

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

DIGITÁLNÍ POZEMNÍ TELEVIZNÍ VYSÍLÁNÍ DVB-T/H A DVB-T2

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

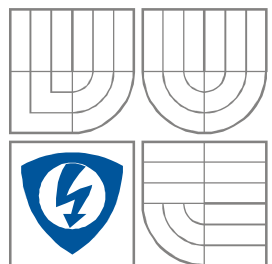
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. MARTIN POSPÍCHAL

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

DIGITÁLNÍ POZEMNÍ TELEVIZNÍ VYSÍLÁNÍ DVB-T/H A DVB-T2 DIGITAL TERRESTRIAL TELEVISION BROADCASTING DVB-T/H AND DVB-T2

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

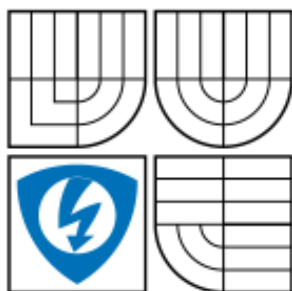
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. MARTIN POSPÍCHAL

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. TOMÁŠ KRATOCHVÍL, Ph.D.

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Bc. Martin Pospíchal
Ročník: 2

ID: 77796
Akademický rok: 2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Digitální pozemní televizní vysílání DVB-T/H a DVB-T2

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

V teoretické části práce proveďte srovnání standardů pro digitální pozemní televizní vysílání první (DVB-T/H) a druhé generace (DVB-T2). Zaměřte se zejména na srovnání, přenosové parametry a dosaženou účinnost a efektivitu přenosu digitální pozemní televize.

V experimentální části proveďte měření signálů pozemní digitální televize DVB-T/H a DVB-T2 v reálných nebo laboratorních podmínkách pomocí dostupného přístrojového vybavení (DVB-T2 po dohodě s vedoucím práce a podle současné dostupnosti přístrojů) nebo na úrovni počítačové simulace.

V praktické části práce proveďte kritické zhodnocení výsledků měření nebo simulací. Zaměřte se na vhodné konfigurace přenosu digitální pozemní televize pro mobilní, přenosný a pevný příjem. Výsledky zpracujte formou vhodné laboratorní úlohy pro předmět Digitální televizní systémy (teoretický rozbor, návod k měření, vzorové řešení).

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] DVB-T. ETSI EN 300 744 V1.5.1 (11/2004). Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television.
- [2] DVB-T2. ETSI EN 302 755 V1.1.1 (09/2009). Digital Video Broadcasting (DVB); Frame structure channel coding and modulation for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2).

Termín zadání: 7.2.2011
Vedoucí práce: doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.

Termín odevzdání: 20.5.2011

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové 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

Diplomová práce porovnává standardy pro digitální pozemní televizní vysílání první generace DVB-T/H a druhé generace DVB-T2 s důrazem kladeným především na modulátor, tedy kanálové zabezpečení signálu proti vlivu rušení přenosového prostředí a samotnou modulaci signálu. Následuje popis konkrétních modelů přenosových kanálů pro pevný, přenosný a mobilní příjem pozemního digitálního signálu.

Porovnání se týká zejména jednotlivých přenosových parametrů pro různé druhy příjmu digitální pozemní televize s dosaženou účinností a efektivitou přenosu na úrovni laboratorního měření a počítačových simulací.

KLÍČOVÁ SLOVA

DVB-T/H/T2, MPEG-2 TS, PLP, FEC, OFDM, model přenosového kanálu, S/N , BER , konstelační analýza

ABSTRACT

Master's thesis compares the standard for digital terrestrial television broadcasting of the first generation DVB-T/H and the second generation DVB-T2 with particular emphasis on the modulator, a security channel interference, the signal from the transmitting environment itself and the modulation signal. The following description of specific models of transmission channels for fixed, portable and mobile reception of digital terrestrial signal.

Comparison with the particular relates of the transmission parameters for different types of reception of digital terrestrial television with achieving efficiency and effectiveness of transmission at the level of laboratory measurements and computer simulation.

KEYWORDS

DVB-T/H/T2, MPEG-2 TS, PLP, FEC, OFDM, model of the transmission channel, S/N , BER , constellation analysis

POSPÍCHAL, M. *Digitální pozemní televizní vysílání DVB-T/H a DVB-T2: diplomová práce*. Brno: FEKT VUT v Brně, 2011. 94 s., 26 příl.

PROHLÁŠENÍ

Jako autor diplomové práce na téma „Digitální pozemní televizní vysílání DVB-T/H a DVB-T2“ dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové 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 20. května 2011

.....
podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Tomáši Kratochvílovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce. Dále děkuji Ing. Radimu Štukavci, Ing. Ladislavu Polákovi a Bc. Adamu Strouhalovi za poskytnuté softwarové aplikace.

V Brně dne 20. května 2011

.....
podpis autora

OBSAH

Seznam obrázků	xi
Seznam tabulek	xv
ÚVOD	1
1 STRUČNÉ POROVNÁNÍ DIGITÁLNÍHO A ANALOGOVÉHO PŘÍJMU TV	2
2 STANDARD DVB	3
2.1 Systém DVB-T/H/T2	4
3 PROTICHYBOVÉ ZABEZPEČENÍ V DVB	6
3.1 Předzpracování TS standardu DVB-T/H	6
3.2 Předzpracování TS standardu DVB-T2	8
3.2.1 Režim přizpůsobení	9
3.2.2 Přizpůsobení PLP_n	10
3.3 Kanálové zabezpečení $FEC_{T/H}$ standardu DVB-T/H	11
3.3.1 RS kód (<i>Reed Solomon Code</i>)	12
3.3.2 Konvoluční prokladač	13
3.3.3 Konvoluční kód	14
3.3.4 Vnitřní prokladač	15
3.4 Kanálové zabezpečení FEC_{T2} standardu DVB-T2	16
3.4.1 BCH kód (<i>Bose Chaudhuri Hocquengham Code</i>)	18
3.4.2 LDPC kód (<i>Low Density Parity Check Code</i>)	20
3.4.3 Bitový prokladač	21
4 MODULACE V DVB	23
4.1 Modulační princip standardu DVB-T/H	23
4.1.1 OFDM modulace	24
4.1.1.1 Generování OFDM symbolů	25

4. 1. 1. 2	Uspořádání přenosového rámce.....	26
4. 1. 2	Ochranný interval GI	27
4. 2	Modulační princip standardu DVB-T2.....	27
4. 2. 1	Modulace s natočením konstelačních bodů	29
5	PŘENOSOVÝ POZEMNÍ KANÁL.....	31
5. 1	Dopplerův jev	31
5. 2	Pevný pozemní příjem	31
5. 2. 1	Gaussův přenosový kanál	32
5. 2. 2	Model přenosového kanálu RC_{20}	32
5. 2. 3	Model přenosového kanálu RL_{20}	33
5. 3	Přenosný pozemní příjem	34
5. 3. 1	Model přenosového kanálu PI_{12}	34
5. 3. 2	Model přenosového kanálu PO_{12}	34
5. 4	Mobilní pozemní příjem.....	35
5. 4. 1	Model přenosového kanálu TU_6	35
5. 4. 2	Model přenosového kanálu RA_6	35
6	ANALÝZA SIGNÁLU PŘI PŘÍJMU DVB-T/H/T2.....	36
6. 1	Modulační chybovost.....	36
6. 2	Bitová chybovost BER	37
7	LABORATORNÍ PRACOVNÍ MÍSTO.....	39
7. 1	Modulátor DTA-110T.....	39
7. 2	Adaptér DTA-145	40
7. 3	Měřicí televizní přijímač KATHREIN MSK-200.....	40
7. 4	Softwarová aplikace pro přehrávání TS DekTec StreamXpress	41
7. 5	Softwarová aplikace modulátoru DtLoop	41
7. 6	Softwarová aplikace modelu přenosových kanálů DTA-305.....	41

8	LABORATORNÍ MĚŘENÍ DVB-T/H	42
8.1	Pevný pozemní příjem DVB-T/H	43
8.1.1	Naměřené hodnoty pevného pozemního příjmu DVB-T/H.....	43
8.1.2	Grafické závislosti pevného pozemního příjmu DVB-T/H	44
8.1.3	Konstelační diagramy pevného pozemního příjmu DVB-T/H.....	45
8.1.4	Vyhodnocení pevného pozemního příjmu DVB-T/H	45
8.2	Přenosný pozemní příjem DVB-T/H.....	46
8.2.1	Naměřené hodnoty přenosného pozemního příjmu DVB-T/H.....	46
8.2.2	Grafické závislosti přenosného pozemního příjmu DVB-T/H.....	47
8.2.3	Konstelační diagramy přenosného pozemního příjmu DVB-T/H....	48
8.2.4	Vyhodnocení přenosného pozemního příjmu DVB-T/H.....	48
8.3	Mobilní pozemní příjem DVB-T/H	49
8.3.1	Naměřené hodnoty mobilního pozemního příjmu DVB-T/H.....	49
8.3.2	Grafické závislosti mobilního pozemního příjmu DVB-T/H.....	50
8.3.3	Konstelační diagramy mobilního pozemního příjmu DVB-T/H.....	51
8.3.4	Vyhodnocení mobilního pozemního příjmu DVB-T/H.....	51
9	PC SIMULACE DVB-T/H & DVB-T2	52
9.1	Standard DVB-T/H.....	52
9.1.1	Pevný pozemní příjem DVB-T/H.....	53
9.1.1.1	Simulované hodnoty pevného pozemního příjmu DVB-T/H.....	53
9.1.1.2	Grafické závislosti pevného pozemního příjmu DVB-T/H.....	54
9.1.1.3	Konstelační diagramy pevného pozemního příjmu DVB-T/H.....	55
9.1.1.4	Vyhodnocení pevného pozemního příjmu DVB-T/H	55
9.1.2	Přenosný pozemní příjem DVB-T/H.....	56
9.1.2.1	Simulované hodnoty přenosného pozemního příjmu DVB-T/H... 56	
9.1.2.2	Grafické závislosti přenosného pozemního příjmu DVB-T/H.....	57
9.1.2.3	Konstelační diagramy přenosného pozemního příjmu DVB-T/H. 58	

9. 1. 2. 4	Vyhodnocení přenosného pozemního příjmu DVB-T/H.....	58
9. 1. 3	Mobilní pozemní příjem DVB-T/H.....	59
9. 1. 3. 1	Simulované hodnoty mobilního pozemního příjmu DVB-T/H.....	59
9. 1. 3. 2	Grafické závislosti mobilního pozemního příjmu DVB-T/H.....	60
9. 1. 3. 3	Konstelační diagramy mobilního pozemního příjmu DVB-T/H...	61
9. 1. 3. 4	Vyhodnocení mobilního pozemního příjmu DVB-T/H.....	61
9. 2	Standard DVB-T2.....	62
9. 2. 1	Pevný pozemní příjem DVB-T2.....	62
9. 2. 1. 1	Simulované hodnoty pevného pozemního příjmu DVB-T2.....	62
9. 2. 1. 2	Grafické závislosti pevného pozemního příjmu DVB-T2.....	63
9. 2. 1. 3	Konstelační diagramy pevného pozemního příjmu DVB-T2.....	64
9. 2. 1. 4	Vyhodnocení pevného pozemního příjmu DVB-T2.....	64
9. 2. 2	Přenosný pozemní příjem DVB-T2.....	65
9. 2. 2. 1	Simulované hodnoty přenosného pozemního příjmu DVB-T2.....	65
9. 2. 2. 2	Grafické závislosti přenosného pozemního příjmu DVB-T2.....	66
9. 2. 2. 3	Konstelační diagramy přenosného pozemního příjmu DVB-T2...	67
9. 2. 2. 4	Vyhodnocení přenosného pozemního příjmu DVB-T2.....	67
9. 2. 3	Mobilní pozemní příjem DVB-T2.....	68
9. 2. 3. 1	Simulované hodnoty mobilního pozemního příjmu DVB-T2.....	68
9. 2. 3. 2	Grafické závislosti mobilního pozemního příjmu DVB-T2.....	69
9. 2. 3. 3	Konstelační diagramy mobilního pozemního příjmu DVB-T2.....	70
9. 2. 3. 4	Vyhodnocení mobilního pozemního příjmu DVB-T2.....	70
9. 2. 4	Pevný pozemní příjem DVB-T2.....	71
9. 2. 4. 1	Simulované hodnoty pevného pozemního příjmu DVB-T2.....	71
9. 2. 4. 2	Grafické závislosti pevného pozemního příjmu DVB-T2.....	72
9. 2. 4. 3	Konstelační diagramy pevného pozemního příjmu DVB-T2.....	73
9. 2. 4. 4	Vyhodnocení pevného pozemního příjmu DVB-T2.....	73

10	SHRNUTÍ	74
10.1	<i>S/N</i> pro QEF signál po kanálové korekci FEC.....	74
10.2	Bitové chybovosti <i>BER</i> přenosových kanálů pozemního příjmu	75
10.3	Grafické závislosti $BER_I = f(S/N)$, $BER_{II} = f(S/N)$	76
10.3.1	Přenosové kanály AWGN, RA_6 , TU_6 mobilního pozemního příjmu.....	76
10.3.2	Přenosové kanály AWGN, RC_{20} , RL_{20} pevného pozemního příjmu.....	77
10.3.3	Přenosové kanály AWGN, PI_{12} , PO_{12} přenosného pozemního příjmu.....	78
10.4	Konstelační diagramy přenosových kanálů pozemního příjmu.....	78
10.4.1	Přenosové kanály AWGN, RA_6 , TU_6 mobilního pozemního příjmu.....	79
10.4.2	Přenosové kanály AWGN, PI_{12} , PO_{12} přenosného pozemního příjmu.....	80
10.4.3	Přenosové kanály AWGN, RC_{20} , RL_{20} pevného pozemního příjmu.....	81
	ZÁVĚR	83
	Literatura	86
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	89
	Seznam příloh	94

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1:	Zjednodušené blokové schéma televizního řetězce systému digitální pozemní televize	2
Obr. 1.2:	Příjem digitálního a analogového signálu.....	3
Obr. 3.1:	Blokové schéma předzpracování TS v kodéru kanálu standardu DVB-T/H	7
Obr. 3.2:	Energetický disperzál pro systém DVB-T/H.....	8
Obr. 3.3:	Blokové schéma předzpracování TS v kodéru kanálu standardu DVB-T2	8
Obr. 3.4:	Bloky režimu přizpůsobení PLP _n systému DVB-T2	9
Obr. 3.5:	Struktura BB rámce standardu DVB-T2.....	10
Obr. 3.6:	Bloky přizpůsobení PLP _n systému DVB-T2	10
Obr. 3.7:	Kanálové zabezpečení FEC _{T/H} standardu DVB-T/H	11
Obr. 3.8:	Paket TS za RS (204, 188) kóděrem.....	12
Obr. 3.9:	Reedův Solomonův blokový kód (RS)	13
Obr. 3.10:	Princip konvolučního prokládání (Forney).....	13
Obr. 3.11:	Konvoluční kódér systému DVB-T/H	15
Obr. 3.12:	Vnitřní prokládání systému DVB-T/H pro modulaci 64-QAM, nehierarchický režim.....	16
Obr. 3.13:	Kanálové zabezpečení FEC _{T2} standardu DVB-T2.....	17
Obr. 3.14:	Formát dat FEC _{T2} zabezpečení před bitovým prokládáním.....	18
Obr. 3.15:	Zpětnovazebný posuvný kruhový registr BCH kodéru	19
Obr. 3.16:	Tannerův graf.....	21
Obr. 3.17:	Princip bitového prokládání normálního FEC _{T2} rámce pro modulaci 16-QAM.....	22
Obr. 4.1:	Modulační princip standardu DVB-T/H	24
Obr. 4.2:	OFDM modulátor, ortogonalita OFDM ve spektrální oblasti	25
Obr. 4.3:	Přenosový rámec signálu COFDM	26
Obr. 4.4:	Generování ochranného intervalu	27
Obr. 4.5:	Modulační princip standardu DVB-T2	28
Obr. 4.6:	Modulace 16-QAM: a) porovnání standardu DVB-T/H (červená) a DVB-T2 (modrá), b) a c) počet přenesených bodů na I, Q osách.....	29

Obr. 6.1:	Vektory pro stanovení MER	37
Obr. 6.2:	Princip stanovení bitových chybovostí BER	38
Obr. 7.1:	PCI karta a blokové schéma modulátoru DTA-110T	39
Obr. 7.2:	PCI karta a blokové schéma adaptéru DTA-145	40
Obr. 7.3:	Přijímač KATHREIN MSK-20	40
Obr. 8.1:	Rozmístění přístrojů laboratorního pracoviště.....	42
Obr. 8.2:	Laboratorní měření DVB-T/H závislosti $BER_I = f(S/N)$ pro pevný pozemní příjem. Přenosové kanály AWGN, RC ₂₀ a RL ₂₀	44
Obr. 8.3:	Laboratorní měření DVB-T/H závislosti $BER_{II} = f(S/N)$ pro pevný pozemní příjem. Přenosové kanály AWGN, RC ₂₀ a RL ₂₀	44
Obr. 8.4:	Laboratorní měření DVB-T/H I/Q diagramů. Pevný pozemní příjem, $S/N = 20\text{dB}$. Přenosové kanály: a) AWGN, b) RC ₂₀ , c) RL ₂₀	45
Obr. 8.5:	Laboratorní měření DVB-T/H závislosti $BER_I = f(S/N)$ pro přenosný pozemní příjem. Přenosové kanály AWGN, PI ₁₂ a PO ₁₂	47
Obr. 8.6:	Laboratorní měření DVB-T/H závislosti $BER_{II} = f(S/N)$ pro přenosný pozemní příjem. Přenosové kanály AWGN, PI ₁₂ , a PO ₁₂	47
Obr. 8.7:	Laboratorní měření DVB-T/H I/Q diagramů. Přenosný pozemní příjem, $S/N = 20\text{dB}$. Přenosové kanály: a) AWGN, b) PI ₁₂ , c) PO ₁₂	48
Obr. 8.8:	Laboratorní měření DVB-T/H závislosti $BER_I = f(S/N)$ pro mobilní pozemní příjem. Přenosové kanály AWGN, RA ₆ a TU ₆	50
Obr. 8.9:	Laboratorní měření DVB-T/H závislosti $BER_{II} = f(S/N)$ pro mobilní pozemní příjem. Přenosové kanály AWGN, RA ₆ a TU ₆	50
Obr. 8.10:	Laboratorní měření DVB-T/H I/Q diagramů. Mobilní pozemní příjem, $S/N = 20\text{dB}$. Přenosové kanály: a) AWGN, b) RA ₆ , c) TU ₆	51
Obr. 9.1:	Hlavní okno aplikace pro simulaci přenosového systému DVB-T.....	52
Obr. 9.2:	Počítačová simulace DVB-T/H závislosti $BER_I = f(S/N)$ pro pevný pozemní příjem. Přenosové kanály AWGN, RC ₂₀ a RL ₂₀	54
Obr. 9.3:	Počítačová simulace DVB-T/H závislosti $BER_{II} = f(S/N)$ pro pevný pozemní příjem. Přenosové kanály AWGN, RC ₂₀ a RL ₂₀	54
Obr. 9.4:	Počítačová simulace DVB-T/H I/Q diagramů po kanálové korekci a odstranění pomocných nosných. Pevný pozemní příjem, $S/N = 20\text{dB}$. Přenosové kanály: a) AWGN, b) RC ₂₀ , c) RL ₂₀	55
Obr. 9.5:	Počítačová simulace DVB-T/H závislosti $BER_I = f(S/N)$ pro přenosný pozemní příjem. Přenosové kanály AWGN, PI ₁₂ a PO ₁₂	57

Obr. 9.6:	Počítačová simulace DVB-T/H závislosti $BER_{II} = f(S/N)$ pro přenosný pozemní příjem. Přenosové kanály AWGN, PI_{12} a PO_{12}	57
Obr. 9.7:	Počítačová simulace DVB-T/H I/Q diagramů po kanálové korekci a odstranění pomocných nosných. Přenosný pozemní příjem, $S/N = 20\text{dB}$. Přenosové kanály: a) AWGN, b) PI_{12} , c) PO_{12}	58
Obr. 9.8:	Počítačová simulace DVB-T/H závislosti $BER_I = f(S/N)$ pro mobilní pozemní příjem. Přenosové kanály AWGN, RA_6 a TU_6	60
Obr. 9.9:	Počítačová simulace DVB-T/H závislosti $BER_{II} = f(S/N)$ pro mobilní pozemní příjem. Přenosové kanály AWGN, RA_6 a TU_6	60
Obr. 9.10:	Počítačová simulace DVB-T/H I/Q diagramů po kanálové korekci a odstranění pomocných nosných. Mobilní pozemní příjem, $S/N = 20\text{dB}$. Přenosové kanály: a) AWGN, b) RA_6 , c) TU_6	61
Obr. 9.11:	Počítačová simulace DVB-T2 závislosti $BER_I = f(S/N)$ pro pevný pozemní příjem. Přenosové kanály AWGN, RC_{20} a RL_{20}	63
Obr. 9.12:	Počítačová simulace DVB-T2 závislosti $BER_{II} = f(S/N)$ pro pevný pozemní příjem. Přenosové kanály AWGN, RC_{20} a RL_{20}	63
Obr. 9.13:	Počítačová simulace DVB-T2 I/Q diagramů pevného pozemního příjmu, $S/N = 20\text{dB}$. Přenosové kanály: a) AWGN, b) RC_{20} , c) RL_{20}	64
Obr. 9.14:	Počítačová simulace DVB-T2 závislosti $BER_I = f(S/N)$ pro přenosný pozemní příjem. Přenosové kanály AWGN, PI_{12} a PO_{12}	66
Obr. 9.15:	Počítačová simulace DVB-T2 závislosti $BER_{II} = f(S/N)$ pro přenosný pozemní příjem. Přenosové kanály AWGN, PI_{12} a PO_{12}	66
Obr. 9.16:	Počítačová simulace DVB-T2 I/Q diagramů přenosného pozemního příjmu, $S/N = 20\text{dB}$. Přenosové kanály: a) AWGN, b) PI_{12} , c) PO_{12}	67
Obr. 9.17:	Počítačová simulace DVB-T2 závislosti $BER_I = f(S/N)$ pro mobilní pozemní příjem. Přenosové kanály AWGN, RA_6 a TU_6	69
Obr. 9.18:	Počítačová simulace DVB-T2 závislosti $BER_{II} = f(S/N)$ pro mobilní pozemní příjem. Přenosové kanály AWGN, RA_6 a TU_6	69
Obr. 9.19:	Počítačová simulace DVB-T2 I/Q diagramů mobilního pozemního příjmu, $S/N = 20\text{dB}$. Přenosové kanály: a) AWGN, b) RA_6 , c) TU_6	70
Obr. 9.20:	Počítačová simulace DVB-T2 závislosti $BER_I = f(S/N)$ pro pevný pozemní příjem. Přenosové kanály AWGN, RC_{20} a RL_{20}	72
Obr. 9.21:	Počítačová simulace DVB-T2 závislosti $BER_{II} = f(S/N)$ pro pevný pozemní příjem. Přenosové kanály AWGN, RC_{20} a RL_{20}	72
Obr. 9.22:	Počítačová simulace DVB-T2 I/Q diagramů pevného pozemního příjmu, $S/N = 20\text{dB}$. Přenosové kanály: a) AWGN, b) RC_{20} , c) RL_{20}	73

Obr. 10.1:	$BER_I = f(S/N)$ přenosových kanálů AWGN, RA ₆ , TU ₆ mobilního pozemního příjmu.....	76
Obr. 10.2:	$BER_{II} = f(S/N)$ přenosových kanálů AWGN, RA ₆ , TU ₆ mobilního pozemního příjmu.....	76
Obr. 10.3:	$BER_I = f(S/N)$ přenosových kanálů AWGN, RC ₂₀ , RL ₂₀ pevného pozemního příjmu.....	77
Obr. 10.4:	$BER_{II} = f(S/N)$ přenosových kanálů AWGN, RC ₂₀ , RL ₂₀ pevného pozemního příjmu.....	77
Obr. 10.5:	$BER_I = f(S/N)$ přenosových kanálů AWGN, PI ₁₂ , PO ₁₂ přenosného pozemního příjmu.....	78
Obr. 10.6:	$BER_{II} = f(S/N)$ přenosových kanálů AWGN, PI ₁₂ , PO ₁₂ přenosného pozemního příjmu.....	78
Obr. 10.7:	I/Q diagramy AWGN, RA ₆ a TU ₆ přenosových kanálů mobilního pozemního příjmu pro $S/N = 20\text{dB}$, QPSK: a), b), c) laboratorní měření; d), e), f) PC simulace DVB-T/H; g), h), i) PC simulace DVB-T2	79
Obr. 10.8:	I/Q diagramy AWGN, PI ₁₂ a PO ₁₂ přenosových kanálů přenosného pozemního příjmu pro $S/N = 20\text{dB}$, 16-QAM: a), b), c) laboratorní měření; d), e), f) PC simulace DVB-T/H; g), h), i) PC simulace DVB-T2	80
Obr. 10.9:	I/Q diagramy AWGN, RC ₂₀ a RL ₂₀ přenosových kanálů pevného pozemního příjmu pro $S/N = 20\text{dB}$, 64-QAM: a), b), c) laboratorní měření; d), e), f) PC simulace DVB-T/H; g), h), i) PC simulace DVB-T2	81
Obr. 10.10:	I/Q diagramy pevného pozemního příjmu, PC simulace DVB-T2 pro $S/N = 20\text{dB}$, 256-QAM. Přenosové kanály: a) AWGN, b) RC ₂₀ , c) RL ₂₀	82

SEZNAM TABULEK

Tab. 2.1: Porovnání standardů DVB-T/H/T2 z pohledu zdrojového kódování, kanálového kódování a modulace.....	5
Tab. 3.1: Permutační funkce $H(w)$ pro jednotlivé bitové prokladače	15
Tab. 3.2: Kódové parametry zabezpečení pro normální FEC _{T2} rámeček standardu DVB-T2	17
Tab. 3.3: Minimální nerozložitelné mnohočleny $g_i(x)$ nad $GF(2^{16})$ normálního FEC _{T2} rámce.....	18
Tab. 3.4: Struktura bitového prokladače pro jednotlivé typy modulace, normální FEC _{T2} rámeček	22
Tab. 4.1: Konkrétní úhly pootočení konstelačních bodů pro jednotlivé modulace	30
Tab. 8.1: Laboratorní měření DVB-T/H závislosti $BER = f(S/N)$ pro pevný pozemní příjem. Přenosové kanály AWGN, RC ₂₀ a RL ₂₀	43
Tab. 8.2: Laboratorní měření DVB-T/H závislosti $BER = f(S/N)$ pro přenosný pozemní příjem. Přenosové kanály AWGN, PI ₁₂ a PO ₁₂	46
Tab. 8.3: Laboratorní měření DVB-T/H závislosti $BER = f(S/N)$ pro mobilní pozemní příjem. Přenosové kanály AWGN, RA ₆ a TU ₆	49
Tab. 9.1: Počítačová simulace DVB-T/H závislosti $BER = f(S/N)$ pro pevný pozemní příjem. Přenosové kanály AWGN, RC ₂₀ a RL ₂₀	53
Tab. 9.2: Počítačová simulace DVB-T/H závislosti $BER = f(S/N)$ pro přenosný pozemní příjem. Přenosové kanály AWGN, PI ₁₂ , a PO ₁₂	56
Tab. 9.3: Počítačová simulace DVB-T/H závislosti $BER = f(S/N)$ pro mobilní pozemní příjem. Přenosové kanály AWGN, RA ₆ a TU ₆	59
Tab. 9.4: Počítačová simulace DVB-T2 závislosti $BER = f(S/N)$ pro pevný pozemní příjem. Přenosové kanály AWGN, RC ₂₀ a RL ₂₀	62
Tab. 9.5: Počítačová simulace DVB-T2 závislosti $BER = f(S/N)$ pro přenosný pozemní příjem. Přenosové kanály AWGN, PI ₁₂ , a PO ₁₂	65
Tab. 9.6: Počítačová simulace DVB-T2 závislosti $BER = f(S/N)$ pro mobilní pozemní příjem. Přenosové kanály AWGN, RA ₆ a TU ₆	68
Tab. 9.7: Počítačová simulace DVB-T2 závislosti $BER = f(S/N)$ pro pevný pozemní příjem. Přenosové kanály AWGN, RC ₂₀ a RL ₂₀	71
Tab. 10.1: Minimální hodnoty S/N odpovídající QEF signálu po FEC konkrétních přenosových kanálů jednotlivých pozemních příjmů	74

Tab. 10.2: Bitové chybovosti BER pro $S/N = 20\text{dB}$ přenosových kanálů pozemního příjmu.....	75
---	----

ÚVOD

Systém digitálního pozemního televizního vysílání vyvinutého v Evropě nazývaný se DVB-T úspěšně řeší problémy vyčerpání kmitočtové spektra, s ním spojitě omezení zavádět další celoplošné televizní kanály, a požadavek na větší počet programů s rostoucím nárokem na kvalitu obrazu a zvuku pro stávající dobíhající analogové televizní vysílání.

Systém DVB-H – „digitální televize do ruky“ byl vyvinut ze systému DVB-T. Je vyvíjen od roku 2001 projektem DVB a je zaměřen na možnost příjmu digitální televize prostřednictvím bateriových přijímačů typu mobilního telefonu nebo příručního osobního počítače PDA.

Systém digitálního pozemního televizního vysílání druhé generace DVB-T2 je nejnovější směr vývoje digitálního terestrického televizního vysílání. V budoucnu se s velkou pravděpodobností stane nástupcem standardu DVB-T. Nejdůležitější výhodou standardu DVB-T2 je zvýšení kapacity datového toku o více než 30% oproti standardu DVB-T za stejných přenosových podmínek. Tato výhoda zvýšení přenosové kapacity je dána především zlepšeným zdrojovým a kanálovým kódováním.

Zavedením standardu DVB-T2, který není slučitelný se standardem DVB-T převážně díky odlišnému zdrojovému a kanálovému kódování, dojde k nutnosti výměny části technologie. Na vysílači zejména výměna modulátoru, naproti tomu demodulátor a dekodér podporující standard DVB-T2 v přijímači.

