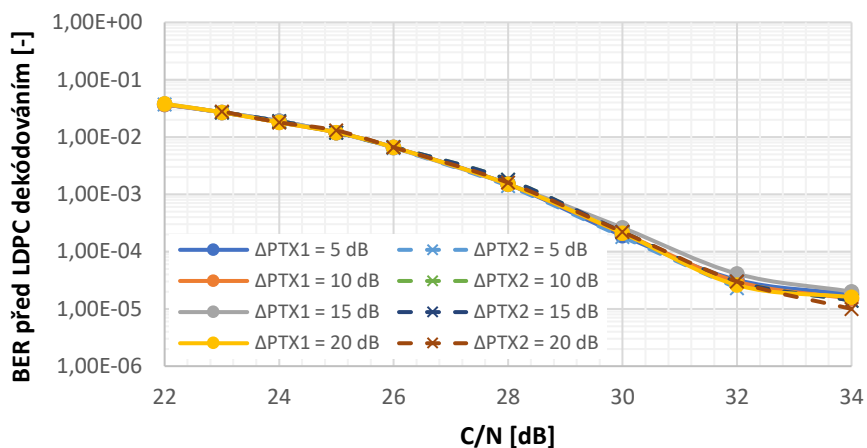
V tomto měření budou uvažována výkonová nevyvážení mezi vysílači. Nastavené systémové parametry jsou zobrazeny v Tab. 13. Označení  $\Delta P_{TX2}$  značí, že na vysílači TX1 je trvale stejná hodnota úrovně signálu (-40 dBm) a na vysílači TX2 je úroveň signálu snížena o určitou hodnotu (5, 10, 15, 20 dB). Obdobně  $\Delta P_{TX1}$  značí, že na TX2 je trvale nastavena stejná hodnota úrovně signálu (-40 dBm) a na vysílači TX1 je úroveň signálu snížena o zvolenou hodnotu. Parametry jsou totožné s předchozím měřením s tím rozdílem, že zde jsou nejprve proměřena výkonová nevyvážení  $\Delta P_{TX2} = 5, 10, 15$  a 20 dB, tzn., že na vysílači TX1 je úroveň signálu -40 dBm a na vysílači TX2 je postupně nastavována úroveň signálu -45, -50, -55, -60 dBm. Poté jsou proměřena výkonová nevyvážení  $\Delta P_{TX1} = 5, 10, 15$  a 20 dB, tj. na vysílači TX2 je trvale úroveň signálu -40 dBm a na TX1 je postupně nastavována úroveň signálu -45, -50, -55, -60 dBm.

Poměr  $C/N$  je opět měněn současně jak na vysílači TX1, tak na TX2.

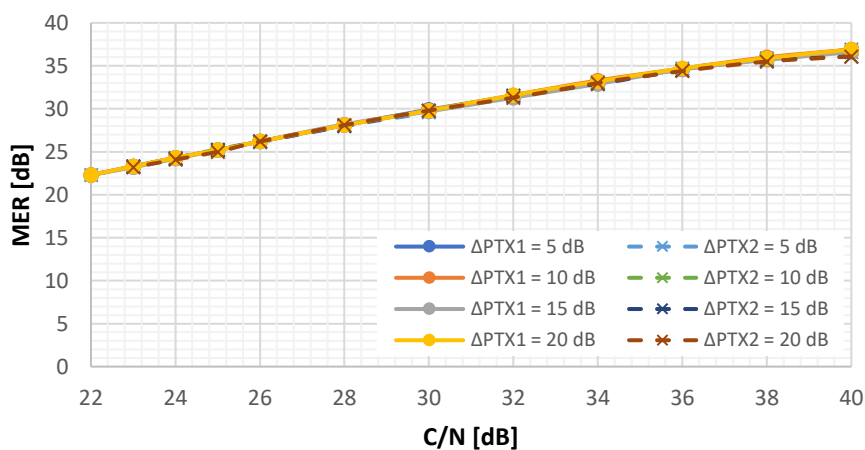
Tab. 13 Nastavené parametry – pevný příjem, výkonové nevyvážení vysílačů

<b>OFDM mód</b>		32K
<b>Přenosový mód</b>		Extended
<b>Rozptýlené nosné</b>		PP2
<b>Ochranný interval</b>		1/16
<b>Modulace</b>		256QAM
<b>Kódový poměr</b>		5/6
1.	<b>Nastavená úroveň signálu TX1</b>	-40 dBm
	<b>Nastavená úroveň signálu TX2</b>	-45 dBm
		-50 dBm
		-55 dBm
2.	<b>Nastavená úroveň signálu TX1</b>	-45 dBm
		-50 dBm
		-55 dBm
	<b>Nastavená úroveň signálu TX2</b>	-60 dBm
<b>Rotovaná konstelace</b>		ANO
<b>Použité modely kanálů</b>		AWGN RC20 RL20
<b>Šířka pásma</b>		8 MHz
<b>Frekvence</b>		514 MHz

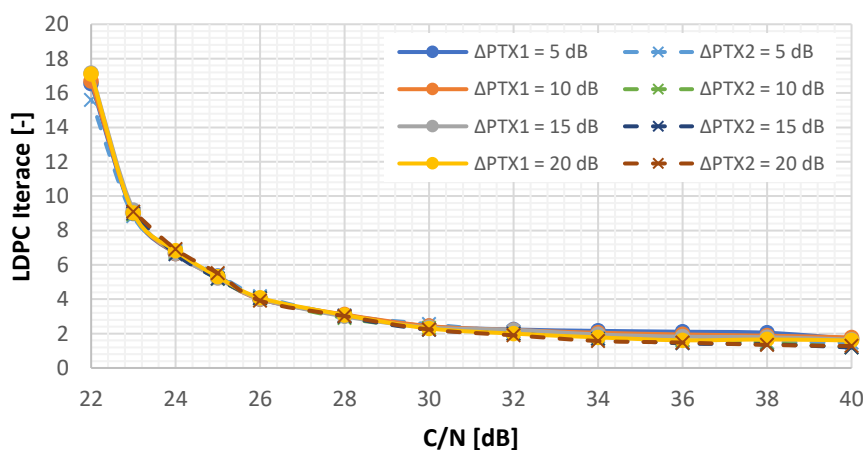
### 5.2.2.1 Vyhodnocení měření – pevný příjem, výkonové nevyvážení vysílačů



a)  $BER_1 = f(C/N)$



b)  $MER = f(C/N)$

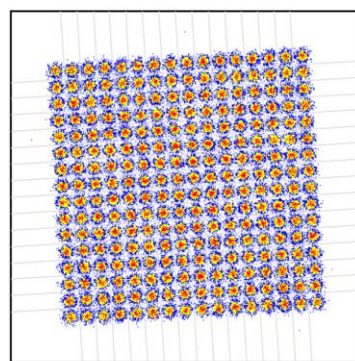


c)  $LDPC\ iterace = f(C/N)$

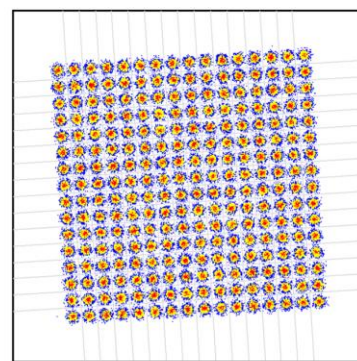
Obr. 26 Měření parametry – výkonové nevyvážení vysílačů, AWGN kanál

Tab. 14 Hodnoty  $C/N$  potřebné pro dosažení QEF příjmu při výkonovém nevyvážení vysílačů – AWGN kanál

	QEF – měřeno pomocí ETL TV analyzátoru				Pozorování výpadku obrazu na TV přijímači			
Model přenosového kanálu	AWGN							
$\Delta P_{TX2}$ [dB]	5	10	15	20	5	10	15	20
$C/N_{změř.}$ [dB]	22	23	23	23	22	22	22	22
$\Delta P_{TX1}$ [dB]	5	10	15	20	5	10	15	20
$C/N_{změř.}$ [dB]	22	22	22	22	21	21	21	21

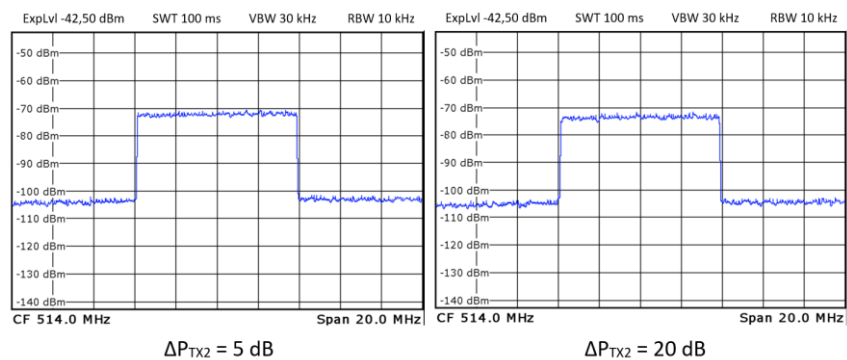


$\Delta P_{TX2} = 5$  dB; MER = 28,5 dB



$\Delta P_{TX2} = 20$  dB; MER = 29,7 dB

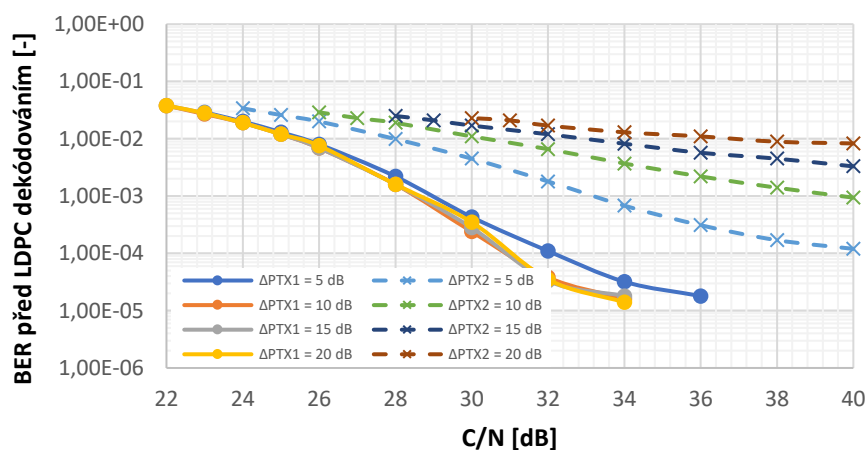
Obr. 27 Konstelační diagramy 256QAM pro AWGN kanál při  $C/N = 30$  dB – výkonové nevyvážení vysílačů



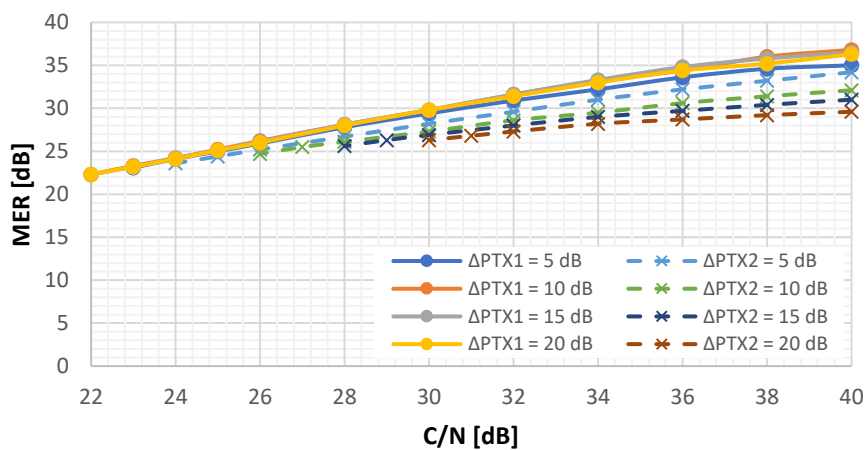
$\Delta P_{TX2} = 5$  dB

$\Delta P_{TX2} = 20$  dB

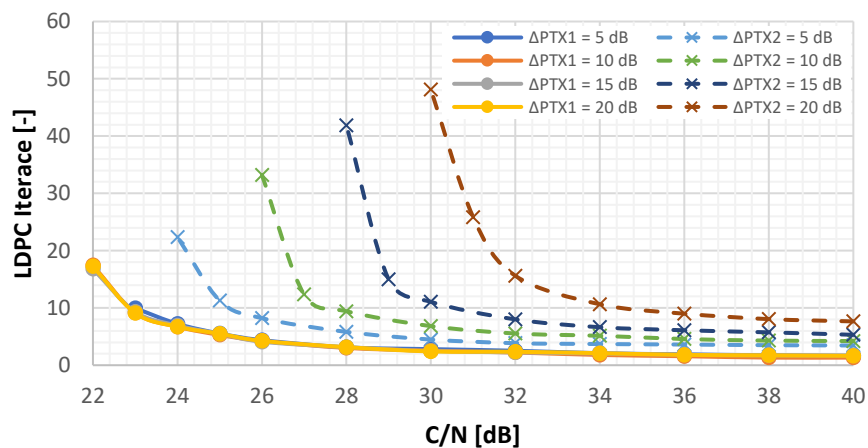
Obr. 28 RF spektrum pro AWGN kanál při  $C/N = 30$  dB – výkonové nevyvážení vysílačů



a)  $BER_1 = f(C/N)$



b)  $MER = f(C/N)$

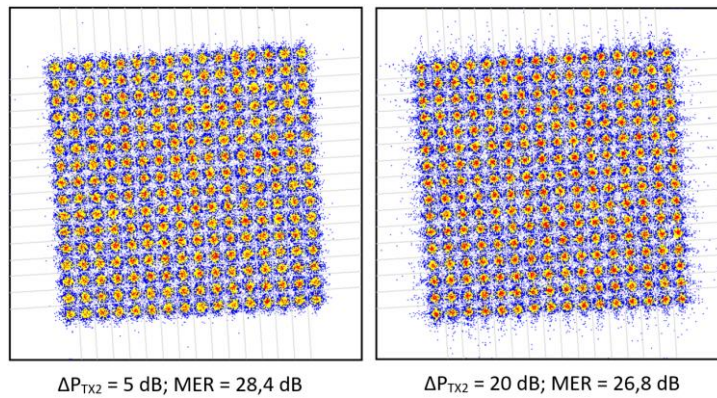


c)  $LDPC\ iterace = f(C/N)$

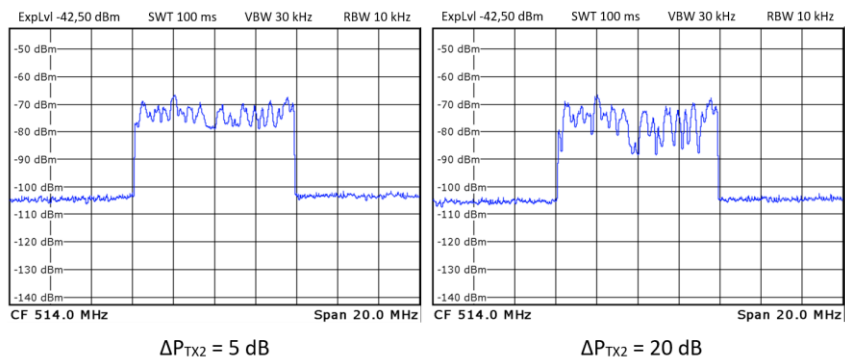
Obr. 29 Měření parametry – výkonové nevyvážení vysílačů, RC20 kanál

Tab. 15 Hodnoty  $C/N$  potřebné pro dosažení QEF příjmu při výkonovém nevyvážení vysílačů – RC20 kanál

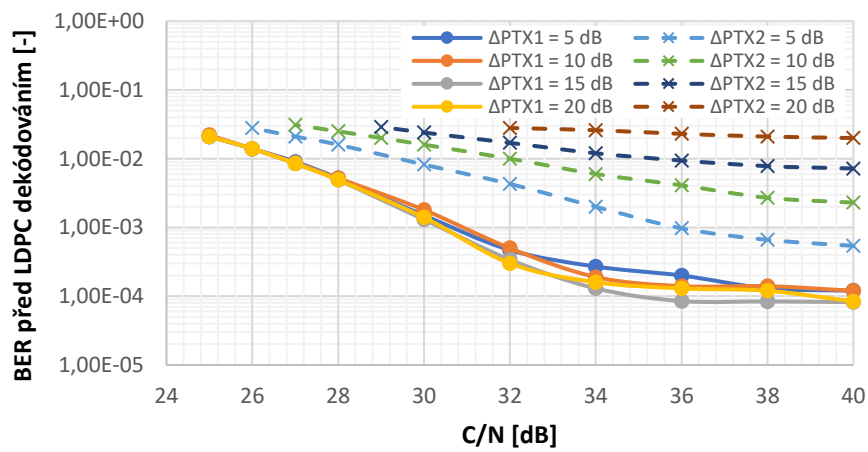
	QEF – měřeno pomocí ETL TV analyzátoru				Pozorování výpadku obrazu na TV přijímači			
Model přenosového kanálu	RC20							
$\Delta P_{TX2}$ [dB]	5	10	15	20	5	10	15	20
$C/N_{změř.}$ [dB]	24	26	29	31	23	24	26	26
$\Delta P_{TX1}$ [dB]	5	10	15	20	5	10	15	20
$C/N_{změř.}$ [dB]	23	22	22	22	22	21	21	21



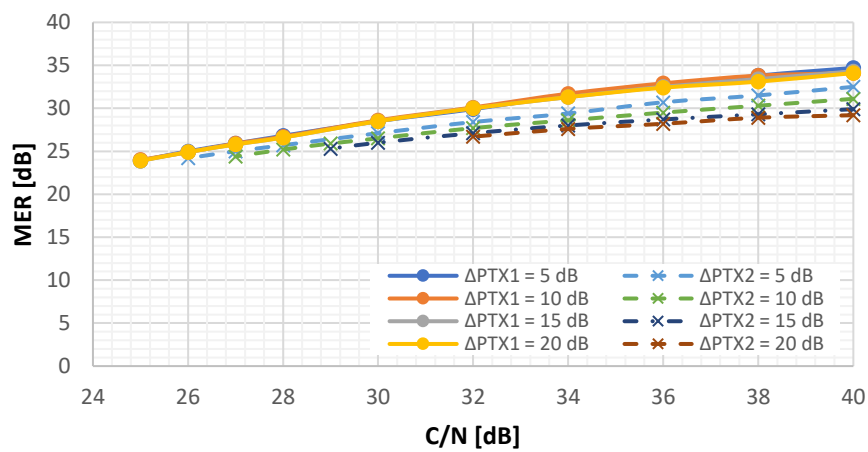
Obr. 30 Konstelační diagramy 256QAM pro RC20 kanál při  $C/N = 30 \text{ dB}$  výkonové nevyvážení vysílačů



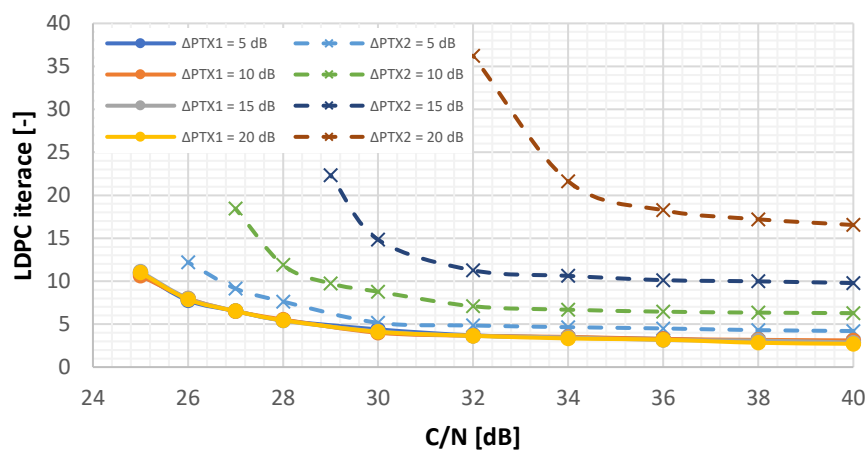
Obr. 31 RF spektrum pro RC20 kanál při  $C/N = 30 \text{ dB}$  – výkonové nevyvážení vysílačů



a)  $BER_1 = f(C/N)$



b)  $MER = f(C/N)$



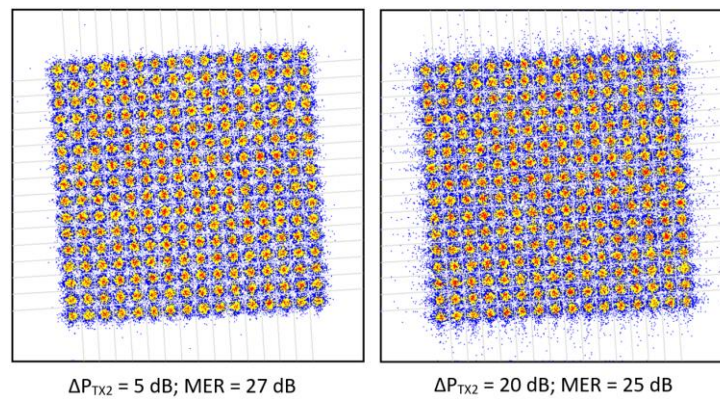
c)  $LDPC\ iterace = f(C/N)$

Obr. 32 Měřené parametry – výkonové nevyvážení vysílačů, RL20 kanál

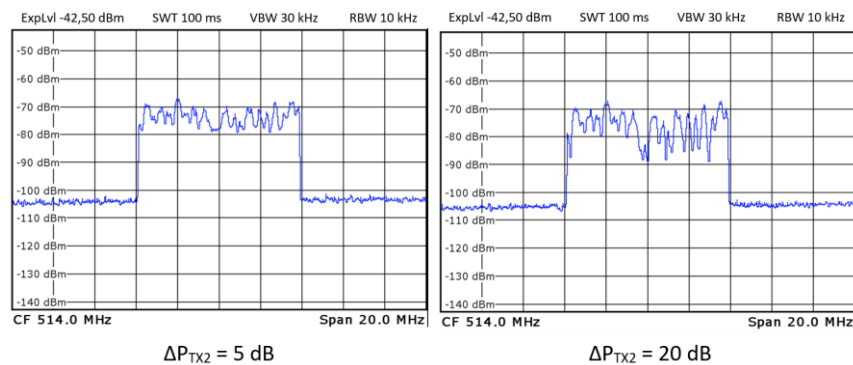


Tab. 16 Hodnoty  $C/N$  potřebné pro dosažení QEF příjmu při výkonovém nevyvážení vysílačů – RL20 kanál

	QEF – měřeno pomocí ETL TV analyzátoru				Pozorování výpadku obrazu na TV přijímači			
Model přenosového kanálu	RL20							
$\Delta P_{TX2}$ [dB]	5	10	15	20	5	10	15	20
$C/N_{změř.}$ [dB]	26	27	29	34	23	24	26	26
$\Delta P_{TX1}$ [dB]	5	10	15	20	5	10	15	20
$C/N_{změř.}$ [dB]	25	25	25	25	22	22	22	22



Obr. 33 Konstelační diagramy 256QAM pro RL20 kanál při  $C/N = 30$  dB výkonové nevyvážení vysílačů



Obr. 34 RF spektrum pro RL20 kanál při  $C/N = 30$  dB – výkonové nevyvážení vysílačů

**AWGN kanál** – Při analýze měření bitové chybovosti  $BER_I$  (viz Obr. 26 a)), modulační chybovosti  $MER$  (viz Obr. 26 b)) a měření počtu iterací (viz Obr. 26 c)) lze pozorovat vliv výkonových nevyvážení  $\Delta P_{TX}$ . Je patrné, že výkonová nevyvážení, jak na vysílači MASTER, tak na vysílači SLAVE, nemají téměř žádný vliv na hodnoty měřených parametrů. Je to způsobeno tím, že se na obou vysílačích uvažuje AWGN

kanál, takže jeden vysílač dokáže plnohodnotně kompenzovat snížení výkonu druhého vysílače.

V Tab. 14 jsou uvedeny zjištěné hodnoty pro tzv. QEF příjem a hodnoty, při kterých docházelo k výpadku obrazu na TV přijímači. Pro výkonová nevyvážení na vysílači MASTER (TX1) i na vysílači SLAVE (TX2) se hodnoty  $C/N$  liší nejvýše o 1 dB.

Vliv jednotlivých modelů přenosových kanálů na konstelační diagram 256QAM a na tvar RF spektra TV signálu pro  $C/N = 30$  dB, jsou zobrazeny na Obr. 27, Obr. 28.

**RC20 kanál** – Při analýze objektivních parametrů pro vyhodnocení kvality digitálního TV signálu (viz Obr. 29 a), b), c), Tab. 15) lze vidět, že pro všechny hodnoty výkonového nevyvážení na vysílači MASTER nedochází k téměř žádné změně. Oproti situaci, kdy je na obou vysílačích nastavena stejná úroveň signálu, dochází k mírnému zlepšení kvality přenosu signálu (viz Obr. 23). Je to z toho důvodu, že mezi TX1 (MASTER) a RX se uvažuje přenosové prostředí, které se dá charakterizovat kanálem RC20. Signál z vysílače MASTER má nižší výkon, a tudíž má menší vliv než signál vysílaný ze SLAVE, na kterém je trvale nastaven AWGN kanál. Naopak na vysílači SLAVE dochází s rostoucím výkonovým nevyvážením ke stále větší degradaci kvality přenosu TV signálu. Je to způsobeno tím, že se více uplatňuje vysílač s větším výkonem, tj. TX1, na kterém je nastaven únikový RC20 kanál. U výkonového nevyvážení 15 a 20 dB se zdá, že druhý vysílač se chová jako „rušič“ signálu TX1.

Pro výkonová nevyvážení na vysílači MASTER se hodnoty liší nejvýše o 2 dB. Oproti tomu pro výkonová nevyvážení na vysílači SLAVE se hodnoty již rozcházejí. S rostoucím výkonovým nevyvážením roste i hodnota  $C/N$  pro QEF příjem a pro výpadek obrazu na TV přijímači. Největší rozdíl mezi hodnotou  $C/N$  pro QEF příjem a výpadkem obrazu je při  $\Delta P_{TX2} = 20$  dB. Pro QEF příjem je  $C/N = 31$  dB a k výpadku na TV přijímači dochází při  $C/N = 26$  dB (viz Tab. 15).

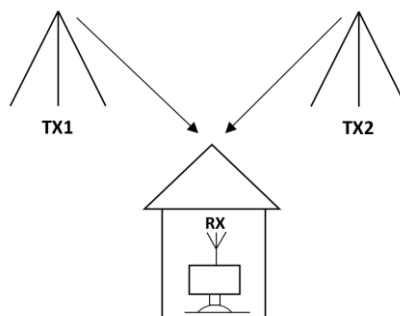
Konstelační diagramy 256QAM a RF spektra TV signálu pro  $C/N = 30$  dB, jsou zobrazeny na Obr. 30, Obr. 31.

**RL20 kanál** – Dochází zde ke stejnému trendu jako u kanálu RC20. Velikost výkonového nevyvážení na vysílači MASTER má minimální vliv na kvalitu přenosu TV signálu. Již při výkonovém nevyvážení 5 dB dojde k mírnému zlepšení a při zvyšování hodnoty výkonového nevyvážení již nedochází k téměř žádné změně. U výkonového nevyvážení na vysílači SLAVE dochází se zvyšující se hodnotou  $\Delta P_{TX2}$  k zhoršování hodnot parametrů  $BER$  a  $MER$ . U  $\Delta P_{TX2} = 20$  dB se vysílač TX2 jeví jako rušení signálu (viz Obr. 32 a), b), c)).

U výkonového nevyvážení na vysílači MASTER nastává QEF příjem při stejné hodnotě  $C/N$  ( $C/N = 25$  dB) pro všechna výkonová nevyvážení (5, 10, 15, 20 dB). Stejně tak k výpadku obrazu TV signálu dochází při stejné hodnotě  $C/N$  ( $C/N = 22$  dB) pro všechna výkonová nevyvážení. U výkonového nevyvážení na vysílači SLAVE se zvyšující se hodnotou výkonového nevyvážení roste hodnota  $C/N$  pro QEF příjem i pro výpadek obrazu. Při  $\Delta P_{TX2} = 20$  dB QEF příjem nastává při  $C/N = 34$  dB a k výpadku obrazu na TV přijímači dochází při  $C/N = 26$  dB (viz Tab. 16).

Vlivy přenosových kanálů na konstelační diagram 256QAM a na tvar RF spektra TV signálu při  $C/N = 30$  dB, jsou zobrazeny na Obr. 33, Obr. 34.

## 5.3 Druhý scénář – MISO konfigurace, přenosný příjem



Obr. 35 Přenosný příjem – MISO konfigurace

### 5.3.1 Přenosný příjem

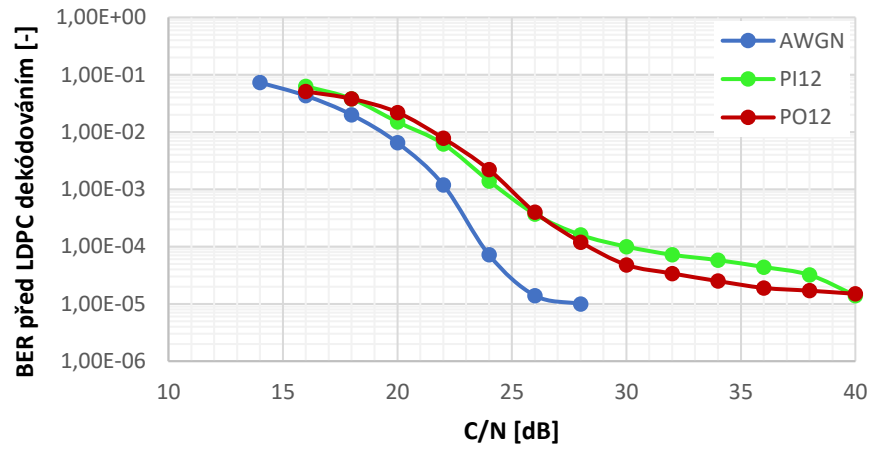
V tomto scénáři byly použity parametry systému pro tzv. přenosný (portable) příjem, tzn., že lze anténu bez obtíží přemístit na jiné místo (viz Obr. 35). Je zde použit mód OFDM 16K Extended, ochranný interval 1/16 a modulace 64QAM, viz Tab. 17. OFDM mód 16K a modulace 64QAM byly zvoleny z toho důvodu, že u přenosného příjmu je zapotřebí větší robustnost signálu na úkor velkému datovému toku oproti pevnému příjmu. Je uvažováno výkonové vyvážení vysílačů, tj., že úroveň signálu je na obou vysílačích nastavena na hodnotu -40 dBm. Poměr  $C/N$  je měněn současně na obou přístrojích SFU a SFE.

K popsání přenosové cesty bylo na vysílači TX1 využito kanálu PI12, vysílání signálu uvnitř budovy, kanál PO12, vysílání signálu vně budovy. Pro referenční měření bylo opět využito modelu přenosového kanálu AWGN. Na vysílači TX2 je trvale nastaven AWGN kanál.

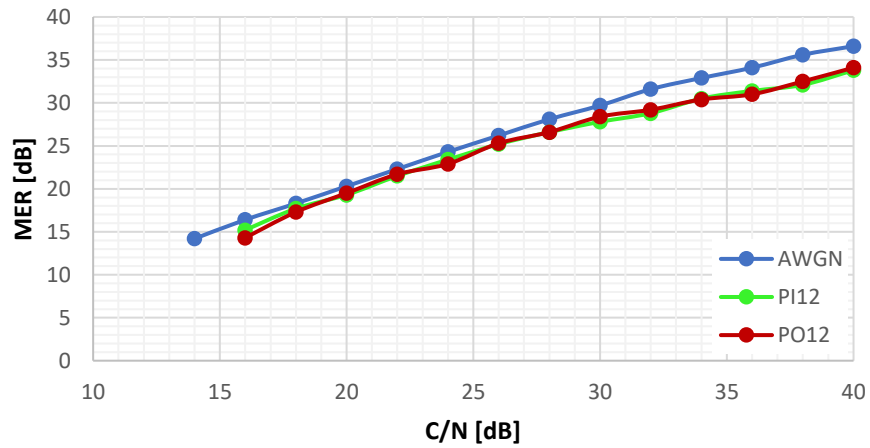
Tab. 17 Nastavené parametry – přenosný příjem

<b>OFDM mód</b>	16K
<b>Přenosový mód</b>	Extended
<b>Rozptýlené nosné</b>	PP3
<b>Ochranný interval</b>	1/16
<b>Modulace</b>	64QAM
<b>Kódový poměr</b>	2/3
<b>Nastavená úroveň signálu TX1</b>	-40 dBm
<b>Nastavená úroveň signálu TX2</b>	-40 dBm
<b>Rotovaná konstelace</b>	ANO
<b>Použité modely kanálů</b>	AWGN PI12 PO12
<b>Šířka pásma</b>	8 MHz
<b>Frekvence</b>	514 MHz

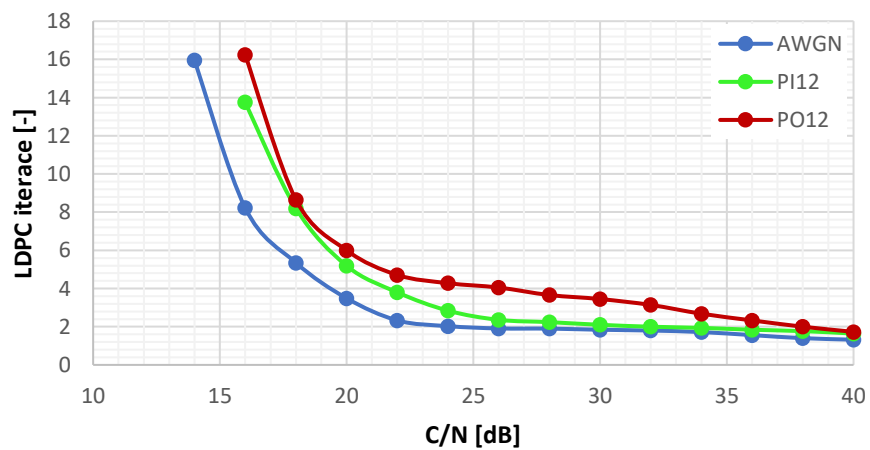
### 5.3.1.1 Vyhodnocení měření – přenosný příjem



a)  $BER_1 = f(C/N)$



b)  $MER = f(C/N)$

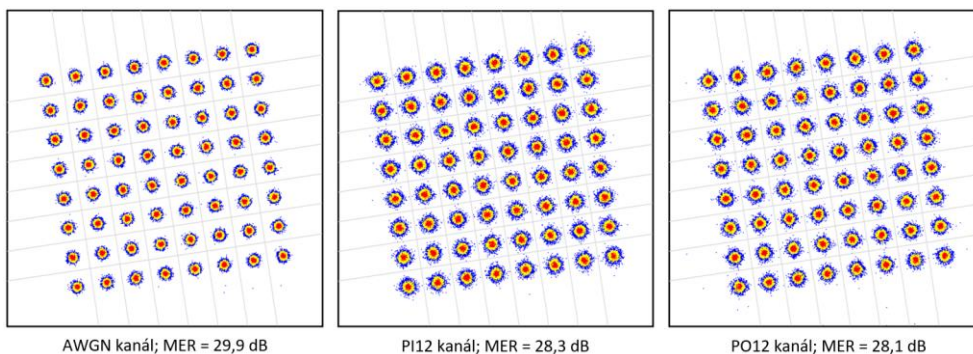


c)  $LDPC\ iterace = f(C/N)$

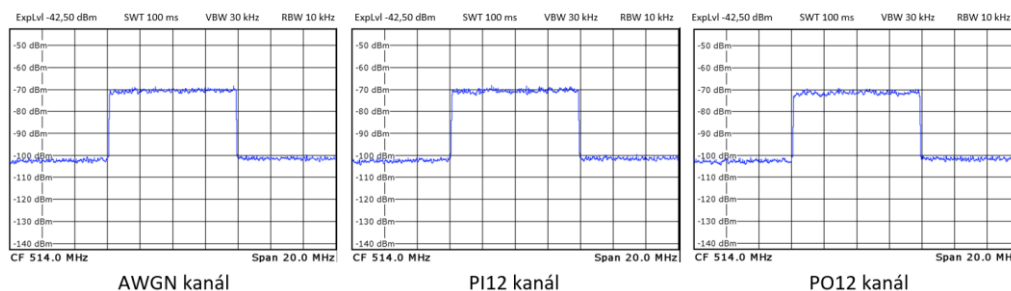
Obr. 36 Měřené parametry – přenosný příjem

Tab. 18 Hodnoty  $C/N$  potřebné pro dosažení QEF příjmu – přenosný příjem

Model přenosového kanálu	QEF – měřeno pomocí ETL TV analyzátoru			Pozorování výpadku obrazu na TV přijímači		
	AWGN	PI12	PO12	AWGN	PI12	PO12
$C/N_{\text{změr. [dB]}}$	14	16	16	13	14	14



Obr. 37 Konstelační diagramy 64QAM při  $C/N = 30$  dB – přenosný příjem



Obr. 38 RF spektra při  $C/N = 30$  dB – přenosný příjem

Z grafické závislosti  $BER_I = f(C/N)$  (Obr. 36 a)) je zřejmé, že AWGN kanál opět představuje nejlepší podmínky pro přenos. Dále lze pozorovat, že kanál PI12 a kanál PO12 představují velmi podobné podmínky pro přenos TV signálu. Mírně lepší hodnoty byly naměřeny pro kanál PO12.