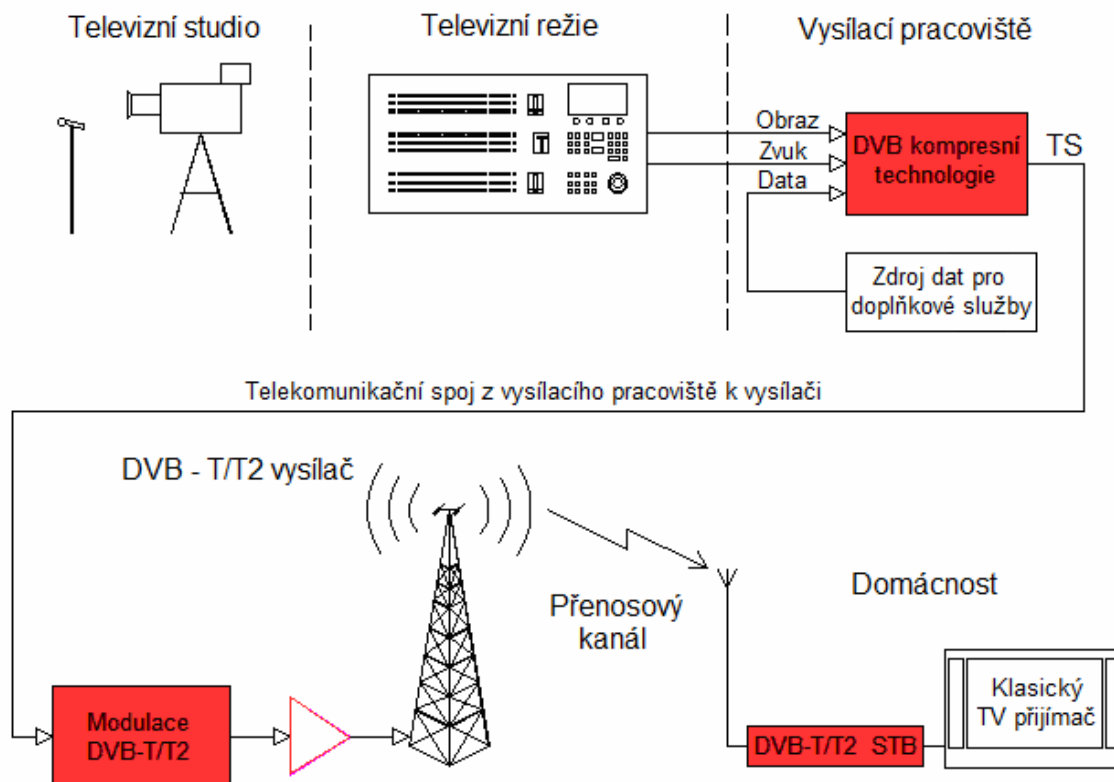
Diplomová práce se zabývá porovnáním standardů pro digitální pozemní televizní vysílání první generace DVB-T/H a druhé generace DVB-T2 s důrazem kladeným především na modulátor, tedy kanálové zabezpečení signálu proti vlivu rušení přenosového prostředí a samotnou modulaci signálu. Následuje popis konkrétních modelů přenosových kanálů pro pevný, přenosný a mobilní příjem pozemního digitálního signálu. Zdrojové kódování signálu není předmětem práce a není mu tedy věnována jakákoli pozornost.

Vliv přenosového prostředí jednotlivých pozemních příjmů na digitálně modulovaný signál pro standard DVB-T/H je podložen laboratorním měřením a počítačovou simulací. Z důvodu nedostupnosti potřebného přístrojového vybavení pro laboratorní měření přenosového systému vysílání pozemního digitálního televizního vysílání dle standardu DVB-T2, není toto laboratorní měření provedeno a vliv přenosového prostředí jednotlivých pozemních příjmů na digitálně modulovaný signál je podroben „pouze“ počítačové simulaci.

1 STRUČNÉ POROVNÁNÍ DIGITÁLNÍHO A ANALOGOVÉHO PŘÍJMU TV

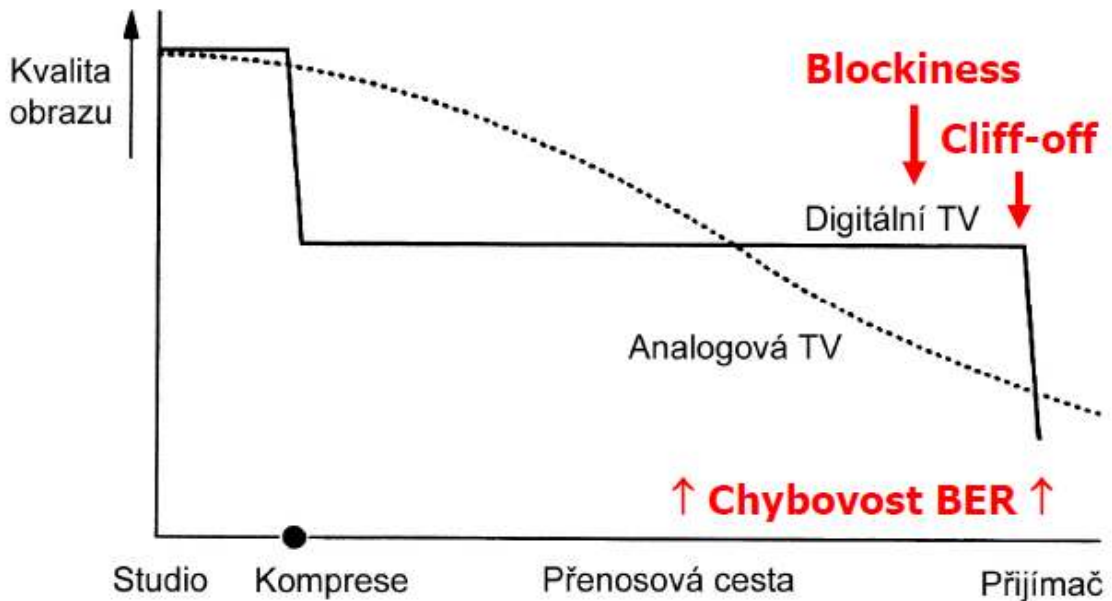
Použitím pozemního digitálního televizního přenosového systému DTV (*Digital Television*) klesá energetická náročnost v porovnání s analogovým přenosovým systémem ATV (*Analog TeleVision*) a vede k efektivnímu využití kmitočtových zdrojů.

Nový systém, postavený na moderních progresivních metodách zpracování obrazu a zvuku je principiálně zcela odlišný a nekompatibilní s dnes „dobíhajícím“ analogovým televizním vysíláním. Na vysílací straně došlo k výměně technologie, k úpravám dochází na vysílacích anténních systémech i na přijímacích anténách, pokud technicky nevyhovují. Na přijímací straně je systém příjmu digitálního televizního vysílání doplněn o digitální přijímač STB (*Set-Top Box*), zapojen mezi přijímací anténu a analogový TV přijímač, anebo je signál přímo přiveden do digitálního přijímače s integrovaným digitálním dílem IDTV (*Integrated Digital TeleVision*). Zjednodušené blokové schéma televizního řetězce systému digitální pozemní televize „od kamery až po obrazovku“ je zobrazeno na obr. 1.1, kde jednotlivé bloky DVB jsou zakresleny barevně.



Obr. 1.1: Zjednodušené blokové schéma televizního řetězce systému digitální pozemní televize

Na obr. 1.2 je zobrazeno porovnání analogové a digitální televize z hlediska plánování služeb televizního vysílání. Se vzrůstající vzdáleností od vysílače klesá u analogového pozemního přenosu úroveň signálu postupně a tím se i postupně zhoršuje kvalita obrazu. U digitálního přenosu se kvalita obrazu s rostoucí vzdáleností od vysílače dlouhodobě nemění, až při určité vzdálenosti se začnou projevovat chyby v obraze „čtverečkování (*Blockiness*)“ nebo obraz tzv. „zamrzá“. Nakonec dochází k úplnému výpadku obrazu i zvuku (*tzv. Cliff efekt*).



Obr. 1.2: Příjem digitálního a analogového signálu (převzato z [23])

2 STANDARD DVB

DVB (*Digital Video Broadcasting*) je mezinárodní konsorcium vytvořené televizními společnostmi, výrobci, síťovými operátory, vývojáři softwaru a dalšími zástupci, celkem 260 členy z 35 států celého světa. Konsorcium bylo založeno v roce 1993 a od té doby se specifikace DVB staly normami v oblasti digitální televize nejen v Evropě, ale i ve světě. Standard DVB je určen pro digitální přenos signálů obrazu, zvuku a dat. Dnes nabízí různé úrovně kvality televizního vysílání od „televize“ s nízkou rozlišovací schopností LDTV (*Low Definition TeleVision*) přes „televizi“ se standardní rozlišovací schopností SDTV (*Standard Definition TeleVision*) až po televizní vysílání s vysokou rozlišovací schopností HDTV (*High Definition TeleVision*), audio doprovod od monofonního zvuku, přes stereofonní až po prostorový zvuk 5.1 (*Dolby Digital*). [27]

Základní způsoby digitálního televizního vysílání jsou: družicové DVB-S (*Satellite*), kabelové DVB-C (*Cable*), pozemské DVB-T (*Terrestrial*) a nejnovější DVB-H (*Handheld*) pro příjem televize v kapesním přijímači.

2.1 Systém DVB-T/H/T2

Princip DVB-T [11] spočívá v digitalizaci vstupních obrazových a zvukových signálů, v redukci datového toku informace, tj. odstranění nadbytečnosti (*redundance*), nepodstatnosti (*irrelevance*) a v podvzorkování chrominančních složek obrazu, v kompresi signálu, ve sloučení více TV programů, případně jiných signálů, do jednoho multiplexu (souhrnný transportní datový tok MPEG-2 TS (*Transport Stream*) skládající se z dílčích programových datových toků), vytvoření ochrany užitečného datového toku různými kódovacími metodami a tzv. prokládání (*interleaving*), použití digitálních modulací QPSK (*Quadrature Phase Shift Keyng*) či M-QAM (*M-Quadrature Amplitude Modulation*), vytvoření několika tisíc nosných v kanálu aplikováním OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplex*), vložením ochranného intervalu a v samotném vysílání.

DVB-H [15] je založen na výborných vlastnostech systému DVB-T z hlediska mobilního příjmu a odpovídá potřebě zajistit spolehlivý příjem velkého množství dat při vysoké rychlosti přenosu směrem k uživateli. Užitečná data DVB-H systému se pomocí MPEG-2 TS přenáší metodou MPE (*Multi Protocol Encapsulation*) založenou na IP (*Internet Protocol*) datagramech, tj. zapouzdření IP paketů v rámci MPEG-2 TS. Na úrovni MPE je přidán další stupeň protichybového zabezpečení MPE-FEC (*Multi Protocol Encapsulation – Forward Error Correction*) s cílem robustnějšího zabezpečení mobilního příjmu a snížení vlivu impulsního rušení. Aplikací časového segmentování (*time-slicing*) lze snížit spotřebu energie mobilního přijímače až o 95% a výrazně tak přispět k životnosti akumulátoru, kdy vysílaná data se přenášejí a jsou přijímány v určitých časových intervalech (*burstech*).

DVB-T2 [8] se v první řadě vyznačuje zvýšenou kapacitou datového toku o více než 30% oproti standardu DVB-T za stejných přenosových podmínek. Tato výrazná přednost je dána především zlepšením zdrojového a kanálového kódování a dále také možnostmi dalších modulačních metod v podobě tzv. RCD (*Rotated Constellation Diagram*). Další změnou oproti standardu DVB-T je zavedení více vstupních datových toků, nazývajících se PLP (*Physical Layer Pipes*). Počet PLP může teoreticky dosáhnout hodnoty až 256, jednotlivé PLP mohou nést jiný typ dat a každá z nich může být v rámci jednoho frekvenčního kanálu modulována jinou metodou s jinou robustností zabezpečení. Zavedením standardu DVB-T2, který není slučitelný se standardem DVB-T převážně díky odlišnému zdrojovému a kanálovému kódování, dojde k nutnosti výměny části technologie. Na vysílací straně to bude zejména výměna modulátoru, na přijímací straně výměna demodulátoru a dekodéru DVB-T2 přijímače.

Porovnání jednotlivých prvků standardů DVB-T/H/T2 je shrnuto v tab. 2.1. Základem standardů DVB-H a DVB-T2 je DVB-T, se kterým mají mnoho společného, a ze kterého se novější systémy vyvinuly. Tab. 2.1 jednotlivé standardy porovnává z pohledu zdrojového kódování, kanálového kódování a modulace.

Tab. 2.1: Porovnání standardů DVB-T/H/T2 z pohledu zdrojového kódování, kanálového kódování a modulace

PRVEK		STANDARD		
		DVB-T	DVB-H	DVB-T2
zdrojové kódování	kódování obrazu	MPEG-2	MPEG-4 AVC	MPEG-4 AVC
	kódování zvuku	MPEG-1, I/II	AAC	AAC
	transportní tok	MPEG-2 TS	IP datagramy	PLP
kanálové kódování	vnější kanálové zabezpečení FEC _I	Reed Solomon (204,188)	MPE-FEC Reed Solomon (204,188)	BCH
	vnitřní kanálové zabezpečení FEC _{II}	konvoluční kód 1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7,8	konvoluční kód 1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7,8	LDPC 1/2, 3/5, 2/3, 3/4, 4/5, 5/6
	prokládání	vnější & vnitřní	vnější & vnitřní	vnitřní
	časové segmentování	ne	ano	ne
modulace	modulační princip	COFDM	COFDM	COFDM
	mód	2k, 8k	2k, 4k, 8k	1k, 2k, 4k, 8k, 16k, 32k
	RCD	ne	ne	ano
	modulace	QPSK, 16-QAM, 64-QAM	QPSK, 16-QAM, 64-QAM	QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM
	ochranný interval	1/4, 1/8, 1/16, 1/32	1/4, 1/8, 1/16, 1/32	1/4, 19/128, 1/8, 19/256, 1/16, 1/32, 1/128
	šířka vf. kanálu [MHz]	6, 7, 8	5, 6, 7, 8	1.7, 5, 6, 7, 8, 10

Následující kapitoly jsou věnovány předmětu této práce, což je srovnání standardů pro digitální pozemní televizní vysílání první generace DVB-T/H a druhé generace DVB-T2 s důrazem kladeným především na modulátor, tedy kanálové zabezpečení signálu proti vlivu rušení přenosové cesty a samotnou modulaci signálu. Zdrojové kódování signálu není předmětem práce a není mu tedy věnována jakákoli pozornost.

3 PROTICHYBOVÉ ZABEZPEČENÍ V DVB

Protichybové zabezpečení transportního toku (TS, PLP_n) v systémech DVB-T/H/T2 je několikastupňové, prováděné v rámci kanálového kódování pomocí kodéru kanálu, který zabezpečuje signál proti chybám při přenosu komunikačním kanálem (přenosovým prostředím) záměrným zvýšením redundance, což má za následek nepatrné zvýšení přenosové rychlosti. Podle použitého systému může být stupeň ochrany různý, mohou být zabezpečeny jednotlivé byty, ale i bity. K tomuto účelu se používají zabezpečovací neboli bezpečnostní kódy, které umožňují chybu nejen detekovat – detekční kódy ARQ (*Automatic Repeat reQuest*), ale i opravit – korekční kódy FEC (*Forward Error Correction*). Způsob ochrany signálu je přizpůsoben přenosovému prostředí – kanálu. Součástí kanálového kódování je prokládání (*interleaving*), jehož cílem je zabezpečit signál proti shlukům chyb (*burst*).

Při ochraně transportního toku DVB signálu se využívá princip tzv. „dopředné“ chybové ochrany FEC, kterému předchází předzpracování TS. Pro jednotlivé standardy DVB-T a DVB-T2 je předzpracování TS i protichybové zabezpečení odlišné. Normy [11], [8] popisující jednotlivé standardy nedefinují požadavky na demodulátor a dekodér. Je však zřejmé, že budou obsahovat bloky provádějící inverzní operace než modulátor a navíc budou rozšířeny o bloky zajišťující synchronizaci a korekci přijímaného signálu.

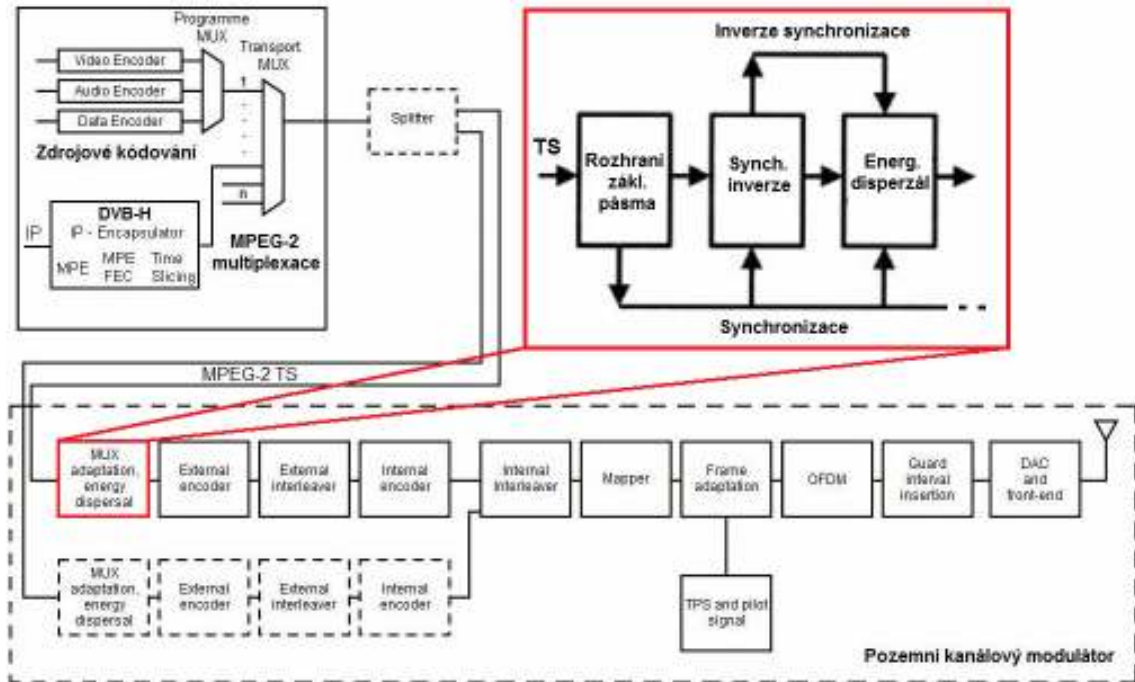
3.1 Předzpracování TS standardu DVB-T/H

Standard DVB-T/H umožňuje volitelný přenos pomocí hierarchického kódování. Mapovací obvod (*splitter*) na obr. 3.1 rozdělí vstupní datový tok na dvě nezávislé identické větve $FEC_{T/H}$. Na cestu s vyšší prioritou HP (*High Priority path*) a nižším datovým tokem je aplikováno účinnější protichybové zabezpečení TS a robustnější modulace (QPSK, 16-QAM), cesta s nižší prioritou LP (*Low Priority path*) a vyšším datovým tokem je zpracována s nižším stupněm zabezpečení a modulací 64-QAM. Vnitřní prokladač $FEC_{T/H}$ obě větve původního toku opět skládá v jeden datový tok TS a ten je dále zpracováván a mapován do modulátoru. [25]

Hlavní úkol předzpracování TS standardu DVB-T je v podobě synchronizace TS a energetického rozptylu.

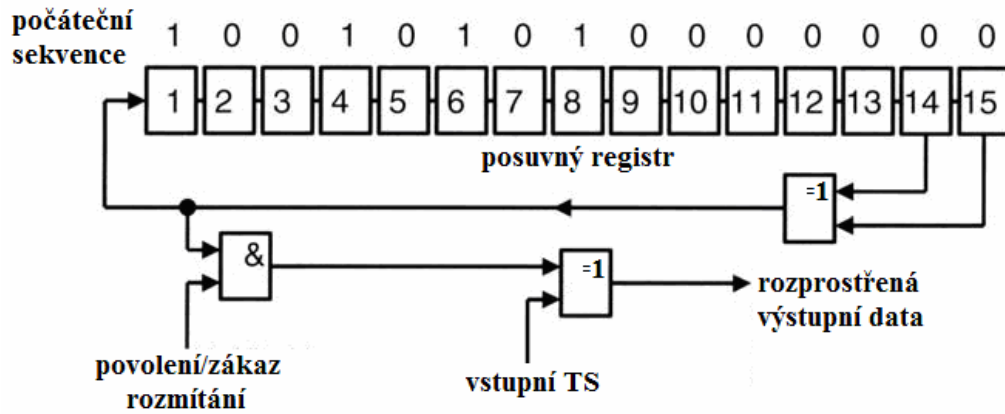
Ve vstupním rozhraní v základním pásmu je signál synchronizován s TS, který se skládá z paketů konstantní délky 188B, obsahující 4B hlavičku (*header*) a 184B užitečného obsahu dat (*payload*). Hlavička začíná synchronizačním bytem 0x47 (47_{HEX}), který se periodicky opakuje v konstantním intervalu 188B. Na rozhraní kanálového kodéru je signál synchronizován na sync byte.

V následujícím bloku jednotky energetického rozptylu je každý osmý synchronizační byte invertován z hodnoty 0x47 na hodnotu 0xB8 pomocí bitové inverze. Ostatních sedm synchronizačních bytů zůstává nezměněno. Použitím inverzní synchronizace, viz obr. 3.2, jsou do datového signálu vloženy přídavné časové značky (*timing stamps*) vždy po 8 paketech TS. Tyto časové značky umožňují modulátoru ve vysílači a demodulátoru v přijímači přijímat pakety synchronizovaně a aplikovat energetický rozptyl na stejné pakety, bloky dat.



Obr. 3.1: Blokové schéma předzpracování TS v kodéru kanálu standardu DVB-T/H [11], [15]

V případě potřeby přenášet bloky dat s konstantní hodnotou, jedničky nebo nuly po delší dobu, nastávají problémy se synchronizací a „rozptýlením“ energie spektra. K eliminaci těchto vlivů je používán u digitálních systémů obvykle energetický disperzál, viz obr. 3.2. K dosažení energetického rozptylu je generována pseudo-náhodná bitová sekvence PRBS (*PseudoRandom Binary Sequence*), která je čas od času definovaným způsobem resetována. Spouštění a resetování je zajištěno vždy, když je synchronizační byte invertován. Datový tok je poté sloučen s pseudonáhodnou sekvencí pomocí funkce sčítání modulo 2 *exclusive OR* – *XOR*, viz obr. 3.2. Funkce *XOR* narušuje dlouhé sekvence jedniček nebo nul. Pokud je energeticky rozptýlený datový tok sloučen opět se stejnou PRBS v přijímači, rozptyl je následně eliminován a vliv je potlačen. [21], [25]

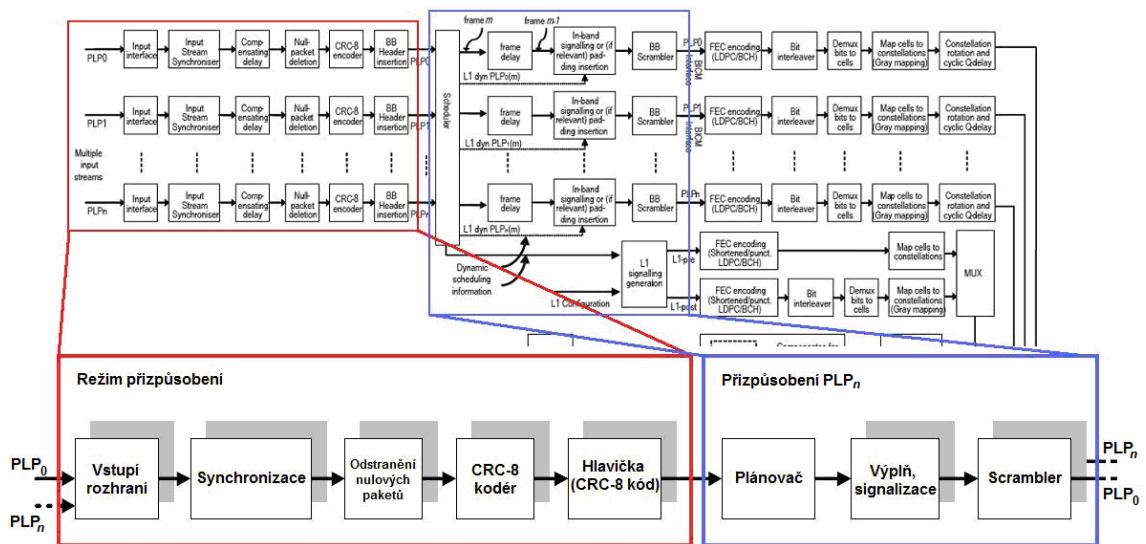


Obr. 3.2: Energetický disperzál pro systém DVB-T/H [25]

3.2 Předzpracování TS standardu DVB-T2

Předzpracování TS standardu DVB-T2 je složitější oproti DVB-T/H a uskutečňuje se v blocích režimu přizpůsobení a přizpůsobení transportního toku TS, viz obr. 3.3. Každý z bloků má dílčí pod-bloky, které plní specifické funkce.

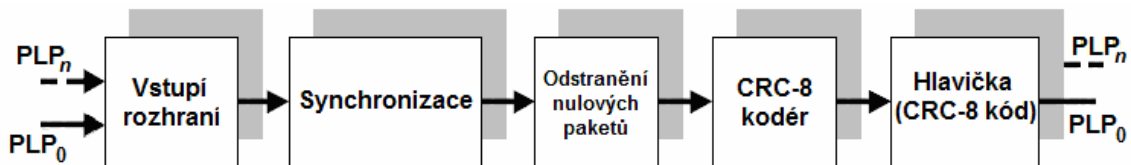
Oproti výstupnímu transportnímu toku TS v systému DVB-T/H, je výstup ze zdrojového kodéru v systému DVB-T2 ve formě jednoho nebo více logických datových toků, nazývajících se PLP_n .



Obr. 3.3: Blokové schéma předzpracování TS v kodéru kanálu standardu DVB-T2 [8]

3. 2. 1 Režim přizpůsobení

Jednotlivé bloky režimu přizpůsobení, viz obr. 3.4, působí na obsah nesoucí jednotlivé PLP_n samostatně, datový tok rozdělují do datových polí BBFRAME, které tvoří základní rámce TS. Na začátku každého rámce je vložena hlavička BBHEADER.



Obr. 3.4: Bloky režimu přizpůsobení PLP_n systému DVB-T2

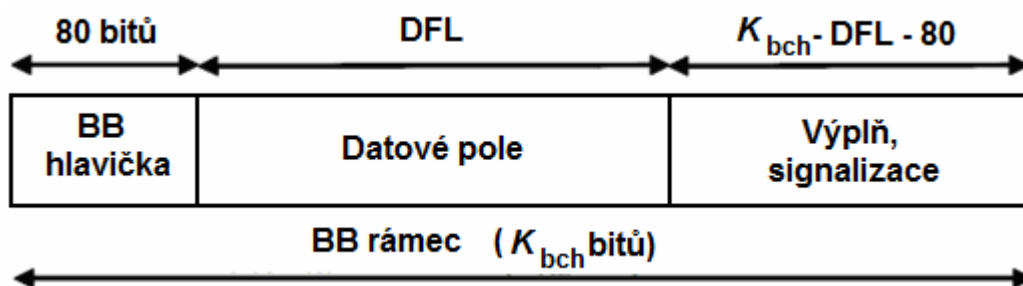
PLP_n mohou nést různá data a mít tedy různé formáty, např. TS (*Transport Stream*), GSE (*Generic Encapsulated Stream*), GCS (*Generic Continuous Stream*) a GFPS (*Generic Fixed-length Packetized Stream*).

Vstupní rozhraní upravuje každou PLP_n individuálně a hlavním úkolem je převést formát do logického bitového formátu, přičemž první obdržovaný bit je nejvýznamnější MSB (*Most Significant Bit*). Vstupní rozhraní načítá datové pole DFL (*Data Field Length*) o délce $0 < DFL < (K_{bch}-80)$, kde K_{bch} je počet bitů chráněných kanálovým kóděrem, viz dále. Minimální hodnota DFL je závislá na zvoleném kódu LDPC, 80 bitů obsahuje hlavička BBHEADER připojená na začátku každého rámce datového pole BBFRAME viz obr. 3.5 a slouží k popisu jeho formátu.

Synchronizace datového toku musí zajišťovat konstantní přenosovou rychlost CBR (*Constant Bit Rate*) a konstantní zpoždění přenosu pro každý vstupní formát. Použití vstupní synchronizace je pro každý formát volitelný a snaží se minimalizovat vliv proměnného zpoždění vstupních dat z důvodu zpracování v DVB-T2 modulátoru. Tento proces také umožní synchronizaci více vstupních datových toků v nezávislých PLP_n , referenční hodiny musí být stejné. ISSY pole (*Input Stream SYNchronization*) vložené do hlavičky BBHEADER, nese ve dvou až třech bytech hodnotu čítače s taktovací frekvencí modulátoru a může být použit přijímačem při synchronizaci.

Dosažení konstantní přenosové rychlosti a konstantního zpoždění bývá u datových toků dosaženo velkým redundantním procentem nulových paketů (*TS-null packets*), které je zbytečné přenášet a proto jsou odstraněny. Tento proces probíhá tak, aby odstraněné nulové pakety mohly být opět vloženy v přijímači na přesně definované původní místo, což zaručuje zpětný konstantní bitový tok.

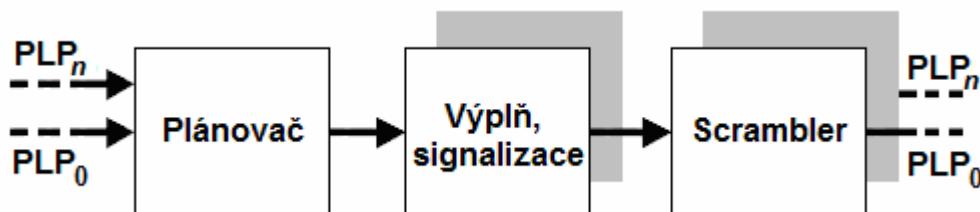
Cyklický CRC-8 (*Cyclic Redundancy Check*) kodér používá systematický 8-bitový kód k detekci chyb v hlavičce BBHEADER. Vypočítaná hodnota CRC-8 kódu o velikosti jednoho bytu je vložena do hlavičky.



Obr. 3.5: Struktura BB rámce standardu DVB-T2

3.2.2 Přizpůsobení PLP_n

Přizpůsobení PLP_n se skládá ze tří bloků, a to plánovače, signalizace nebo „výplně“ a energetického rozptýlení viz obr. 3.6. Jednotlivé bity, signalizující nastavení zmíněných bloků, se nacházejí v rámci BBFRAME za DFL, viz obr. 3.5.

Obr. 3.6: Bloky přizpůsobení PLP_n systému DVB-T2

Plánovač definuje přesné složení uspořádání T2-rámce a nemá žádný dopad na datový tok. Funguje jako čítač FEC rámců pro každou PLP a dopředu počítá hodnotu za účelem vytvoření požadované dynamické signalizační informace L1.