Ke stejnému závěru dojdeme při zkoumání hodnot  $MER$  (Obr. 36 b)). Průběhy kanálu PI12 a PO12 se prakticky překrývají. U závislosti LDPC iterace =  $f(C/N)$  (Obr. 36 c)) lze vidět, že u kanálu PO12 je zapotřebí větší počet opakovaných LDPC iterací pro opravu přenášeného signálu než kanál PI12.

Porovnání hodnot  $C/N$  pro QEF příjem je v Tab. 18. Pro AWGN kanál QEF příjem nastává při  $C/N = 14$  dB a k výpadku obrazu došlo při  $C/N = 13$  dB. U kanálu PI12 a PO12 bylo dosaženo QEF příjmu při hodnotě  $C/N = 16$  dB a k výpadku obrazu došlo při  $C/N = 14$  dB.

Vlivy jednotlivých přenosových kanálů na konstelační diagram 64QAM a na tvar RF spektra TV signálu při  $C/N = 30$  dB jsou zobrazeny na Obr. 37, Obr. 38.

### 5.3.2 Přenosný příjem – výkonové nevyvážení vysílačů

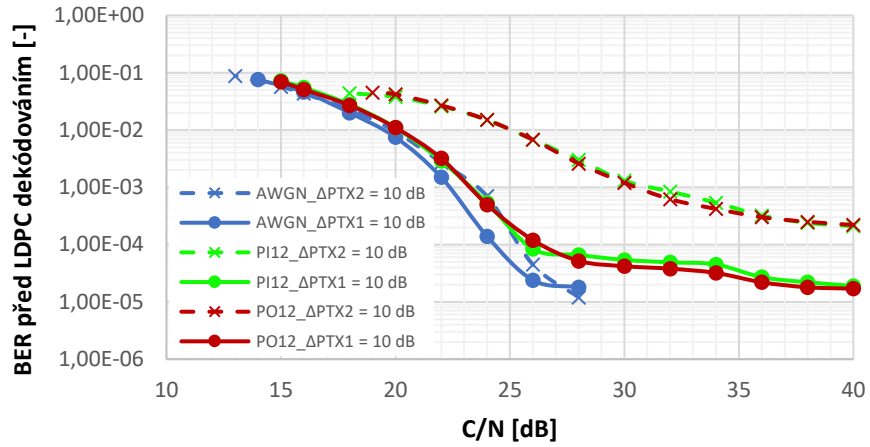
Nastavené systémové parametry jsou v Tab. 19. Změnou oproti předchozímu scénáři je, že jsou zde uvažována dvě výkonová nevyvážení vysílačů,  $\Delta P_{TX2} = 10$  dB a  $\Delta P_{TX1} = 10$  dB. V prvním případě je na vysílači TX1 nastavena úroveň signálu -40 dBm a na TX2 -50 dBm. V druhém případě jsou úrovně signálu nastaveny opačně, tj. na vysílači TX1 je úroveň -50 dBm a na TX2 je nastavena úroveň signálu -40 dBm.

Hodnota  $C/N$  je měněna současně na vysílači TX1 i na vysílači TX2.

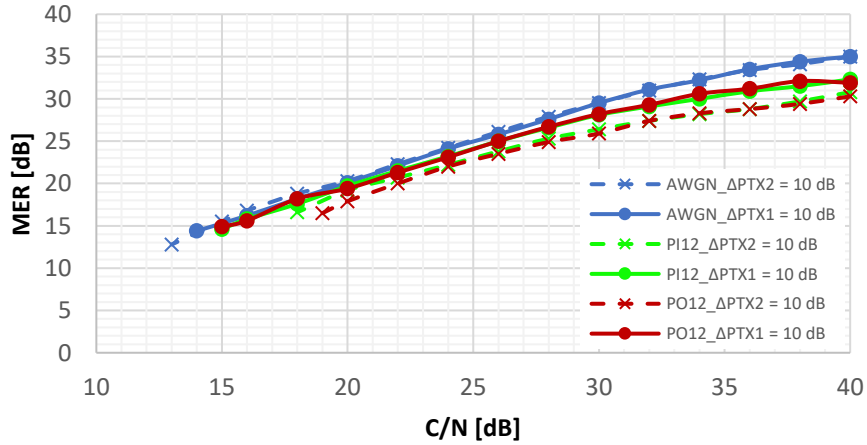
Tab. 19 Systémové parametry – přenosný příjem, výkonové nevyvážení vysílačů

<b>OFDM mód</b>	16K
<b>Přenosový mód</b>	Extended
<b>Rozptýlené nosné</b>	PP3
<b>Ochranný interval</b>	1/16
<b>Modulace</b>	64QAM
<b>Kódový poměr</b>	2/3
<b>Nastavená úroveň signálu TX1</b>	-40 dBm
<b>Nastavená úroveň signálu TX2</b>	-50 dBm
<b>Nastavená úroveň signálu TX1</b>	-50 dBm
<b>Nastavená úroveň signálu TX2</b>	-40 dBm
<b>Rotovaná konstelace</b>	ANO
<b>Použité modely kanálů</b>	AWGN PI12 PO12
<b>Šířka pásma</b>	8 MHz
<b>Frekvence</b>	514 MHz

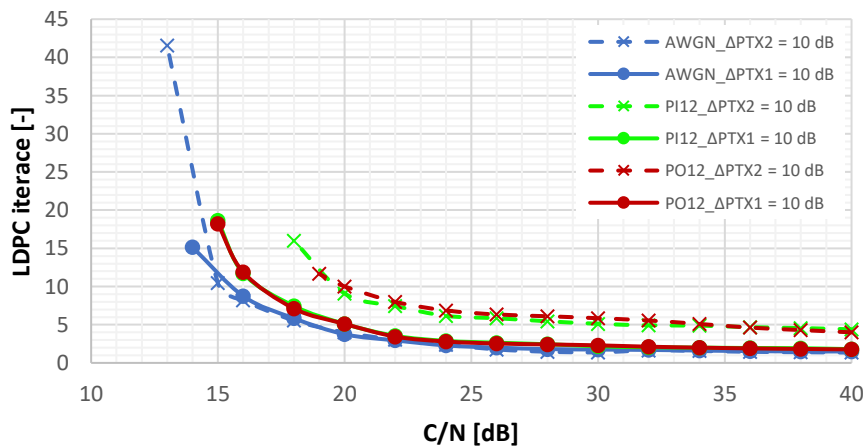
### 5.3.2.1 Vyhodnocení měření – přenosný příjem, výkonové nevyvážení vysílačů



a)  $BER_1 = f(C/N)$



b)  $MER = f(C/N)$

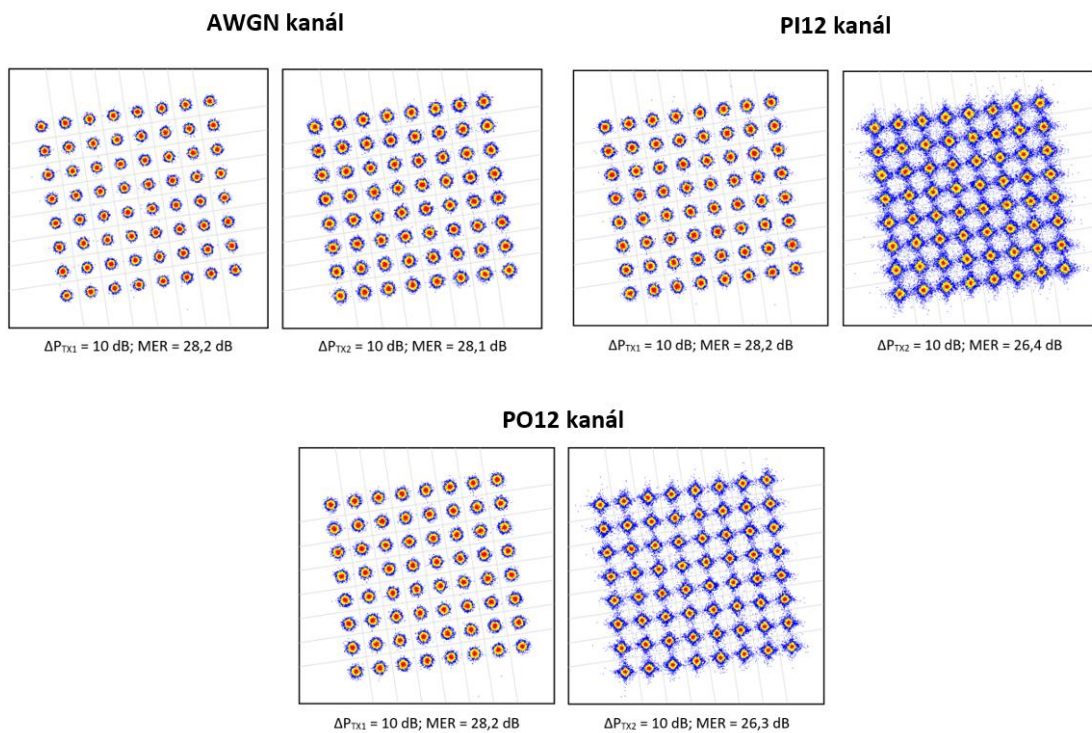


c) LDPC iterace =  $f(C/N)$

Obr. 39 Měřené parametry – přenosný příjem, výkonové nevyvážení vysílačů

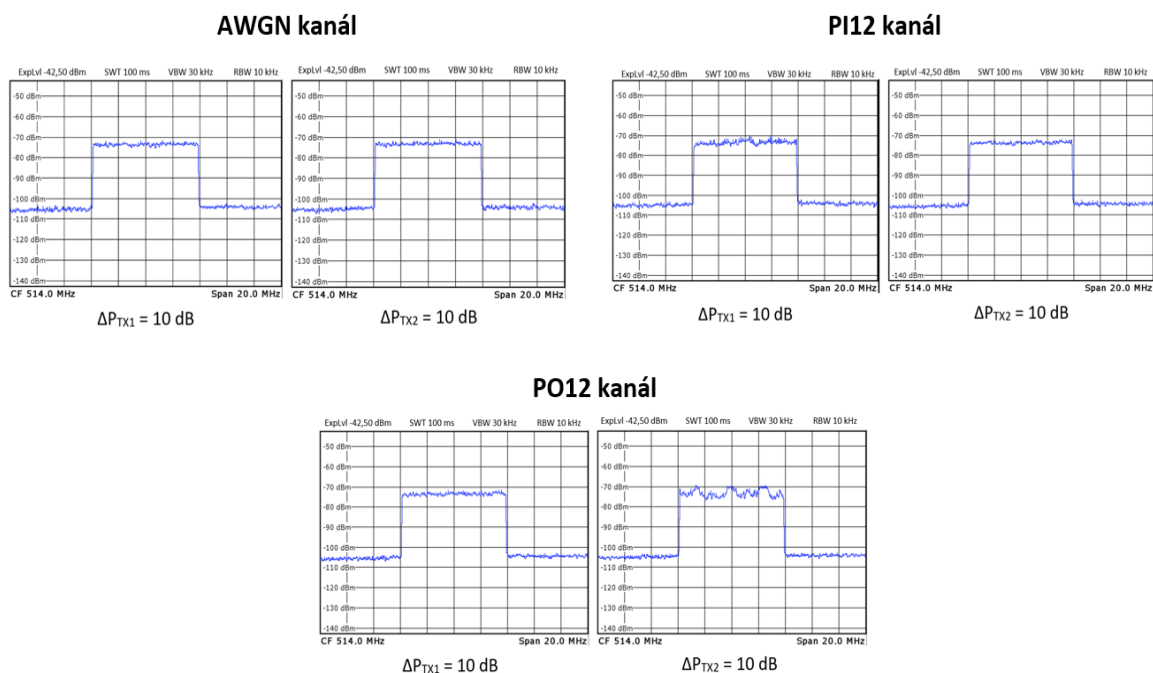
Tab. 20 Hodnoty  $C/N$  potřebné pro dosažení QEF příjmu při výkonovém nevyvážení vysílačů – přenosný příjem

	QEF – měřeno pomocí ETL TV analyzátoru		Pozorování výpadku obrazu na TV přijímači	
Model přenosového kanálu	AWGN			
$\Delta P_{TX}$ [dB]	$\Delta P_{TX1} = 10$ dB	$\Delta P_{TX2} = 10$ dB	$\Delta P_{TX1} = 10$ dB	$\Delta P_{TX2} = 10$ dB
$C/N_{změř.}$ [dB]	14	14	13	13
Model přenosového kanálu	PI12			
$\Delta P_{TX}$ [dB]	$\Delta P_{TX1} = 10$ dB	$\Delta P_{TX2} = 10$ dB	$\Delta P_{TX1} = 10$ dB	$\Delta P_{TX2} = 10$ dB
$C/N_{změř.}$ [dB]	15	18	13	16
Model přenosového kanálu	PO12			
$\Delta P_{TX}$ [dB]	$\Delta P_{TX1} = 10$ dB	$\Delta P_{TX2} = 10$ dB	$\Delta P_{TX1} = 10$ dB	$\Delta P_{TX2} = 10$ dB
$C/N_{změř.}$ [dB]	15	18	13	16



Obr. 40 Konstelační diagramy 64QAM při  $C/N = 30$  dB – výkonové nevyvážení vysílačů





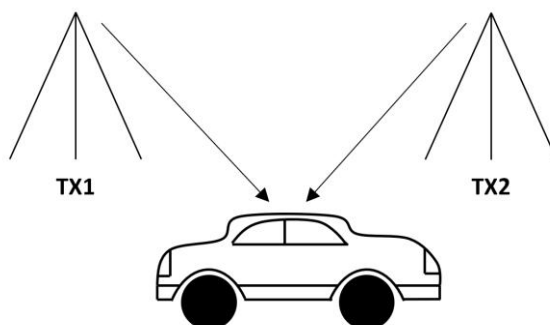
Obr. 41 RF spektra při  $C/N = 30$  dB – přenosný příjem, výkonové nevyvážení vysílačů

Při analýze naměřených grafických závislostí  $BER_I$  (Obr. 39 a)),  $MER$  (Obr. 39 b)) a počet LDPC iterací (Obr. 39 c)) dojdeme ke stejným závěrům jako u předchozího scénáře. AWGN kanál má nejlepší podmínky pro přenos TV signálu. Kanály PI12 a PO12 představují téměř stejné podmínky pro přenos.

V Tab. 20 jsou uvedeny hodnoty, při kterých bylo dosaženo QEF příjmu pro AWGN kanál, PI12 a PO12. Také jsou zde hodnoty, při kterých dochází k výpadku obrazu na TV přijímači. U kanálu AWGN nenastala žádná změna. Je to z toho důvodu, že na vysílači MASTER i na vysílači SLAVE je nastaven AWGN kanál, tudíž při výkonovém nevyvážení nedochází k téměř žádnému ovlivnění přenášeného TV signálu. U kanálu PI12 a PO12 bylo dosaženo QEF příjmu při stejných hodnotách  $C/N$ , stejně tak k výpadku obrazu. Při výkonovém nevyvážení  $\Delta P_{TX1}$  došlo ke snížení poměru  $C/N$  o 1 dB oproti měření, kdy byla úroveň signálu stejná na obou vysílačích (viz Obr. 36). Naopak u výkonového nevyvážení  $\Delta P_{TX2}$  došlo ke zvýšení hodnoty  $C/N$  pro QEF příjem o 2 dB. Je to způsobeno tím, že vysílač MASTER má nižší úroveň signálu, tudíž se více uplatňuje na přenášený signál vysílač SLAVE a tím pádem dochází ke kompenzaci přenášeného signálu. To samé i naopak, kdy je na vysílači SLAVE nižší úroveň signálu, tudíž AWGN kanál má menší vliv na přenášený signál a více se uplatňuje kanál PI12/PO12.

Konstelční diagramy 64QAM a RF spektra při hodnotě  $C/N = 30$  dB jsou na Obr. 40 a Obr. 41.

## 5.4 Třetí scénář – MISO konfigurace, mobilní příjem



Obr. 42 Mobilní příjem – MISO konfigurace

### 5.4.1 Mobilní příjem

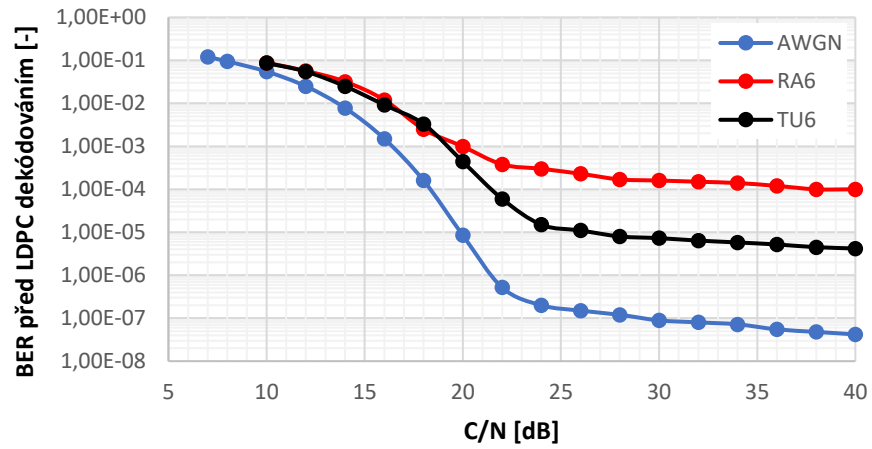
V následujícím scénáři jsou vybrány parametry pro tzv. mobilní (mobile) příjem. Přenosové prostředí je definováno pomocí kanálu TU6, přijímač se pohybuje cca rychlostí 50 km/h. Tento kanálový model má emulovat šíření a příjem signálu v městské oblasti. Dále je definováno pomocí kanálu RA6, kdy se přijímač pohybuje rychlostí 100 km/h. Kanál představuje šíření a příjem signálu ve venkovské oblasti. Je použit OFDM mód 4K, ochranný interval 1/8 a modulace 16QAM. Tyto parametry byly zvoleny z toho důvodu, že u mobilního příjmu je zapotřebí co nejrobustnější systém, aby se zabránilo rušení a co nejvíce se eliminovaly chyby. Všechny nastavené parametry jsou v Tab. 21. Je proměřeno výkonové vyvážení vysílačů, tzn., že úroveň signálu obou vysílačů je nastavena na -40 dBm. Poměr  $C/N$  je měněn současně na obou vysílačích.

Na vysílači TX1 bylo pro referenční měření využito kanálu AWGN. Pro emulaci mobilního příjmu bylo užito modelu kanálu RA6 a kanálu TU6. Na TX2 byl opět trvale nastaven AWGN kanál.

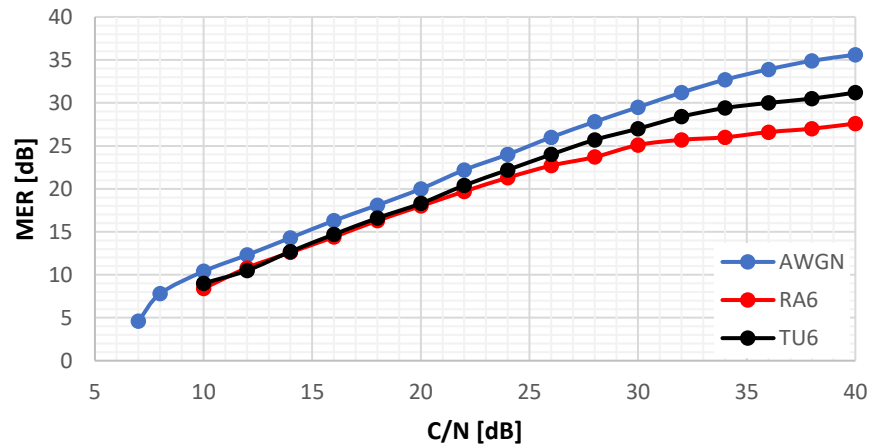
Tab. 21 Systémové parametry – mobilní příjem

<b>OFDM mód</b>	4K
<b>Rozptýlené nosné</b>	PP1
<b>Ochranný interval</b>	1/8
<b>Modulace</b>	16QAM
<b>Kódový poměr</b>	1/2
<b>Nastavená úroveň signálu TX1</b>	-40 dBm
<b>Nastavená úroveň signálu TX2</b>	-40 dBm
<b>Rotovaná konstelace</b>	ANO
<b>Použité modely kanálů</b>	AWGN RA6 TU6
<b>Šířka pásma</b>	8 MHz
<b>Frekvence</b>	514 MHz

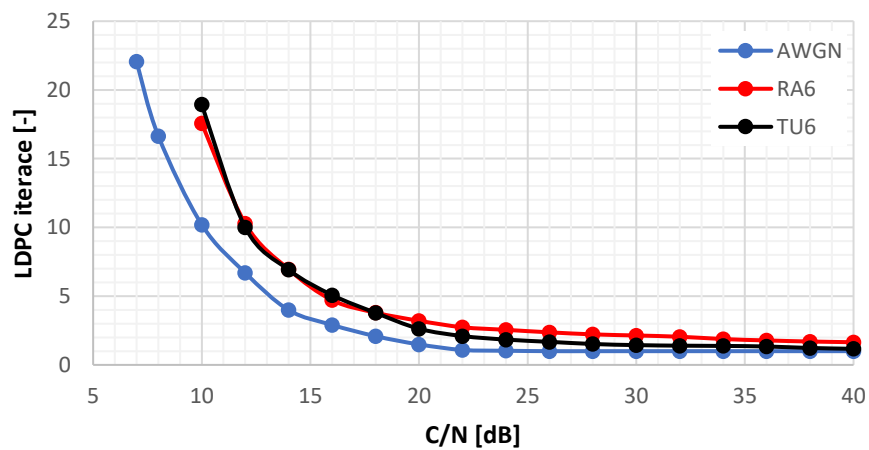
### 5.4.1.1 Vyhodnocení měření – mobilní příjem



a)  $BER_1 = f(C/N)$



b)  $MER = f(C/N)$

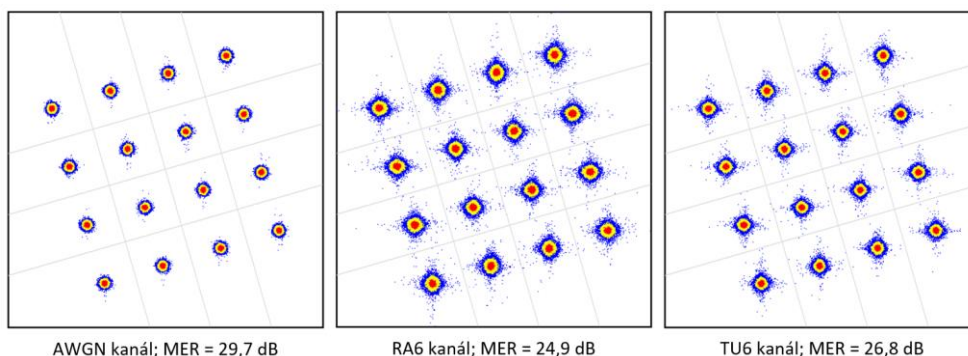


c)  $LDPC\ iterace = f(C/N)$

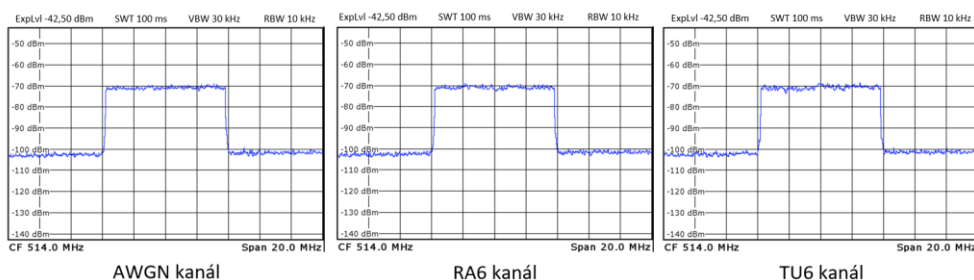
Obr. 43 Měřené parametry – mobilní příjem

Tab. 22 Hodnoty  $C/N$  potřebné pro dosažení QEF příjmu – mobilní příjem

Model přenosového kanálu	QEF – měřeno pomocí ETL TV analyzátoru			Pozorování výpadku obrazu na TV přijímači		
	AWGN	RA6	TU6	AWGN	RA6	TU6
$C/N_{\text{změř.}} [\text{dB}]$	7	10	10	6	9	8



Obr. 44 Konstelační diagramy 16QAM při  $C/N = 30 \text{ dB}$  – mobilní příjem



Obr. 45 RF spektra při  $C/N = 30 \text{ dB}$  – mobilní příjem

Z naměřených hodnot (Obr. 43 a), b), c)) lze vidět, že nejlepší podmínky pro tzv. mobilní příjem představuje kanál TU6. Důvodem je, že rychlost přijímače je vůči vysílači 50 km/h, což má za následek menší Dopplerův posuv, který má vliv na přenášený signál. Oproti tomu se u kanálu RA6 přijímač pohybuje rychlostí 100 km/h, tudíž je i větší Dopplerův posuv, což má za následek i horší přenosové podmínky.

V Tab. 22 jsou zobrazeny hodnoty pro QEF příjem a pro výpadek obrazu na TV přijímači při subjektivním pozorování. U kanálu AWGN bylo QEF příjmu dosaženo již při hodnotě  $C/N = 7 \text{ dB}$  a k výpadku obrazu došlo při  $C/N = 6 \text{ dB}$ . V případě kanálových modelů TU6 a RA6 bylo QEF příjmu dosaženo při totožné hodnotě  $C/N = 10 \text{ dB}$ . K výpadku obrazu na TV přijímači došlo u kanálu RA6 při  $C/N = 9 \text{ dB}$  a u kanálu TU6 při  $C/N = 8 \text{ dB}$ .

Vlivy přenosových kanálů na konstelační diagram 16QAM a na tvar RF spektra TV signálu pro  $C/N = 30 \text{ dB}$ , jsou zobrazeny na Obr. 44 a Obr. 45.

## 5.4.2 Mobilní příjem – výkonové nevyvážení vysílačů

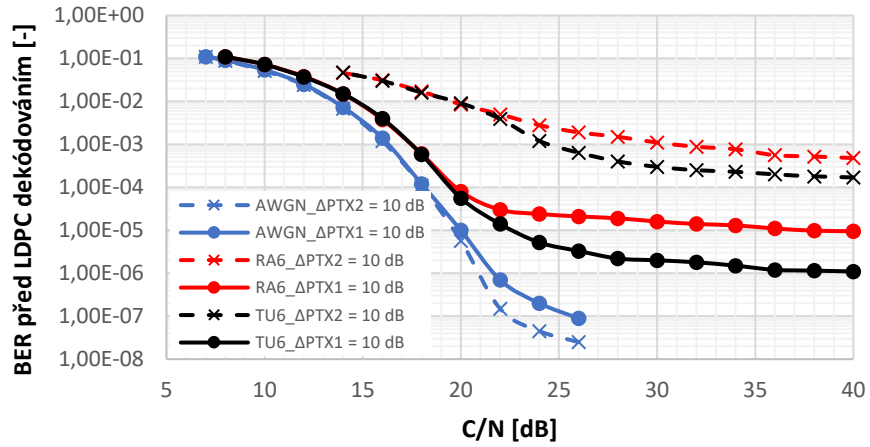
Jedná se opět o parametry pro tzv. mobilní příjem. Systémové parametry jsou v Tab. 23. Oproti předchozímu scénáři jsou zde uvažována dvě výkonová nevyvážení vysílačů,  $\Delta P_{TX2} = 10$  dB a  $\Delta P_{TX1} = 10$  dB. Jsou proměřeny dva případy. V prvním případě je na TX1 nastavena úroveň signálu -40 dBm a na vysílači TX2 -50 dBm. V druhém případě jsou úrovně signálu nastaveny obráceně, na TX1 -50 dBm a na TX2 -40 dBm.

Poměr  $C/N$  je měněn zároveň na SFU i SFE přístroji.

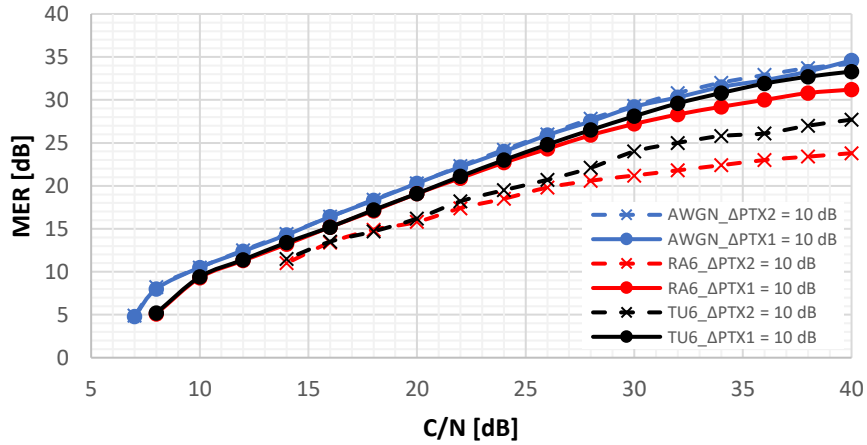
Tab. 23 Systémové parametry – mobilní příjem, výkonové nevyvážení vysílačů

<b>OFDM mód</b>	4K
<b>Rozptýlené nosné</b>	PP1
<b>Ochranný interval</b>	1/8
<b>Modulace</b>	16QAM
<b>Kódový poměr</b>	1/2
<b>Nastavená úroveň signálu TX1</b>	-40 dBm
<b>Nastavená úroveň signálu TX2</b>	-50 dBm
<b>Nastavená úroveň signálu TX1</b>	-50 dBm
<b>Nastavená úroveň signálu TX2</b>	-40 dBm
<b>Rotovaná konstelace</b>	ANO
<b>Použité modely kanálů</b>	AWGN
	RA6
	TU6
<b>Šířka pásma</b>	8 MHz
<b>Frekvence</b>	514 MHz

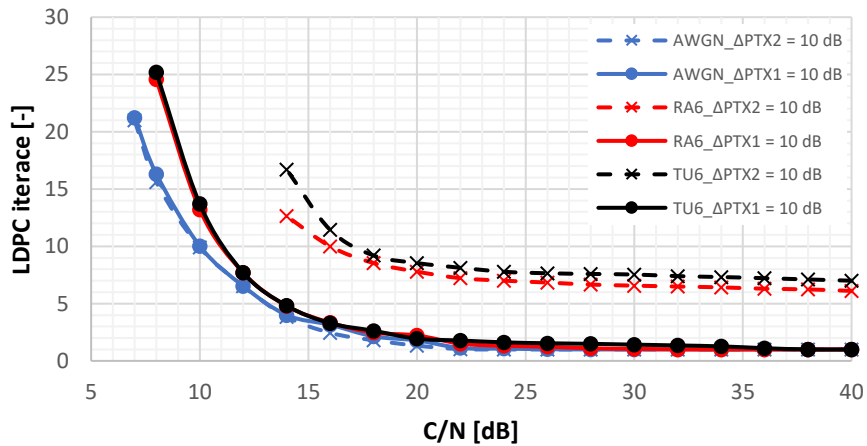
### 5.4.2.1 Vyhodnocení měření – výkonové nevyvážení vysílačů, mobilní příjem



a)  $BER_1 = f(C/N)$



b)  $MER = f(C/N)$

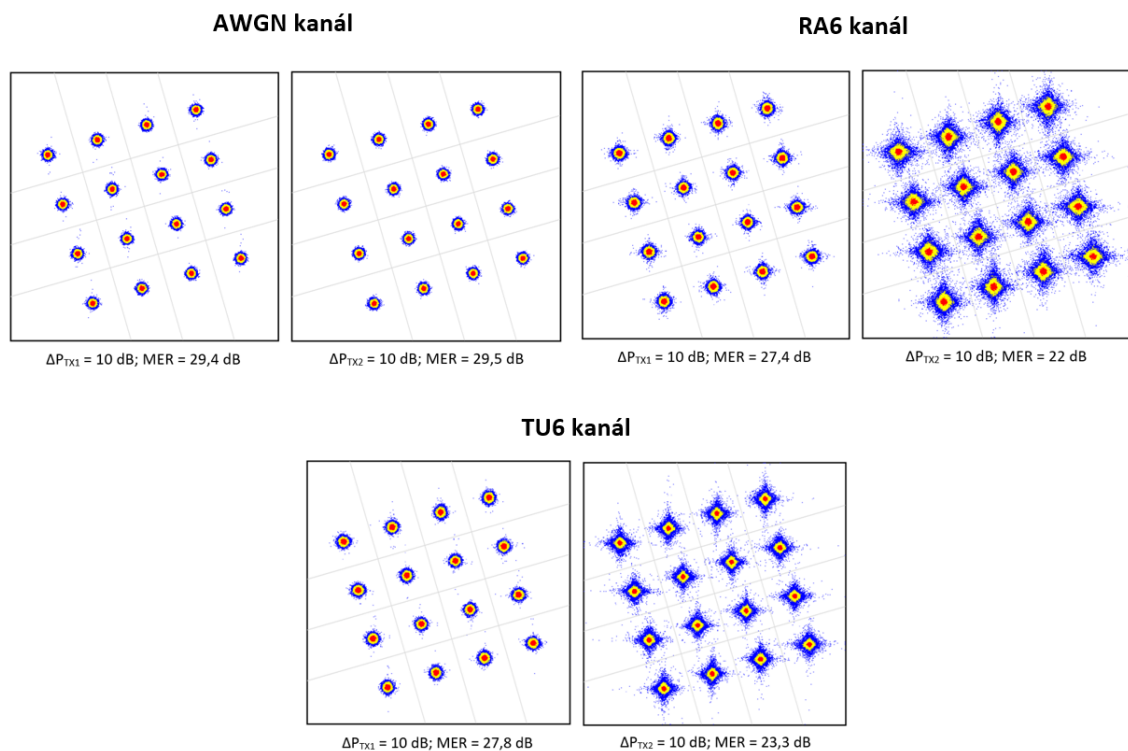


c)  $LDPC\ iterace = f(C/N)$

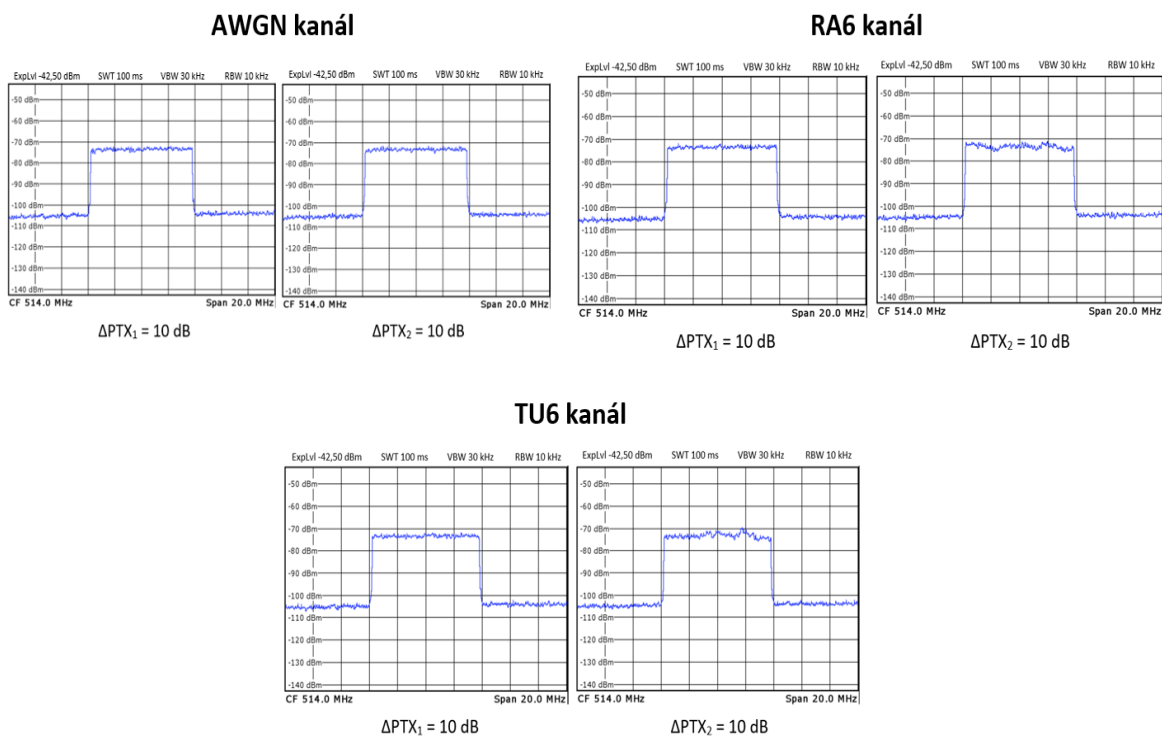
Obr. 46 Měřené parametry – výkonové nevyvážení vysílačů, mobilní příjem

Tab. 24 Hodnoty  $C/N$  potřebné pro dosažení QEF příjmu při výkonovém nevyvážení vysílačů – mobilní příjem

	QEF – měřeno pomocí ETL TV analyzátoru		Pozorování výpadku obrazu na TV přijímači	
Model přenosového kanálu	AWGN			
$\Delta P_{TX}$ [dB]	$\Delta P_{TX1} = 10$ dB	$\Delta P_{TX2} = 10$ dB	$\Delta P_{TX1} = 10$ dB	$\Delta P_{TX2} = 10$ dB
$C/N_{změř.}$ [dB]	7	7	6	5
Model přenosového kanálu	RA6			
$\Delta P_{TX}$ [dB]	$\Delta P_{TX1} = 10$ dB	$\Delta P_{TX2} = 10$ dB	$\Delta P_{TX1} = 10$ dB	$\Delta P_{TX2} = 10$ dB
$C/N_{změř.}$ [dB]	8	14	7	14
Model přenosového kanálu	TU6			
$\Delta P_{TX}$ [dB]	$\Delta P_{TX1} = 10$ dB	$\Delta P_{TX2} = 10$ dB	$\Delta P_{TX1} = 10$ dB	$\Delta P_{TX2} = 10$ dB
$C/N_{změř.}$ [dB]	8	14	6	12



Obr. 47 Konstelační diagramy 16QAM při  $C/N = 30$  dB – výkonové nevyvážení vysílačů



Obr. 48 RF spektra při  $C/N = 30 \text{ dB}$  – mobilní příjem, výkonové nevyvážení vysílačů

Při analýze naměřených objektivních parametrů (Obr. 46 a), b), c)) dojdeme ke stejnému závěru jako u předchozího scénáře. Nejlepší přenosové podmínky pro mobilní příjem představuje kanál TU6 i při výkonových nevyváženích. Při výkonovém nevyvážení, kdy je na vysílači MASTER nižší úroveň signálu než na vysílači SLAVE, bylo dosaženo značně lepších výsledků, protože má na přenášený signál větší dopad vysílač SLAVE, který emuluje AWGN kanál.