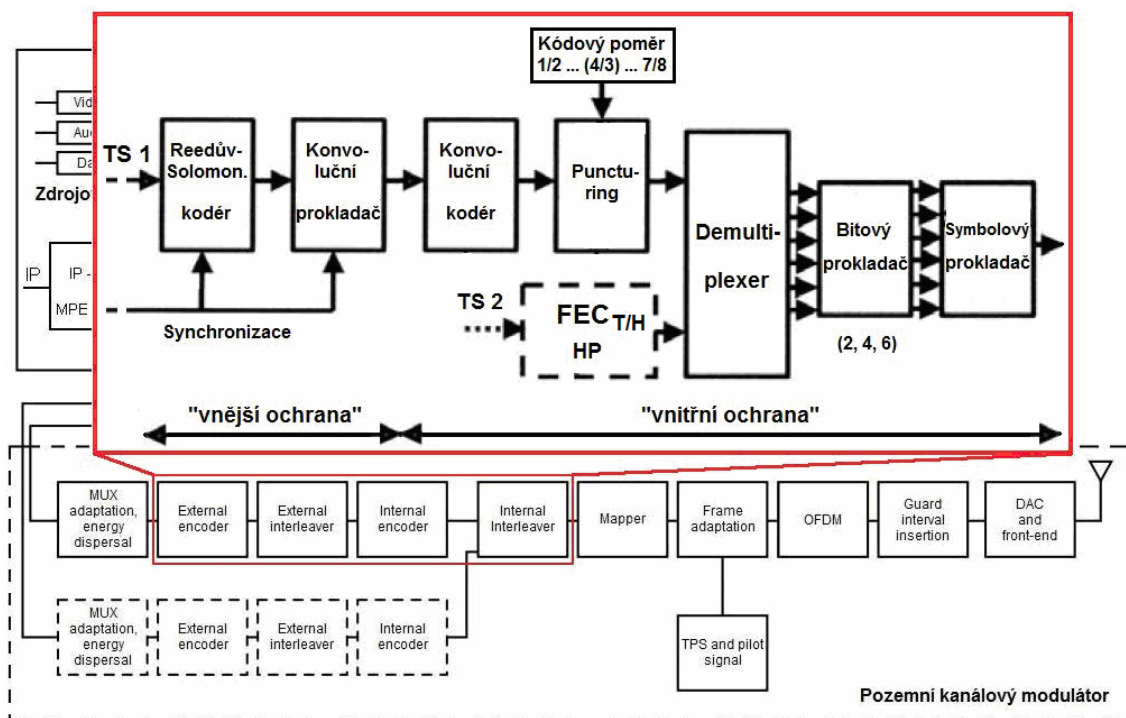
Hodnota K_{bch} závisí na použitém protichybovém zabezpečení FEC_{T2} viz tab. 3.2. „Výplň“ může být použita v případě, pokud „množství“ užitečných dat není dostatečné, aby zcela zaplnilo rámec BBFRAME. $(K_{bch}-DFL-80)$ nulových bitů musí být připojeno za DFL, aby výsledný BBFRAME měl konstantní délku bitů K_{bch} . Signalizace nese informaci o formátu vstupních dat a je provedena pouze v prvním BBFRAME indikována nastavením IN-BAND_FLAG pole v L1.

Úkolem „scrambleru“ je znáhodnění celého BBFRAME rámce. K tomuto účelu se používá pseudonáhodná kódovací posloupnost generovaná zpětnovazebním posuvným registrem, totožným s disperzálem v systému DVB-T pro „rozproštění“ datového toku TS, viz kap. 3.1. PRBS musí být zcela synchronní s BBFRAME rámcem, počínaje MSB a končící po K_{bch} bitech.

3.3 Kanálové zabezpečení FEC_{T/H} standardu DVB-T/H

Ochrana transportního toku standardu DVB-T/H signálu využívá princip tzv. „dopředné“ chybové ochrany FEC_{T/H}, skládající se z „vnější ochrany“ a „vnitřní ochrany“, symbolového a bitového prokladače viz obr. 3.7.

Princip je takový, že zdrojové symboly jsou zakódovány nejprve „vnější ochranou“ chránící před skupinovými chybami – Reedův Solomonův kodér. Kódová posloupnost je poté zakódována kódem chránící před nezávislými ojedinelými chybami využívající konvoluční kodér s možností zúžení kódového poměru pomocí vytečkování. Hlavním rozdílem mezi oběma kódy je to, že u blokového Reedova Solomonova kódu se přidávají k informačním symbolům délky m opravující symboly počtu k , zatímco u konvolučního binárního kódu se korekční bity nepřidávají a informační bity se mezi sebou definovaným způsobem ovlivňují. Pro zabezpečení signálu dle standardu DVB-T/H, první generace FEC_{T/H}, následují za oběma ochranami prokladače, zajišťující ochranu signálu proti skupinovým chybám, shluky chyb (*bursty*). Vnější konvoluční prokladač upravuje signál na úrovni bytů, vnitřní prokladač upravuje signál na bitové a symbolové úrovni. Uvedené protichybové zabezpečení FEC_{T/H} je typický příklad uplatnění zřetěžených kódů, využívající několikanásobného kanálového kódování a prokládání.



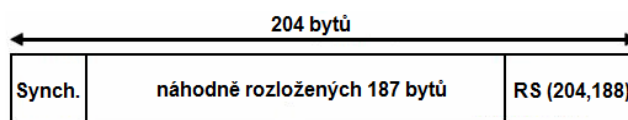
Obr. 3.7: Kanálové zabezpečení FEC_{T/H} standardu DVB-T/H

3.3.1 RS kód (*Reed Solomon Code*)

Označuje se jako vnější ochranný kód opravující určitý počet celých symbolů (bytů) v bloku. Patří mezi blokové nebinární cyklické BCH kódy. Chybová korekce musí nejen rozeznat chybný symbol v bloku, ale musí také vyhodnotit hodnotu původního symbolu. Blok je složen z počtu n symbolů odpovídajících číselně hodnotám 256-1, do něhož je zařazeno m bytů (symbolů) informačních a zbytek tvoří k míst s ochrannými byty tak, že platí $n = m + k$.

Protože je transportní tok TS složen z paketů o 188 bytech, redukuje se (zkracuje se) kód na typ RS (204, 188). Redukce spočívá v položení prvních 51 bytů rovných nule, anebo se vůbec nepřenáší. Paket se skládá z jednoho synchronizačního bytu, 187 informačních a 16 ochranných bytů viz obr. 3.8. Tento typ RS kódu opraví 8 symbolů (chybných bytů). Matematicky se vyjadřuje kódový poměr jako:

$$CR = \frac{m}{n} = \frac{n-k}{n} = 1 - \frac{k}{n} \quad [-]. \quad (3.1)$$



Obr. 3.8: Paket TS za RS (204, 188) kóděrem

Doplněním m informačních symbolů do počtu n , pomocí opravných symbolů s počtem k , se může dosáhnout počtu t symbolů, které se samy opraví, přičemž se najde místo „vadného“ symbolu a určí se jeho správná hodnota. Aby se opravilo t symbolů, musí být u kódu RS dvojnásobný počet opravujících symbolů, tj. $k = 2t$. Samoopravný kód Reed-Solomon se značí RS (n, m) a jeho principiální blokové schéma je na obr. 3.9.

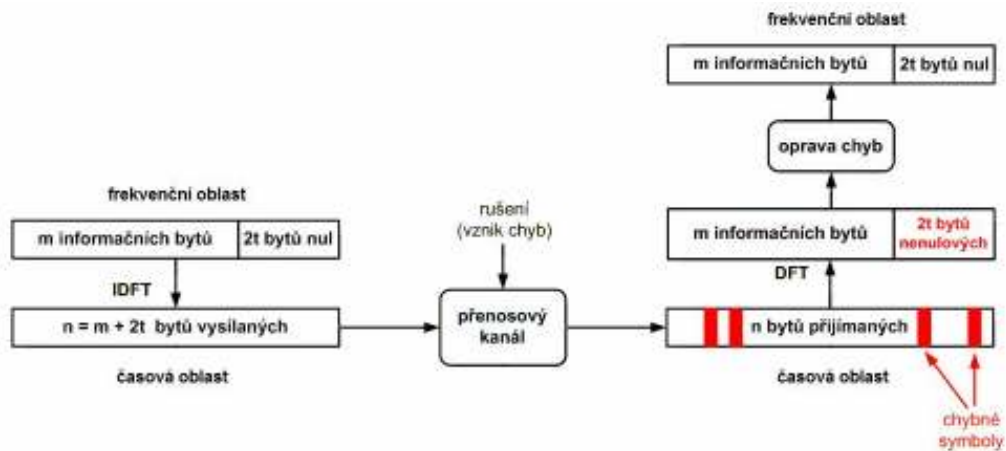
RS kódování používá prostor Galoisova pole $GF(q)$, konečného pole s omezeným počtem různých prvků a přesná definice je založena na kódování a dekódování ve frekvenční oblasti. Nevýhodou zpracování signálu ve frekvenční oblasti je implementace DFT transformace a dále fakt, že původní informace není identifikovatelná v přenášeném kódovém vektoru. Nevýhody lze odstranit implementací IDFT (*Inverse Discrete Fourier Transform*) a operace kódování a dekódování realizovat v časové oblasti. [25]

Dle normy [11] standardu DVB-T je $GF(q)$ určeno $q = 2^w$, kde $w = 8$ a definováno generujícím polynomem:

$$g(x) = (x+\lambda^0)(x+\lambda^1)(x+\lambda^2)\dots(x+\lambda^{15}), \quad (3.2)$$

kde $\lambda = 02_{\text{HEX}}$ a dále primitivním prvkem α . Během dekódování je vyhodnocen syndrom pomocí Euclidova Berlekampova algoritmu a vyhodnocením informací o poloze a hodnotách chyb lze stanovit chyby v přijímaném vektoru kódového slova.

Pokud byla překročena zabezpečující schopnost kódu $2t \leq n - k$ je přijatý symbol vyhodnocen jako chybný („poškozený“). [25]



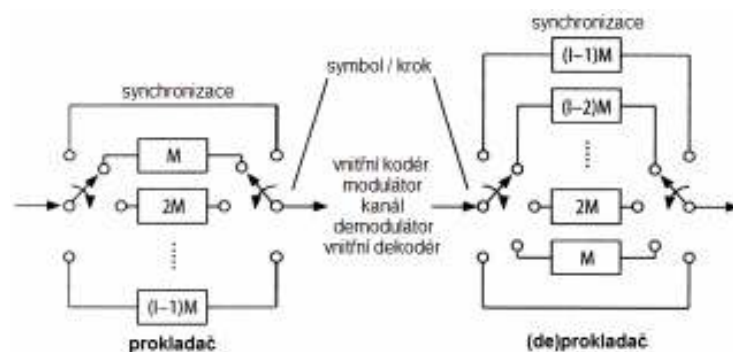
Obr. 3.9: Reedův Solomonův blokový kód (RS) [20]

RS kódy nejsou efektivní pro opravu nezávislých, ojedinělých chyb. Pokud je v každém opraveném slově (bytu) pouze jeden chybný bit, opraví RS kód pouze tolik chybných bitů, kolik opravil chybných slov (bytů).

3.3.2 Konvoluční prokladač

Konvoluční prokladač (*interleaver*) je součástí protichybového zabezpečení $FEC_{T/H}$ kanálového kodéru z důvodu „opravy“ dlouhých úseků shlukových chyb.

Důležitými parametry uvedeného zpracování signálu jsou tzv. hloubka prokládání I a rámeček vnějšího kódu n_r . V systému DVB-T je hloubka prokládání $I = 12$ pro kód RS (204, 188). Základní zpoždění systému M je dáno výrazem $M = n_r/I$, tedy $M = 204/12 = 17$. Čím větší je hloubka prokládání, tím větší může být skupinová chyba, kterou je schopen prokládací stupeň „rozprostřít“. Rámeček vnějšího kódu udává počet symbolů, po kterých se budou opakovat vzniklé ojedinělé chyby. [19]



Obr. 3.10: Princip konvolučního prokládání (Forney)

Konvoluční prokladač na obr. 3.10 se skládá z $(I-1)$ posuvných registrů s délkou M až $(I-1) \cdot M$ a odpovídajících multiplexerů a demultiplexerů znázorněných jako spínače. Každý z nich připojuje a přepíná v každém kroku registr na příslušný vstup nebo výstup pro symboly generované vnějším Reed Solomonovým kódem (1 symbol = 1 byte). Symbol je načten do tohoto posuvného registru, který je právě připojen na vstup a jiný symbol je odebrán z výstupu zmíněného posuvného registru. V případě připojení na synchronizaci, je vstup připojen přímo na výstup. To zajišťuje, že mezi následujícími symboly na vstupu je přeneseno $M \cdot I$ následných symbolů.

Zpětný (de)prokladač je navržen tak, aby zajistil nulové zpoždění symbolů z prokladače, kde bylo zpoždění naopak maximální. Celkové zpoždění je dáno výrazem $M \cdot (I-1) \cdot I$ pro všechny symboly. Pohyb přepínačů musí být synchronní. [25]

Bez prokládání a zpětného (de)prokládání by všechny shlukové chyby byly obsaženy v jednom rámci vnějšího blokového kódu a došlo by k selhání dekodéru.

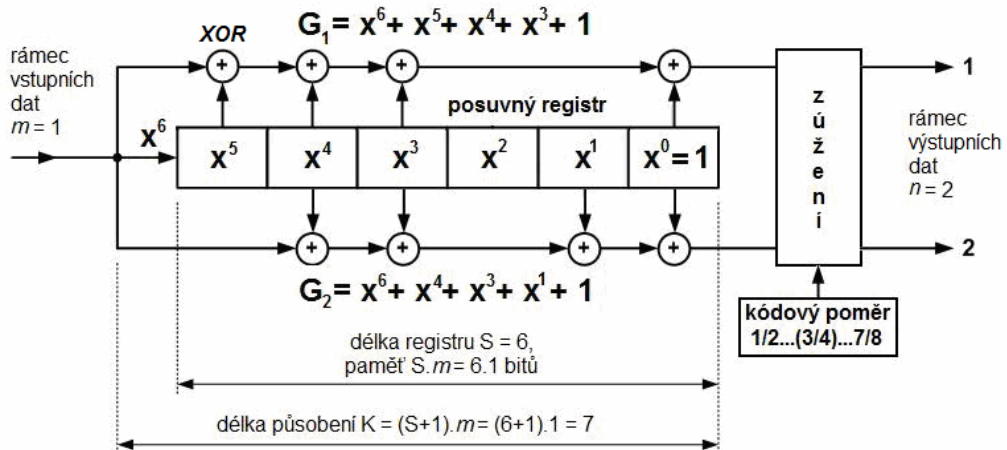
3.3.3 Konvoluční kód

Konvoluční kód zabezpečuje bity před poruchami tím, že jejich inverzní působení opravuje. Jeho účinnost závisí na délce působení kodéru na bitový tok. Při tomto druhu zabezpečení se nepřidávají zvláštní opravné bity k informačním bitům m , pouze se tyto vstupní bity navzájem ovlivňují vytvářením součtů na různých odbočkách registru. Bity se takto předepsaným způsobem „konvolují“, tj. skládají, takže jejich práva hodnota je „rozmazána“.

Konvoluční kodéry se označují $K(n, m)$, kde n je rámeček výstupních bitů a m je rámeček vstupních bitů, přičemž platí $n > m$. Poměr rámeček m vstupních bitů a rámeček výstupních bitů n udává kódový poměr CR , který bývá $1/2$, $2/3$, $3/4$, $5/6$ nebo $7/8$. Pro vytvoření výstupního signálu v jednotlivých větvích n se kromě odboček z posuvného registru používá i vstupní signál. Konvoluční kodér na obr. 3.11 obsahuje posuvný registr délky $S = 6$ a několik součtových členů realizujících funkci sčítání modulo 2 (XOR). Jejich počet je stanoven tzv. generujícími mnohočleny G stupně S , které udávají, podle jakých pravidel mají být vytvářeny výstupní signály. Norma [11] pro standard DVB-T definuje generující polynomy $G_1 = 171_{\text{OCT}}$ a $G_2 = 133_{\text{OCT}}$. Délka působení kódu je dána vztahem:

$$K = (S + 1) \cdot m \quad [-]. \quad (3.3)$$

Po provedení matematických operací jsou signály na n výstupech sestaveny opět do jednoho sériového bitového toku.



Obr. 3.11: Konvoluční kodér systému DVB-T/H

Konvoluční kód používaný v digitální televizi je zúžený, protože konvoluční kódování značně zvyšuje bitovou rychlost přidáváním až 50% redundance při kódovém poměru $CR = 1/2$. Ke snížení rychlosti dochází „vytečkováním“ konvolučního kódu tím, že se ve skupině bitů některé vynechají, např. každý třetí, čímž se původní kódový poměr $CR = 1/2$ změní na $CR = 3/4$.

Pro dekódování konvolučních kódů se nejčastěji používá Viterbiho algoritmus nebo algoritmus sekvenčního dekódování.

3.3.4 Vnitřní prokladač

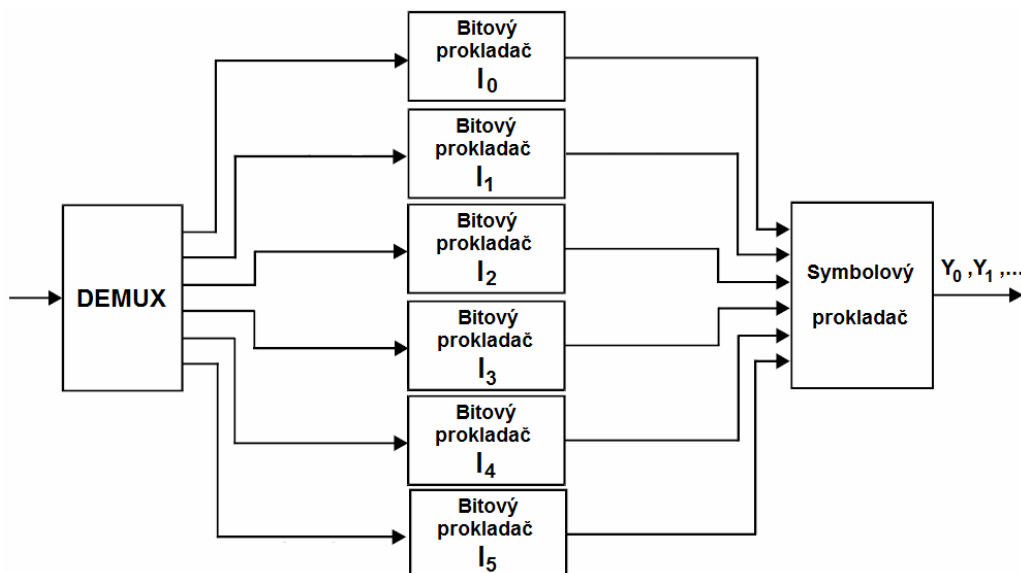
V systému DVB-T/H je vnitřní prokládací stupeň tvořen bitovým prokladačem následovaný symbolovým prokladačem.

Sériový bitový tok je v nehierarchickém režimu demultiplexací rozdělen do v_h podtoků v závislosti na typu použité modulace. Pro modulaci QPSK odpovídá počet podtoků $v_h = 2$, modulaci 16-QAM odpovídá $v_h = 4$ a modulaci 64-QAM $v_h = 6$ na obr. 3.12. Na jednotlivé podtoky je aplikován samostatný bitový prokladač ($I_0 - I_5$) s konstantní velikostí bloku 126 bitů a se specifickou permutační funkcí $H(w)$, viz tab. 3.1 dle normy [11], kde w odpovídá pořadí bitů v dané větvi ($w = 0, 1, 2, \dots, 125$), mod představuje funkci modulo, tedy zbytek po celočíselném dělení.

Tab. 3.1: Permutační funkce $H(w)$ pro jednotlivé bitové prokladače

prokladač I_i	permutační funkce $H_i(w)$
I_0	w
I_1	$(w + 63) \bmod 126$
I_2	$(w + 105) \bmod 126$
I_3	$(w + 42) \bmod 126$
I_4	$(w + 21) \bmod 126$
I_5	$(w + 84) \bmod 126$

Všechny v podtoky dohromady tvoří v -bitové datové slovo, za jednu periodu bitových prokladačů tak vznikne celkem 126 datových slov. V závislosti na zvoleném módu OFDM režimu se prokládání opakuje přesně 12x pro mód 2k, 24x pro mód 4k a 48x pro mód 8k.

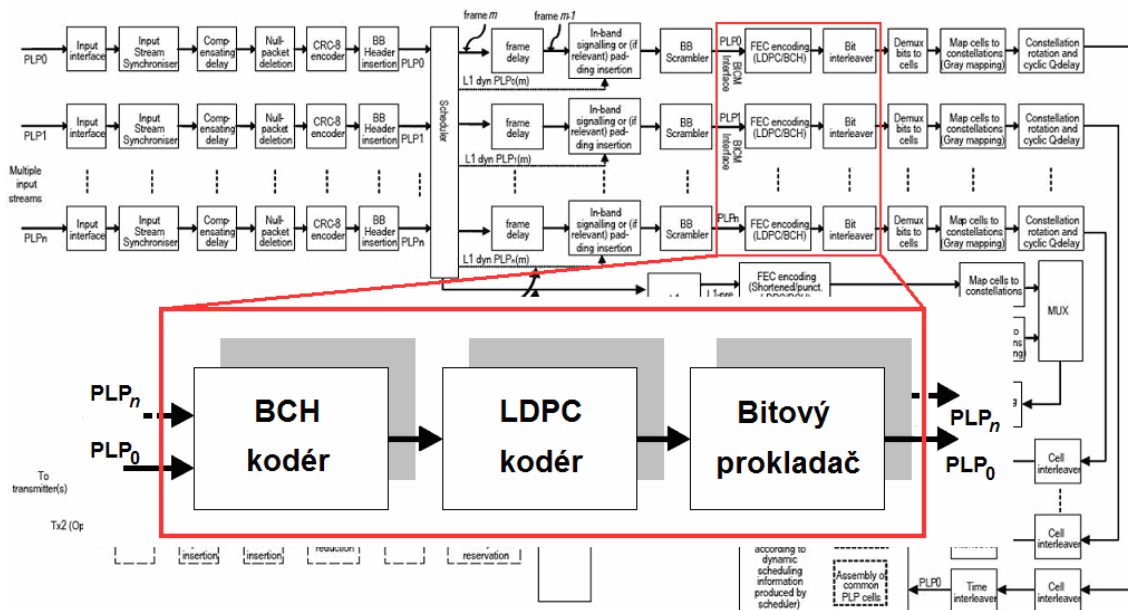


Obr. 3.12: Vnitřní prokládání systému DVB-T/H pro modulaci 64-QAM, nehierarchický režim

Symbolový prokladač záměrně mění pořadí datových slov pomocí permutační funkce $H(q)$ definované v [11], čímž vznikne výsledný vektor Y obsahující 1512 (mód 2k), 3024 (mód 4k) resp. 6048 (mód 8k) v -bitových datových slov určených pro mapování na jednotlivé nosné OFDM režimu.

3.4 Kanálové zabezpečení FEC_{T2} standardu DVB-T2

Ochrana jednotlivých PLP_{*n*} datových toků standardu DVB-T2 využívá pro každou PLP princip tzv. „dopředné“ chybové ochrany FEC_{T2}. Využívá několikanásobného kanálového kódování a prokládání skládajícího se z „vnější ochrany“ realizované BCH kóděrem, vnitřní zabezpečení tvoří LDPC kóděer společně s bitovým prokladačem viz obr. 3.13.

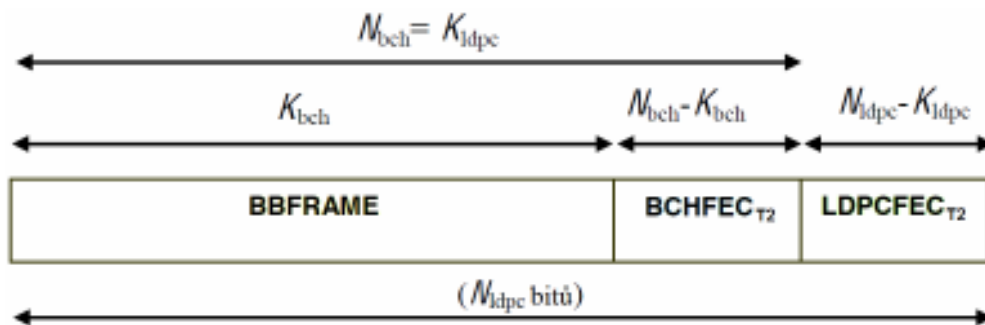
Obr. 3.13: Kanálové zabezpečení FEC_{T2} standardu DVB-T2

Hodnota informačních bitů nezabezpečené zprávy K_{bch} je závislá na kódovém poměru LDPC kódu. K_{bch} je určeno celočíselným násobkem zdrojových datových toků PES (*Packetized Elementary Stream*) velikosti 188B a doplněním nulových bitů do požadovaných velikostí, viz tab. 3.2.

Tab. 3.2: Kódové parametry zabezpečení pro normální FEC_{T2} rámeček standardu DVB-T2

LDPC kód	K_{bch}	$N_{\text{bch}} = K_{\text{ldpc}}$	BCH oprava t chyb	$N_{\text{bch}} - K_{\text{bch}}$	$N_{\text{ldpc}} - N_{\text{bch}}$	N_{ldpc}
[-]	[bit]	[bit]	[bit]	[bit]	[bit]	[bit]
1/2	32 208	32 400	12	192	32 400	64 800
3/5	38 688	38 880	12	192	25 920	64 800
2/3	43 040	43 200	10	160	21 600	64 800
3/4	48 408	48 600	12	192	16 200	64 800
4/5	51 648	51 840	12	192	12 960	64 800
5/6	53 840	54 000	10	160	10 800	64 800

Popis jednotlivých fází zabezpečení FEC_{T2} je na obr. 3.14, kde K_{bch} jsou informační bity nezabezpečené zprávy, $N_{\text{bch}} = K_{\text{ldpc}}$ jsou bity zabezpečené BCH kódem a zároveň představují nezabezpečenou zprávu pro LDPC kód. Hodnota $N_{\text{bch}} - K_{\text{bch}}$ určuje počet redundantních zabezpečovacích bitů BCH kódu. Hodnota $N_{\text{ldpc}} - N_{\text{bch}}$ je počet redundantních zabezpečovacích bitů LDPC kódu a společně s konečnou hodnotou zabezpečené zprávy N_{ldpc} FEC_{T2} kódování určuje velikost paritní matice H , podrobněji v kap. 3.4.2.

Obr. 3.14: Formát dat FEC_{T2} zabezpečení před bitovým prokládáním

3. 4. 1 BCH kód (*Bose Chaudhuri Hocquengham Code*)

Patří do skupiny systematických lineárních blokových cyklických kódů (binárních i nebinárních).

Binární BCH kód (n, k) umožňující opravu t chyb, existuje pro každé celé číslo $m \geq 3$, a je definován mimo jiné:

$$\square \text{ maximální délkou kódového slova} \quad n = 2^m - 1, \quad (3.4)$$

$$\square \text{ počtem informačních bitů v kódovém slově} \quad k \geq n - mt, \quad (3.5)$$

$$\square \text{ počtem paměťových buněk} \quad r = n - k. \quad (3.6)$$

Pro vytvoření generujícího mnohočlenu BCH kódu délky $n = 2^m - 1$ schopného opravit t chyb se nejdříve vybere primitivní mnohočlen řádu m . Primitivní mnohočlen je nerozložitelný mnohočlen stupně m v prostoru konečného Galoisova pole $GF(q)$ prvků, který dělí mnohočlen $x^n - 1$ beze zbytku. Dle normy [9] standardu DVB-T2 je $GF(q)$ určeno $q = 2^m$, kde $m = 16$ pro normální nezkrácený FEC_{T2} rámec ($N_{LDPC} = 64800$). Následně jsou nalezeny minimální nerozložitelné mnohočleny $g_i(x)$, jejichž kořeny tvoří $2t$ po sobě jdoucích mocnin primitivního prvku α Galoisova tělesa $GF(2^m)$. Generující polynom $g(x)$, umožňující opravit t chyb, je vytvořen dle rovnice 3.7 nejmenším společným násobkem LCM (*Least Common Multiple*) prvních $g_i(x)$ mnohočlenů. Minimální nerozložitelné mnohočleny $g_i(x)$ dle normy [9] jsou v tab. 3.3. [30]

$$g(x) = \text{LCM}\{g_1(x), g_2(x), \dots, g_{2t}(x)\}. \quad (3.7)$$

Tab. 3.3: Minimální nerozložitelné mnohočleny $g_i(x)$ nad $GF(2^{16})$ normálního FEC_{T2} rámce

mnohočleny $g_i(x)$	
$g_1(x)$	$1+x^2+x^3+x^5+x^{16}$
$g_2(x)$	$1+x+x^4+x^5+x^6+x^8+x^{16}$
$g_3(x)$	$1+x^2+x^3+x^4+x^5+x^7+x^8+x^9+x^{10}+x^{11}+x^{16}$
$g_4(x)$	$1+x^2+x^4+x^6+x^9+x^{11}+x^{12}+x^{14}+x^{16}$
$g_5(x)$	$1+x+x^2+x^3+x^5+x^8+x^9+x^{10}+x^{11}+x^{12}+x^{16}$
$g_6(x)$	$1+x^2+x^4+x^5+x^7+x^8+x^9+x^{10}+x^{12}+x^{13}+x^{14}+x^{15}+x^{16}$
$g_7(x)$	$1+x^2+x^5+x^6+x^8+x^9+x^{10}+x^{11}+x^{13}+x^{15}+x^{16}$

mnohočleny $g_i(x)$	
$g_8(x)$	$1+x+x^2+x^5+x^6+x^8+x^9+x^{12}+x^{13}+x^{14}+x^{16}$
$g_9(x)$	$1+x^5+x^7+x^9+x^{10}+x^{11}+x^{16}$
$g_{10}(x)$	$1+x+x^2+x^5+x^7+x^8+x^{10}+x^{12}+x^{13}+x^{14}+x^{16}$
$g_{11}(x)$	$1+x^2+x^3+x^5+x^9+x^{11}+x^{12}+x^{13}+x^{16}$
$g_{12}(x)$	$1+x+x^5+x^6+x^7+x^9+x^{11}+x^{12}+x^{16}$

Kódování BCH kódem znamená vynásobit k informačních bitů nezabezpečené zprávy $m(x)$ členem $x^{(N-K)}$, tento mnohočlen je následně vydělen generujícím polynomem kódu $g(x)$, čímž se získá mnohočlen zbytku $r(x)$, matematicky vyjádřeno rov. 3.8 a po úpravě rov. 3.9. Mnohočlen zbytku $r(x)$ je přičten k součinu $m(x) \cdot x^{(N-K)}$ s výsledným ziskem zabezpečené zprávy $c(x)$, viz rov. 3.10. Pokud během přenosu nedojde vlivem rušení k chybám, $r(x) = r'(x)$, lze zabezpečenou zprávu vyjádřit vztahem 3.11. [22]

$$\frac{m(x) \cdot x^{(N-K)}}{g(x)} = q(x) + \frac{r(x)}{g(x)}, \quad (3.8)$$

$$m(x) \cdot x^{(N-K)} = q(x) \cdot g(x) + r(x), \quad (3.9)$$

$$c(x) = m(x) \cdot x^{(N-K)} + r(x) = q(x) \cdot g(x) + r(x), \quad (3.10)$$

$$c(x) = q(x) \cdot g(x), \quad (3.11)$$

kde: $m(x)$ - informační bity nezabezpečené zprávy,

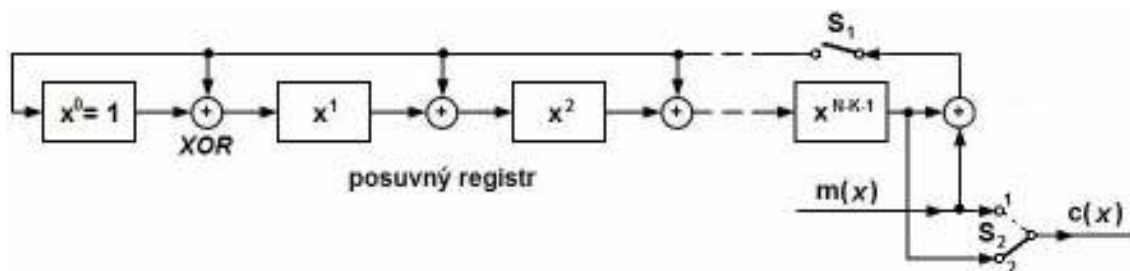
$g(x)$ - generující polynom kódu,

$q(x)$ - mnohočlen podílu,

$r(x)$ - mnohočlen zbytku,

$c(x)$ - bity zabezpečené zprávy.