Jednotlivé hodnoty  $C/N$  pro QEF příjem a pro výpadek obrazu na TV přijímači jsou v Tab. 24. U kanálu AWGN byl QEF příjem opět zjištěn při  $C/N = 7 \text{ dB}$  pro výkonové nevyvážení na vysílači MASTER  $\Delta P_{TX1}$  i na vysílači SLAVE  $\Delta P_{TX2}$ . K výpadku obrazu pro výkonové nevyvážení  $\Delta P_{TX1}$  došlo při  $C/N = 6 \text{ dB}$  a pro výkonové nevyvážení  $\Delta P_{TX2}$  při  $C/N = 5 \text{ dB}$ . Pro kanál RA6 a kanál TU6 bylo QEF příjmu dosaženo při totožných hodnotách, a to při  $C/N = 8 \text{ dB}$  pro výkonové nevyvážení  $\Delta P_{TX1}$  a pro výkonové nevyvážení  $\Delta P_{TX2}$  při  $C/N = 14 \text{ dB}$ . Dosažení nižší hodnoty pro QEF příjem při výkonovém nevyvážení na vysílači MASTER je opět způsobeno tím, že vysílač SLAVE má větší vliv na přenášený signál, tím pádem dochází ke kompenzaci kvality signálu.

Konstelační diagramy 16QAM a RF spektra pro jednotlivé konfigurace, při  $C/N = 30 \text{ dB}$ , jsou zobrazeny na Obr. 47 a Obr. 48.



## 5.5 Dosažené výsledky vs. stav poznání

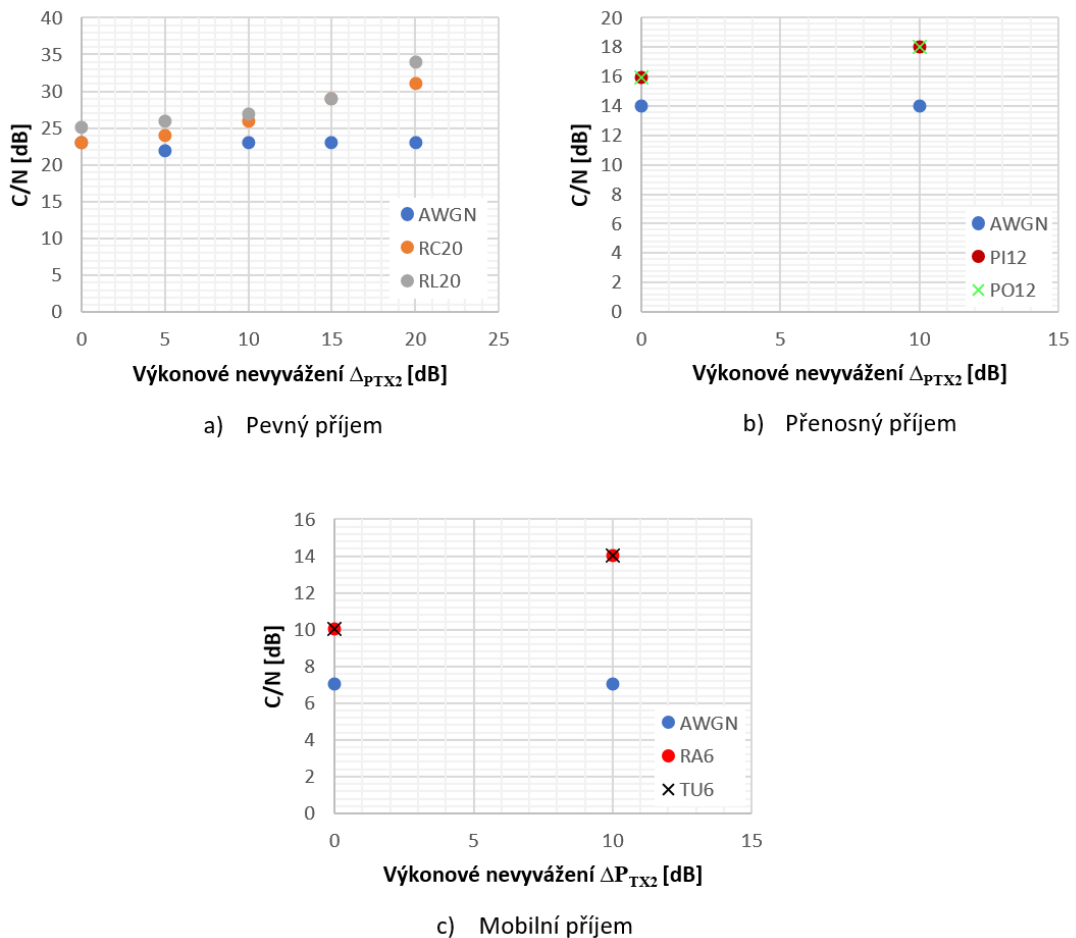
Výsledky měření nelze přímo porovnat s dostupnou literaturou. Nepodařilo se nalézt měření, kde by byly uvažovány stejné systémové parametry. Největším rozdílem je, že ve všech případech je na vysílači TX2 nastaven AWGN kanál, což vede k ovlivnění výsledků.

Při měření, které bylo prezentováno v kapitole 5.2.1, bylo pro Riceův kanál dosaženo QEF příjmu při hodnotě  $C/N = 23$  dB. V [36] byl použit OFDM mód 8K, ochranný interval 1/8, kódový poměr 2/3 a modulace 256QAM. QEF příjmu bylo u Riceova kanálu dosaženo při  $C/N = 19$  dB [36].

V případě mobilního příjmu při výkonovém vyvážení vysílačů (5.4.1) bylo pro TU6 kanál dosaženo QEF příjmu při  $C/N = 10$  dB. V [36] byl opět použit mód OFDM 8K, ochranný interval 1/8, kódový poměr 2/3 a modulace 64QAM. Pro kanál TU6 bylo QEF příjmu dosaženo při  $C/N = 15$  dB [36].

Při uvažování výkonových nevyvážení, kdy je na vysílači SLAVE nižší úroveň signálu, dochází při výkonovém nevyvážení 10 dB ke zvýšení hodnoty  $C/N$  pro QEF příjem o 2 až 4 dB. V [37], při výkonovém nevyvážení 10 dB, dochází ke zvýšení hodnoty  $C/N$  pro QEF příjem o přibližně 3 dB [37].

Na Obr. 49 a), b), c) je srovnání hodnot  $C/N$  pro dosažení QEF příjmu v závislosti na výkonovém nevyvážení vysílačů pro jednotlivé scénáře.



Obr. 49 Srovnání hodnot  $C/N$  pro QEF příjem pro výkonové nevyvážení  $\Delta P_{TX2}$

## 6. ZÁVĚR

Cílem této práce bylo prostudovat standard digitální televizní techniky DVB-T2, detailně popsat MISO vysílání, navrhnout a realizovat vhodné laboratorní pracoviště pro měření vysílání a příjmu TV signálu DVB-T2 využívající MISO konfiguraci. Dále bylo provedeno měření, analýza, vyhodnocení jednotlivých měření a navržení laboratorní úlohy pro měření DVB-T2 MISO vysílání a její vzorové vypracování.

V teoretické části byl prozkoumán standard pro digitální pozemní vysílání druhé generace DVB-T2. Následně byla detailně popsána MISO konfigurace, která je jednou z nejperspektivnějších inovací ve standardu DVB-T2. Dále byly popsány jednotlivé přenosové kanály, které se používají jako přenosové cesty signálu.

V experimentální části práce bylo navrženo měřicí pracoviště sloužící pro měření digitálního TV vysílání DVB-T2 využívající MISO konfiguraci. Byly popsány použité měřicí přístroje, zapojení a měřené parametry, které jsou podstatné k vyhodnocení kvality TV signálu.

Pro seznámení s přístroji bylo jako první provedeno referenční měření standardu DVB-T2 využívající SISO konfiguraci. Poté byly změřeny tři scénáře pro DVB-T2 využívající MISO konfiguraci. Tyto scénáře představují situace, které nastávají při vysílání TV signálu. Jedná se o pevný, přenosný a mobilní příjem. Pro všechny scénáře byla proměřena výkonová nevyváženost na obou vysílačích. Všechna měření proběhla v laboratorních podmínkách v Laboratoři digitální, televizní a rozhlasové systémy na Ústavu radioelektroniky. Dále byly zobrazeny grafické závislosti měřených objektivních parametrů. U MISO konfigurace byly také zobrazeny konstelační diagramy a RF spektra použitých přenosových kanálů. Na závěr každého měření bylo provedeno krátké vyhodnocení naměřených hodnot.

Na závěr byla vypracována laboratorní úloha do předmětu Digitální televizní a rozhlasové systémy a také její vzorové vypracování, které jsou dostupné v příloze této bakalářské práce.

Část této bakalářské práce byla prezentována na soutěži Student EEICT 2020 [38].

# LITERATURA

- [1] LEGÍŇ, Martin, 2006. *Televizní technika DVB-T*. Praha: BEN – technická literatura. ISBN 978-80-7300-204-6.
- [2] FISCHER, Walter a Horst von RENOARD, 2008. *Digital video and audio broadcasting technology: a practical engineering guide ; with 71 tables*. 2. ed. Berlin: Springer. Springer series on signals and communication technology. ISBN 978-3-540-76357-4.
- [3] BEUTLER, Roland, 2012. *The Digital Dividend of Terrestrial Broadcasting*. New York: Springer. ISBN 978-1-4614-1568-8.
- [4] ŘÍČNÝ, V. *Druhá generace standardu digitální pozemní televize DVB-T2*. [online] [vid. 2019-10-16]. Dostupné z: <https://www.lupa.cz/clanky/druha-generace-standardu-digitalni-pozemni/>
- [5] 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.
- [6] ŘÍČNÝ, V. *Jaký kompresní standard použije Česko u budoucího vysílání Ultra HD v DVB-T2? Lupa.cz* [online] [vid. 2019-10-19]. Dostupné z: <https://www.lupa.cz/clanky/jaky-kompresni-standard-pouzije-cesko-u-budouciho-vysilani-ultra-hd-v-dvb-t2/>
- [7] 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.
- [8] 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)*.
- [9] 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)*.
- [10] POLÁK, L., KRATOCHVÍL, T., *Performance of the Rotated Constellation in DVB-T2*, Department of Radio Electronics, Brno University of Technology, 2012.

- [11] 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.
- [12] KREJČÍ, 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.
- [13] Tvfreak.cz: *Zakulisi DVB-teorie a technické informace*. [online]. 13. 7. 2009 [cit. 2019-11-08]. Dostupné z: <https://www.tvfreak.cz/zakulisi-dvb-teorie-a-technicke-informace/2988-7>
- [14] POLÁK, L. *Analysis and simulation of the signal transmission in the DVB-H/SH standards*. Doctoral Thesis. Brno: Brno University of Technology, Faculty of Electrical Engineering and Communication, Department of Radio Electronics, 2012. 113 p. Supervised by doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.
- [15] Digitalnivelevize.cz: *Seriál o DVB-T2: 1.díl - Proč DVB-T2* [online]. 28.12.2010 [cit. 2019-09-10]. Dostupné z WWW: <<http://www.digitalnivelevize.cz/magazin/obecne/mala-encyklopedie-televiznitechiky/2010-12-serial-o-dvb-t2-proc-dvb-t2.html?sablona=tisk>>.
- [16] POLÁK, Ladislav; KALLER, Ondřej; KRATOCHVÍL, Tomáš. SISO/MISO Performances in DVB-T2 and Fixed TV Channels. In: 2015 38th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP). IEEE, 2015. p. 768-771.
- [17] Učebnice teorie rádiové komunikace: *Alamoutiho kód*. [online]. [cit. 2019-11-24]. Dostupné z: [http://www.urel.feec.vutbr.cz/MTRK/?Mimo\\_syst%E9my%2C\\_%E8aso-prostorov%E9\\_k%F3dov%E1n%ED:%C8asoprostorov%E9\\_k%F3dov%E1n%ED:Alamoutiho\\_k%F3d](http://www.urel.feec.vutbr.cz/MTRK/?Mimo_syst%E9my%2C_%E8aso-prostorov%E9_k%F3dov%E1n%ED:%C8asoprostorov%E9_k%F3dov%E1n%ED:Alamoutiho_k%F3d)
- [18] ITU-R, *Frequency and network planning aspects of DVB-T2*, Report ITU-R BT.2254-3 2017.
- [19] SURANTHA, Nico, Tatsumi UWAI, Yuhei NAGAO, Masayuki KUROSAKI, Baiko SAI a Hiroshi OCHI, 2013. Channel Estimation for a MISO DVB-T2 System in High-Speed Environments. *Journal of Signal Processing* [online]. 17(5), 179–188. ISSN 1342-6230, 1880-1013. Dostupné z: doi:10.2299/jsp.17.179
- [20] Omko.cz: *Digitální vysílání DVB-T2 v ČR*. [online]. 2019 [cit. 2019-11-14]. Dostupné z: <https://www.omko.cz/digitalni-vysilani-dvb-t2/>

- [21] Wing-TV. *D4- Laboratory Tests Results. Project report*. CELTIC participants in project Wing-TV, 2005.
- [22] POSPÍCHAL, M. *Digitální pozemní televizní vysílání DVB-T/H a DVB-T2: diplomová práce*. Brno: FEKT VUT v Brně, 2011. 94 s., 26 příl.
- [23] POLÁK, L. *Simulace vícecestného šíření vícestavových modulací*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2009.
- [24] ETSI TR 101 290 V1.2.1 (2001-05). *Digital Video Broadcasting (DVB), Measurement guidelines for DVB systems*. Technical Report ETSI, 2001.
- [25] 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.
- [26] KOBLISCHKA, Vítězslav *Měření diverzitního vysílání ve standardu DVB-T2: bakalářská práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2014. 50 s. Vedoucí práce Ing. Ladislav Polák, Ph.D.
- [27] R&S SFU Broadcast Test System Data sheet. Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG, v04.00, 2010.
- [28] Rohde&Schwarz, *Generating a Test Signal for Distributed DVB-T2 MISO*, Application Note 7BM80\_1E, 2012.
- [29] R&S SFE Broadcast Tester Data sheet. Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG, v03.02, 2010.
- [30] R&S ETL TV Analyzer Data sheet. Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG, v05.01, 2011.
- [31] Techopedia.com, *Set-Top Box (STB)* [online]. [cit. 2019-12-03]. Dostupné z: <https://www.techopedia.com/definition/2284/set-top-box-stb>
- [32] Anténní slučovač Teroz, <https://www.gme.cz/antenni-slučovac-teroz-t-226-k>

- [33] KVÍČALA, R. *Chybovost a dostupnost atmosférických optických spojů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 103 s. Vedoucí dizertační práce prof. Ing. Otakar Wilfert, CSc.
- [34] Antény a satelity, *Měření digitálních signálů DVB-T* [online]. [cit. 2019-12-11]. Dostupné z: <http://www.profidigital.cz/homepage/56-mereni-digitalniho-signalu-dvb-t.html>
- [35] KŘÍŽ, David. *Na jaké parametry si musíte dát pozor při příjmu digitálního televizního signálu* [online]. 25. 1. 2010 [cit. 2019-12-09]. Dostupné z: <https://www.lupa.cz/clanky/na-jake-parametry-si-musite-dat-pozor-u-dvb-t/>
- [36] TORMOS, Mokhtar, et al. Experimental performance of mobile DVB-T2 in SFN and distributed MISO network. In: 2012 19th International Conference on Telecommunications (ICT). IEEE, 2012. p. 1-5.
- [37] MORGADE, Javier, et al. SFN-SISO and SFN-MISO Gain Performance Analysis for DVB-T2 Network Planning. TBC, 2014, 60.2: 272-286.
- [38] BÁRTA, Vojtěch. *Laboratory workplace to measure DVB-T2 MISO signal*, Student EEICT 2020, 3 s.

# SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1: Návrh laboratorní úlohy .....	72
Příloha 2: Vzorové vypracování laboratorní úlohy.....	79

## **Příloha 1: Návrh laboratorní úlohy**



Digitální televizní a rozhlasové systémy (MDTV)

Laboratorní úloha

## MĚŘENÍ DVB-T2 MISO VYSÍLÁNÍ

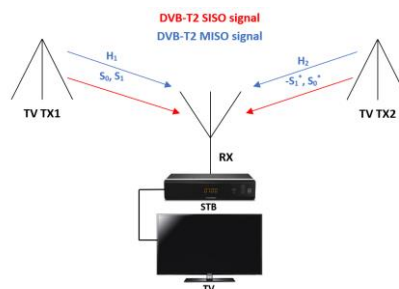
Cílem úlohy je seznámit se s obsluhou R&S SFU a SFE vysílačů, měřícího přijímače ETL TV Analyzer a s měření parametrů signálu při příjmu vysílání DVB-T2 MISO vysílání. Během měření získáte základní představu o parametrech, na základě kterých se vyhodnocuje kvalita TV signálu a vlivu výkonového nevyvážení vysílačů na přenášený signál. Měření bude provedeno pro pevný příjem digitálního TV signálu. Je rozděleno na dvě části. V první části je uvažován případ, kdy mají oba vysílače stejnou úroveň signálu a v druhé části je uvažováno výkonové nevyvážení vysílačů.

### Teoretický úvod

Druhá generace systému pozemního digitálního TV vysílání (Digital Video Broadcasting – Second Generation Terrestrial – DVB-T2) je nástupcem standardu DVB-T [1], ale není s ním zpětně kompatibilní. Poprvé byl zveřejněn v roce 2008 a v současnosti patří mezi nejpokročilejší pozemní televizní systém v Evropské Unii. V porovnání s DVB-T disponuje větší systémovou flexibilitou a pokročilejším řetězcem pro zpracování signálu. Jednou z výhod je zvýšení kapacity datového toku o více než 30 %. Větší kapacitu přenosu lze využít k zajištění většího televizního obsahu, ale také pro vysílání audiovizuálního obsahu ve vyšší kvalitě, např. v rozlišení High Definition Television (HDTV) a Ultra High Definition (UHD). U standardu DVB-T2 je ke komprimaci videa použit standard High Efficiency Video Coding (HEVC/H.265) [2].

### DVB-T2 MISO konfigurace

Jednou z nejperspektivnějších inovací ve standardu DVB-T2 je podpora tzv. přenosové techniky Multiple-Input Single-Output (MISO) [1]. To znamená, že na vysílací straně jsou použity minimálně dvě antény. Vysílače vysílají na stejném kmitočtu, TV signál druhého vysílače je však mírně modifikován. Pro tento účel se využívá tzv. Alamoutiho kódování, což způsobuje, že se vysílače navzájem nebudou rušit (viz Obr. 1 a popis signálu z TX1 a TX2), zatímco u konfigurace Single-Input Single-Output (SISO) je při použití dvou vysílačů značné vzájemné rušení [3]. Ve srovnání s konfigurací SISO může technika MISO redukovat destruktivní interference a zlepšovat pokrytí v tzv. jednofrekvenčních sítích [2]. MISO mód má oproti SISO více zakázaných ochranných intervalů (Guard Interval – GI), které nelze použít. U  $GI = 1/128$  má MISO mód více možností použít různé tzv. Pilot Pattern (PP) [4], ale u ostatních ochranných intervalů je univerzálnější SISO mód. Nevýhodou konfigurace MISO je, že je zapotřebí dvojnásobné hustoty rozptýlených pilotních nosných [4].

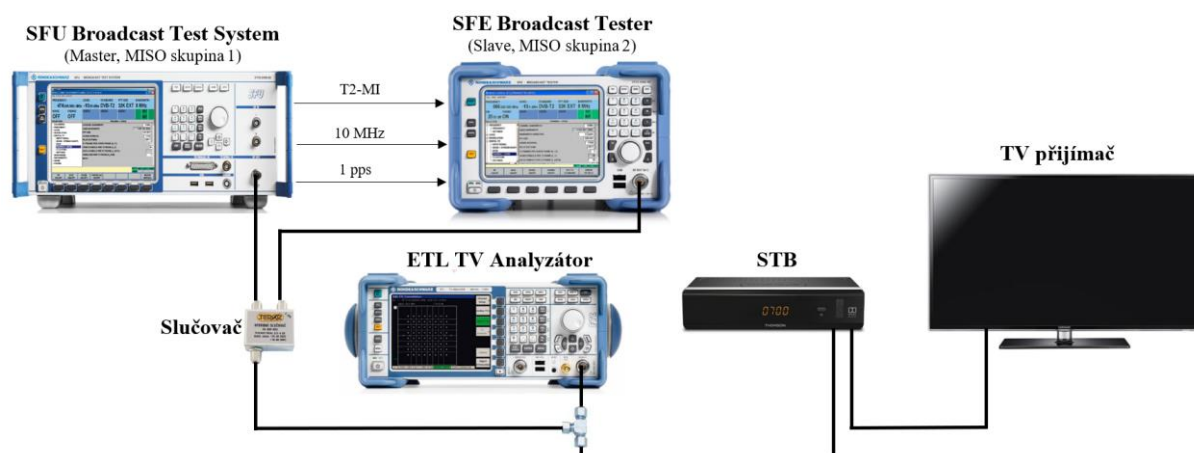


Obr. 1 DVB-T2 MISO konfigurace (na základě [2])

Pro generování TV signálu ve standardu DVB-T2 MISO konfigurace je použito generátoru Rohde & Schwarz® SFU Broadcast Test System a generátoru Rohde & Schwarz® SFE Broadcast Tester. Generátor SFU dokáže emulovat různé přenosové podmínky pomocí kanálových modelů. Při použití MISO konfigurace je přístroj nastaven jako MASTER (TX1), MISO skupina 1. Všechny systémové parametry se nastavují na vysílači MASTER pomocí speciální videosekvence. Generátor SFE je nastaven jako SLAVE (TX2), MISO skupina 2 a dokáže emulovat pouze přenosový kanál AWGN. Pro správné vygenerování DVB-T2 MISO signálu je potřebné zajistit dokonalou synchronizaci mezi vysílačem MASTER a SLAVE (viz Obr. 2). Dále je použit Rohde & Schwarz® ETL TV Analyzátor pro měření parametrů TV signálu. Pomocí Set-top-boxu a TV přijímače je možné subjektivně hodnotit TV vysílání.

Objektivní měřené parametry jsou bitová chybovost (Bit Error Rate, BER) a modulační chybovost (Modulation Error Ratio, MER). Bitová chybovost BER je definována jako poměr počtu chybně přijatých bitů k celkovému počtu přenesených bitů za určitý časový interval. Při analýze signálu DVB-T2 se měří před (BER<sub>1</sub>) a za dekodérem LDPC (BER<sub>2</sub>). Po LDPC dekodování pro parametr BER platí  $BER_2 \leq 1 \cdot 10^{-7}$ , když je splněna tato podmínka, tak v daném signále, v průběhu jedné hodiny, se objeví maximálně jedna chyba, tzv. Quasi-Error Free (QEF) [1]. Modulační chybovost MER udává informaci o úrovni šumu v signálu, který způsobuje zkreslení hodnoty amplitudy a fáze každé jednotlivé nosné vlny, čímž ji znehodnocuje. Tyto parametry závisí na poměru Carrier-to-Noise (C/N), který se při měření MISO konfigurace nastavuje jak na SFU generátoru, tak na SFE generátoru.

Pro různé přenosové scénáře se využívají rozdílné typy přenosových kanálů, které emulují požadované podmínky pro daný scénář. Jsou to pevný, přenosný a mobilní příjem. Pro pevný pozemní příjem je přenosová cesta definována pomocí tří modelů přenosových kanálů: Gaussův kanál (AWGN) předpokládající šíření TV signálu mezi vysílačem a přijímačem pouze jednou přímou cestou bez odrazů, dále Riceův kanál (RC20), který kromě přímé cesty předpokládá i odrazy (20 nezávislých cest) a Rayleighův kanál (RL20) předpokládající jenom odrazy [1]. U přenosného pozemního příjmu, kdy se přijímač vůči vysílači pohybuje velmi nízkou rychlostí (jedná se o jednotky km/h) je přenosová cesta popsána pomocí kanálu Portable Indoor (PI12) a Portable Outdoor (PO12). Číslo u zkratk kanálů představuje počet nepřímých cest. V případě, kdy se přijímač vůči vysílači pohybuje v rozmezí od 30 do 100 km/h, se jedná o mobilní příjem. Přenosová cesta je popsána pomocí modelů přenosových kanálů Typical Urban (TU6) a Rural Area (RA6) [5].



Obr. 2 Měřící pracoviště pro měření DVB-T2 MISO vysílání

## Zadání a postup měření

1. Seznamte se s obsluhou signálových generátorů SFU a SFE, dále s analyzátořem TV signálu ETL TV, STB Thomson THT712 a TV přijímače.
2. Měření je zaměřeno na analýzu hlavních parametrů, které se měří u digitálního TV signálu, tzv. měřené parametry. Jedná se o bitovou chybovost BER a modulační chybovost MER. Tyto parametry budou měřeny pomocí ETL TV analyzátořu. Pro jednotlivé kanálové modely změřte uvedené měřené parametry, vyhodnoťte QEF příjem a na základě subjektivního pozorování pomocí TV přijímače vyhodnoťte, kdy dojde k výpadku obrazu na TV přijímači.
3. Všechna měření budou pro tzv. pevný příjem. Změřte výše zmíněné parametry pro model kanálu AWGN, RC20 a RL20. Dále zjistěte hodnotu poměru  $C/N$  pro tzv. QEF příjem a hodnotu  $C/N$ , při kterém dojde k výpadku obrazu na TV přijímači.
4. Nastavte na generátoru SFU a SFE úroveň signálu -40 dBm a frekvenci 514 MHz. Postupně měňte velikost poměru  $C/N$  současně na obou generátorech. Pro kanál AWGN nechte *Fading* ve stavu OFF a pro kanály RC20 a RL20 přepněte *Fading* do stavu ON. Před samotným měřením zkontrolujte, jestli máte zapnuté výstupy obou generátorů (RF ON). **Při měření dávejte pozor, když bude končit videosekvence (trvá cca 3 minuty). Vždy chvíli počkejte, než se signál ustálí a teprve poté pokračujte v měření.**

### Nastavení SFU:

Stiskněte tlačítko Setup – FAVORITIES – FREQUENCY – TX:FREQUENCY:FREQUENCY (zadejte 514 MHz); TX:LEVEL:LEVEL (zadejte -40 dBm).

Pomocí otočného knoflíku/myši postupně nastavte další parametry: MODULATION – MODULATION – TRANSMISSION STANDARD (nastavte DVB-T2).

### **DIGITAL TV:**

INPUT SIGNAL – T2-MI INTERFACE (nastavte ON); T2-MI SOURCE (nastavte INTERNAL); FRAMING + OFDM – CHANNEL BANDWIDTH (zadejte 8 MHz).  
T2 SYSTEM – NETWORK MODE (nastavte SFN); MISO GROUP (nastavte 1).

### **TSGEN:**

Vyberte vhodnou T2-MI MISO videosekvenci: OPEN PLAY FILE (vyberte d:/TSREC/t2mi\_vv018\_rs\_gmit\_gw\_180sec.T2MI\_C).

### **NOISE:**

NOISE – NOISE (nastavte ADD); AWGN (nastavte ON).

AWGN –  $C/N$  (postupně měňte hodnotu od 40 do cca 20 dB, krok 2 dB).

Pro kanál AWGN: **FADING** – FADING (nastavte OFF)

Pro kanál RC20: **FADING** – FADING (nastavte ON); PROFILE – STANDARD (vyberte DVB); PARAMETER SET (vyberte RC20 ANX B).

Pro kanál RL20: **FADING** – FADING (nastavte ON); PROFILE – STANDARD (vyberte DVB); PARAMETER SET (vyberte RL20 ANX B); SPEED (v tabulce parametrů jednotlivých přenosových cest nastavte rychlost (SPEED) **z 20 m/s na 0 m/s u všech přenosových cest**).

### **Nastavení SFE:**

Stiskněte tlačítko Setup – FAVORITIES – FREQUENCY – TX:FREQUENCY:FREQUENCY (zadejte 514 MHz); TX:LEVEL:LEVEL (zadejte -40 dBm).

Pomocí otočného knoflíku/myši postupně nastavte další parametry: MODULATION – MODULATION – TRANSMISSION STANDARD (nastavte DVB-T2).

### **DIGITAL TV:**

INPUT SIGNAL – T2-MI INTERFACE (nastavte ON); T2-MI SOURCE (nastavte EXTERNAL); FRAMING + OFDM – CHANNEL BANDWIDTH (zadejte 8 MHz). T2 SYSTEM – NETWORK MODE (nastavte SFN); MISO GROUP (nastavte 2).

### **NOISE:**

NOISE – NOISE (nastavte ADD); C/N (měňte zároveň s generátorem SFU)

- Na vysílači SFE lze nastavit pouze přenosový model kanálu AWGN.

Na ETL TV analyzátoru nastavte stejnou frekvenci jako na obou generátorech.

Na STB naladíte kanál se stejnou frekvencí a videosekvenci zobrazte na TV přijímači.

**Nastavení ETL:** DIGITAL TV SETTINGS – TV STANDARD – OFDM – DVB-T2; stisk tlačítka FREQ (zadejte 514 MHz) – ENTER.

**Nastavení STB:** stisk MENU – INSTALACE – RUČNÍ VYHLEDÁVÁNÍ – ČÍSLO KANÁLU – 514 MHz – VYHLEDAT.

5. Pomocí ETL TV analyzátoru změřte bitovou chybovost před LDPC dekódováním  $BER_1$  (BER before LDPC) a modulační chybovost (MER).

Vyhodnoťte, při jaké hodnotě C/N dojde k tzv. QEF příjmu ( $BER_2 \leq 1 \cdot 10^{-7}$ ) a při jaké hodnotě C/N dojde k vypadnutí obrazu na TV přijímači.

6. Dále na ETL TV analyzátoru zobrazte a nakreslete RF spektrum vysílaného signálu pro všechny modely přenosových kanálů a zobrazte jejich konstelační diagramy. RF spektra a konstelační diagramy zobrazte při hodnotě C/N = 30 dB.

**Postup pro ETL TV analyzátor:** MEAS – Modulation Analysis – Const Diagram; zobrazení RF spektra: MEAS – Spectrum.

7. Dále budete měřit výkonová nevyvážení vysílačů SFU a SFE. Parametry jsou totožné s předchozím měřením. Rozdíl bude v nastavování výkonové úrovně signálu na obou vysílačích SFU a SFE. Znovu změřte všechny měřené parametry a hodnotu C/N, při které je dosaženo QEF příjmu, a při které dojde k výpadku obrazu na TV přijímači.

Proměřte výkonové nevyvážení na vysílači MASTER  $\Delta P_{TX1} = 5, 20$  dB (na TX2 je trvale nastavena úroveň signálu -40 dBm a na vysílači TX1 je úroveň signálu snížena o 5 a 20 dB).

8. Dále proměřte výkonová nevyvážení na vysílači SLAVE  $\Delta P_{TX2} = 5, 20$  dB (na TX1 je trvale nastavena úroveň signálu -40 dBm a na vysílači TX2 je úroveň signálu snížena o 5 a 20 dB).

Postup měření je stejný jako u předchozího měření (bod 4-6).

Změny oproti předchozímu měření:

- **Výkonové nevyvážení  $\Delta P_{TX1}$**

**Nastavení SFE:**

TX:LEVEL:LEVEL (zadejte -40 dBm)

**Nastavení SFU:**

TX:LEVEL:LEVEL (při jednotlivých měření postupně zadejte -45, -60 dBm)

- **Výkonové nevyvážení  $\Delta P_{TX2}$**

**Nastavení SFE:**

TX:LEVEL:LEVEL (při jednotlivých měření postupně zadejte -45, -60 dBm)

**Nastavení SFU:**

TX:LEVEL:LEVEL (zadejte -40 dBm)

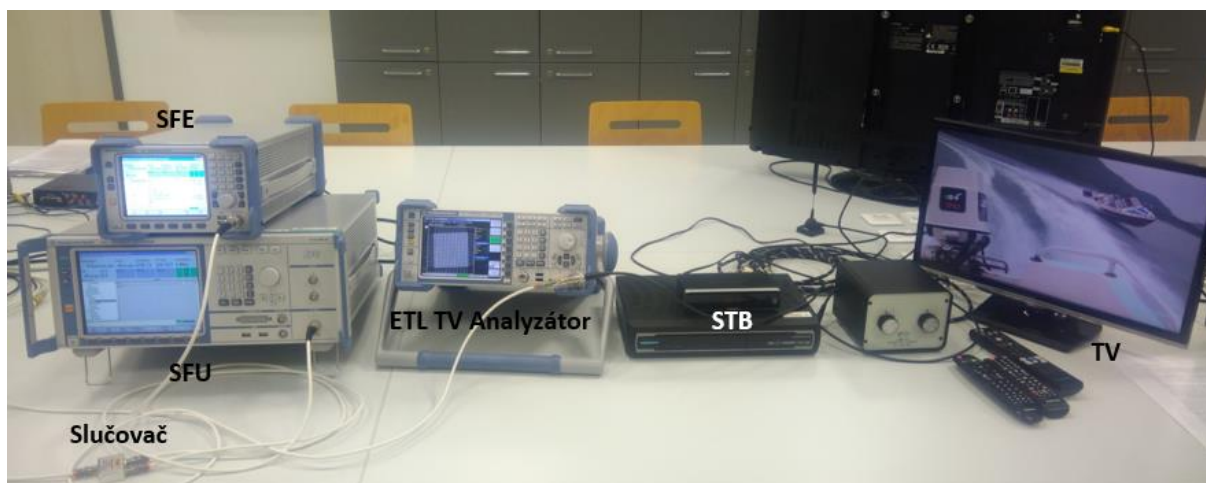
9. Vyhodnoťte, při jaké hodnotě  $C/N$  dojde k tzv. QEF příjmu ( $BER_2 \leq 1 \cdot 10^{-7}$ ) a při jaké hodnotě  $C/N$  dojde k vypadnutí obrazu na TV přijímači. Vhodně okomentujte vliv výkonového nevyvážení vysílačů na výsledky měření.
10. Dále na ETL TV analyzátoru zobrazte RF spektrum vysílaného signálu pro všechny modely přenosových kanálů a zobrazte jejich konstelační diagramy. RF spektra a konstelační diagramy zobrazte při hodnotě  $C/N = 30$  dB.
11. Vyneste grafické závislosti všech měřených parametrů a porovnejte jednotlivé kanály pro daný scénář. Zobrazte konstelační diagramy. Také zobrazte a pouze pro výkonové vyvážení vysílačů nakreslete RF spektra pro všechny modely přenosových kanálů. Na závěr vyhodnoťte, při jaké hodnotě  $C/N$  je dosaženo QEF příjmu a porovnejte při jaké hodnotě  $C/N$  dojde k výpadku obrazu na TV přijímači. Krátce zhodnoťte vliv výkonových nevyvážení vysílačů na přenášený signál.

Pozn.: Pro lepší přehlednost vyneste vždy všechna výkonová nevyvážení do jednoho grafu.

## **Použité měřicí přístroje**

<b>SFU</b>	laboratorní vysílač DVB-T/T2 R&S® SFU Broadcast Test System
<b>SFE</b>	laboratorní vysílač DVB-T2 R&S® SFE Broadcast Tester
<b>ETL</b>	měřicí přijímač R&S® ETL-K202 TV Analyzer
<b>TV</b>	televizní přijímač Samsung + dálkové ovládání
<b>Slučovač</b>	hybridní slučovač Teroz
<b>STB</b>	digitální televizní přijímač DVB-T/T2 Thomson THT712 + dálkové ovládání

propojovací vodiče 4 x BNB-BNC, 1 x BNC – anténní, 1 x člen BNC, HDMI



**Obr. 3 Rozložení přístrojů laboratorního pracoviště pro měření DVB-T2 MISO vysílání**

## **Závěr**

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


## **Kontrolní otázky**

1. Jaký je hlavní rozdíl mezi MISO a SISO konfigurací?
2. Co znamená tzv. QEF příjem? Jaká podmínka musí být splněna, aby bylo dosaženo QEF příjmu?
3. Jaké jsou hlavní objektivní měřené parametry, na jejichž základě se vyhodnocuje kvalita digitálního TV signálu?