Realizace kodéru je poměrně jednoduchá, avšak realizace dekodéru je složitější a vyžaduje implementaci několika matematických postupů. Kodér vychází ze zapojení pomocí kruhového posuvného registru, principiálně viz obr. 3.15, se zpětnými vazbami a zapojenými sčítačkami modulo 2 (XOR) podle generujícího polynomu kódu. Počet paměťových buněk, které jsou potřeba pro realizaci kodéru, získáme podle vztahu 3.6.



Obr. 3.15: Zpětnovazebný posuvný kruhový registr BCH kodéru

Do BCH kodéru vstupuje k informačních bitů nezabezpečené zprávy $m(x)$. Přepínač S_2 je v poloze 1, informační bity vycházejí z kodéru v nezměněné podobě a současně se díky sepnutému spínači S_1 dostávají do posuvných registrů. Tento proces trvá od 1 do k cyklů, v cyklech od $k+1$ do n je posuvný registr vyprazdňován a všechna data jsou přenášena na výstup kodéru. Spínač S_1 je rozepnut a přepínač S_2 je v poloze 2. Celkový počet posunutí v posuvných registrech je n . Po provedení celého procesu je na výstupu kodéru kódové slovo $c(x)$ (zabezpečená zpráva) a děj se opakuje s další bitovou posloupností. [22]

Proces dekódování BCH kódu je oproti kódování složitější a výpočetně náročnější. Účelem dekódování je opět získat z „pozměněné“ přijaté zprávy vlivem rušení zprávu shodnou s vyslanou za předpokladu, že nebyla překročena zabezpečovací schopnost kódu. Dekodéry se mohou lišit v metodě stanovení chybového mnohočlenu – lokátoru chyb, pomocí např. Berlekampova Masseyova algoritmu. Metody pro kontrolu správnosti a opravení chyb jsou stejné. Proces dekódování se obecně skládá z kontroly správnosti přijatého kódového slova (získání syndromových rovnic), určení chybového mnohočlenu (lokátoru chyb), nalezení kořenů chybového mnohočlenu a opravení chyb [22]. Podrobnější informace lze nalézt v [32].

3. 4. 2 LDPC kód (*Low Density Parity Check Code*)

Patří do skupiny korekčních lineárních blokových kódů. Je označován jako kód s nízkou hustotou kontroly parity a vyznačuje se velmi vysokou efektivitou.

LDPC kódy jsou, na rozdíl od jiných druhů kódů, vybaveny velmi rychlými kódovacími a dekódovacími algoritmy, které umožňují dosahovat a realizovat přenosové rychlosti velmi blízké maximálnímu využití přenosového komunikačního kanálu. To však pouze za předpokladu zpracování bloků velké délky, řádově desetitisíce až statisíce bitů, přičemž s velikostí bloků vzrůstá složitost a náročnost kódování.

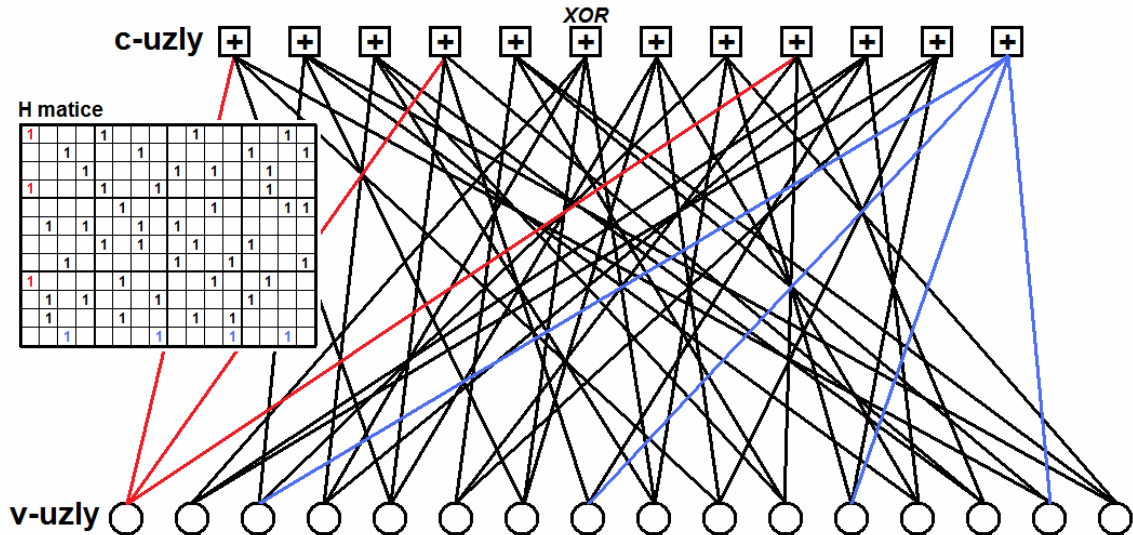
Pro kódování používá „řádkou“ paritní matici H , která má malý počet jedniček a její velikost je $H(N,K)$, kde N je počet sloupců bitů zabezpečených dat LDPC kódem a K je počet řádků redundantních bitů závislý na rozdílu LDPC a BCH rámce (N, K řádově tisíce), viz tab. 3.2. Při návrhu paritní matice nesmí vznikat jednoduché smyčky (čtverec, obdélník) => snižují efektivitu kódu a počet jedniček v každém řádku a sloupci ≥ 3 . Pro každý kódový poměr LDPC kódu existuje tabulka s koeficienty této matice, kterou jsou násobeny vstupní nezabezpečené informační bity.

Ke každé paritní matici H lze definovat odpovídající Tannerův graf, principiální na obr. 3.16, kde počet c -uzlů je K a počet v -uzlů je N . Hodnota 1 v matici H odpovídá propojení odpovídajícího c -uzlu s v -uzlem. Přenášena bitová posloupnost je znázorněna v -uzly, c -uzly znázorňují kontrolní uzly a musí v nich platit parita (počet „1“ vstupujících do uzlu musí být sudý). Kódování se provádí po blocích o velikosti K , pro výstupní posloupnost platí:

$$y_p = (x_p \cdot H) \bmod 2, \quad (3.12)$$

kde: $y_p = \{y_1, y_2, \dots, y_N\}$ - výstupní posloupnost,

$x_p = \{x_1, x_2, \dots, x_K\}$ - vstupní posloupnost.

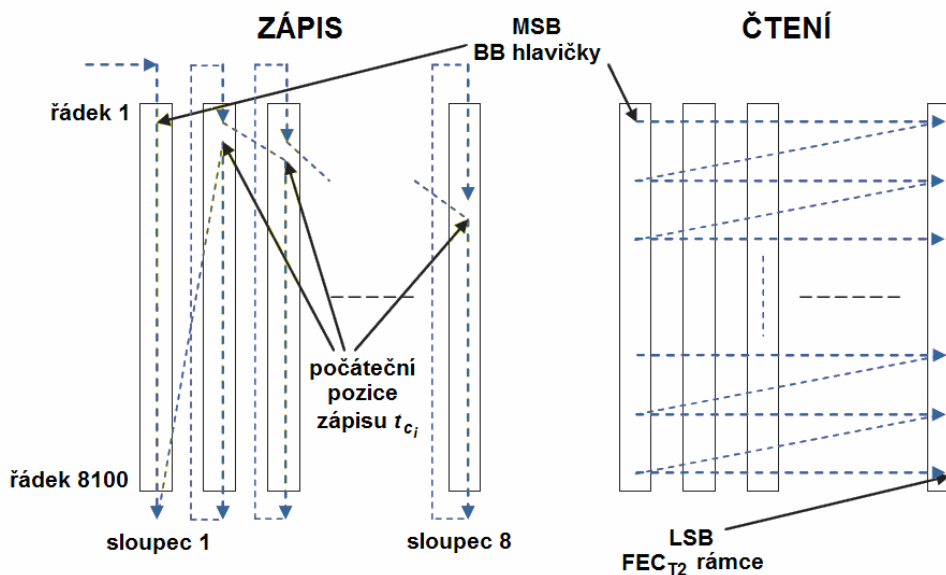


Obr. 3.16: Tannerův graf

Dekódování je založeno na výměně zpráv mezi v-uzly a c-uzly, které si předávají očekávané hodnoty posloupnosti. V-uzly předají odpovídajícím c-uzlům své očekávané hodnoty, c-uzly provedou paritní kontrolu a podle výsledku předají informaci o očekávané hodnotě v-uzlu. V-uzly podle zpráv c-uzlu upraví své hodnoty a celý proces se opakuje do doby, než je paritní kontrola v pořádku a c-uzly informují v-uzly, že očekávají stejnou hodnotu. Dekódování je tedy náročné, protože se využívá iterační metody. Kvalita dekodování značně závisí na času, jaký mu bude věnován. U bezchybného přenosu je dekodování jednoduché, ale při zvýšené chybovosti je nutné počet iterací dekodéru zvyšovat, čím více chyb, tím více iterací je potřeba a tím větší výpočetní výkon. [37]

3. 4. 3 Bitový prokladač

Zabezpečená posloupnost bitů N_{ldpc} FEC_{T2} kódování je postupně sériově zapisována do sloupců bitového prokladače a následně sériově vyčítána po řádcích, jak je naznačeno na obr. 3.17, kde počáteční hodnota (pozice) zápisu t_{ci} je pro každý sloupec různě definována, viz tab. 3.4 dle normy [8].


 Obr. 3.17: Princip bitového prokládání normálního FEC_{T2} rámce pro modulaci 16-QAM [8]

Jednotlivé vstupní bity b pro $0 \leq b \leq N_{\text{ldpc}}$ jsou zapisovány do sloupců N_c a řádků N_r dle výrazů:

$$N_c = b / N_r, \quad (3.13)$$

$$N_r = (b + t_{c_i}) \bmod N_r. \quad (3.14)$$

Výstupní bity j pro $0 \leq j \leq N_{\text{ldpc}}$ jsou vyčítány z řádků N_r a sloupců N_c dle výrazů:

$$N_r = j / N_c, \quad (3.15)$$

$$N_c = j \bmod N_r, \quad (3.16)$$

kde mod představuje funkci modulo, tedy zbytek po celočíselném dělení. Počet sloupců N_c a řádků N_r bitového prokládání je proměnný, závislý na použitém typu modulace, dle normy [8] viz tab. 3.4.

 Tab. 3.4: Struktura bitového prokladače pro jednotlivé typy modulace, normální FEC_{T2} rámec [8]

Modulace	N_r	N_c	t_{c_i}															
	$N_{\text{ldpc}} = 64800$		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
16-QAM	8100	8	0	0	2	4	4	5	7	7	-	-	-	-	-	-	-	-
64-QAM	5400	12	0	0	2	2	3	4	4	5	5	7	8	9	-	-	-	-
256-QAM	4050	16	0	2	2	2	2	3	7	15	16	20	22	22	27	27	28	32

4 MODULACE V DVB

Modulace je proces, při kterém dochází k ovlivňování některého parametru nosného signálu v závislosti na okamžité hodnotě modulačního signálu. U digitálních televizních systémů je modulačním signálem digitální signál, který může nabývat pouze dvou různých hodnot, a to log. 1 a log. 0. Proto se podle okamžité hodnoty digitálního modulačního signálu mění parametry nosné vlny skokem, uvedený modulační proces se nazývá digitální modulace. Modulační metody používané v DVB jsou kvadrurní fázové klíčování QPSK a vícecestavová kvadrurní amplitudová modulace M -QAM s modulačním principem ortogonálně frekvenčně děleného multiplexu OFDM, který patří mezi modulace typu MCM (*Multi Carrier Modulation*), tedy modulace s více nosnými kmitočty, jež je využita v systémech DVB-T/H/T2. [34]

4.1 Modulační princip standardu DVB-T/H

Vnitřní prokládací stupeň, resp. vnitřní symbolový prokladač záměrně mění pořadí datových slov pomocí permutační funkce $H(q)$ definované v [11], čímž vznikne výsledný vektor Y obsahující 1512 (mód 2k), 3024 (mód 4k) resp. 6048 (mód 8k) v -bitových datových slov určených pro mapování na jednotlivé nosné OFDM režimu.

Výsledkem mapování jsou dvě tabulky s reálnou $\text{Re}(f)$ a imaginární $\text{Im}(f)$ částí signálu, které navíc obsahují „mezery“ pro doplnění dalších nosných, pilotních a TPS, které jsou vloženy v bloku adaptace rámce, viz obr. 4.1. Kompletní tabulky jsou vedeny do bloku IFFT (*Inverse Fast Fourier Transform*). [25]

Následně je signál OFDM dostupný odděleně v reálné a imaginární části signálu, a to v časové oblasti. Celkem 1705, 3409 nebo 6817 subnosných je poté dočasně uloženo ve dvou posuvných registrech, pracujících způsobem zřetězení (*pipeline*). Střídavě je do nich zapisováno, čteno a tímto známým způsobem je generován ochranný interval, viz obr. 4.4. [25]

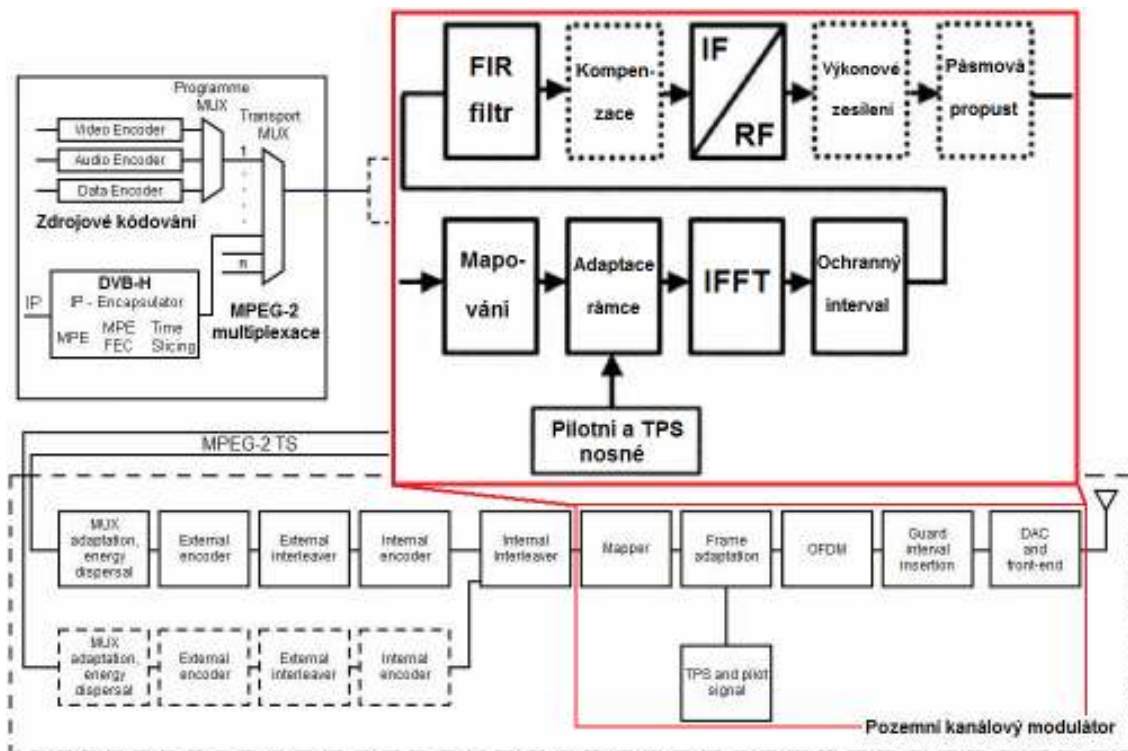
Signál je následně číslicově filtrován a tak jsou vytvořeny I/Q signály, které mají upravené potlačení ramen.

Ve výkonovém vysílači je signál nejdříve upraven pro kompenzaci nelinearity koncových stupňů. Ve stejnou chvíli je ořezán tak, aby DVB-T/H signál respektoval požadovaný crest faktor (ochrana proti velkým a malým úrovním amplitudy).

Pokud je D/A převodník umístěn až za I/Q modulátorem, je třeba konvertovat nízké mezifrekvenční pásmo IF (*Intermediate Frequency*) na požadované výstupní radiofrekvenční pásmo RF (*Radio Frequency*). [25]

Pozice I/Q modulátoru závisí na implementaci modulátoru DVB-T. Signál je buď D/A konvertován odděleně pro I a Q složku na I/Q úrovně a poté přiveden do analogového IQ modulátoru, který umožňuje přímou modulaci na požadovaný RF

kanál. Naopak, při aplikaci digitálního IQ modulátoru je signál nejprve modulován a poté následuje D/A převod. Tento způsob však vyžaduje dodatečnou konverzi IF pásma do požadovaného RF kanálu. [25]



Obr. 4.1: Modulační princip standardu DVB-T/H

4. 1. 1 OFDM modulace

OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplex*) modulace s více nosnými, až s tisíci subnosnými vzájemně ortogonálními mezi sebou. V kombinaci s ochranným proti-chybovým kódováním FEC v základním pásmu se označuje jako COFDM (*Coded OFDM*). V módu 2k využívá až 1705 nosných kmitočtů, v módu 4k až 3409 a v módu 8k až 6817 nosných kmitočtů v jednom přenosovém kanále. Jedná se o úzkopásmové nosné kmitočty jednoho širokopásmového nosného kmitočtu. Ve spojení s tzv. ochranným intervalem (*guard interval*) se vyznačuje vysokou odolností proti mezi-symbolovým interferencím ISI (*InterSymbol Interference*), které ohrožují terestrické vysílání digitálních signálů s ohledem na vliv odrazů (mnohanásobný příjem) od různých překážek na zemském povrchu. [25]

Odražené signály mají v místě příjmu různá časová zpoždění i amplitudy, prodloužením bitové periody T_b na hodnotu $n \cdot k \cdot T_b$ lze zvýšit pravděpodobnost, že silné odražené signály s malou dobou zpoždění (desetiny μs) neovlivní sousední bity datového toku. Prodloužení bitové periody je možno uskutečnit převedením sériového bitového toku pomocí mapování na skupiny (symboly) po n paralelních bitech, vhodných

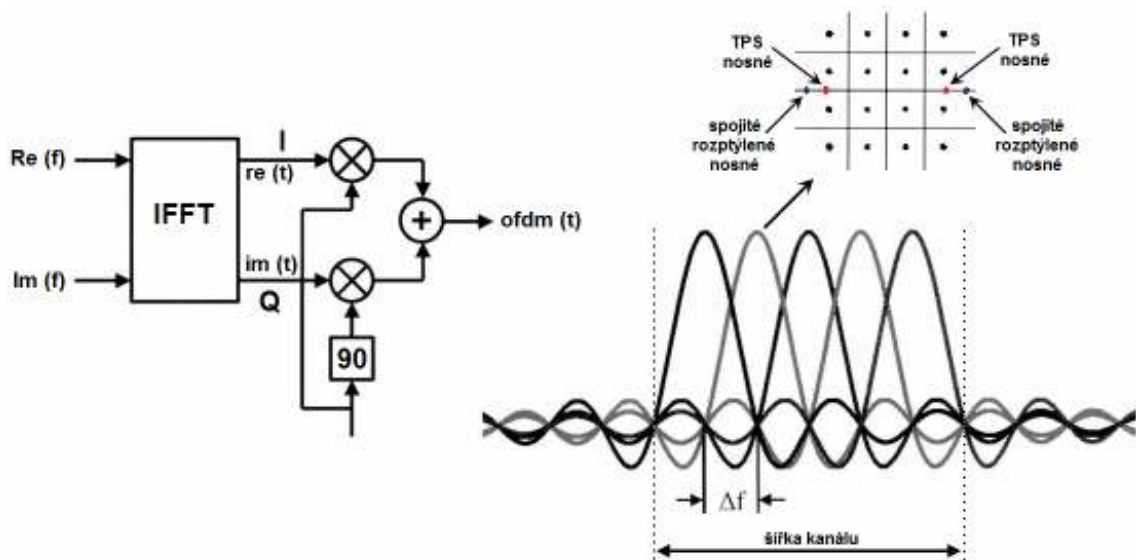
pro modulaci QPSK nebo M -QAM. Pomocí demultiplexeru se rozdělují n -bitové symboly do k paralelních větví, doba trvání symbolu T_s se prodlouží k krát, resp. $n.k.T_b$.

Frekvenční rozestup Δf maxim (minim) jednotlivých subnosných vln, viz obr. 4.2, je roven $\Delta f = 1/\Delta T_s$, tedy celočíselnému násobku převrácené hodnoty doby trvání symbolu = podmínka ortogonality. [25]

V průběhu přenosu může být v přenosovém kanále informace přenášena kontinuálně nebo v časových intervalech (*time slot*), odpovídá standardu DVB-H, kdy je možné přenášet různá data v různých časových slotech z různých zdrojů. [25]

4.1.1.1 Generování OFDM symbolů

Každá subnosná vyžaduje mapování symbolů podle typu modulace (QPSK, M -QAM) a je modulována nezávisle na ostatních. Všechny modulační procesy jsou synchronizovány s ostatními, vždy je generován symbol s délkou $\Delta t_s = 1/\Delta f$. Reálně jsou OFDM symboly generovány násobným mapováním, ve kterém jsou generovány dvě tabulky, reálná a imaginární část, následovány IFFT (*Inverse Fast Fourier Transform*), viz obr. 4.2. [25]



Obr. 4.2: OFDM modulátor, ortogonalita OFDM ve spektrální oblasti [18]

OFDM modulátor se sestává z IFFT bloku následovaného komplexním směšovačem (I/Q modulátorem), do kterého jsou postupně sériově přivedeny reálné a imaginární symboly. Po IFFT pracuje směšovač opět v časové oblasti.

Po I/Q modulaci je generován amplitudově modulovaný signál s potlačenou nosnou. Každá subnosná $im(t)$ je přesně posunuta o 90° od $re(t)$ a má stejnou amplitudu, díky čemuž horní kmitočtové pásmo OFDM nezpůsobuje žádný přeslech do spodního kmitočtového pásma. [25]

4. 1. 1. 2 Uspořádání přenosového rámce

V případě specifikace terestrického přenosu OFDM signálů je sdruženo 68 symbolů, které vytvářejí tzv. superrámec. Celkem 1705, 3409 nebo 6817 subnosných OFDM signálu je skládáno vedle sebe v horizontálním směru, viz obr. 4.3. Podélná osa odpovídá kmitočtu. Posloupnost symbolů je znázorněna ve vertikálním směru. Mimo aktivních nosných (*payload*) s konstantní frekvenční pozicí, které jsou modulovány užitečnými daty včetně protichybového zabezpečení, jsou znázorněny i ostatní pilotní nosné, které slouží pro synchronizaci (spojité a rozptýlené nosné) a přenos doplňkových informací (TPS nosné). [25]

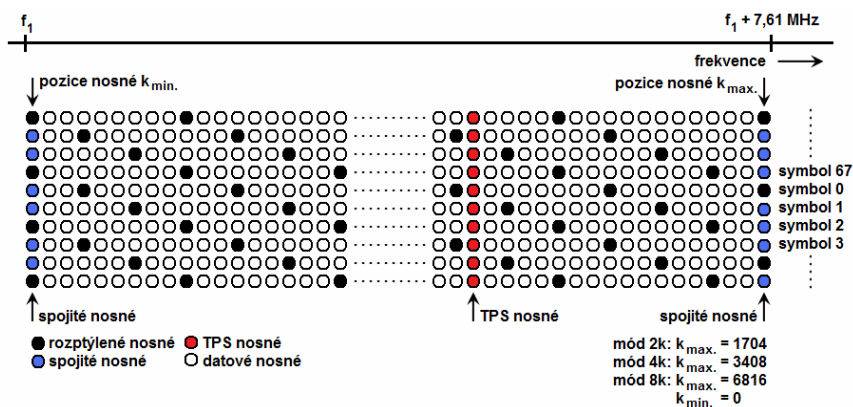
Spojité nosné (*continual*) s konstantní frekvenční pozicí, umístěné na reálné ose I (*in-phase*) buď na 0° nebo 180° , s definovaným zesílením amplitudy o 3dB vůči průměrné hodnotě. Jsou používány jako referenční pro řízení AFC.

Rozptýlené nosné (*scattered*) s proměnnou frekvenční pozicí jsou rozptýleny přes celé spektrum. Každá 12. rozptýlená nosná skáče o 3 pozice v obou složkách I, Q a slouží pro odhad stavu přenosového kanálu. [25]

TPS (*Transmission Parameters Signalling*) nosné nesou informaci pro přijímač, jež obsahuje použitý mód, typ vnitřní modulace, délku ochranného intervalu GI, kódový poměr *CR* a stav použití hierarchického kódování. Jsou umístěny na konstantních frekvenčních pozicích na ose I na pozici 0° nebo 180° a DBPSK (*Differential Binary Phase Shift Keying*) modulovány. Kompletní TPS informace jsou uloženy v 68 symbolech = jeden rámec a skládají se z 68 bitů. Prvních 17 z 68 TPS bitů je určeno pro inicializaci a synchronizaci, 14 bitů představuje protichybové zabezpečení, 23 bitů se využívá v současnosti a dalších 14 bitů je rezervováno pro budoucí aplikace. [25]

DVB-H využívá navíc rezervované dva bity 48 a 49. Nastavení bitu 48 na „1“ signalizuje, že alespoň jeden elementární tok ES (*Elementary Stream*) je časově segmentován. Nastavení 49. bitu na „1“ signalizuje, že alespoň jeden ES je kódován s protichybovým zabezpečením MPE-FEC. [25]

Neaktivní nosné s konstantní pozicí jsou nastaveny na nuly, nenesou modulaci a mají nulové amplitudy. Jejich frekvenční pozice je na horním a dolním okraji pásma.



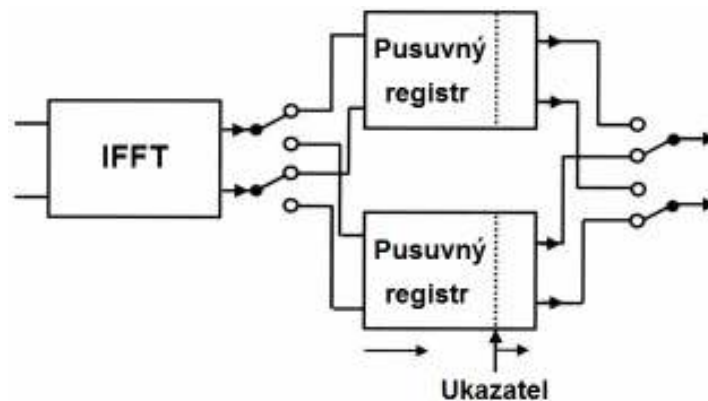
Obr. 4.3: Přenosový rámec signálu COFDM [18]

4. 1. 2 Ochranný interval GI

Ochranný interval GI (*Guard Interval*) je doba, v níž se nepřenáší užitečný signál a který zabraňuje rušivému vlivu zpožděných signálů.

Perioda za periodou má OFDM symbol konstantní generovanou délkou $\Delta t_s = 1/\Delta f$. Mezi symboly je udržován ochranný interval s nastavitelnou délkou, která musí být delší než nejdelší čas zpožděného signálu v přenosovém systému. Na konci ochranného intervalu musí všechna přenosová zkreslení zaniknout, jinak dochází k ISI. [25]

GI není nastaven pouze na nulové symboly, ale obsahuje konec následujícího symbolu, díky němuž lze ochranný interval poměrně jednoduše nalézt pomocí autokorelační funkce v přijímači, kdy začátek a konec symbolu je obtížně detekovatelný v případě mnohacestného šíření. Generování ochranného intervalu ukazuje obr. 4.4. [25]



Obr. 4.4: Generování ochranného intervalu [18]

4. 2 Modulační princip standardu DVB-T2

Sériový bitový tok jednotlivých PLP_n je pomocí demultiplexeru rozdělen do paralelních v -bitových datových slov, dle použitého typu modulace (QPSK, M -QAM), které jsou po následném mapování modulovány technikou spočívající v natočení konstelačních bodů s cyklickým Q -zpožděním imaginární části signálu o jedno datové slovo (symbol). Úhel natočení Φ jednotlivých konstelačních bodů I/Q diagramu je závislý na typu modulace, viz tab. 4.1.

Symbolový prokladač záměrně mění pořadí datových slov pomocí pseudo-náhodné permutační funkce, čímž se nezachová korelace distribuce přenosového kanálu a interferenčních zkreslení.

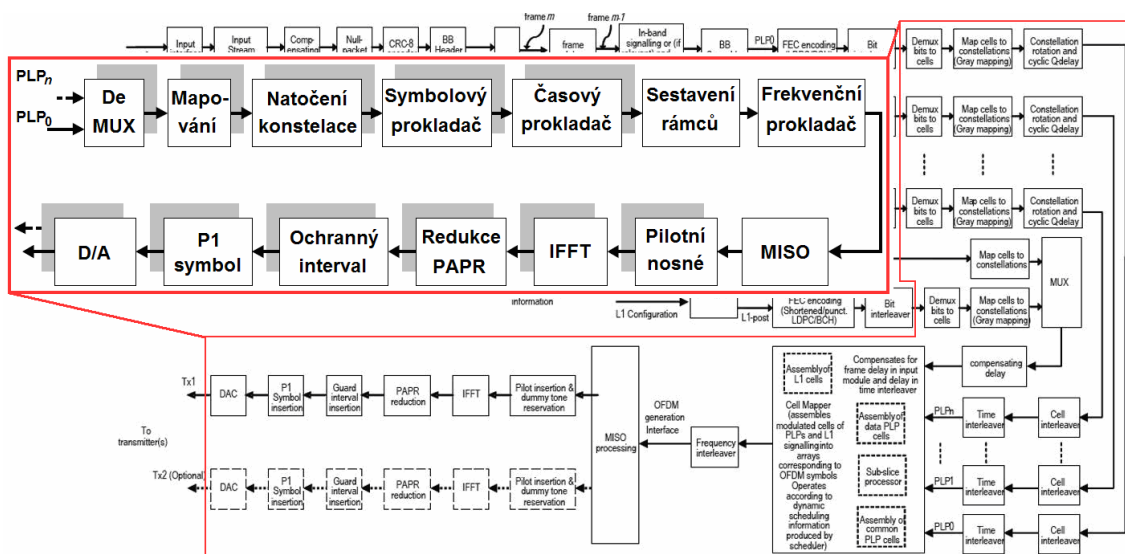
Prokládání v čase může být různé pro různé PLP_n . Princip prokládání je analogický s bitovým prokladačem, kdy jsou jednotlivé symboly postupně sériově zapisovány do sloupců a následně sériově vyčítány po řádcích, jak je naznačeno na obr.

3.17 s tím rozdílem, že zápis do sloupců je kontinuální bez jakékoli počáteční hodnoty. Účelem časového prokládání je rozprostřít symboly s ohledem na různě časově „proměnný“ přenosový kanál a impulsní rušení. Časově proložené symboly jednotlivých PLP_n jsou sestaveny do rámců, jejichž součástí jsou údaje o parametrech vysílání.

Frekvenční blokovaný prokladač působí na jednotlivé rámce PLP_n , vzájemně je mísí a slučuje v jeden datový tok PLP . Navíc využívá pseudonáhodných permutací na výstupu časového prokladače s cílem narušit strukturovanou povahu rámce tak, že po sobě jdoucí symboly budou vysílány na různých kmitočtech nosných a budou tak více odolné vůči skupinovým chybám v přenosovém kanále.