## **Použitá a doporučená literatura**

- [1] FISCHER, Walter a Horst von RENOUARD, 2008. *Digital Video and Audio Broadcasting Technology: A Practical Engineering Guide*. 2. ed. Berlin: Springer. Springer series on signals and communication technology. ISBN 978-3-540-76357-4.
- [2] POLAK, Ladislav; KALLER, Ondrej; KRATOCHVIL, Tomas. SISO/MISO Performances in DVB-T2 and Fixed TV Channels. In: 2015 38th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP). IEEE, 2015. p. 768-771.
- [3] Rohde&Schwarz, Generating a Test Signal for Distributed DVB-T2 MISO, Application Note 7BM80\_1E, 2012.
- [4] ITU-R, Frequency and Network Planning Aspects of DVB-T2, Report ITU-R BT.2254-3 2017.
- [5] ETSI TR 101 290 V1.2.1 (2001-05). *Digital Video Broadcasting (DVB), Measurement guidelines for DVB systems*. Technical Report ETSI, 2001.

## **Příloha 2: Vzorové vypracování laboratorní úlohy**

	Předmět <b>Digitální rozhlasové systémy</b>	
	Jméno	
	Ročník	Studijní skupina
	Spolupracoval	Měřeno dne
Kontroloval	Hodnocení	Dne
Číslo úlohy	Název úlohy  <b>Měření DVB-T2 MISO vysílání</b>	

## Zadání

1. Seznamte se s obsluhou signálových generátorů SFU a SFE, dále s analyzátořem TV signálu ETL TV, STB Thomson THT712 a TV přijímače.
2. Měření je zaměřeno na analýzu hlavních parametrů, které se měří u digitálního TV signálu, tzv. měřené parametry. Jedná se o bitovou chybovost BER a modulační chybovost MER. Tyto parametry budou měřeny pomocí ETL TV analyzátořu. Pro jednotlivé kanálové modely změřte uvedené měřené parametry, vyhodnoťte QEF příjem a na základě subjektivního pozorování pomocí TV přijímače vyhodnoťte, kdy dojde k výpadku obrazu na TV přijímači.
3. Všechna měření budou pro tzv. pevný příjem. Změřte výše zmíněné parametry pro model kanálu AWGN, RC20 a RL20. Dále zjistěte hodnotu poměru  $C/N$  pro tzv. QEF příjem a hodnotu  $C/N$ , při kterém dojde k výpadku obrazu na TV přijímači.
4. Nastavte na generátoru SFU a SFE úroveň signálu -40 dBm a frekvenci 514 MHz. Postupně měňte velikost poměru  $C/N$  současně na obou generátorech. Pro kanál AWGN nechte *Fading* ve stavu OFF a pro kanály RC20 a RL20 přepněte *Fading* do stavu ON. Před samotným měřením zkontrolujte, jestli máte zapnuté výstupy obou generátorů (RF ON). **Při měření dávejte pozor, když bude končit videosekvence (trvá cca 3 minuty). Vždy chvíli počkejte, než se signál ustálí a teprve poté pokračujte v měření.**

### Nastavení SFU:

Stiskněte tlačítko Setup – FAVORITIES – FREQUENCY – TX:FREQUENCY:FREQUENCY (zadejte 514 MHz); TX:LEVEL:LEVEL (zadejte -40 dBm).

Pomocí otočného knoflíku/myši postupně nastavte další parametry: MODULATION – MODULATION – TRANSMISSION STANDARD (nastavte DVB-T2).

### **DIGITAL TV:**

INPUT SIGNAL – T2-MI INTERFACE (nastavte ON); T2-MI SOURCE (nastavte INTERNAL); FRAMING + OFDM – CHANNEL BANDWIDTH (zadejte 8 MHz). T2 SYSTEM – NETWORK MODE (nastavte SFN); MISO GROUP (nastavte 1).



### **TSGEN:**

Vyberte vhodnou T2-MI MISO videosekvenci: OPEN PLAY FILE (vyberte d:/TSREC/t2mi\_vv018\_rs\_gmit\_gw\_180sec.T2MI\_C).

### **NOISE:**

NOISE – NOISE (nastavte ADD); AWGN (nastavte ON).

AWGN – C/N (postupně měňte hodnotu od 40 do cca 20 dB, krok 2 dB).

Pro kanál AWGN: **FADING** – FADING (nastavte OFF)

Pro kanál RC20: **FADING** – FADING (nastavte ON); PROFILE – STANDARD (vyberte DVB); PARAMETER SET (vyberte RC20 ANX B).

Pro kanál RL20: **FADING** – FADING (nastavte ON); PROFILE – STANDARD (vyberte DVB); PARAMETER SET (vyberte RL20 ANX B); SPEED (v tabulce parametrů jednotlivých přenosových cest nastavte rychlost (SPEED) z **20 m/s na 0 m/s u všech přenosových cest**).

### **Nastavení SFE:**

Stiskněte tlačítko Setup – FAVORITIES – FREQUENCY –

TX:FREQUENCY:FREQUENCY (zadejte 514 MHz); TX:LEVEL:LEVEL (zadejte -40 dBm).

Pomocí otočného knoflíku/myši postupně nastavte další parametry: MODULATION – MODULATION – TRANSMISSION STANDARD (nastavte DVB-T2).

### **DIGITAL TV:**

INPUT SIGNAL – T2-MI INTERFACE (nastavte ON); T2-MI SOURCE (nastavte EXTERNAL); FRAMING + OFDM – CHANNEL BANDWIDTH (zadejte 8 MHz).

T2 SYSTEM – NETWORK MODE (nastavte SFN); MISO GROUP (nastavte 2).

### **NOISE:**

NOISE – NOISE (nastavte ADD); C/N (měňte zároveň s generátorem SFU)

- Na vysílači SFE lze nastavit pouze přenosový model kanálu AWGN.

Na ETL TV analyzátoru nastavte stejnou frekvenci jako na obou generátorech.

Na STB naladíte kanál se stejnou frekvencí a videosekvenci zobrazte na TV přijímači.

**Nastavení ETL:** DIGITAL TV SETTINGS – TV STANDARD – OFDM – DVB-T2; stisk tlačítka FREQ (zadejte 514 MHz) – ENTER.

**Nastavení STB:** stisk MENU – INSTALACE – RUČNÍ VYHLEDÁVÁNÍ – ČÍSLO KANÁLU – 514 MHz – VYHLEDAT.

5. Pomocí ETL TV analyzátoru změřte bitovou chybovost před LDPC dekódováním  $BER_1$  (BER before LDPC) a modulační chybovost (MER).

Vyhodnoťte, při jaké hodnotě C/N dojde k tzv. QEF příjmu ( $BER_2 \leq 1 \cdot 10^{-7}$ ) a při jaké hodnotě C/N dojde k vypadnutí obrazu na TV přijímači.

6. Dále na ETL TV analyzátoru zobrazte a nakreslete RF spektrum vysílaného signálu pro všechny modely přenosových kanálů a zobrazte jejich konstelační diagramy. RF spektra a konstelační diagramy zobrazte při hodnotě C/N = 30 dB.

**Postup pro ETL TV analyzátor:** MEAS – Modulation Analysis – Const Diagram; zobrazení RF spektra: MEAS – Spectrum.

7. Dále budete měřit výkonová nevyvážení vysílačů SFU a SFE. Parametry jsou totožné s předchozím měřením. Rozdíl bude v nastavování výkonové úrovně signálu na obou vysílačích SFU a SFE. Znovu změřte všechny měřené parametry a hodnotu  $C/N$ , při které je dosaženo QEF příjmu, a při které dojde k výpadku obrazu na TV přijímači.

Proměřte výkonové nevyvážení na vysílači MASTER  $\Delta P_{TX1} = 5, 20$  dB (na TX2 je trvale nastavena úroveň signálu  $-40$  dBm a na vysílači TX1 je úroveň signálu snížena o 5 a 20 dB).

8. Dále proměřte výkonová nevyvážení na vysílači SLAVE  $\Delta P_{TX2} = 5, 20$  dB (na TX1 je trvale nastavena úroveň signálu  $-40$  dBm a na vysílači TX2 je úroveň signálu snížena o 5 a 20 dB).

Postup měření je stejný jako u předchozího měření (bod 4-6).

Změny oproti předchozímu měření:

- **Výkonové nevyvážení  $\Delta P_{TX1}$**

**Nastavení SFE:**

TX:LEVEL:LEVEL (zadejte  $-40$  dBm)

**Nastavení SFU:**

TX:LEVEL:LEVEL (při jednotlivých měření postupně zadejte  $-45, -60$  dBm)

- **Výkonové nevyvážení  $\Delta P_{TX2}$**

**Nastavení SFE:**

TX:LEVEL:LEVEL (při jednotlivých měření postupně zadejte  $-45, -60$  dBm)

**Nastavení SFU:**

TX:LEVEL:LEVEL (zadejte  $-40$  dBm)

9. Vyhodnoťte, při jaké hodnotě  $C/N$  dojde k tzv. QEF příjmu ( $BER_2 \leq 1 \cdot 10^{-7}$ ) a při jaké hodnotě  $C/N$  dojde k vypadnutí obrazu na TV přijímači. Vhodně okomentujte vliv výkonového nevyvážení vysílačů na výsledky měření.
10. Dále na ETL TV analyzátoru zobrazte RF spektrum vysílaného signálu pro všechny modely přenosových kanálů a zobrazte jejich konstelační diagramy. RF spektra a konstelační diagramy zobrazte při hodnotě  $C/N = 30$  dB.
11. Vyneste grafické závislosti všech měřených parametrů a porovnejte jednotlivé kanály pro daný scénář. Zobrazte konstelační diagramy. Také zobrazte a pouze pro výkonové vyvážení vysílačů nakreslete RF spektra pro všechny modely přenosových kanálů. Na závěr vyhodnoťte, při jaké hodnotě  $C/N$  je dosaženo QEF příjmu a porovnejte při jaké hodnotě  $C/N$  dojde k výpadku obrazu na TV přijímači. Krátce zhodnoťte vliv výkonových nevyvážení vysílačů na přenášený signál.

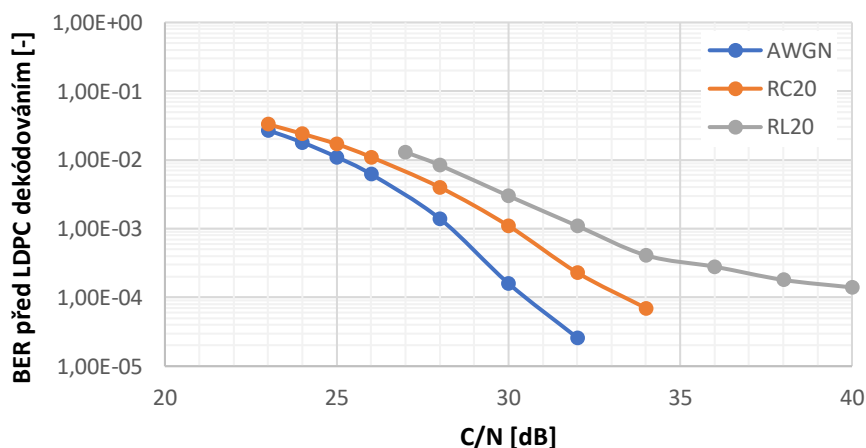
Pozn.: Pro lepší přehlednost vyneste vždy všechna výkonová nevyvážení do jednoho grafu.

# Vypracování

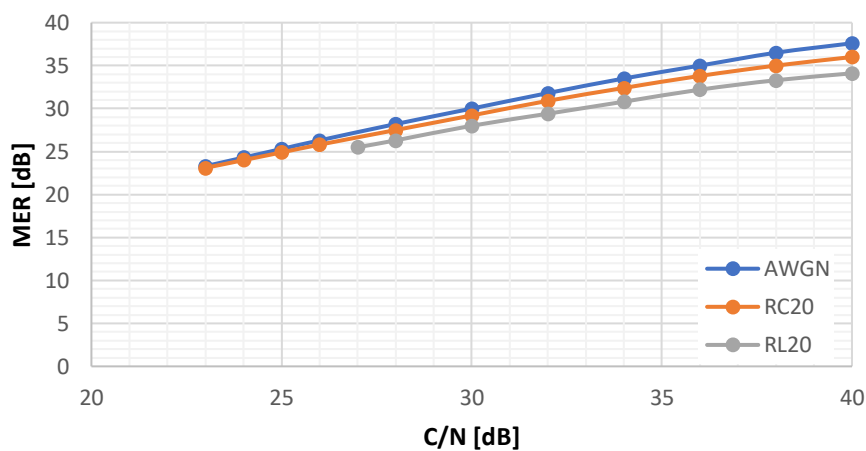
## Měření pro pevný příjem

Tabulka 1 Naměřené hodnoty objektivních parametrů BER<sub>1</sub>, MER a LDPC iterace

AWGN kanál			RC20 kanál			RL20 kanál		
C/N [dB]	BER <sub>1</sub> [-]	MER [dB]	C/N [dB]	BER <sub>1</sub> [-]	MER [dB]	C/N [dB]	BER <sub>1</sub> [-]	MER [dB]
40	1,80E-05	37,6	40	6,10E-05	36	40	1,40E-04	34,1
38	2,00E-05	36,5	38	6,40E-05	35	38	1,80E-04	33,3
36	2,20E-05	35	36	6,80E-05	33,8	36	2,80E-04	32,2
34	2,40E-05	33,5	34	7,00E-05	32,4	34	4,10E-04	30,8
32	2,60E-05	31,8	32	2,30E-04	30,9	32	1,10E-03	29,4
30	1,60E-04	30	30	1,10E-03	29,2	30	3,00E-03	28
28	1,40E-03	28,2	28	4,00E-03	27,5	28	8,40E-03	26,3
26	6,20E-03	26,3	26	1,10E-02	25,8	27	1,30E-02	25,5
25	1,10E-02	25,3	25	1,70E-02	24,9	26	1,80E-02	24,7
24	1,80E-02	24,3	24	2,40E-02	24	25	2,60E-02	23,8
23	2,7E-02	23,3	23	3,30E-02	23,1			



a)  $BER_1 = f(C/N)$

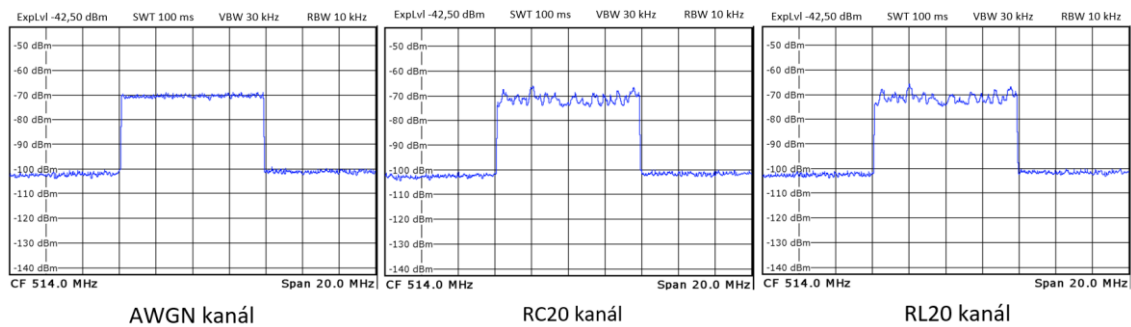


b)  $MER = f(C/N)$

Obrázek 1 Měřené parametry – pevný příjem

Tabulka 2 Hodnoty  $C/N$  potřebné pro dosažení QEF příjmu – pevný příjem

Model přenosového kanálu	QEF – měřeno pomocí ETL TV analyzátoru			Pozorování výpadku obrazu na TV přijímači		
	AWGN	RC20	RL20	AWGN	RC20	RL20
$C/N_{změř.} [dB]$	23	23	25	22	22	23

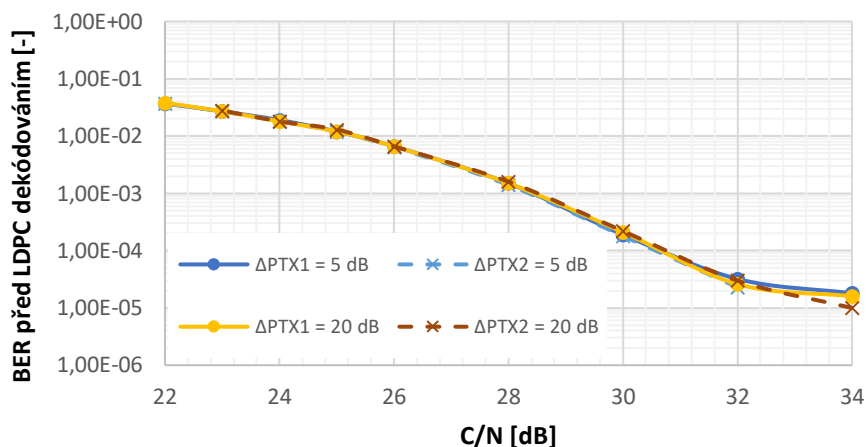


Obrázek 2 RF spektra při  $C/N = 30$  dB – pevný příjem

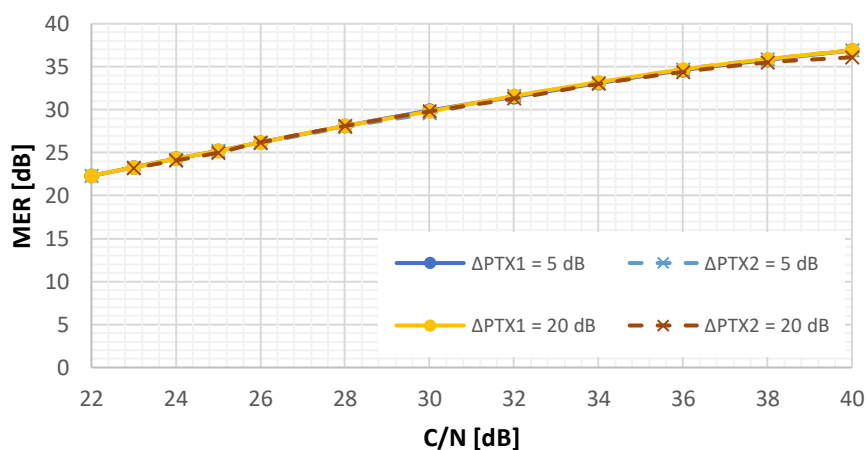
## Měření pro pevný příjem – výkonová nevyvážení vysílačů

Tabulka 3 Naměřené hodnoty objektivních parametrů BER<sub>1</sub>, MER a LDPC iterace – AWGN kanál