Zpracování datového toku PLP technologií MISO založené na Alamoutiho kódování představuje rozdělení PLP na dva datové toky PLP . Pilotní nosné, jejich umístění a počet je flexibilní oproti standardu DVB-T/H a jsou definovány v normě [8]. Mohou být použity pro synchronizaci rámce, frekvenční a časovou synchronizaci, k odhadu stavu přenosového kanálu apod. IFFT opět jako ve standardu DVB-T/H převádí OFDM signál z frekvenční oblasti do časové. Blok redukce PAPR (*Peak to Average Power Ratio*) řeší nevýhodu OFDM signálu, tedy velký poměr mezi špičkovou a střední hodnotou signálu. Na celkem 853 (mód 1k), 1705 (mód 2k), 3409 (mód 4k), 6817 (mód 8k), 13633 (mód 16k) a 27265 (mód 32k) subnosných je aplikován ochranný interval.

DVB-T2 vysílá na začátku fyzické vrstvy rámce symboly, které signalizují typ přenosu a základní přenosové parametry. Každý rámec DVB-T2 začíná symbolem P1, jenž signalizuje signál standardu DVB-T2. Umožňuje rychlejší synchronizaci a definuje režim přenosu SISO/MISO.



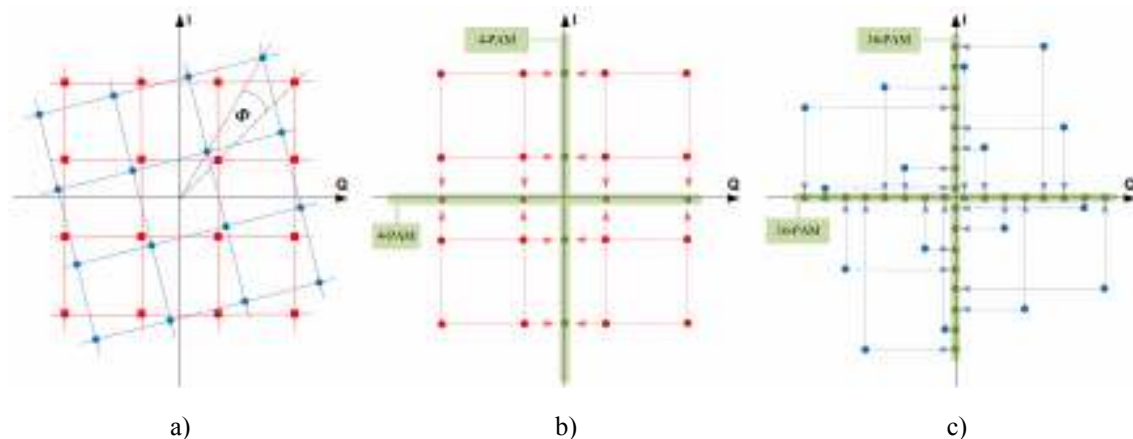
Obr. 4.5: Modulační princip standardu DVB-T2

4. 2. 1 Modulace s natočením konstelačních bodů

Technika modulace s natočením konstelačních bodů, resp. celého konstelačního diagramu v standardu DVB-T2 je zavedena pro zlepšení diverzity úniků přenosových kanálů. Cílem této metody je zlepšit účinnost demodulování v přijímači pro složitější druhy pozemního příjmu, jako jsou přenosný a mobilní pozemní příjem.

V modulaci s nepootočenými konstelačními body potřebuje přijímač k vyhodnocení přijatého digitálně modulovaného signálu obě složky konstelace I a Q, které ovšem postihují stejné úniky v případě šíření signálů pozemním přenosovým prostředím. [31]

V případě modulace s natočenou konstelací jednotlivých bodů o určitý pro různé modulace definovaný úhel Φ obsahuje každá I, Q složka dostatek informací o vysílaném symbolu. Obr. 4.6 porovnává a ukazuje konstelační diagram modulace 16-QAM bez a s natočením jednotlivých bodů konstelace. Např. pro pootočenou konstelaci M -QAM modulace odpovídá počet přenesených bodů na jednotlivé souřádné a kvadrantní ose počtu M , zatímco pro nepootočenou konstelaci M -QAM modulace odpovídá počet přenesených bodů na jednotlivé souřádné a kvadrantní ose počtu \sqrt{M} , viz obr. 4.6.



Obr. 4.6: Modulace 16-QAM: a) porovnání standardu DVB-T/H (červená) a DVB-T2 (modrá), b) a c) počet přenesených bodů na I, Q osách [31]

Po natočení konstelačních bodů je proces prokládání aplikován na zpožděnou o jedno datové slovo (symbol) imaginární část signálu (Q-složku) s cílem vysílat odděleně I a Q složky signálu na různých nosných a v různém čase. Potom pokud je jedna složka postižena v přenosovém kanále hlubokým selektivním únikem, může být druhá složka využita k získání informace. Cyklické zpoždění Q-složky musí být na straně přijímače odstraněno, to lze provést zpožděním I-složky symbolu. Díky procesu prokládání I a Q složky přenášených symbolů jsou případně tyto symboly ovlivněny nezávisle na únicích a výsledkem je zvýšení odolnosti přijímaného signálu pro šíření signálu přenosovým prostředím s hlubokými úniky. [31]

Zvýšení účinnosti demodulování při použití modulace s pootočenými konstelačními body je závislé na volbě úhlu Φ pootočení, optimální úhel Φ je závislý na zvoleném typu modulace a na přenosovém kanálu. Pro standard DVB-T2 byl vybrán pro konkrétní konstelaci úhel Φ , viz tab. 4.1, nezávislý na typu přenosového kanálu. Zvolené úhly Φ v tab. 4.1 jsou dobrým kompromisem pro všechny možné typy přenosových kanálů v DVB-T2. [31]

Tab. 4.1: Konkrétní úhly pootočení konstelačních bodů pro jednotlivé modulace

Modulace	Φ
	[°]
QPSK	29,0
16-QAM	16,8
64-QAM	8,6
256-QAM	atan (1/16)

5 PŘENOSOVÝ POZEMNÍ KANÁL

Pozemní přenosové prostředí je charakterizováno nízkým odstupem signálu od šumu S/N a je vystaveno mnoha interferenčním vlivům, kromě AWGN (*Additive White Gaussian Noise*) je to zejména vliv odrazů. Vícecestné šíření způsobuje značné problémy při příjmu, který je velmi závislý na okamžitém stavu odražených signálů, které jsou určeny zejména výkonovou ztrátou (útlumem), zpožděním a fázovým úhlem vzhledem k přímému šíření signálu LOS (*Line Of Sight*) v závislosti na přenosové cestě. Za účelem využití přijímače lze definovat různé druhy pozemních příjmů:

- pevný (*fixed*) příjem,
- přenosný (*portable*) příjem,
- mobilní (*mobile*) příjem,

kteří mají specifické vlastnosti a jsou přesně definovány standardy ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*) a normami DVB.

5.1 Dopplerův jev

Pokud je přijímač vzhledem k vysílači v pohybu s určitou rychlostí v , dojde vlivem Dopplerova jevu k posunu frekvence Δf_D definované vztahem:

$$\Delta f_D = v \cdot \frac{f_0}{\gamma} \cdot \cos(\varphi) \quad [\text{Hz}], \quad (5.1)$$

kde: v [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] - rychlost pohybu přijímače,
 f_0 [Hz] - nosná frekvence signálu,
 γ [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] - rychlost elektromagnetického vlnění,
 $\cos(\varphi)$ [°] - úhel, pod kterým je signál přijímán vzhledem ke směru přijímače.

Dopplerův posuv se odráží ve frekvenčním posuvu přijímaných OFDM nosných a ten je funkcí rychlosti a směru pohybu přijímače. Pokud je známá rychlost přijímače v a přenášená nosná frekvence f_0 , lze posuv frekvence Δf_D kompenzovat pomocí automatického doladování kmitočtu AFC (*Automatic Frequency Control*). [25]

5.2 Pevný pozemní příjem

Statická poloha přijímače je charakteristická pro pevný pozemní příjem s typickými parametry modulovaného signálu v režimu OFDM, mód 8k s modulací 64-QAM, hodnota kódového poměru $CR=2/3$ a délka ochranného intervalu $GI=1/4$ pro standard DVB-T/H.

Přenosová cesta se vyznačuje LOS signálem včetně odražených signálů bez Dopplerova posuvu definována přenosovými modely kanálů:

- Gaussův kanál,
- RC₂₀ kanál,
- RL₂₀ kanál.

5. 2. 1 Gaussův přenosový kanál

Vyznačuje se přímou viditelností přijímače na vysílač v systému DVB-T/H při vysílání signálu technologií SISO (*Single Input Single Output*), v systému DVB-T2 přímou viditelností přijímače na vysílače v důsledku použití vysílací technologie MISO (*Multiple Inputs Single Output*). Signály jsou přijímány pouze přímou cestou bez jakýchkoli odrazů. Přenosovým prostředím jsou pouze více či méně utlumeny a ovlivněny mírou bílého Gaussova šumu AWGN, který je generován zejména samotným přijímačem. Tento šum je charakterizován konstantní výkonovou hustotou v celém jeho spektru s pravděpodobností výskytu amplitud danou Gaussovým rozložením. Gaussův kanál zajišťuje přijímači nejlepší podmínky příjmu.

5. 2. 2 Model přenosového kanálu RC₂₀

Riceův přenosový kanál, rozšířen z Gaussova kanálu, bere vedle přímých cest signálu v úvahu vliv vícecestného šíření signálu. Statistika šíření vícecestného signálu je charakterizována Riceovou distribucí matematicky popsanou vztahem 5.2 pro standard DVB-T/H a vztahem 5.3 pro standard DVB-T2. Odrazy v případě DVB signálu způsobují nárůst mezisymbolových interferencí ISI (*InterSymbol Interference*), které způsobují nárůst bitové chybovosti BER (*Bit Error Ratio*). Tento nárůst bývá korigován např. zvýšením přenášeného výkonu. [25]

$$y(t) = \frac{\rho_0 \cdot x(t) + \sum_{i=1}^N \rho_i \cdot e^{-j \cdot 2\pi \cdot \theta_i} \cdot x(t - \tau_i)}{\sqrt{\sum_{i=0}^N \rho_i^2}}, \quad (5.2)$$

$$y(t) = \frac{\rho_{1,0} \cdot x_1(t) + \sum_{i=1}^N \rho_{1,i} \cdot e^{-j \cdot 2\pi \cdot \theta_{1,i}} \cdot x_1(t - \tau_{1,i}) + A \left[\rho_{2,0} \cdot x_2(t - \Delta_2) + \sum_{i=1}^N \rho_{2,i} \cdot e^{-j \cdot 2\pi \cdot \theta_{2,i}} \cdot x_2(t - \tau_{2,i} - \Delta_2) \right] \cdot e^{j \cdot 2\pi \cdot f_d \cdot t}}{\sqrt{\sum_{i=0}^N \rho_{1,i}^2 + A^2 \sum_{i=0}^N \rho_{2,i}^2}}, \quad (5.3)$$

kde: $y(t)$ - výstupní signál,
 $x_i(t)$ - vstupní signály,

$\rho_{i,0}.x_i(t)$	- zisk přímých cest signálů,
N	- počet odrazů,
θ_i	- fázový posuv i -té cesty,
ρ_i	- zisk i -té cesty,
τ_i	- relativní zpoždění i -té cesty,
Δ_2	- vzájemné zpoždění vysílačů,
f_{Δ}	- frekvenční offset mezi vysílači,
A	- vzájemný útlum vysílačů.

Výstupní signál modelu kanálu $y(t)$ je charakterizován jako funkce vstupních signálů $x_i(t)$ pomocí rovnice 5.2, resp. 5.3, kde jsou uvažovány vlivy jak přímých signálů, tak součet jednotlivých odrazů. Normy [8], [11] využívají k popisu a stanovení vlastností matematického modelu Riceova přenosového kanálu 20-ti odrazů, přičemž jednotlivé i -té odražené signály jsou definovány ziskem ρ_i [-], relativním časovým posunem τ_i [μ s] a fázovým úhlem θ_i [rad]. Norma [8] definuje hodnoty parametrů Δ_2, f_{Δ}, A .

Zisk přímých cest signálů je definován vztahem 5.4.

$$\rho_{i,0} = \sqrt{K_j \cdot \sum_{i=1}^N \rho_{j,i}^2}. \quad (5.4)$$

Riceův faktor K_j udává poměr výkonu signálů přímých cest k součtu výkonů signálů všech odražených cest a je vyjádřen vztahem 5.5. [8]

$$K_j = \frac{\rho_{j,0}^2}{\sum_{i=1}^N \rho_{j,i}^2}. \quad (5.5)$$

5. 2. 3 Model přenosového kanálu RL₂₀

Rayleighův přenosový kanál je odvozen z Riceova kanálu se změnou, kdy v důsledku narušení přímé viditelnosti mezi vysílačem a přijímačem je příjem možný pouze díky odrazům. Rozložení odrazů odpovídá Rayleighově distribuci matematicky popsanou pro standard DVB-T/H vztahem 5.6 a pro standard DVB-T2 vztahem 5.8. [25]

$$y(t) = k_T \sum_{i=1}^N \rho_i \cdot e^{-j \cdot 2\pi \cdot \theta_i} \cdot x(t - \tau_i), \quad (5.6)$$

$$k_T = \frac{1}{\sqrt{\sum_{i=1}^N \rho_i^2}}, \quad (5.7)$$

$$y(t) = k_{T_2} \sum_{i=1}^N \rho_{1,i} \cdot e^{-j \cdot 2\pi \cdot \theta_{1,i}} \cdot x_1(t - \tau_{1,i}) + A \cdot \sum_{i=1}^N \rho_{2,i} \cdot e^{-j \cdot 2\pi \cdot \theta_{2,i}} \cdot x_2(t - \tau_{2,i} - \Delta_2) \cdot e^{j \cdot 2\pi \cdot f_d \cdot t}, \quad (5.8)$$

$$k_{T_2} = \frac{1}{\sqrt{\sum_{i=1}^N \rho_{1,i}^2 + A^2 \sum_{i=1}^N \rho_{2,i}^2}}. \quad (5.9)$$

kde význam jednotlivých členů vztahů je totožný s definicí v kap. 5.2.2. Normy [8], [11] využívají k popisu a stanovení vlastností matematického modelu Rayleighova přenosového kanálu 20-ti odrazů, přičemž jednotlivé i -té odražené signály jsou definovány ziskem ρ_i [-], relativním časovým posunem τ_i [μ s] a fázovým úhlem θ_i [rad].

5.3 Přenosný pozemní příjem

Malá rychlost, řádově jednotky km/h, pohybu přijímače vůči vysílači je charakteristická pro přenosný pozemní příjem s typickými parametry modulovaného signálu v režimu OFDM, mód 4k s modulací 16-QAM, hodnota kódového poměru $CR=2/3$ a délka ochranného intervalu $GI=1/8$ pro standard DVB-T/H.

Přenosová cesta se vyznačuje zpravidla mnohacestným příjmem přímých i odražených signálů s Dopplerovým posunem definována přenosovými modely kanálů:

- PI₁₂ kanál,
- PO₁₂ kanál.

5.3.1 Model přenosového kanálu PI₁₂

Portable Indoor přenosový kanál přenosného pozemního příjmu je definován pro šíření signálu uvnitř budovy s rychlostí pohybu přijímače 3 km/h. Statistika šíření signálu je charakterizována Dopplerovým spektrem s Riceovou distribucí pro první cestu šíření signálu a Rayleighovou distribucí pro ostatní cesty. [28] popisuje vlastnosti matematického modelu PI₁₂ přenosového kanálu 12-ti odrazy, přičemž jednotlivé i -té odražené signály jsou definovány ziskem ρ_i [dB] a relativním časovým posunem τ_i [μ s].

5.3.2 Model přenosového kanálu PO₁₂

Portable Outdoor přenosový kanál přenosného pozemního příjmu je definován pro šíření signálu vně budovy s rychlostí pohybu přijímače 3 km/h. Statistika šíření signálu je charakterizována Dopplerovým spektrem s Riceovou distribucí pro první cestu šíření signálu a Rayleighovou distribucí pro ostatní cesty. [28] popisuje vlastnosti matematického modelu PO₁₂ přenosového kanálu 12-ti odrazy, přičemž jednotlivé i -té odražené signály jsou definovány ziskem ρ_i [dB] a relativním časovým posunem τ_i [μ s].

5.4 Mobilní pozemní příjem

Střední až vysoká rychlost, (30 – 100) km/h, pohybu přijímače vůči vysílači je charakteristická pro mobilní pozemní příjem s typickými parametry modulovaného signálu v režimu OFDM, mód 2k s modulací QPSK, hodnota kódového poměru $CR=1/2$ a délka ochranného intervalu $GI=1/16$ pro standard DVB-T/H.

Přenosová cesta se vyznačuje zpravidla mnohacestným příjmem přímých i odražených signálů s Dopplerovým posunem definována přenosovými modely kanálů:

- TU₆ kanál,
- RA₆ kanál.

5.4.1 Model přenosového kanálu TU₆

Typical Urban přenosový kanál mobilního pozemního příjmu je definován pro šíření signálu v zastavěném městském prostředí s rychlostí pohybu přijímače 50 km/h. Statistika šíření signálu je charakterizována Dopplerovým spektrem s Rayleighovou distribucí matematicky popsanou vztahy 5.6 a 5.8. Norma [12] využívá k popisu a stanovení vlastností matematického modelu TU₆ přenosového kanálu 6-ti odrazů, přičemž jednotlivé i -té odražené signály jsou definovány ziskem ρ_i [dB] a relativním časovým posunem τ_i [μ s], Rayleighův faktor pro TU₆ přenosový kanál je definován:

$$k = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_0}{f_D}\right)^2}}, \quad (5.10)$$

kde: f_0 - nosná frekvence signálu,
 f_D - dopplerův posun frekvence.

5.4.2 Model přenosového kanálu RA₆

Rural Area přenosový kanál mobilního pozemního příjmu je definován pro šíření signálu ve venkovském prostředí s rychlostí pohybu přijímače 100 km/h. Je odvozen z TU₆ přenosového kanálu, statistika šíření signálu je charakterizována Dopplerovým spektrem s Riceovou distribucí pro první cestu šíření signálu a Rayleighovou distribucí pro ostatní cesty. Norma [12] využívá k popisu a stanovení vlastností matematického modelu RA₆ přenosového kanálu 6-ti odrazů, přičemž jednotlivé i -té odražené signály jsou definovány ziskem ρ_i [dB] a relativním časovým posunem τ_i [μ s].

6 ANALÝZA SIGNÁLU PŘI PŘÍJMU DVB-T/H/T2

Přijatý signál ovlivněn celou soustavou DVB, zejména komunikačním kanálem, lze z pohledu „kvality“ signálu popsat zejména parametry modulační chybovost MER , poměr S/N , C/N a bitová chybovost BER . Odolnost signálu proti chybám vzniklým přenosovým prostředím úzce souvisí především s kanálovým zabezpečením signálu v modulátoru parametry OFDM s jednotlivými módy a modulacemi, konvolučním kódem a ochranným intervalem.

6.1 Modulační chybovost

Interferenční jev, který postihuje všechny přenosové cesty je šum AWGN. V konstelačním diagramu je rušení šumem rozpoznatelné z konstelačních bodů, které mají proměnnou velikost. Efektivní hodnotou RMS (*Root Mean Square*) šumového rušení jsou vyhodnoceny distribuce každého konstelačního stavu v čase odpovídající odchylkám z ideálních stavů diagramu. Vztažení RMS hodnoty šumu N (*Noise*) k amplitudě QAM signálu S (*Signal*) umožňuje vyhodnocení a vyčíslení logaritmického poměru S/N v dB. Analogicky vztažením RMS hodnoty N k amplitudě nosné QAM signálu C (*Carrier*) umožňuje vyhodnocení a vyčíslení logaritmického poměru C/N v dB. Vzájemné přepočítání je možné. Pokud je odchylka z nominálních pozic ve středu rozhodovacích úrovní příliš velká, rozhodovací úrovně jsou překročeny a vznikají bitové chyby.

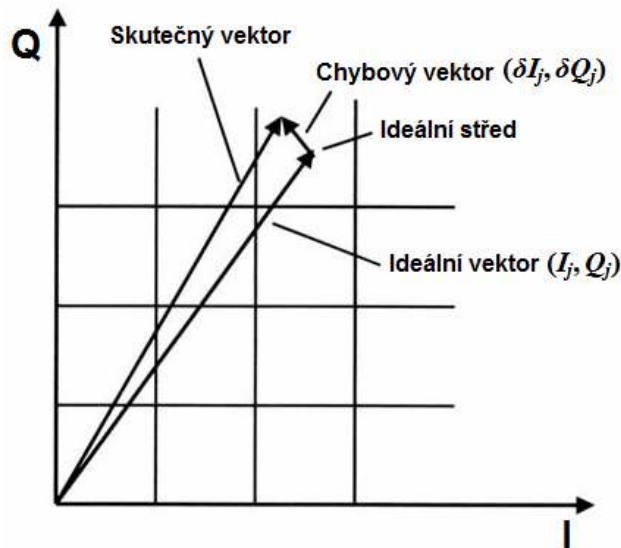
Ne jen AWGN šum, ale také např. impulsní rušení, intermodulace a křížová modulace způsobují produkty interference a zkreslení signálu díky nelinearitám na přenosové cestě. Tyto produkty se mohou projevit v konstelačním diagramu podobně jako šum a nelze je při analýze od šumu odlišit.

Modulační chyba MER (*Modulation Error Ratio*) je metrika zohledňující všechny individuální interferenční vlivy při přenosu a tím i vliv pozemní přenosové cesty. Analýzou IQ složek konstelačního diagramu se stanoví chybový vektor $(\delta I_j, \delta Q_j)$, který určuje vzdálenost mezi ideální pozicí (střed čtverce) a aktuální (reálnou) pozicí daného přijatého symbolu, viz obr. 6.1.

Suma kvadrátů hodnot ideálních symbolových vektorů (I_j, Q_j) je podělena sumou kvadrátů symbolových chybových vektorů $(\delta I_j, \delta Q_j)$. Výsledná hodnota MER je pak vyjádřena jako výkonový poměr v dB dle vztahu 6.1.

$$MER = 10 \log_{10} \left\{ \frac{\sum_{j=1}^N (I_j^2 + Q_j^2)}{\sum_{j=1}^N (\delta I_j^2 + \delta Q_j^2)} \right\} \quad [\text{dB}], \quad (6.1)$$

kde N je počet datových bodů měřeného vzorku.

Obr. 6.1: Vektory pro stanovení MER

Pokud je interferenčním efektem pouze šum, hodnoty S/N a MER se rovnají a pro modulační chybu platí vztah:

$$MER \text{ [dB]} \leq S/N \text{ [dB]}. \quad (6.2)$$

Chyba EVM (*Error Vector Magnitude*) je v úzkém vztahu k MER , rozdíl je v použité referenční hodnotě. MER používá jako referenční hodnotu RMS velikost QAM signálu, zatímco EVM používá jako referenční hodnotu špičkovou velikost QAM signálu. EVM a MER lze navzájem přepočítat pomocí konverzní tabulky. [25]

6.2 Bitová chybovost BER

Bitová chybovost BER (*Bit Error Rate*) [27] je považována za nejdůležitější parametr pro vyhodnocení kvality digitálního signálu a je definována vztahem 6.3.

$$BER = \frac{m}{n} \quad [-], \quad (6.3)$$

kde: m - počet chybně přijatých bitů,
 n - celkový počet přijatých bitů.

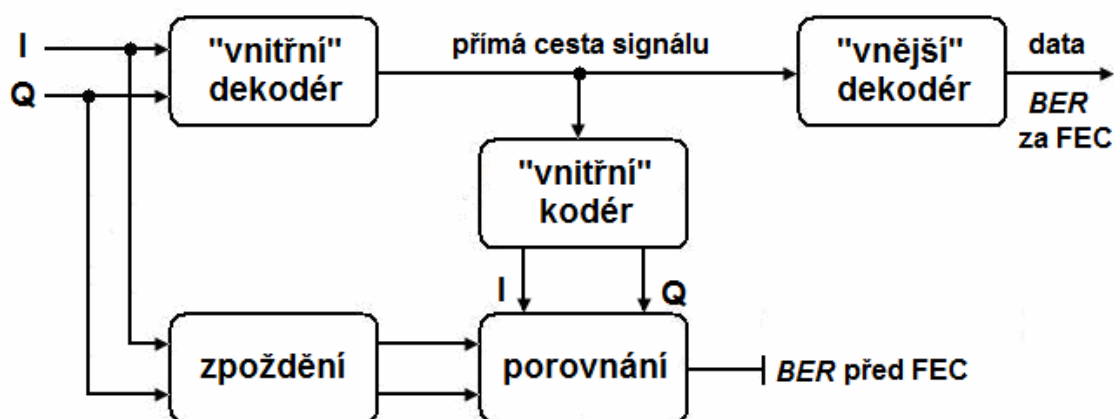
Díky vnějšímu a vnitřnímu zabezpečení FEC, viz obr. 6.2, lze vyhodnotit tři typy bitové chybovosti BER :

- ❑ bitová chybovost před „vnitřním“ dekódováním = kanálová (BER_I),
- ❑ bitová chybovost před „vnějším“ dekódováním = po Viterbiho dekódování, resp. po LDPC dekódování (BER_{II}),
- ❑ bitová chybovost po „vnějším“ dekódování.

BER_I před „vnitřním“ dekódováním, někdy označováno jako BER před FEC, udává informace o chybovosti celé soustavy DVB, tj. vysílače, přenosového kanálu a přijímače v průběhu vysílání. Metoda měření spočívá v tom, že se datový tok dekódovaný ve „vnitřním“ dekodéru opět kóduje shodným kódem ve „vnitřním“ kodéru jako na vysílací straně s cílem dosáhnout originálního signálu jako ve vysílači. Tento signál je porovnáván se signálem před „vnitřním“ dekodérem, rozdíl a tím i bitová chybovost je pak stanovena pomocí komparace v I a Q větvích. Rozsah bitové chybovosti před „vnitřním“ dekódováním je 10^{-9} až 10^{-2} . Standard první generace využívá k „vnitřnímu“ dekódování Viterbiho algoritmus, DVB-T2 využívá iteračních algoritmů předávání zprávy na základě pravděpodobnosti (*belief propagation algorithm*).

„Vnitřní“ dekodér dokáže opravit pouze některé bitové chyby, stále zůstává určitá chybovost před „vnějším“ dekódováním. Počítáním korekčních zásahů „vnějšního“ dekodéru a jeho vztažením k celkovému počtu přenesených bitů v dané periodě je stanovena chybovost před „vnějším“ dekódováním BER_{II} . Standard DVB-T/H využívá k vnějšnímu dekódování Reed Solomonův dekodér založen na Euclidovu Berlekampovu algoritmu, standard druhé generace BCH dekodér založen na Berlekampovu Masseyovu algoritmu.

„Vnějšní“ dekodér neopraví všechny chyby, ale označí v hlavičce všechny chybné pakety TS, PLP. Počítáním chybných paketů umožňuje stanovení chybovosti po „vnějším“ dekódování. Hodnota bitové chybovosti BER_{FEC} po celkové kanálové korekci FEC $BER_{FEC} \leq 10^{-11}$ je považována za bezchybnost signálu QEF (*Quasi Error Free*) a odpovídá jedné bitové chybě za hodinu. [25]



Obr. 6.2: Princip stanovení bitových chybovostí BER

7 LABORATORNÍ PRACOVNÍSTĚ

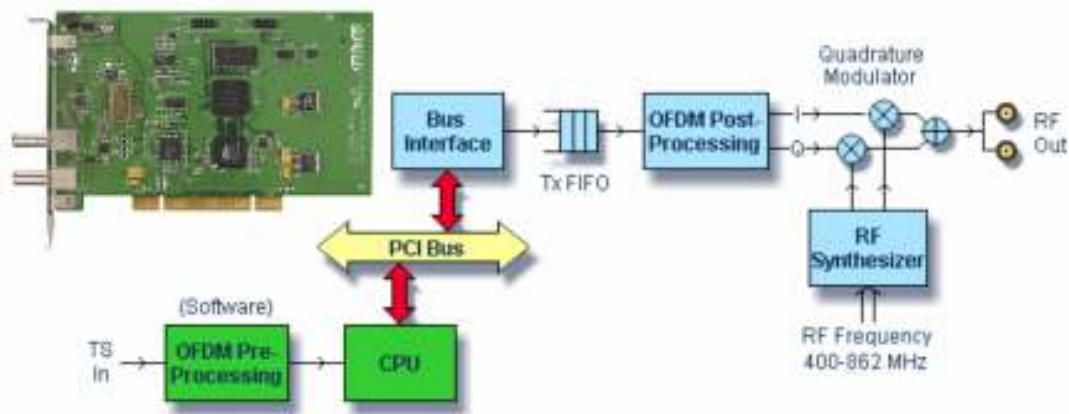
Experimentální laboratorní měření bylo provedeno na přenosovém systému pro vysílání pozemního digitálního televizního vysílání DVB-T/H v laboratoři televizní techniky Ústavu radioelektroniky.

Laboratorní přenosový systém, graficky uveden v příloze B, se skládá z hardwarového a softwarového vybavení:

- ❑ modulátor DTA-110T,
- ❑ adaptér DekTec DTA-145,
- ❑ měřicí přijímač KATHREIN MSK-200,
- ❑ PC se softwarem:
 - DtGrabber – rekordér transportního toku TS,
 - DekTec StreamXpress-Stream Player – přehrávač transportního toku TS,
 - DtLoop – modulátor,
 - DTA-305 – simulátor přenosového kanálu.

7.1 Modulátor DTA-110T

Modulátor DTA-110T realizovaný PCI (*Peripheral Component Interconnect*) kartou, na obr. 7.1 spolu s blokovým schématem modulátoru, podporuje vícestavové QAM, OFDM a VSB (*Vestigial SideBand*) modulace s šířkou pásma (5-8)MHz. Modulátor má integrovaný UHF upkonvertor se směšovačem (400-862)MHz, RF (*Radio Frequency*) výstup s úrovní (-29 ± 2) dBm může být přímo připojen k přijímači. Karta je opatřena dvěma výstupními konektory typu F (75Ω). [4]

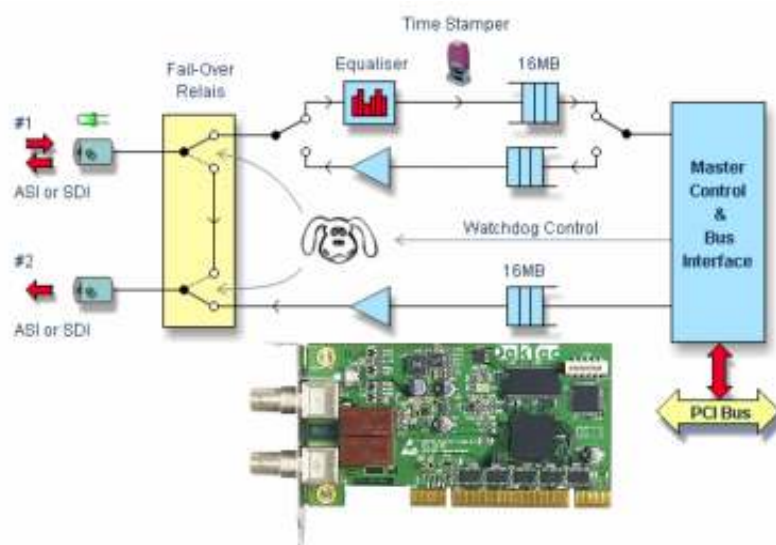


Obr. 7.1: PCI karta a blokové schéma modulátoru DTA-110T [4]

7.2 Adaptér DTA-145

Univerzální vstupně-výstupní adaptér realizovaný PCI kartou, na obr. 7.2 spolu s blokovým schématem adaptéru, pro zpracování transportních toků MPEG-2 TS. Karta disponuje dvěma nezávislými BNC (*Bayonet Neill Concelman*) porty, kdy jeden port je vyhrazený pro výstupní ASI/SDI (*Asynchronous Serial Interface / Serial Digital Interface*), druhý může být softwarově řízen jako vstupní či výstupní ASI/SDI port.

Adaptér lze také použít k záznamu transportního toku TS. Na softwarově nedefinovaný vstup se připojí libovolný generátor datových toků a pomocí programu DtGrabber se uloží TS. S takto uloženým transportním tokem TS lze dále pracovat. [5]



Obr. 7.2: PCI karta a blokové schéma adaptéru DTA-145 [5]

7.3 Měřicí televizní přijímač KATHREIN MSK-200

Přijímač KATHREIN MSK-200 na obr. 7.3 umožňuje komplexní analýzu DVB signálu včetně samotného transportního toku MPEG-2 TS. Z mnoha podporujících funkcí lze vyzvednout potřeby analýzy přijatého signálu experimentálního laboratorního měření, k nimž patří schopnost měřit modulační *MER* i bitovou chybovost *BER*, odstup signálu od šumu *S/N*, analyzovat spektrum přijatého signálu a v neposlední řadě analyzovat I, Q složky konstelčního diagramu DVB datového toku. Mimo jiné disponuje integrovaným osciloskopem se schopností zachycovat napěťové úrovně signálu, v transportním toku TS zobrazuje SID, PID, PMT, apod. [26]



Obr. 7.3: Přijímač KATHEREIN MSK-20 [26]

7.4 Softwarová aplikace pro přehrávání TS DekTec StreamXpress

DekTec StreamXpress je software pro přehrávání transportních toků TS, který je kompatibilní se všemi DekTec výstupními adaptéry. Po načtení zvoleného transportního toku TS se zobrazí jeho obsah, velikost, bitový tok, PID (*Packet Identifier*) identifikátory a další informace. Volbou adaptéru lze určit, který fyzický adaptér bude dále „zpracovávat“ vybraný TS. Program obsahuje generátor testovacího pseudonáhodného signálu, do vysílaného signálu lze vložit chyby v podobě pravděpodobnosti ztracených paketů k počtu definovaných paketů. Obdobně lze vložit bitové či bytové chyby s možností definovat, kolik bitových/bytových chyb se bude maximálně v jednom paketu nacházet. [3]

7.5 Softwarová aplikace modulátoru DtLoop

DtLoop je softwarový modulátor, který je kompatibilní jak s fyzickým výstupním DTA-110T modulátorem, tak i se vstupním DTA-145 adaptérem. V programu DtLoop lze nastavit požadované parametry modulace, přičemž vstupní TS z DTA-145 adaptéru je ve fyzickém modulátoru DTA-110T těmito nastavenými parametry modulován a vysílán s následnou možností analýzy signálu pomocí měřícího přijímače či zobrazením pomocí set-top-boxu STB na televizním přijímači TVP.

Možností volby parametrů modulace lze zcela modelovat systémy digitálního pozemního televizního vysílání první generace, tedy standardy DVB-T/H. [2]

7.6 Softwarová aplikace modelu přenosových kanálů DTA-305

DTA-305 je softwarový simulátor přenosového kanálu s možností nastavení definovaných komunikačních přenosových kanálů uvedených v kapitole 5 pro pevný, přenosný a mobilní pozemní příjem.

Po aktivování možnosti AWGN kanálu lze volit hodnotu S/N v dB, která je relativní vzhledem k původnímu signálu, bez útlumu. Současně jsou zobrazeny informace o šířce pásma kanálu, šířce pásma šumu, výkon šumu v signálu a celkový výkon šumu.

Po aktivování vícecestné přenosové simulace lze nadefinovat až 32 cest šíření signálu. Pro každou cestu lze definovat typ přenosového kanálu s Dopplerovým spektrem, kdy se nastaví požadovaná simulovaná rychlost přijímače a Dopplerův posuv se automaticky dopočítá. Možnosti nastavení parametrů pro každou cestu jsou útlum [dB], zpoždění [μ s] a fázový posuv [$^\circ$], současně je i zobrazena informace o celkovém výkonu přenosové cesty v dB. [2]

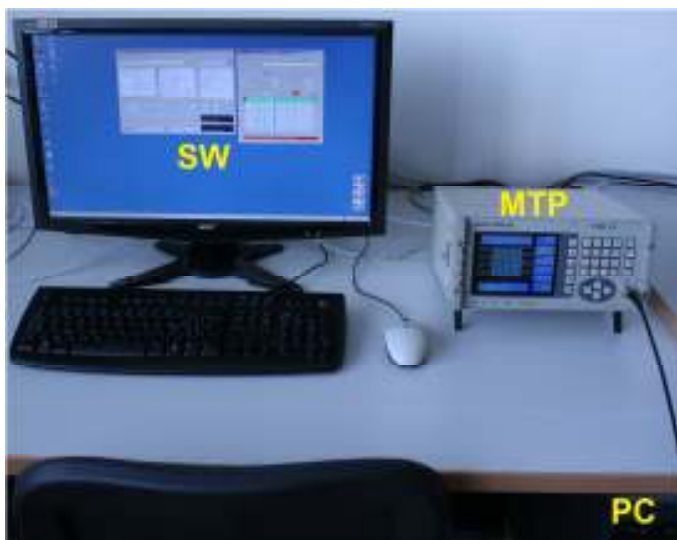
8 LABORATORNÍ MĚŘENÍ DVB-T/H

Experimentální laboratorní měření bylo provedeno na přenosovém systému pro vysílání pozemního digitálního televizního vysílání podle standardu DVB-T/H v laboratoři televizní techniky Ústavu radioelektroniky. Z důvodu nedostupnosti potřebného přístrojového vybavení pro laboratorní měření přenosového systému pro vysílání pozemního digitálního televizního vysílání dle standardu DVB-T2, není toto měření realizováno.

Pomocí laboratorního přenosového systému, graficky uvedeného v příloze B, byl nejprve vytvořen za pomoci laboratorního generátoru transportních toků DVRG a pomocí PCI karty DekTec DTA-145 společně se softwarem DtGrabber transportní tok TS o velikosti souboru 25,6MB, délce sekvence 42s a celkové bitové rychlosti 5 097 226 bps.

Následné samotné laboratorní měření nebylo možné realizovat na přenosovém systému pro vysílání pozemního digitálního televizního vysílání DVB-T/H, graficky uvedeného v příloze B, neboť přenosová propustnost PCI slotů „boxu“ od firmy Magma není dostatečná. Modulátor DTA-110T byl proto vložen do PCI slotu „klasického“ stolního PC, pomocí něhož bylo laboratorní měření realizováno, viz obr. 8.1. SW označuje použité softwarové vybavení, tedy přehrávač transportních toků TS včetně modulátoru StreamXpress-Stream Player a kanálový simulátor přenosového prostředí StreamXpress-Channel Simulator. Měřícím přijímačem MTP byl v průběhu měření použit měřicí televizní přijímač Kathrein MSK-33 z důvodu efektivnosti měření bitových chybovostí *BER*. Laboratorní měření pomocí měřícího televizního přijímače MSK-200 nebylo efektivní, kdy se hodnota bitové chybovosti *BER* „ustálila“ po relativně dlouhé době. Podrobněji o postupu a průběhu měření viz příloha D, vzorová laboratorní úloha.

Jednotlivá laboratorní měření pro pevný, přenosný a mobilní pozemní příjem byla realizována na kanále č. 40, $f_0 = 626\text{MHz}$.



Obr. 8.1: Rozmístění přístrojů laboratorního pracoviště

8.1 Pevný pozemní příjem DVB-T/H

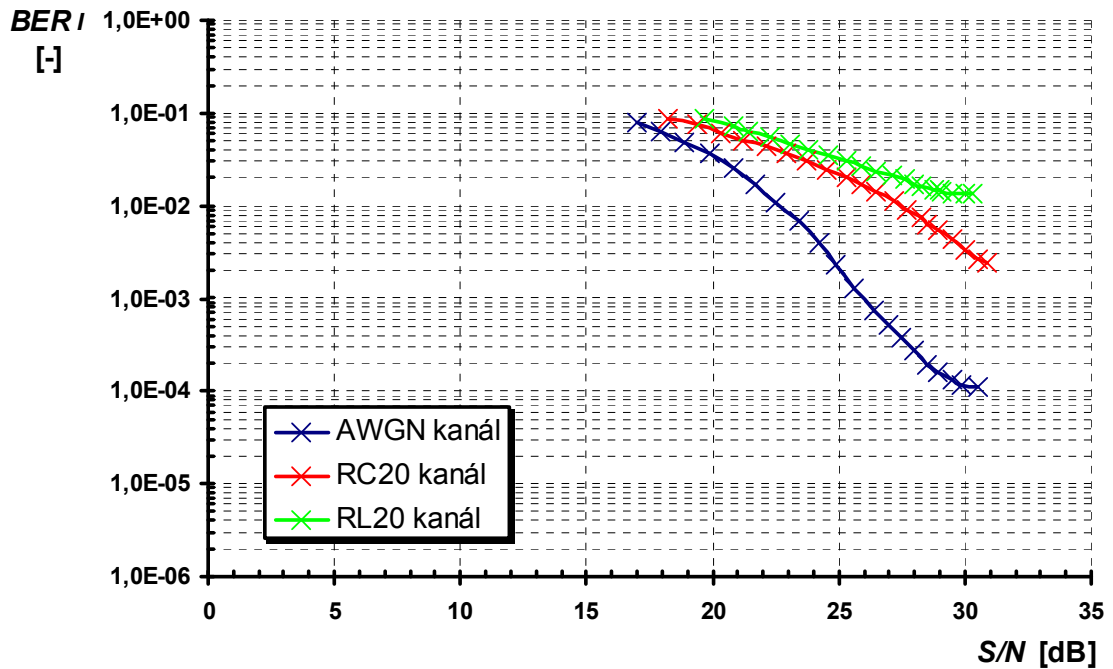
Statická poloha přijímače je charakteristická pro pevný pozemní příjem s typickými parametry modulovaného signálu v režimu OFDM, mód 8k s modulací 64-QAM, hodnota kódového poměru $CR=2/3$ a délka ochranného intervalu $GI=1/4$ pro standard DVB-T/H. Přenosová cesta bez Dopplerova posuvu se vyznačuje přímým signálem pro Gaussův přenosový kanál, včetně odražených signálů pro RC_{20} přenosový kanál a pouze nepřímými odraženými signály pro RL_{20} přenosový kanál, definovány v příloze C.1.

8.1.1 Naměřené hodnoty pevného pozemního příjmu DVB-T/H

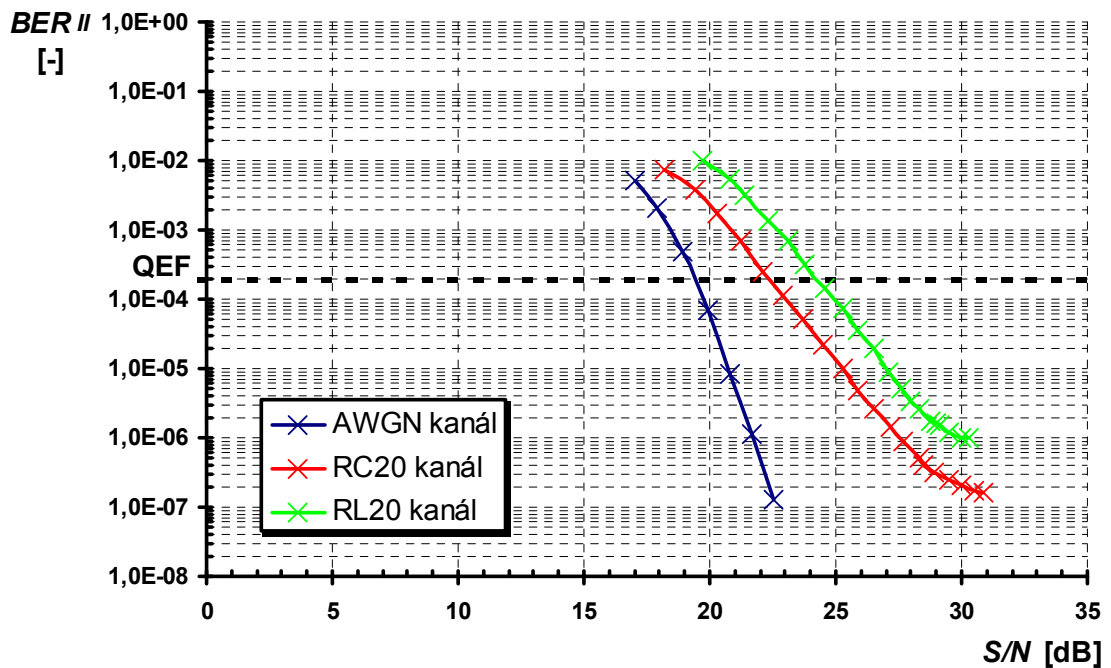
Tab. 8.1: Laboratorní měření DVB-T/H závislosti $BER = f(S/N)$ pro pevný pozemní příjem. Přenosové kanály AWGN, RC_{20} a RL_{20}

S/N	AWGN kanál		S/N	RC_{20} kanál		S/N	RL_{20} kanál	
	BER_I	BER_{II}		BER_I	BER_{II}		BER_I	BER_{II}
[dB]	[-]	[-]	[dB]	[-]	[-]	[dB]	[-]	[-]
30,5	1,10E-04	<1,00E-11	30,9	2,50E-03	1,60E-07	30,3	1,30E-02	9,80E-07
29,9	1,20E-04	<1,00E-11	30,5	2,70E-03	1,70E-07	30,0	1,30E-02	9,80E-07
29,5	1,30E-04	<1,00E-11	30,0	3,40E-03	2,00E-07	29,5	1,40E-02	1,20E-06
28,9	1,60E-04	<1,00E-11	29,5	4,40E-03	2,50E-07	29,1	1,40E-02	1,50E-06
28,5	1,90E-04	<1,00E-11	28,9	5,50E-03	3,20E-07	29,0	1,50E-02	1,60E-06
28,0	2,70E-04	<1,00E-11	28,5	6,10E-03	4,10E-07	28,8	1,50E-02	1,80E-06
27,5	3,80E-04	<1,00E-11	28,3	7,40E-03	5,30E-07	28,3	1,60E-02	2,60E-06
27,0	5,20E-04	<1,00E-11	27,7	9,10E-03	8,90E-07	28,0	1,70E-02	3,40E-06
26,4	7,60E-04	<1,00E-11	27,2	1,10E-02	1,40E-06	27,6	1,90E-02	5,20E-06
25,6	1,30E-03	<1,00E-11	26,5	1,40E-02	2,70E-06	27,1	2,10E-02	8,90E-06
24,9	2,30E-03	9,60E-09	25,9	1,70E-02	4,90E-06	26,5	2,30E-02	1,90E-05
24,2	3,90E-03	9,60E-09	25,3	2,10E-02	9,80E-06	25,9	2,70E-02	3,50E-05
23,4	6,80E-03	1,00E-11	24,5	2,50E-02	2,20E-05	25,3	3,00E-02	7,20E-05
22,5	1,10E-02	1,30E-07	23,7	3,10E-02	5,20E-05	24,6	3,50E-02	1,40E-04
21,7	1,70E-02	1,10E-06	22,9	3,60E-02	1,10E-04	23,8	4,00E-02	3,10E-04
20,8	2,50E-02	8,30E-06	22,1	4,30E-02	2,50E-04	23,1	4,70E-02	6,80E-04
19,9	3,60E-02	7,10E-05	21,2	5,10E-02	6,90E-04	22,3	5,40E-02	1,40E-03
18,9	4,80E-02	4,80E-04	20,3	6,10E-02	1,70E-03	21,4	6,20E-02	3,10E-03
17,9	6,20E-02	2,10E-03	19,4	7,40E-02	3,80E-03	20,8	7,30E-02	5,30E-03
17,0	7,90E-02	5,10E-03	18,2	8,50E-02	7,50E-03	19,7	8,50E-02	9,70E-03

8. 1. 2 Grafické závislosti pevného pozemního příjmu DVB-T/H

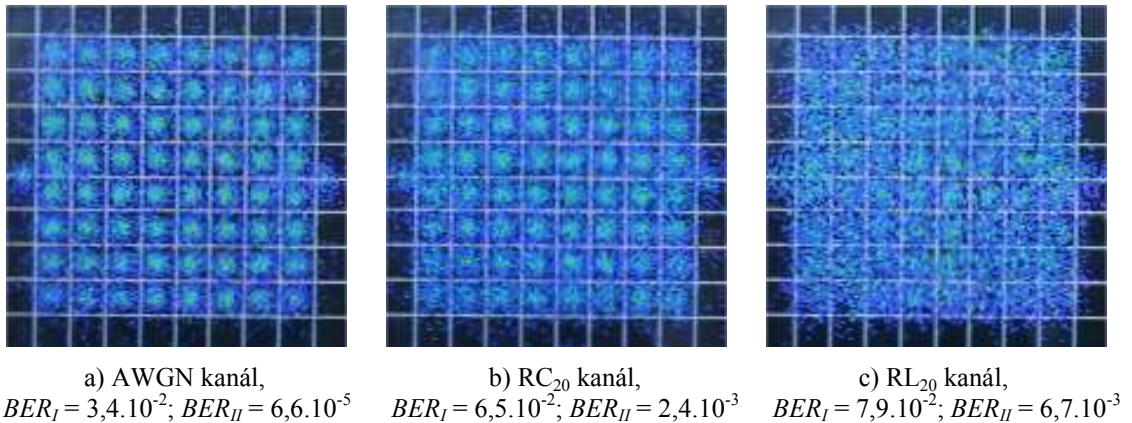


Obr. 8.2: Laboratorní měření DVB-T/H závislosti $BER_I = f(S/N)$ pro pevný pozemní příjem. Přenosové kanály AWGN, RC₂₀ a RL₂₀



Obr. 8.3: Laboratorní měření DVB-T/H závislosti $BER_{II} = f(S/N)$ pro pevný pozemní příjem. Přenosové kanály AWGN, RC₂₀ a RL₂₀

8. 1. 3 Konstelační diagramy pevného pozemního příjmu DVB-T/H



Obr. 8.4: Laboratorní měření DVB-T/H I/Q diagramů. Pevný pozemní příjem, $S/N = 20\text{dB}$.
Přenosové kanály: a) AWGN, b) RC₂₀, c) RL₂₀

8. 1. 4 Vyhodnocení pevného pozemního příjmu DVB-T/H

Statický pozemní příjem digitálně modulovaného signálu DVB-T/H je z pohledu zabezpečení proti chybám vzniklým v přenosovém kanále nejméně náročný, a proto je signál modulován hodnotami parametrů uvedených v úvodu pevného pozemního příjmu.

Při porovnání hodnot bitových chybovostí BER z tab. 8.1 a grafických závislostí $BER=f(S/N)$ na obr. 8.2 a 8.3 použitých přenosových kanálů pro laboratorní měření pevného pozemního příjmu se nejlépe z pohledu rušení signálu jeví AWGN přenosový kanál, kdy tímto kanálem znehodnocený přijímaný digitální signál dokáže kanálová korekce FEC_{T/H} pro poměrovou hodnotu $S/N \geq 19,0\text{dB}$ opravit na tzv. bezchybný signál QEF, jehož hodnota bitové chybovosti BER_{FEC} po celkové kanálové korekci FEC je $BER_{\text{FEC}} \leq 1 \cdot 10^{-11}$. Hraniční hodnota bitové chybovosti QEF signálu po Viterbiho dekódování BER_{II} odpovídá hodnotě $BER_{\text{QEF}} = BER_{II} = 2 \cdot 10^{-4}$. Přenosový kanál RC₂₀ je více rušivý vůči AWGN přenosovému kanálu, pro QEF signál je potřeba hodnoty $S/N \geq 22,0\text{dB}$. Nejméně vhodný pro šíření signálu pozemního příjmu je RL₂₀ přenosový kanál, ve kterém je zapotřebí hodnoty $S/N \geq 24,0\text{dB}$ pro možnost příjmu QEF signálu po kanálové korekci FEC_{T/H}.

Porovnáním konstelačních diagramů, na obr. 8.4, jednotlivých přenosových kanálů pro hodnotu $S/N = 20\text{dB}$ je patrné, že „nejkvalitnější“ přenosový kanál je AWGN, ve kterém jsou jednotlivé koncové body I/Q diagramu v jednotlivých rozhodovacích úrovních nejméně „rozostřené“. Méně „kvalitní“ se na první pohled jeví přenosový kanál RC₂₀ následovaný z pohledu nižší „kvality“ přenosového kanálu RL₂₀ kanálem, jehož koncové body I/Q diagramu jsou „rozprostřeny“ v celých jednotlivých rozhodovacích úrovních.

8.2 Přenosný pozemní příjem DVB-T/H

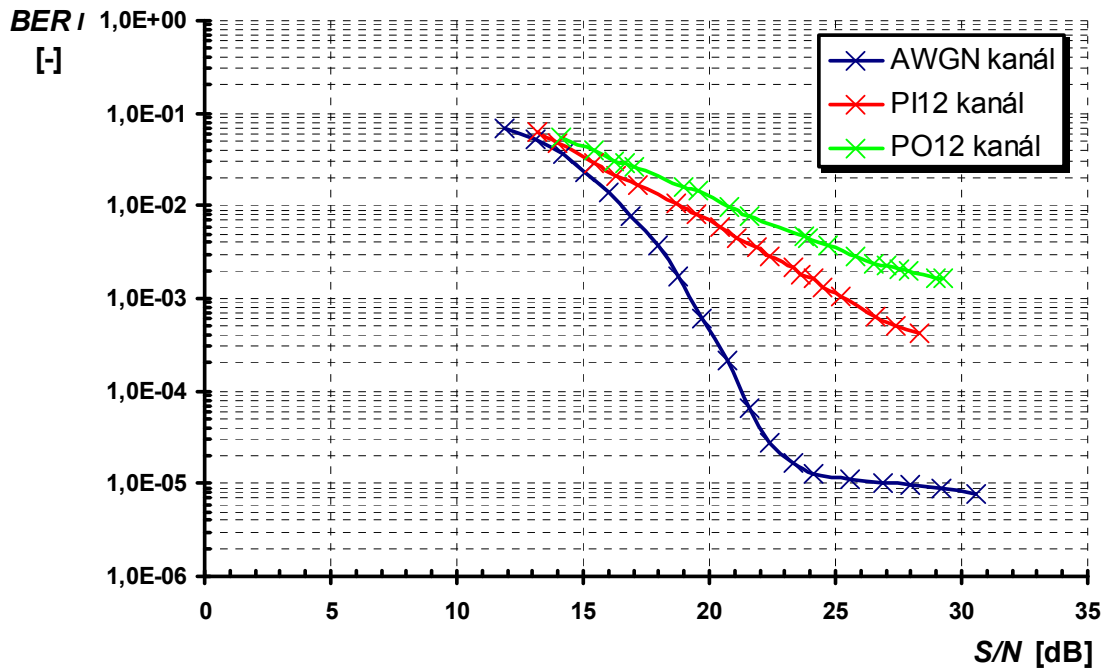
Malá rychlost, řádově jednotky km/h, pohybu přijímače vůči vysílači je charakteristická pro přenosný pozemní příjem s typickými parametry modulovaného signálu v režimu OFDM, mód 4k s modulací 16-QAM, hodnota kódového poměru $CR=2/3$ a délka ochranného intervalu $GI=1/8$ pro standard DVB-T/H. Přenosová cesta se vyznačuje zpravidla mnohacestným příjmem přímých i odražených signálů s Dopplerovým posunem. Naměřená data odpovídají pohybu přijímače rychlostí 3km/h. Přenosové kanály PI_{12} a PO_{12} jsou simulovány podle definovaných hodnot v příloze C.2, včetně uvedených distribucí Dopplerova spektra.

8.2.1 Naměřené hodnoty přenosného pozemního příjmu DVB-T/H

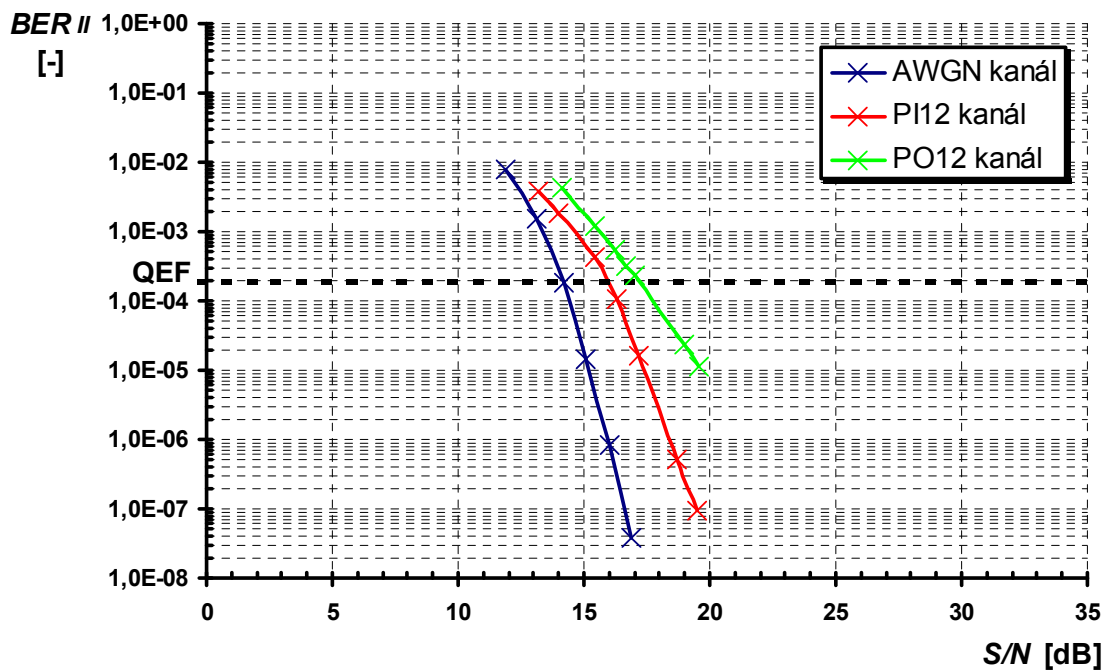
Tab. 8.2: Laboratorní měření DVB-T/H závislosti $BER = f(S/N)$ pro přenosný pozemní příjem. Přenosové kanály AWGN, PI_{12} a PO_{12}

S/N	AWGN kanál		S/N	PI_{12} kanál		S/N	PO_{12} kanál	
	BER_I	BER_{II}		BER_I	BER_{II}		BER_I	BER_{II}
[dB]	[-]	[-]	[dB]	[-]	[-]	[dB]	[-]	[-]
30,6	7,80E-06	<1,00E-11	28,3	4,30E-04	<1,00E-11	29,3	1,60E-03	<1,00E-11
29,2	8,90E-06	<1,00E-11	27,4	5,00E-04	<1,00E-11	29,0	1,70E-03	<1,00E-11
28,0	9,80E-06	<1,00E-11	26,6	6,50E-04	<1,00E-11	27,9	1,90E-03	<1,00E-11
26,9	1,00E-05	<1,00E-11	25,2	1,00E-03	<1,00E-11	27,5	2,00E-03	<1,00E-11
25,6	1,10E-05	<1,00E-11	24,5	1,30E-03	<1,00E-11	27,0	2,20E-03	<1,00E-11
24,1	1,30E-05	<1,00E-11	24,1	1,60E-03	<1,00E-11	26,5	2,30E-03	<1,00E-11
23,3	1,70E-05	<1,00E-11	23,6	1,80E-03	<1,00E-11	25,8	2,90E-03	<1,00E-11
22,4	2,80E-05	<1,00E-11	23,3	2,10E-03	<1,00E-11	24,7	3,70E-03	<1,00E-11
21,6	6,60E-05	<1,00E-11	22,4	2,90E-03	<1,00E-11	23,9	4,60E-03	<1,00E-11
20,7	2,10E-04	<1,00E-11	21,9	3,60E-03	<1,00E-11	23,8	4,70E-03	<1,00E-11
19,7	6,20E-04	<1,00E-11	21,1	4,60E-03	<1,00E-11	21,6	7,60E-03	<1,00E-11
18,8	1,70E-03	<1,00E-11	20,4	5,90E-03	<1,00E-11	20,8	9,60E-03	<1,00E-11
18,0	3,80E-03	<1,00E-11	19,5	7,90E-03	9,60E-08	19,6	1,50E-02	1,20E-05
16,9	7,80E-03	3,90E-08	18,7	1,10E-02	5,00E-07	19,0	1,60E-02	2,30E-05
16,0	1,40E-02	8,40E-07	17,2	1,70E-02	1,60E-05	17,0	2,60E-02	2,30E-04
15,1	2,30E-02	1,40E-05	16,3	2,10E-02	1,10E-04	16,7	2,90E-02	3,20E-04
14,2	3,60E-02	1,80E-04	15,4	2,90E-02	4,20E-04	16,2	3,10E-02	5,50E-04
13,1	5,10E-02	1,50E-03	14,0	4,70E-02	1,80E-03	15,4	3,90E-02	1,20E-03
11,9	6,90E-02	7,80E-03	13,2	6,30E-02	3,70E-03	14,1	5,50E-02	4,20E-03

8. 2. 2 Grafické závislosti přenosného pozemního příjmu DVB-T/H

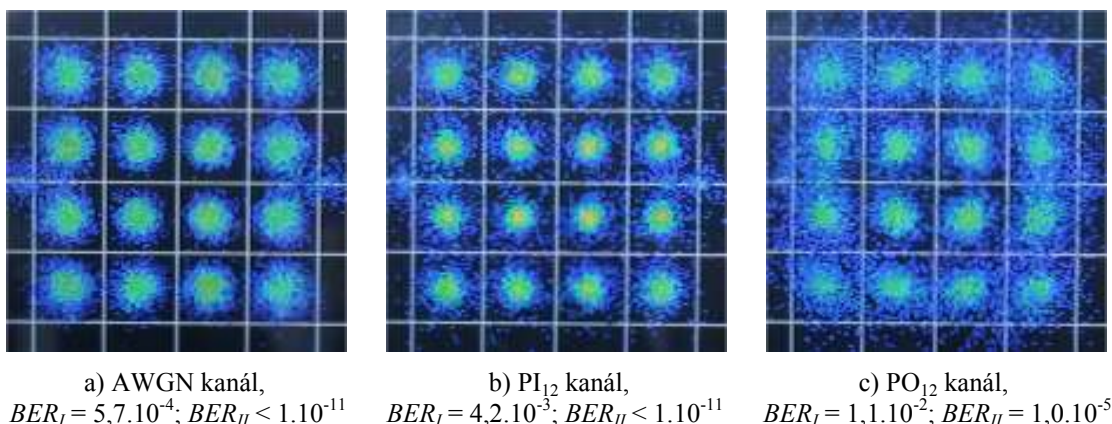


Obr. 8.5: Laboratorní měření DVB-T/H závislosti $BER_I = f(S/N)$ pro přenosný pozemní příjem. Přenosové kanály AWGN, PI₁₂ a PO₁₂



Obr. 8.6: Laboratorní měření DVB-T/H závislosti $BER_{II} = f(S/N)$ pro přenosný pozemní příjem. Přenosové kanály AWGN, PI₁₂, a PO₁₂

8. 2. 3 Konstelační diagramy přenosného pozemního příjmu DVB-T/H



Obr. 8.7: Laboratorní měření DVB-T/H I/Q diagramů. Přenosný pozemní příjem, $S/N = 20$ dB.
Přenosové kanály: a) AWGN, b) PI_{12} , c) PO_{12}

8. 2. 4 Vyhodnocení přenosného pozemního příjmu DVB-T/H

Přenosný pozemní příjem digitálně modulovaného signálu DVB-T/H je z pohledu zabezpečení proti chybám vzniklým v přenosovém kanále více náročný oproti pevnému pozemnímu příjmu. Proto je signál modulován hodnotami parametrů uvedených v úvodu přenosného pozemního příjmu. Použité měřicí přijímače (Kathrein MSK-33, MSK-200) při analýze přijatého digitálně modulovaného signálu nepodporují mód 4k, pro laboratorní měření byl zvolen mód 8k.