AWGN kanál					
$\Delta P_{TX1} = 5 \text{ dB}$			$\Delta P_{TX1} = 20 \text{ dB}$		
C/N [dB]	BER <sub>1</sub> [-]	MER [dB]	C/N [dB]	BER <sub>1</sub> [-]	MER [dB]
40	1,40E-05	36,9	40	1,30E-05	36,9
38	1,60E-05	35,8	38	1,30E-05	35,9
36	1,70E-05	34,6	36	1,30E-05	34,7
34	1,80E-05	33,1	34	1,60E-05	33,2
32	3,20E-05	31,5	32	2,60E-05	31,6
30	1,90E-04	29,9	30	2,10E-04	29,8
28	1,50E-03	28,1	28	1,50E-03	28,1
26	6,60E-03	26,2	26	6,60E-03	26,2
25	1,20E-02	25,2	25	1,20E-02	25,2
24	1,90E-02	24,3	24	1,80E-02	24,3
23	2,70E-02	23,3	23	2,70E-02	23,3
22	3,70E-02	22,3	22	3,80E-02	22,3
$\Delta P_{TX2} = 5 \text{ dB}$			$\Delta P_{TX2} = 20 \text{ dB}$		
C/N [dB]	BER <sub>1</sub> [-]	MER [dB]	C/N [dB]	BER <sub>1</sub> [-]	MER [dB]
40	1,20E-05	36,9	40	5,40E-06	36,1
38	1,40E-05	35,9	38	6,00E-06	35,5
36	1,80E-05	34,7	36	6,40E-06	34,4
34	2,00E-05	33,1	34	1,00E-05	33
32	2,30E-05	31,6	32	3,00E-05	31,3
30	1,80E-04	29,6	30	2,20E-04	29,8
28	1,40E-03	28	28	1,60E-03	28,1
26	6,40E-03	26,1	26	6,60E-03	26,2
25	1,20E-02	25,2	25	1,30E-02	25
24	1,80E-02	24,2	24	1,80E-02	24,1
23	2,70E-02	23,3	23	2,80E-02	23,2
22	3,70E-02	22,3			



a)  $BER_1 = f(C/N)$



b)  $MER = f(C/N)$

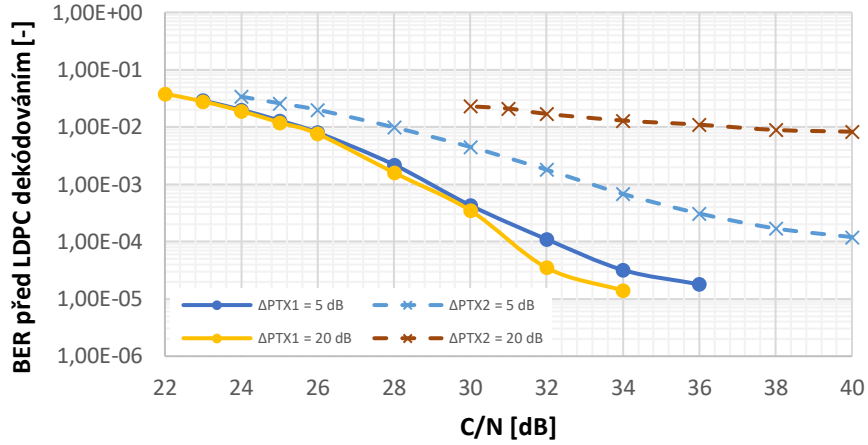
Obrázek 3 Měřené parametry – výkonové nevyvážení vysílačů, AWGN kanál

Tabulka 4 Hodnoty  $C/N$  potřebné pro dosažení QEF příjmu při výkonovém nevyvážení vysílačů – AWGN kanál

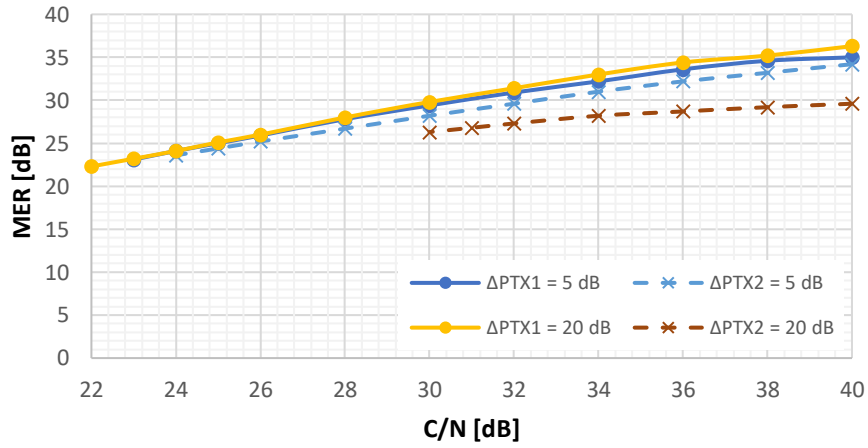
Model přenosového	QEF – měřeno pomocí ETL TV analyzátoru		Pozorování výpadku obrazu na TV přijímači	
	5	20	5	20
$\Delta P_{TX2}$ [dB]	22	23	22	22
$C/N_{změř.}$ [dB]	22	22	21	21
$\Delta P_{TX1}$ [dB]	22	22	21	21
$C/N_{změř.}$ [dB]	22	22	21	21

Tabulka 5 Naměřené hodnoty objektivních parametrů BER<sub>1</sub>, MER a LDPC iterace – RC20 kanál

RC20 kanál					
$\Delta P_{TX1} = 5 \text{ dB}$			$\Delta P_{TX1} = 20 \text{ dB}$		
C/N [dB]	BER <sub>1</sub> [-]	MER [dB]	C/N [dB]	BER <sub>1</sub> [-]	MER [dB]
40	1,60E-05	40	40	1,30E-05	36,3
38	1,60E-05	38	38	1,30E-05	35,2
36	1,80E-05	36	36	1,30E-05	34,4
34	3,20E-05	34	34	1,40E-05	33
32	1,10E-04	32	32	3,50E-05	31,4
30	4,30E-04	30	30	3,50E-04	29,8
28	2,20E-03	28	28	1,60E-03	28
26	8,00E-03	26	26	7,60E-03	26
25	1,30E-02	25	25	1,20E-02	25,1
24	2,00E-02	24	24	1,90E-02	24,1
23	2,90E-02	23	23	2,80E-02	23,2
			22	3,80E-02	22,3
$\Delta P_{TX2} = 5 \text{ dB}$			$\Delta P_{TX2} = 20 \text{ dB}$		
C/N [dB]	BER <sub>1</sub> [-]	MER [dB]	C/N [dB]	BER <sub>1</sub> [-]	MER [dB]
40	1,20E-04	34,2	40	8,30E-03	29,6
38	1,70E-04	33,2	38	8,90E-03	29,2
36	3,10E-04	32,2	36	1,10E-02	28,7
34	6,80E-04	31	34	1,30E-02	28,2
32	1,80E-03	29,6	32	1,70E-02	27,3
30	4,50E-03	28,2	31	2,10E-02	26,8
28	9,90E-03	26,7	30	2,30E-02	26,3
26	2,00E-02	25,2			
25	2,60E-02	24,4			
24	3,40E-02	23,6			



a)  $BER_1 = f(C/N)$



b)  $MER = f(C/N)$

Obrázek 4 Měření parametry – výkonové nevyvážení vysílačů, RC20 kanál

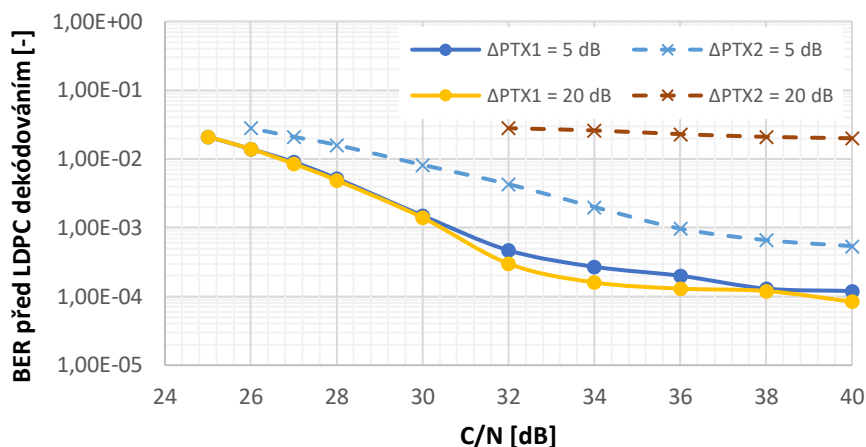
Tabulka 6 Hodnoty  $C/N$  potřebné pro dosažení QEF příjmu při výkonovém nevyvážení vysílačů – RC20 kanál

Model přenosového	QEF – měřeno pomocí ETL TV analyzátoru		Pozorování výpadku obrazu na TV přijímači	
	5	20	5	20
$\Delta P_{TX2}$ [dB]	24	31	23	26
$C/N_{změř.}$ [dB]	24	31	23	26
$\Delta P_{TX1}$ [dB]	23	22	22	21
$C/N_{změř.}$ [dB]	23	22	22	21

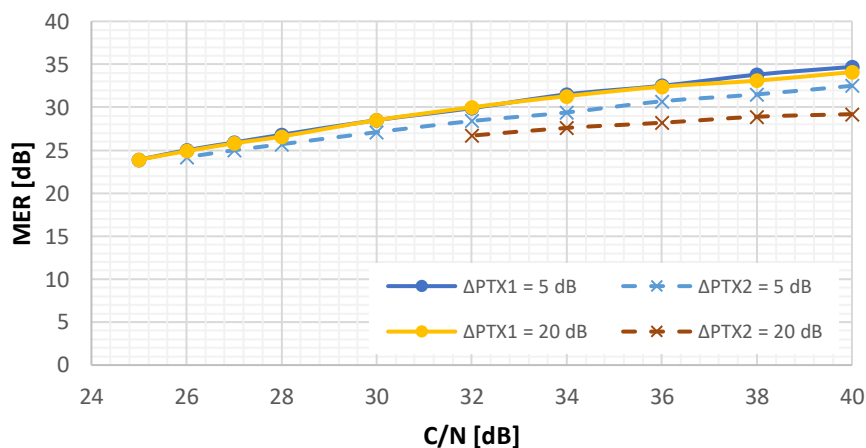


Tabulka 7 Naměřené hodnoty objektivních parametrů BER<sub>1</sub>, MER a LDCP iterace – RL20 kanál

$\Delta P_{TX1} = 5 \text{ dB}$			$\Delta P_{TX1} = 20 \text{ dB}$		
C/N [dB]	BER <sub>1</sub> [-]	MER [dB]	C/N [dB]	BER <sub>1</sub> [-]	MER [dB]
40	1,20E-04	34,7	40	8,40E-05	34,1
38	1,30E-04	33,8	38	1,20E-04	33,1
36	2,00E-04	32,5	36	1,30E-04	32,4
34	2,70E-04	31,5	34	1,60E-04	31,3
32	4,70E-04	29,9	32	3,00E-04	30
30	1,50E-03	28,5	30	1,40E-03	28,5
28	5,20E-03	26,8	28	4,90E-03	26,6
27	9,00E-03	25,9	27	8,50E-03	25,8
26	1,40E-02	25	26	1,40E-02	24,9
25	2,10E-02	23,9	25	2,10E-02	23,9
$\Delta P_{TX2} = 5 \text{ dB}$			$\Delta P_{TX2} = 20 \text{ dB}$		
C/N [dB]	BER <sub>1</sub> [-]	MER [dB]	C/N [dB]	BER <sub>1</sub> [-]	MER [dB]
40	5,40E-04	32,5	40	2,00E-02	29,2
38	6,60E-04	31,5	38	2,10E-02	28,9
36	9,70E-04	30,7	36	2,30E-02	28,2
34	2,00E-03	29,4	34	2,60E-02	27,6
32	4,30E-03	28,4	32	2,80E-02	26,7
30	8,20E-03	27,1			
28	1,60E-02	25,7			
27	2,10E-02	25			
26	2,80E-02	24,2			



a)  $BER_1 = f(C/N)$



b)  $MER = f(C/N)$

Obrázek 5 Měření parametry – výkonové nevyvážení vysílačů, RL20 kanál

Tabulka 8 Hodnoty  $C/N$  potřebné pro dosažení QEF příjmu při výkonovém nevyvážení vysílačů – RL20 kanál

Model přenosového	QEF – měřeno pomocí ETL TV analyzátoru		Pozorování výpadku obrazu na TV přijímači	
	5	20	5	20
$\Delta P_{TX2}$ [dB]	5	20	5	20
$C/N_{změř.}$ [dB]	26	34	23	26
$\Delta P_{TX1}$ [dB]	5	20	5	20
$C/N_{změř.}$ [dB]	25	25	22	22

## Použité měřicí přístroje

<b>SFU</b>	laboratorní vysílač DVB-T/T2 R&S® SFU Broadcast Test System
<b>SFE</b>	laboratorní vysílač DVB-T2 R&S® SFE Broadcast Tester
<b>ETL</b>	měřicí přijímač R&S® ETL-K202 TV Analyzer
<b>TV</b>	televizní přijímač Samsung + dálkové ovládání
<b>Slučovač</b>	hybridní slučovač Teroz
<b>STB</b>	digitální televizní přijímač DVB-T/T2 Thomson THT712 + dálkové ovládání

propojovací vodiče 4 x BNB-BNC, 1 x BNC – anténní, 1 x člen BNC, HDMI

## Závěr

### Výkonové vyvážení vysílačů

Při porovnání hodnot  $BER_I$  (viz Obrázek 1 a)) garantuje nejlepší podmínky pro přenos TV signálu AWGN kanál. Hodnota pro QEF příjem je dosažena při  $C/N = 23$  dB. V případě uvažování přenosového kanálu RC20 bylo dosaženo QEF příjmu při stejné hodnotě  $C/N$ . U kanálu RL20 bylo QEF příjmu dosaženo při  $C/N = 25$  dB, viz Tabulka 2. Kanálový model RL20 představuje nejhorší podmínky pro přenos TV signálu. Je to z toho důvodu, že tento model nemá žádnou přímou cestu mezi TX a RX, tudíž k přenosu dochází pouze díky odrazům.

I na základě závislosti  $MER$  (viz Obrázek 1 b)) lze říct, že kanály AWGN a RC20 opět představují velmi podobné podmínky pro přenos TV signálu. Hodnoty  $MER$  se odlišují maximálně o 1 dB. U kanálu RL20 jsou naměřeny nižší hodnoty parametru  $MER$ .

Vliv jednotlivých modelů přenosových kanálů na tvar RF spektra TV signálu při  $C/N = 30$  dB jsou zobrazeny na Obrázek 2. U kanálu AWGN lze vidět, že na RF spektru nejsou téměř viditelné žádné úniky, ale na RF spektru kanálu RC20 a RL20 jsou již úniky patrnější.

U kanálu AWGN dochází k vypadnutí obrazu na TV přijímači při  $C/N = 22$  dB, při použití kanálu RC20 obraz opět vypadne při  $C/N = 22$  dB a u kanálu RL20 při  $C/N = 23$  dB (viz Tabulka 2).

### Výkonové nevyvážení vysílačů

**AWGN kanál** – Při analýze objektivních parametrů pro vyhodnocení kvality digitálního TV signálu (viz Obrázek 3 a), b)) lze pozorovat vliv výkonových nevyvážení  $\Delta P_{TX}$ . Je patrné, že výkonová nevyvážení, jak na vysílači MASTER, tak na vysílači SLAVE, nemají téměř žádný vliv na hodnoty měřených parametrů. Je to způsobeno tím, že se na obou vysílačích uvažuje AWGN kanál, takže jeden vysílač dokáže plnohodnotně kompenzovat snížení výkonu druhého vysílače.

V Tabulka 4 jsou uvedeny zjištěné hodnoty pro tzv. QEF příjem a hodnoty, při kterých docházelo k výpadku obrazu na TV přijímači. Pro výkonová nevyvážení na vysílači MASTER (TX1) i na vysílači SLAVE (TX2) se hodnoty  $C/N$  liší nejvýše o 1 dB.

**RC20 kanál** – Z naměřených závislostí (viz Obrázek 4 a), b), Tabulka 6) lze vidět, že pro všechny hodnoty výkonového nevyvážení  $\Delta P_{TX1}$  nedochází k téměř žádné změně. Oproti situaci, kdy je na obou vysílačích nastavena stejná úroveň signálu, dochází k mírnému zlepšení kvality přenosu signálu (viz Obrázek 1). Je to z toho důvodu, že mezi TX1 (MASTER) a RX se uvažuje přenosové prostředí, které se dá charakterizovat kanálem RC20. Signál z vysílače

MASTER má nižší výkon, a tudíž má menší vliv než signál vysílaný ze SLAVE, na kterém je trvale nastaven AWGN kanál. Naopak na vysílači SLAVE dochází s rostoucím výkonovým nevyvážením ke stále větší degradaci kvality přenosu TV signálu. Je to způsobeno tím, že se více uplatňuje vysílač s větším výkonem, tj. TX1, na kterém je nastaven únikový RC20 kanál. U výkonového nevyvážení 20 dB se zdá, že druhý vysílač se chová jako „rušič“ signálu TX1.

Pro výkonová nevyvážení  $\Delta P_{TX1}$  se hodnoty liší nejvýše o 2 dB. Oproti tomu pro výkonová nevyvážení  $\Delta P_{TX2}$  se hodnoty již rozcházejí. S rostoucím výkonovým nevyvážením roste i hodnota  $C/N$  pro QEF příjem a pro výpadek obrazu na TV přijímači. Při  $\Delta P_{TX2} = 20$  dB je QEF příjem dosažen při  $C/N = 31$  dB a k výpadku na TV přijímači dochází při  $C/N = 26$  dB (viz Tabulka 6).

**RL20 kanál** – Opět dochází ke stejnému trendu jak u kanálu RC20. Velikost výkonového nevyvážení  $\Delta P_{TX1}$  má minimální vliv na kvalitu přenosu TV signálu. U výkonového nevyvážení  $\Delta P_{TX2}$  dochází se zvyšující se hodnotou  $\Delta P_{TX2}$  k zhoršování hodnot parametrů *BER* a *MER*. U  $\Delta P_{TX2} = 20$  dB se vysílač TX2 jeví jako rušení signálu (Obrázek 5 a), b)).

U výkonového nevyvážení  $\Delta P_{TX1}$  nastává QEF příjem při stejné hodnotě  $C/N$  ( $C/N = 25$  dB) pro všechna výkonová nevyvážení (5, 20 dB). Stejně tak k výpadku obrazu TV signálu dochází při stejné hodnotě  $C/N$  ( $C/N = 22$  dB) pro všechna výkonová nevyvážení. U výkonového nevyvážení  $\Delta P_{TX2}$  se zvyšující se hodnotou výkonového nevyvážení roste hodnota  $C/N$  pro QEF příjem i pro výpadek obrazu. Při  $\Delta P_{TX2} = 20$  dB QEF příjem nastává při  $C/N = 34$  dB a k výpadku obrazu na TV přijímači dochází při  $C/N = 26$  dB (viz Tabulka 8).