Při porovnání hodnot bitových chybovostí BER z tab. 8.2 a grafických závislostí $BER=f(S/N)$ na obr. 8.5 a 8.6 použitých přenosových kanálů pro laboratorní měření přenosného pozemního příjmu se nejlépe z pohledu rušení DVB-T/H signálu jeví referenční AWGN přenosový kanál, kdy tímto kanálem znehodnocený přijímaný digitální signál dokáže kanálová korekce FEC pro poměrovou hodnotu $S/N \geq 14,0$ dB opravit na tzv. bezchybný signál QEF. Přenosový kanál PI_{12} je více rušivý oproti AWGN přenosovému kanálu, pro QEF signál je zapotřebí hodnoty $S/N \geq 16,0$ dB. Nejméně vhodný pro šíření DVB-T/H signálu pozemního příjmu je PO_{12} přenosový kanál, ve kterém je potřeba hodnoty $S/N \geq 17,5$ dB pro možnost příjmu QEF signálu po kanálové korekci $FEC_{T/H}$.

Porovnáním konstelačních diagramů, na obr. 8.7, jednotlivých přenosových kanálů pro hodnotu $S/N = 20$ dB je možné vyzorovat, že „nejkvalitnější“ přenosový kanál je AWGN, ve kterém jsou jednotlivé koncové body I/Q diagramu v jednotlivých rozhodovacích úrovních nejméně „rozprostřené“. Za méně „kvalitní“ lze označit přenosový kanál PI_{12} , i když horší „kvalita“ tohoto přenosového kanálu vůči AWGN kanálu není na první pohled zcela patrná, nicméně dle naměřených bitových chybovostí BER tomu tak je. Zcela jistě z pohledu nižší „kvality“ přenosového kanálu se jeví PO_{12} kanál, jehož koncové body I/Q diagramu jsou v porovnání s ostatními I/Q diagramy přenosného pozemního příjmu nejvíce „rozostřené“ v jednotlivých rozhodovacích úrovních.

8.3 Mobilní pozemní příjem DVB-T/H

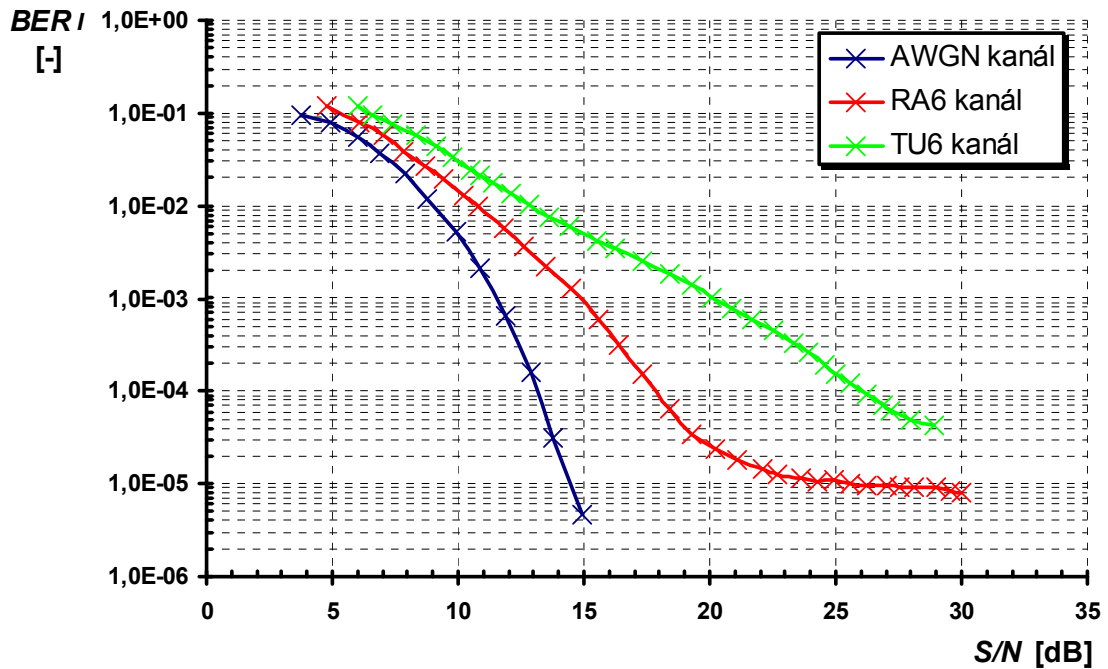
Střední až vysoká rychlost, (30 – 100) km/h, pohybu přijímače vůči vysílači je charakteristická pro mobilní pozemní příjem s typickými parametry modulovaného signálu v režimu OFDM, mód 2k s modulací QPSK, hodnota kódového poměru $CR=1/2$ a délka ochranného intervalu $GI=1/16$ pro standard DVB-T/H. Přenosová cesta se vyznačuje zpravidla mnohacestným příjmem přímých i odražených signálů s Dopplerovým posunem pro přenosový kanál RA₆ a pouze odraženými signály s Dopplerovým posunem pro přenosový kanál TU₆. Naměřená data odpovídají pro přenosový kanál TU₆ rychlosti pohybu přijímače 50km/h, pro přenosový kanál RA₆ pohybu přijímače rychlostí 100km/h. Přenosové kanály TU₆ a RA₆ jsou simulovány podle definovaných hodnot v příloze C.3, včetně uvedených distribucí Dopplerova spektra.

8.3.1 Naměřené hodnoty mobilního pozemního příjmu DVB-T/H

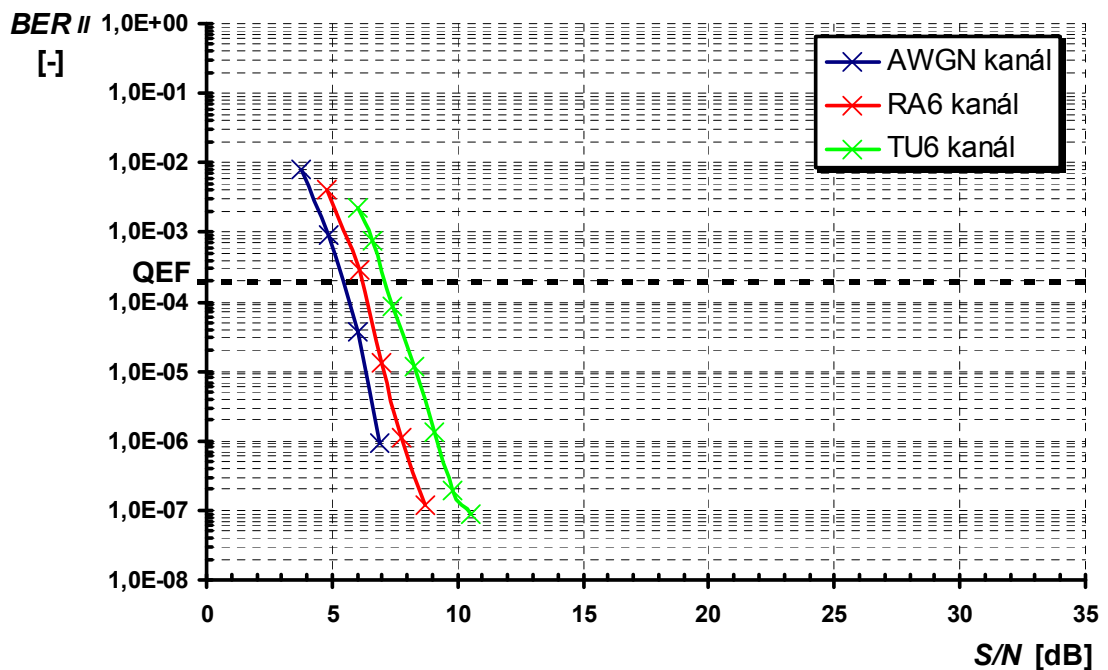
Tab. 8.3: Laboratorní měření DVB-T/H závislosti $BER = f(S/N)$ pro mobilní pozemní příjem. Přenosové kanály AWGN, RA₆ a TU₆

S/N	AWGN kanál		S/N	RA ₆ kanál		S/N	TU ₆ kanál	
	BER _I	BER _{II}		BER _I	BER _{II}		BER _I	BER _{II}
[dB]	[-]	[-]	[dB]	[-]	[-]	[dB]	[-]	[-]
30,6	<1,00E-11	<1,00E-11	30,0	8,10E-06	<1,00E-11	28,9	4,30E-05	<1,00E-11
29,9	<1,00E-11	<1,00E-11	29,6	8,50E-06	<1,00E-11	28,0	4,90E-05	<1,00E-11
29,0	<1,00E-11	<1,00E-11	28,1	9,10E-06	<1,00E-11	26,9	7,00E-05	<1,00E-11
28,1	<1,00E-11	<1,00E-11	27,5	9,30E-06	<1,00E-11	26,2	9,50E-05	<1,00E-11
27,6	<1,00E-11	<1,00E-11	27,0	9,50E-06	<1,00E-11	25,6	1,20E-04	<1,00E-11
27,1	<1,00E-11	<1,00E-11	26,2	9,50E-06	<1,00E-11	25,0	1,50E-04	<1,00E-11
26,3	<1,00E-11	<1,00E-11	25,6	1,00E-05	<1,00E-11	24,6	1,90E-04	<1,00E-11
25,6	<1,00E-11	<1,00E-11	24,9	1,10E-05	<1,00E-11	23,9	2,60E-04	<1,00E-11
24,9	<1,00E-11	<1,00E-11	24,3	1,10E-05	<1,00E-11	23,3	3,40E-04	<1,00E-11
24,1	<1,00E-11	<1,00E-11	23,6	1,20E-05	<1,00E-11	22,5	4,40E-04	<1,00E-11
23,3	<1,00E-11	<1,00E-11	22,7	1,30E-05	<1,00E-11	21,7	5,80E-04	<1,00E-11
22,4	<1,00E-11	<1,00E-11	22,1	1,40E-05	<1,00E-11	20,9	7,70E-04	<1,00E-11
21,5	<1,00E-11	<1,00E-11	21,1	1,80E-05	<1,00E-11	20,1	1,00E-03	<1,00E-11
20,7	<1,00E-11	<1,00E-11	20,2	2,40E-05	<1,00E-11	19,3	1,40E-03	<1,00E-11
19,8	<1,00E-11	<1,00E-11	19,3	3,50E-05	<1,00E-11	18,4	1,90E-03	<1,00E-11
18,8	<1,00E-11	<1,00E-11	18,4	6,60E-05	<1,00E-11	17,3	2,50E-03	<1,00E-11
17,7	<1,00E-11	<1,00E-11	17,3	1,50E-04	<1,00E-11	16,2	3,50E-03	<1,00E-11
16,8	6,70E-08	<1,00E-11	16,4	3,10E-04	<1,00E-11	15,5	4,20E-03	<1,00E-11
15,9	5,60E-07	<1,00E-11	15,6	5,90E-04	<1,00E-11	14,4	5,90E-03	<1,00E-11
14,9	4,70E-06	<1,00E-11	14,5	1,30E-03	<1,00E-11	13,6	7,70E-03	<1,00E-11
13,8	3,10E-05	<1,00E-11	13,5	2,20E-03	<1,00E-11	12,8	1,00E-02	<1,00E-11
12,9	1,60E-04	<1,00E-11	12,6	3,70E-03	<1,00E-11	12,1	1,40E-02	<1,00E-11
11,9	6,60E-04	<1,00E-11	11,8	5,80E-03	<1,00E-11	11,4	1,80E-02	<1,00E-11
10,9	2,10E-03	<1,00E-11	10,8	9,80E-03	<1,00E-11	10,9	2,10E-02	<1,00E-11
9,9	5,30E-03	<1,00E-11	10,2	1,30E-02	<1,00E-11	10,5	2,40E-02	8,80E-08
8,8	1,20E-02	<1,00E-11	9,4	1,90E-02	<1,00E-11	9,8	3,40E-02	1,90E-07
7,9	2,20E-02	<1,00E-11	8,7	2,60E-02	1,20E-07	9,1	4,40E-02	1,30E-06
6,9	3,60E-02	9,40E-07	7,8	3,90E-02	1,10E-06	8,3	5,80E-02	1,20E-05
6,0	5,60E-02	3,80E-05	7,0	5,70E-02	1,30E-05	7,4	7,60E-02	8,80E-05
4,9	8,00E-02	8,80E-04	6,1	7,80E-02	2,80E-04	6,6	9,60E-02	7,50E-04
3,8	9,70E-02	7,80E-03	4,8	1,20E-01	4,10E-03	6,0	1,20E-01	2,30E-03

8. 3. 2 Grafické závislosti mobilního pozemního příjmu DVB-T/H

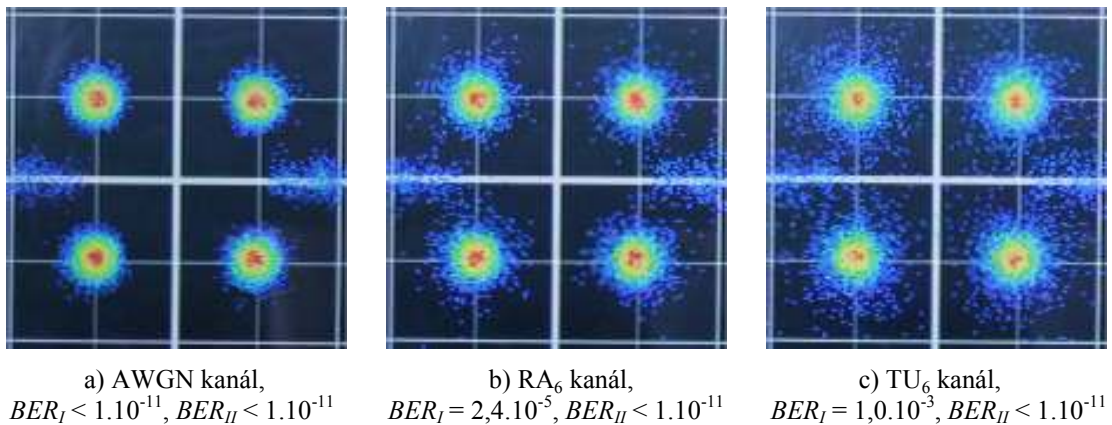


Obr. 8.8: Laboratorní měření DVB-T/H závislosti $BER_I = f(S/N)$ pro mobilní pozemní příjem. Přenosové kanály AWGN, RA₆ a TU₆



Obr. 8.9: Laboratorní měření DVB-T/H závislosti $BER_{II} = f(S/N)$ pro mobilní pozemní příjem. Přenosové kanály AWGN, RA₆ a TU₆

8.3.3 Konstelační diagramy mobilního pozemního příjmu DVB-T/H



Obr. 8.10: Laboratorní měření DVB-T/H I/Q diagramů. Mobilní pozemní příjem, $S/N = 20\text{dB}$. Přenosové kanály: a) AWGN, b) RA₆, c) TU₆

8.3.4 Vyhodnocení mobilního pozemního příjmu DVB-T/H

Mobilní pozemní příjem digitálně modulovaného signálu DVB-T/H je z pohledu zabezpečení proti chybám vzniklým v přenosovém kanále nejnáročnější oproti pevnému a přenosnému pozemnímu příjmu. Proto je signál nejrobustněji zabezpečen proti vlivům přenosového kanálu a modulován hodnotami parametrů uvedených v úvodu mobilního pozemního příjmu.

Při porovnání hodnot bitových chybovostí BER z tab. 8.3 a grafických závislostí $BER=f(S/N)$ na obr. 8.8 a 8.9 použitých přenosových kanálů pro laboratorní měření mobilního pozemního příjmu se nejlépe z pohledu rušení signálu jeví opět referenční AWGN přenosový kanál, kdy tímto kanálem znehodnocený přijímaný digitální signál dokáže kanálová korekce FEC_{T/H} pro poměrovou hodnotu $S/N \geq 5,0\text{dB}$ opravit na tzv. bezchybný signál QEF. Přenosový kanál RA₆ je více rušivý oproti AWGN přenosovému kanálu, pro QEF signál je zapotřebí hodnoty $S/N \geq 6,0\text{dB}$. Nejméně vhodný pro šíření signálu pozemního příjmu je TU₆ přenosový kanál, ve kterém je potřeba hodnoty $S/N \geq 7,0\text{dB}$ pro možnost příjmu QEF signálu po kanálové korekci FEC_{T/H}.

Porovnáním konstelačních diagramů, na obr. 8.10, jednotlivých přenosových kanálů pro hodnotu $S/N = 20\text{dB}$ je zřejmé, že „nejkvalitnější“ přenosový kanál je AWGN, ve kterém jsou jednotlivé koncové body I/Q diagramu v jednotlivých rozhodovacích úrovních nejméně „rozprostřené“. Méně „kvalitní“ vůči AWGN přenosovému kanálu se na první pohled jeví přenosový kanál RA₆ následovaný z pohledu nižší „kvality“ přenosového kanálu TU₆ kanálem, jehož koncové body I/Q diagramu jsou nejvíce „rozprostřeny“ v jednotlivých rozhodovacích úrovních.

9 PC SIMULACE DVB-T/H & DVB-T2

Pro počítačové modelování a simulace přenosových systémů pozemního digitálního televizního vysílání DVB-T/H a DVB-T2 je použit softwarový produkt Matlab firmy Mathworks.

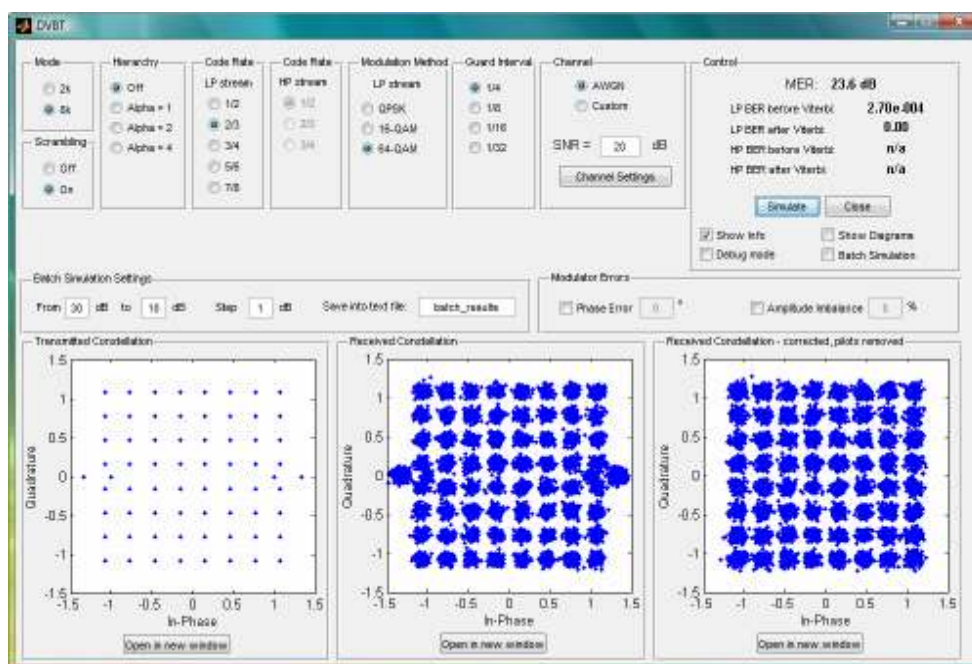
Jednotlivé počítačové simulace pevného, přenosného a mobilního pozemního příjmu byly simulovány na kanále č. 40, $f_0 = 626\text{MHz}$.

9.1 Standard DVB-T/H

Přenosový systém dle standardu DVB-T/H je simulován pomocí aplikace vytvořené studentem doktorského studia Ústavu radioelektroniky.

Hlavní okno aplikace je na obr. 9.1, program obsahuje bloky kanálového kodéru a modulátoru odpovídající svou strukturou přesně standardu DVB-T. Dále pak bloky demodulátoru a kanálového dekodéru, zajišťující demulaci a dekódování přijatého signálu s provedením protichybových korekcí a výpočtem hodnot bitových chybovostí před Viterbiho dekódováním BER_I a bitové chybovosti po Viterbiho dekódování BER_{II} .

Součástí programové aplikace je kanálový simulátor přenosového prostředí, který umožňuje volbu základního přenosového AWGN kanálu a dále možnost definovat pro přenosové kanály s vícecestným šířením signálu zisk [-] a zpoždění [μs] pro jednotlivé i -té cesty uvedené v příloze C. Ve spodních oknech jsou zobrazené konstelační diagramy právě proběhlé simulace. [24]



Obr. 9.1: Hlavní okno aplikace pro simulaci přenosového systému DVB-T

9. 1. 1 Pevný pozemní příjem DVB-T/H

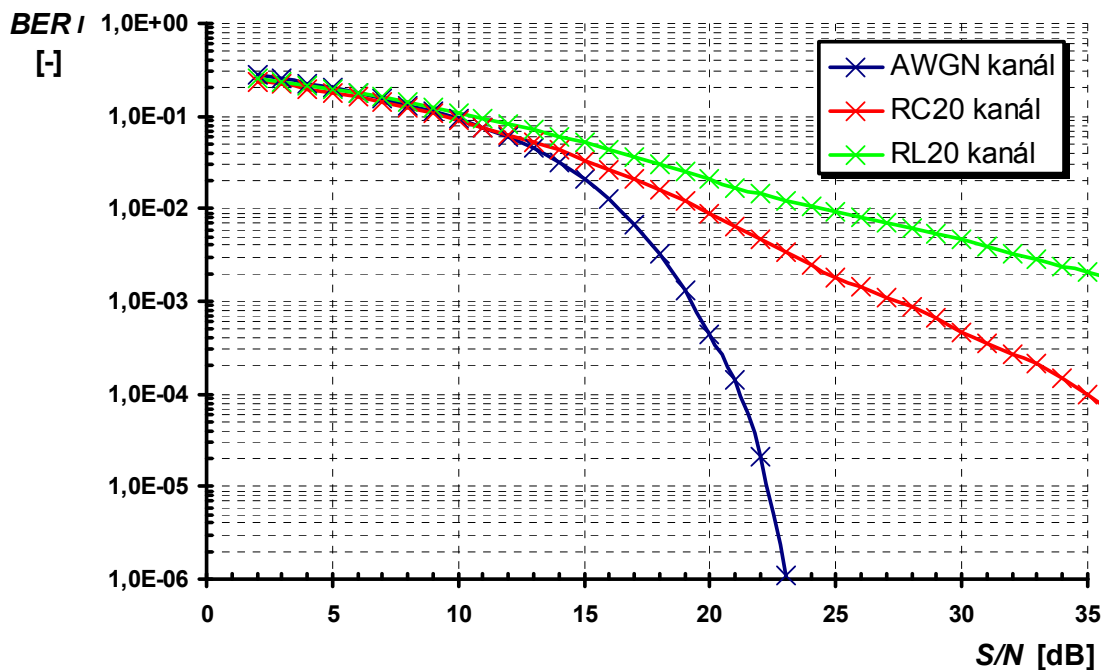
Statická poloha přijímače je charakteristická pro pevný pozemní příjem s typickými parametry modulovaného signálu v režimu OFDM, mód 8k s modulací 64-QAM, hodnota kódového poměru $CR=2/3$ a délka ochranného intervalu $GI=1/4$ pro standard DVB-T/H. Přenosová cesta bez Dopplerova posuvu se vyznačuje přímým signálem pro AWGN přenosový kanál, včetně odražených signálů pro RC_{20} přenosový kanál a pouze nepřímými odraženými signály pro RL_{20} přenosový kanál, definovány v příloze C.1.

9. 1. 1. 1 Simulované hodnoty pevného pozemního příjmu DVB-T/H

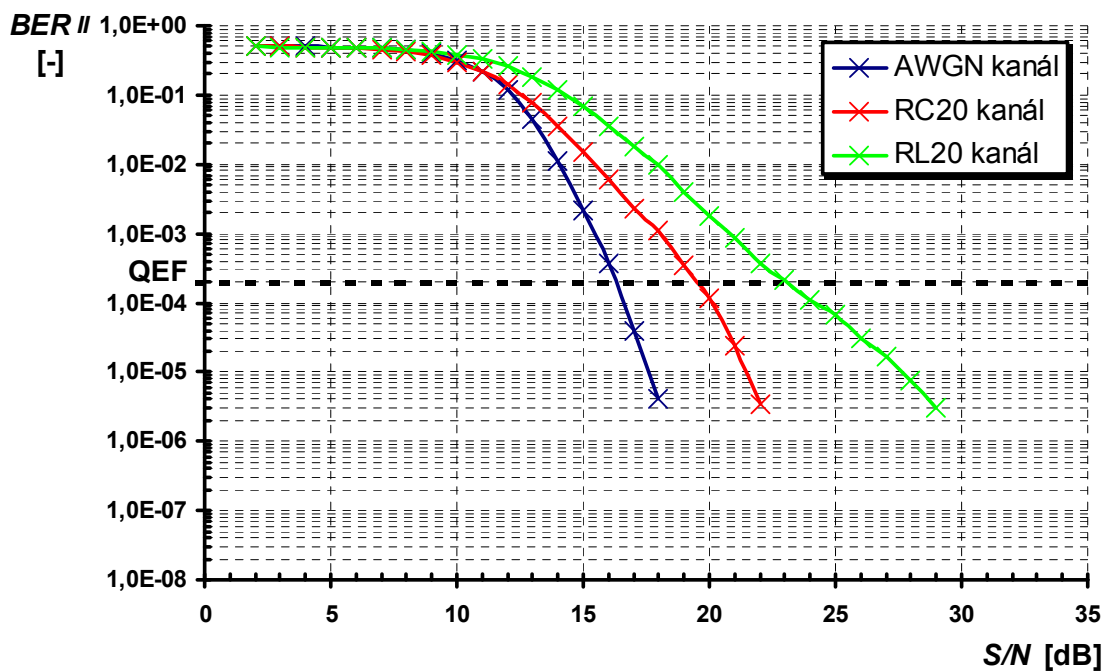
Tab. 9.1: Počítačová simulace DVB-T/H závislosti $BER = f(S/N)$ pro pevný pozemní příjem. Přenosové kanály AWGN, RC_{20} a RL_{20}

S/N	AWGN kanál		RC ₂₀ kanál		RL ₂₀ kanál	
	BER_I	BER_{II}	BER_I	BER_{II}	BER_I	BER_{II}
[dB]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
35	<1,00E-11	<1,00E-11	9,83E-05	<1,00E-11	2,03E-03	<1,00E-11
34	<1,00E-11	<1,00E-11	1,47E-04	<1,00E-11	2,36E-03	<1,00E-11
33	<1,00E-11	<1,00E-11	2,10E-04	<1,00E-11	2,79E-03	<1,00E-11
32	<1,00E-11	<1,00E-11	2,73E-04	<1,00E-11	3,24E-03	<1,00E-11
31	<1,00E-11	<1,00E-11	3,55E-04	<1,00E-11	3,91E-03	<1,00E-11
30	<1,00E-11	<1,00E-11	4,71E-04	<1,00E-11	4,62E-03	<1,00E-11
29	<1,00E-11	<1,00E-11	6,50E-04	<1,00E-11	5,31E-03	3,09E-06
28	<1,00E-11	<1,00E-11	8,58E-04	<1,00E-11	6,13E-03	7,59E-06
27	<1,00E-11	<1,00E-11	1,09E-03	<1,00E-11	6,98E-03	1,62E-05
26	<1,00E-11	<1,00E-11	1,43E-03	<1,00E-11	8,01E-03	3,02E-05
25	<1,00E-11	<1,00E-11	1,84E-03	<1,00E-11	9,37E-03	6,68E-05
24	<1,00E-11	<1,00E-11	2,53E-03	<1,00E-11	1,07E-02	1,11E-04
23	1,10E-06	<1,00E-11	3,43E-03	<1,00E-11	1,24E-02	2,19E-04
22	2,07E-05	<1,00E-11	4,74E-03	3,46E-06	1,46E-02	3,72E-04
21	1,41E-04	<1,00E-11	6,42E-03	2,40E-05	1,71E-02	8,48E-04
20	4,34E-04	<1,00E-11	8,76E-03	1,17E-04	2,06E-02	1,82E-03
19	1,29E-03	<1,00E-11	1,20E-02	3,39E-04	2,47E-02	3,89E-03
18	3,26E-03	4,17E-06	1,58E-02	1,07E-03	2,97E-02	1,00E-02
17	6,74E-03	3,80E-05	2,08E-02	2,24E-03	3,62E-02	1,76E-02
16	1,27E-02	3,72E-04	2,66E-02	6,17E-03	4,29E-02	3,51E-02
15	2,11E-02	2,14E-03	3,37E-02	1,50E-02	5,12E-02	6,96E-02
14	3,22E-02	1,14E-02	4,27E-02	3,63E-02	6,05E-02	1,21E-01
13	4,54E-02	4,49E-02	5,23E-02	7,82E-02	7,06E-02	1,85E-01
12	5,99E-02	1,17E-01	6,36E-02	1,41E-01	8,30E-02	2,63E-01
11	7,65E-02	2,22E-01	7,66E-02	2,23E-01	9,57E-02	3,30E-01
10	9,46E-02	3,22E-01	9,09E-02	3,04E-01	1,10E-01	3,86E-01
9	1,13E-01	3,97E-01	1,07E-01	3,76E-01	1,25E-01	4,30E-01
8	1,32E-01	4,45E-01	1,23E-01	4,22E-01	1,42E-01	4,58E-01
7	1,53E-01	4,71E-01	1,41E-01	4,56E-01	1,59E-01	4,75E-01
6	1,76E-01	4,87E-01	1,59E-01	4,75E-01	1,77E-01	4,85E-01
5	2,00E-01	4,95E-01	1,78E-01	4,87E-01	1,96E-01	4,91E-01
4	2,27E-01	4,98E-01	1,99E-01	4,93E-01	2,15E-01	4,96E-01
3	2,54E-01	5,00E-01	2,19E-01	4,98E-01	2,34E-01	4,96E-01
2	2,81E-01	5,00E-01	2,38E-01	4,99E-01	2,52E-01	4,99E-01

9. 1. 1. 2 Grafické závislosti pevného pozemního příjmu DVB-T/H

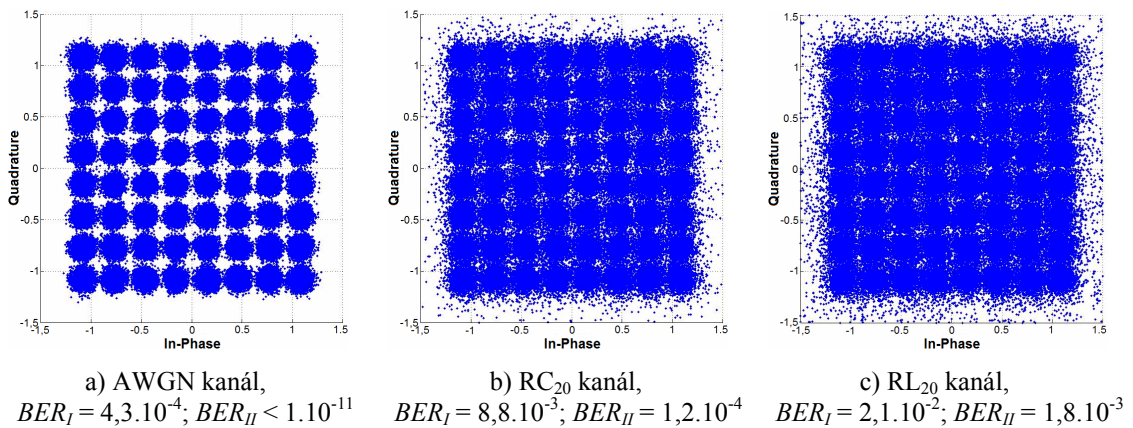


Obr. 9.2: Počítačová simulace DVB-T/H závislosti $BER_I = f(S/N)$ pro pevný pozemní příjem. Přenosové kanály AWGN, RC₂₀ a RL₂₀



Obr. 9.3: Počítačová simulace DVB-T/H závislosti $BER_{II} = f(S/N)$ pro pevný pozemní příjem. Přenosové kanály AWGN, RC₂₀ a RL₂₀

9. 1. 1. 3 Konstelační diagramy pevného pozemního příjmu DVB-T/H



Obr. 9.4: Počítačová simulace DVB-T/H I/Q diagramů po kanálové korekci a odstranění pomocných nosných. Pevný pozemní příjem, $S/N = 20\text{dB}$. Přenosové kanály: a) AWGN, b) RC₂₀, c) RL₂₀

9. 1. 1. 4 Vyhodnocení pevného pozemního příjmu DVB-T/H

Statický pozemní příjem digitálně modulovaného signálu DVB-T/H je z pohledu zabezpečení proti chybám vzniklým v přenosovém kanále nejméně náročný, a proto je signál modulován hodnotami parametrů uvedených v úvodu pevného příjmu.

Při porovnání hodnot bitových chybovostí BER z tab. 9.1 a grafických závislostí $BER=f(S/N)$ na obr. 9.2 a 9.3 použitých přenosových kanálů pro počítačovou simulaci DVB-T/H pevného pozemního příjmu se nejlépe z pohledu rušení signálu jeví AWGN přenosový kanál, kdy tímto kanálem znehodnocený přijímaný digitální signál dokáže kanálová korekce FEC_{T/H} pro poměrovou hodnotu $S/N \geq 16,0\text{dB}$ opravit na tzv. bezchybný signál QEF. Přenosový kanál RC₂₀ je více rušivý oproti AWGN přenosovému kanálu, pro QEF signál je potřeba hodnoty $S/N \geq 19,0\text{dB}$. Nejméně vhodný pro šíření signálu pozemního příjmu je RL₂₀ přenosový kanál, ve kterém je potřeba hodnoty $S/N \geq 23,0\text{dB}$ pro možnost příjmu QEF signálu po kanálové korekci FEC_{T/H}.

Porovnáním konstelačních diagramů, na obr. 9.4, jednotlivých přenosových kanálů pro hodnotu $S/N = 20\text{dB}$ je patrné, že nejvíce „kvalitní“ je AWGN přenosový kanál, ve kterém jsou jednotlivé koncové body konstelačního diagramu v jednotlivých rozhodovacích úrovních nejméně „rozostřené“. I/Q diagramy přenosových kanálů RC₂₀ a RL₂₀ jsou si velmi podobné, avšak z dosažených simulovaných hodnot bitových chybovostí BER je, lidským okem téměř nerozpoznatelný rozdíl, přenosový kanál RL₂₀ více rušivý pro DVB-T/H signál oproti RC₂₀ přenosovému kanálu.

9. 1. 2 Přenosný pozemní příjem DVB-T/H

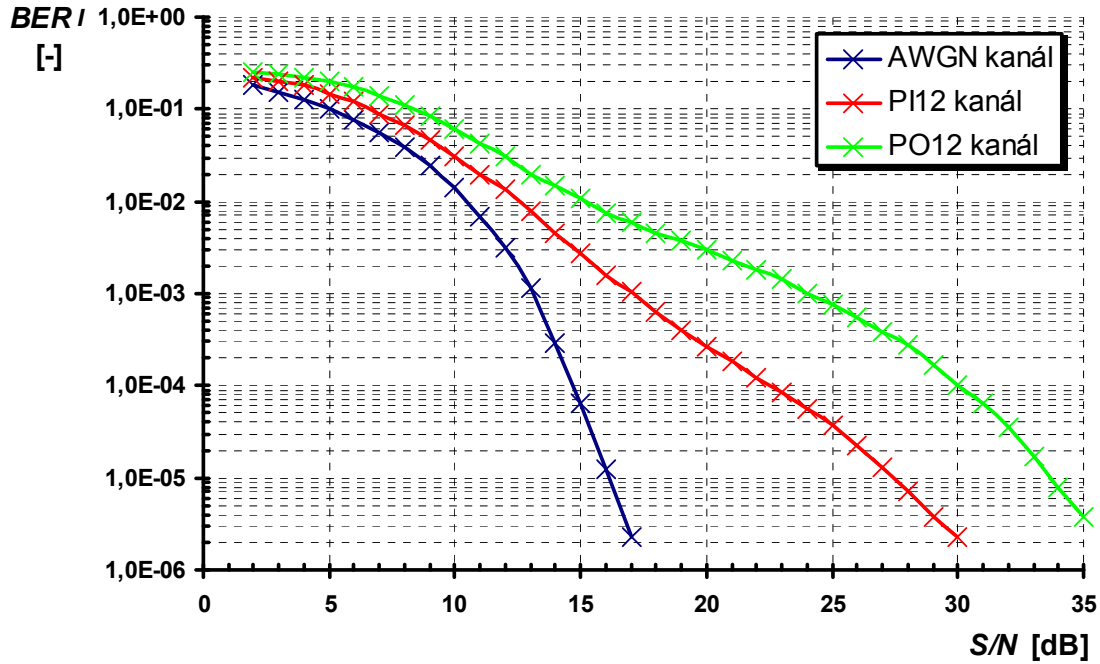
Malá rychlost, řádově jednotky km/h, pohybu přijímače vůči vysílači je charakteristická pro přenosný pozemní příjem s typickými parametry modulovaného signálu v režimu OFDM, mód 4k s modulací 16-QAM, hodnota kódového poměru $CR=2/3$ a délka ochranného intervalu $GI=1/8$ pro standard DVB-T/H. Přenosová cesta se vyznačuje zpravidla mnohacestným příjmem přímých i odražených signálů s Dopplerovým posunem, který však dostupná softwarová aplikace nepodporuje. Přenosové kanály PI_{12} a PO_{12} jsou simulovány podle definovaných hodnot v příloze C.2, bez uvedených distribucí Dopplerova spektra.

9. 1. 2. 1 Simulované hodnoty přenosného pozemního příjmu DVB-T/H

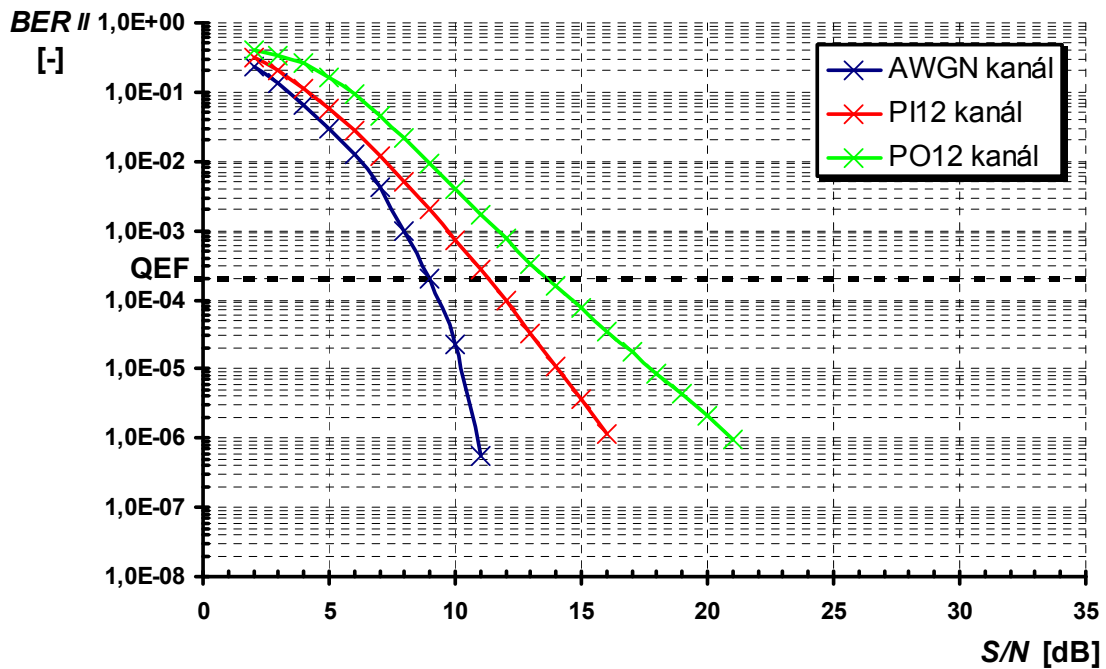
Tab. 9.2: Počítačová simulace DVB-T/H závislosti $BER = f(S/N)$ pro přenosný pozemní příjem. Přenosové kanály AWGN, PI_{12} , a PO_{12}

S/N	AWGN kanál		PI_{12} kanál		PO_{12} kanál	
	BER_I	BER_{II}	BER_I	BER_{II}	BER_I	BER_{II}
[dB]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
35	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11	3,84E-06	<1,00E-11
34	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11	7,76E-06	<1,00E-11
33	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11	1,69E-05	<1,00E-11
32	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11	3,47E-05	<1,00E-11
31	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11	6,31E-05	<1,00E-11
30	<1,00E-11	<1,00E-11	2,30E-06	<1,00E-11	1,03E-04	<1,00E-11
29	<1,00E-11	<1,00E-11	3,84E-06	<1,00E-11	1,71E-04	<1,00E-11
28	<1,00E-11	<1,00E-11	7,08E-06	<1,00E-11	2,75E-04	<1,00E-11
27	<1,00E-11	<1,00E-11	1,32E-05	<1,00E-11	3,80E-04	<1,00E-11
26	<1,00E-11	<1,00E-11	2,29E-05	<1,00E-11	5,50E-04	<1,00E-11
25	<1,00E-11	<1,00E-11	3,63E-05	<1,00E-11	7,76E-04	<1,00E-11
24	<1,00E-11	<1,00E-11	5,62E-05	<1,00E-11	1,01E-03	<1,00E-11
23	<1,00E-11	<1,00E-11	8,32E-05	<1,00E-11	1,44E-03	<1,00E-11
22	<1,00E-11	<1,00E-11	1,23E-04	<1,00E-11	1,78E-03	<1,00E-11
21	<1,00E-11	<1,00E-11	1,82E-04	<1,00E-11	2,31E-03	9,55E-07
20	<1,00E-11	<1,00E-11	2,63E-04	<1,00E-11	2,95E-03	2,09E-06
19	<1,00E-11	<1,00E-11	3,98E-04	<1,00E-11	3,77E-03	4,37E-06
18	<1,00E-11	<1,00E-11	6,46E-04	<1,00E-11	4,62E-03	8,51E-06
17	2,30E-06	<1,00E-11	1,02E-03	<1,00E-11	6,03E-03	1,74E-05
16	1,23E-05	<1,00E-11	1,55E-03	1,12E-06	7,59E-03	3,47E-05
15	6,37E-05	<1,00E-11	2,69E-03	3,72E-06	1,07E-02	7,76E-05
14	2,88E-04	<1,00E-11	4,57E-03	1,10E-05	1,48E-02	1,58E-04
13	1,13E-03	<1,00E-11	7,76E-03	3,16E-05	2,00E-02	3,31E-04
12	3,12E-03	<1,00E-11	1,35E-02	9,77E-05	3,09E-02	7,76E-04
11	6,97E-03	5,50E-07	2,00E-02	2,75E-04	4,17E-02	1,66E-03
10	1,40E-02	2,19E-05	3,16E-02	7,24E-04	6,03E-02	3,89E-03
9	2,46E-02	2,04E-04	4,57E-02	2,04E-03	8,51E-02	9,55E-03
8	3,81E-02	1,00E-03	6,61E-02	5,01E-03	1,10E-01	2,17E-02
7	5,57E-02	4,17E-03	8,91E-02	1,17E-02	1,38E-01	4,62E-02
6	7,69E-02	1,26E-02	1,23E-01	2,75E-02	1,74E-01	9,10E-02
5	1,01E-01	2,95E-02	1,48E-01	5,75E-02	2,00E-01	1,66E-01
4	1,25E-01	6,46E-02	1,86E-01	1,12E-01	2,24E-01	2,56E-01
3	1,52E-01	1,36E-01	2,00E-01	2,04E-01	2,40E-01	3,36E-01
2	1,80E-01	2,32E-01	2,19E-01	3,16E-01	2,51E-01	4,00E-01

9. 1. 2. 2 Grafické závislosti přenosného pozemního příjmu DVB-T/H

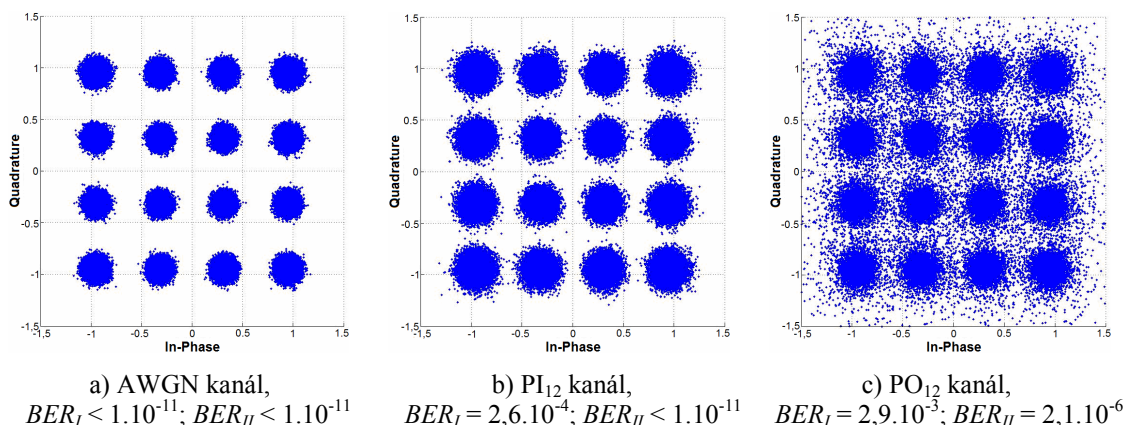


Obr. 9.5: Počítačová simulace DVB-T/H závislosti $BER_I = f(S/N)$ pro přenosný pozemní příjem. Přenosové kanály AWGN, PI₁₂ a PO₁₂



Obr. 9.6: Počítačová simulace DVB-T/H závislosti $BER_{II} = f(S/N)$ pro přenosný pozemní příjem. Přenosové kanály AWGN, PI₁₂ a PO₁₂

9. 1. 2. 3 Konstelační diagramy přenosného pozemního příjmu DVB-T/H



Obr. 9.7: Počítačová simulace DVB-T/H I/Q diagramů po kanálové korekci a odstranění pomocných nosných. Přenosný pozemní příjem, $S/N = 20$ dB. Přenosové kanály: a) AWGN, b) PI_{12} , c) PO_{12}

9. 1. 2. 4 Vyhodnocení přenosného pozemního příjmu DVB-T/H

Přenosný pozemní příjem digitálně modulovaného signálu DVB-T/H je z pohledu zabezpečení proti chybám vzniklým v přenosovém kanále více náročný oproti pevnému pozemnímu příjmu. Proto je signál modulován hodnotami parametrů uvedených v úvodu přenosného pozemního příjmu. Použitá počítačová simulační aplikace nepodporuje a neumožňuje volbu módu 4k OFDM režimu a ani zahrnutí vlivu Dopplerova posuvu odražených signálů. Simulované výsledky jsou proto pro mód 8k OFDM režimu se simulovanými přenosovými kanály bez Dopplerova posuvu, pouze s hodnotami parametrů i -tých cest, definovaných v příloze C.2.

Při porovnání hodnot bitových chybovostí BER z tab. 9.2 a grafických závislostí $BER=f(S/N)$ na obr. 9.5 a 9.6 použitých přenosových kanálů pro počítačovou simulaci DVB-T/H přenosného pozemního příjmu se nejlépe z pohledu rušení signálu jeví referenční AWGN přenosový kanál, kdy tímto kanálem znehodnocený přijímaný digitální signál dokáže kanálová korekce $FEC_{T/H}$ pro poměrovou hodnotu $S/N \geq 9,0$ dB opravit na tzv. bezchybný signál QEF. Přenosový kanál PI_{12} je více rušivý oproti AWGN přenosovému kanálu, pro QEF signál je potřeba hodnoty $S/N \geq 11,0$ dB. Nejméně vhodný pro šíření DVB-T/H signálu pozemního příjmu je PO_{12} přenosový kanál, ve kterém je potřeba hodnoty $S/N \geq 13,5$ dB pro příjem QEF signálu po $FEC_{T/H}$.

Porovnáním konstelačních diagramů, na obr. 9.7, jednotlivých přenosových kanálů pro hodnotu $S/N = 20$ dB je patrné, že „nejkvalitnější“ je AWGN přenosový kanál, ve kterém jsou jednotlivé koncové body I/Q diagramu v jednotlivých rozhodovacích úrovních nejméně „rozprostřené“ oproti přenosovému kanálu PI_{12} . Na první pohled se jako „nejhorší“ pro šíření DVB-T/H signálu jeví přenosový kanál PO_{12} , v jehož I/Q diagramu jsou jednotlivé koncové body jednoznačně nejvíce „rozostřené“.

9. 1. 3 Mobilní pozemní příjem DVB-T/H

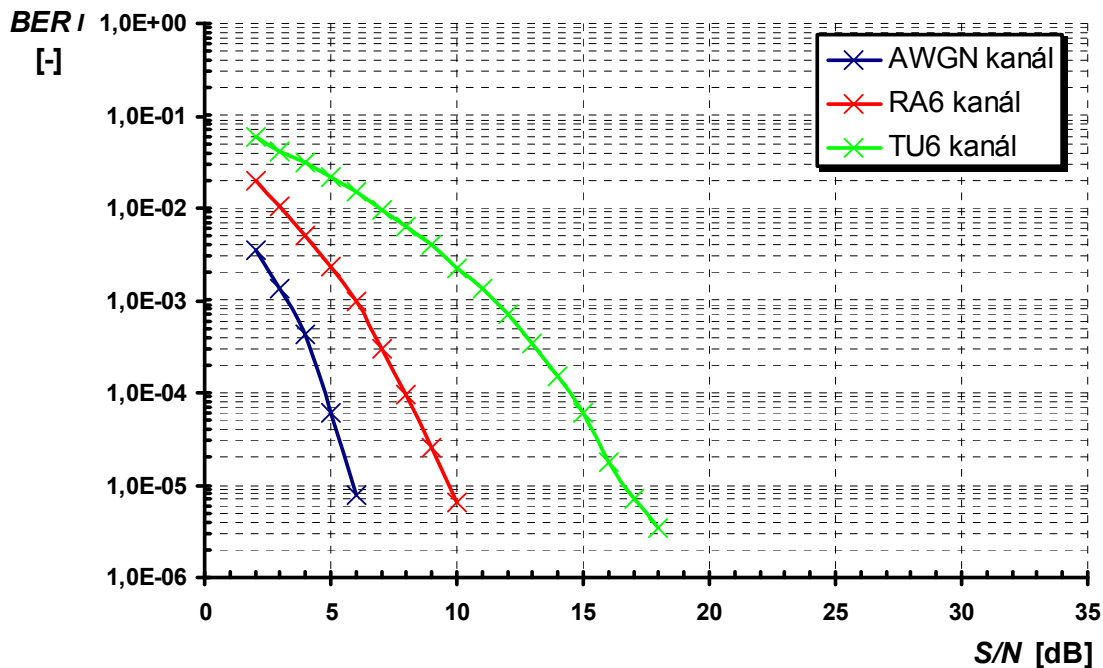
Střední až vysoká rychlost, (30 – 100) km/h, pohybu přijímače vůči vysílači je charakteristická pro mobilní pozemní příjem s typickými parametry modulovaného signálu v režimu OFDM, mód 2k s modulací QPSK, hodnota kódového poměru $CR=1/2$ a délka ochranného intervalu $GI=1/16$ pro standard DVB-T/H. Přenosová cesta se vyznačuje zpravidla mnohacestným příjmem přímých i odražených signálů s Dopplerovým posunem, který však dostupná softwarová aplikace nepodporuje. Přenosové kanály TU₆ a RA₆ jsou simulovány podle definovaných hodnot v příloze C.3, bez uvedených distribucí Dopplerova spektra.

9. 1. 3. 1 Simulované hodnoty mobilního pozemního příjmu DVB-T/H

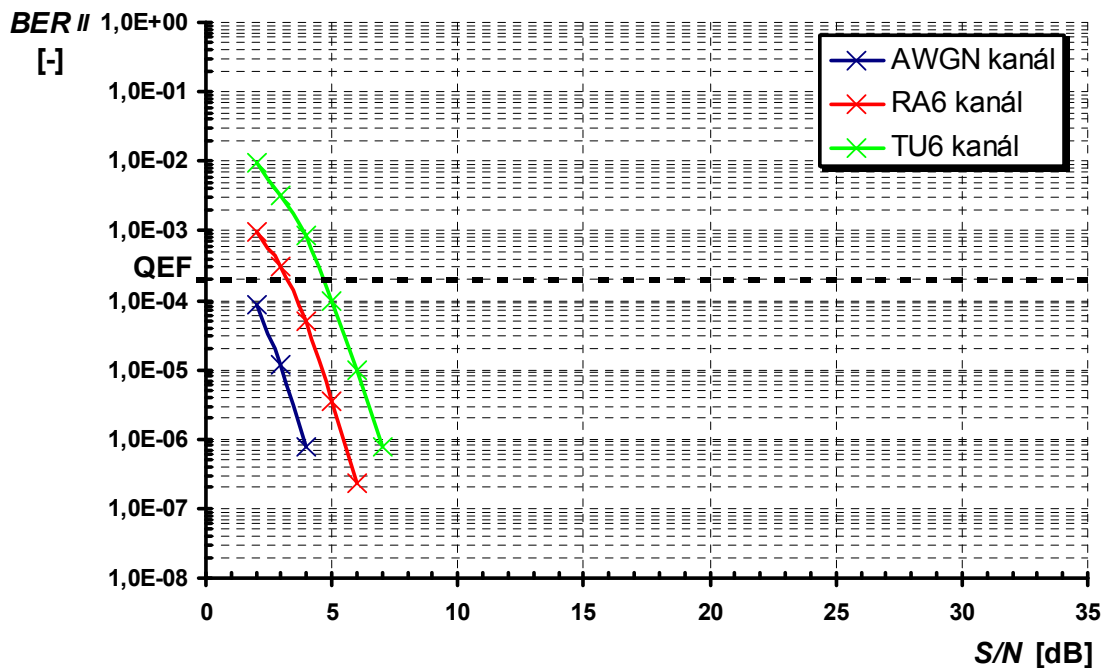
Tab. 9.3: Počítačová simulace DVB-T/H závislosti $BER = f(S/N)$ pro mobilní pozemní příjem. Přenosové kanály AWGN, RA₆ a TU₆

S/N	AWGN kanál		RA ₆ kanál		TU ₆ kanál	
	BER_I	BER_{II}	BER_I	BER_{II}	BER_I	BER_{II}
[dB]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
35	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11
34	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11
33	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11
32	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11
31	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11
30	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11
29	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11
28	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11
27	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11
26	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11
25	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11
24	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11
23	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11
22	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11
21	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11
20	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11
19	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11
18	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11	3,46E-06	<1,00E-11
17	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11	7,08E-06	<1,00E-11
16	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11	1,78E-05	<1,00E-11
15	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11	6,03E-05	<1,00E-11
14	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11	1,52E-04	<1,00E-11
13	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11	3,39E-04	<1,00E-11
12	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11	6,95E-04	<1,00E-11
11	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11	<1,00E-11	1,35E-03	<1,00E-11
10	<1,00E-11	<1,00E-11	6,46E-06	<1,00E-11	2,23E-03	<1,00E-11
9	<1,00E-11	<1,00E-11	2,57E-05	<1,00E-11	3,98E-03	<1,00E-11
8	<1,00E-11	<1,00E-11	9,55E-05	<1,00E-11	6,31E-03	<1,00E-11
7	<1,00E-11	<1,00E-11	3,02E-04	<1,00E-11	9,77E-03	7,59E-07
6	7,68E-06	<1,00E-11	9,97E-04	2,29E-07	1,51E-02	9,55E-06
5	5,99E-05	<1,00E-11	2,34E-03	3,50E-06	2,19E-02	9,55E-05
4	4,21E-04	7,59E-07	5,01E-03	4,90E-05	3,09E-02	8,29E-04
3	1,36E-03	1,15E-05	1,02E-02	3,02E-04	4,17E-02	3,31E-03
2	3,48E-03	8,71E-05	1,95E-02	9,67E-04	6,03E-02	9,67E-03

9. 1. 3. 2 Grafické závislosti mobilního pozemního příjmu DVB-T/H

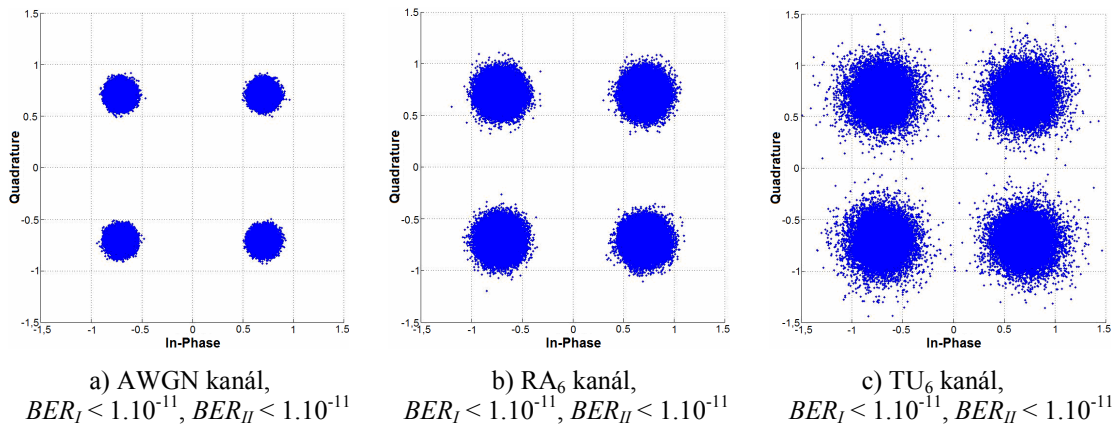


Obr. 9.8: Počítačová simulace DVB-T/H závislosti $BER_I = f(S/N)$ pro mobilní pozemní příjem. Přenosové kanály AWGN, RA₆ a TU₆



Obr. 9.9: Počítačová simulace DVB-T/H závislosti $BER_{II} = f(S/N)$ pro mobilní pozemní příjem. Přenosové kanály AWGN, RA₆ a TU₆

9. 1. 3. 3 Konstelační diagramy mobilního pozemního příjmu DVB-T/H



Obr. 9.10: Počítačová simulace DVB-T/H I/Q diagramů po kanálové korekci a odstranění pomocných nosných. Mobilní pozemní příjem, $S/N = 20\text{dB}$. Přenosové kanály: a) AWGN, b) RA₆, c) TU₆

9. 1. 3. 4 Vyhodnocení mobilního pozemního příjmu DVB-T/H

Mobilní pozemní příjem digitálně modulovaného signálu DVB-T/H je z pohledu zabezpečení proti chybám vzniklým v přenosovém kanále nejnáročnější oproti ostatním pozemním příjmům. Proto je signál nejrobustněji zabezpečen proti vlivům přenosového kanálu a modulován hodnotami parametrů uvedených v úvodu mobilního příjmu. Použitá počítačová simulační aplikace neumožňuje zahrnutí vlivu Dopplerova posuvu odražených signálů, simulované výsledky jsou proto pro simulované přenosové kanály bez Dopplerova posuvu, pouze s parametry i -tých cest, definovaných v příloze C.3.

Při porovnání hodnot bitových chybovostí BER z tab. 9.3 a grafických závislostí $BER=f(S/N)$ na obr. 9.8 a 9.9 použitých přenosových kanálů pro počítačovou simulaci DVB-T/H mobilního pozemního příjmu se nejlépe z pohledu rušení signálu jeví referenční AWGN přenosový kanál, kdy tímto kanálem znehodnocený robustně zabezpečený přijímaný digitální signál je Viterbiho dekódováním natolik zbaven chyb, že hodnota bitové chybovosti po Viterbiho dekódování BER_{II} je menší než hranice bitové chybovosti QEF signálu $BER_{II} < BER_{QEF}$, tedy $BER_{II} < 2 \cdot 10^{-4}$. Přenosový kanál RA₆ je více rušivý oproti AWGN přenosovému kanálu, pro QEF signál je zapotřebí hodnoty $S/N \geq 3,0\text{dB}$. Nejméně vhodný pro šíření signálu pozemního příjmu je TU₆ přenosový kanál, ve kterém je potřeba hodnoty $S/N \geq 4,5\text{dB}$ pro možnost příjmu QEF signálu po kanálové korekci $FEC_{T/H}$.

Porovnáním konstelačních diagramů, na obr. 9.10, jednotlivých přenosových kanálů pro hodnotu $S/N = 20\text{dB}$ je patrné, že „nejkvalitnější“ je AWGN přenosový kanál. Méně „kvalitní“ se na první pohled jeví přenosový kanál RA₆ a „kvalitně“ nejhorší je přenosový kanál TU₆, jehož koncové body I/Q diagramu jsou nejvíce „rozprostřeny“ vůči ostatním přenosovým kanálům mobilního pozemního příjmu.

9.2 Standard DVB-T2

Přenosový systém dle standardu DVB-T2 je simulován pomocí aplikace vytvořené studentem doktorského studia Ústavu radioelektroniky.

Programová aplikace obsahuje bloky kanálového kodéru odpovídající svou strukturou standardu DVB-T2 a modulátoru, jenž odpovídá standardu DVB-T/H. Dále bloky demodulátoru a kanálového dekodéru, zajišťující demodulaci a dekódování přijatého signálu s provedením protichybových korekcí a výpočtem hodnot bitových chybovostí před LDPC dekódováním BER_I a bitové chybovosti po LDPC dekódování BER_{II} . Současně s vyhodnocením hodnot bitových chybovostí BER jsou zobrazeny konstelační diagramy právě proběhlé simulace.

Součástí programové aplikace je kanálový simulátor přenosového prostředí, který umožňuje volbu základního přenosového AWGN kanálu a dále možnost definovat pro přenosové kanály s vícecestným šířením signálu zisk [-] a zpoždění [μ s] pro jednotlivé i -té cesty včetně uvedených distribucí Dopplerova spektra, uvedené v příloze C.

9.2.1 Pevný pozemní příjem DVB-T2

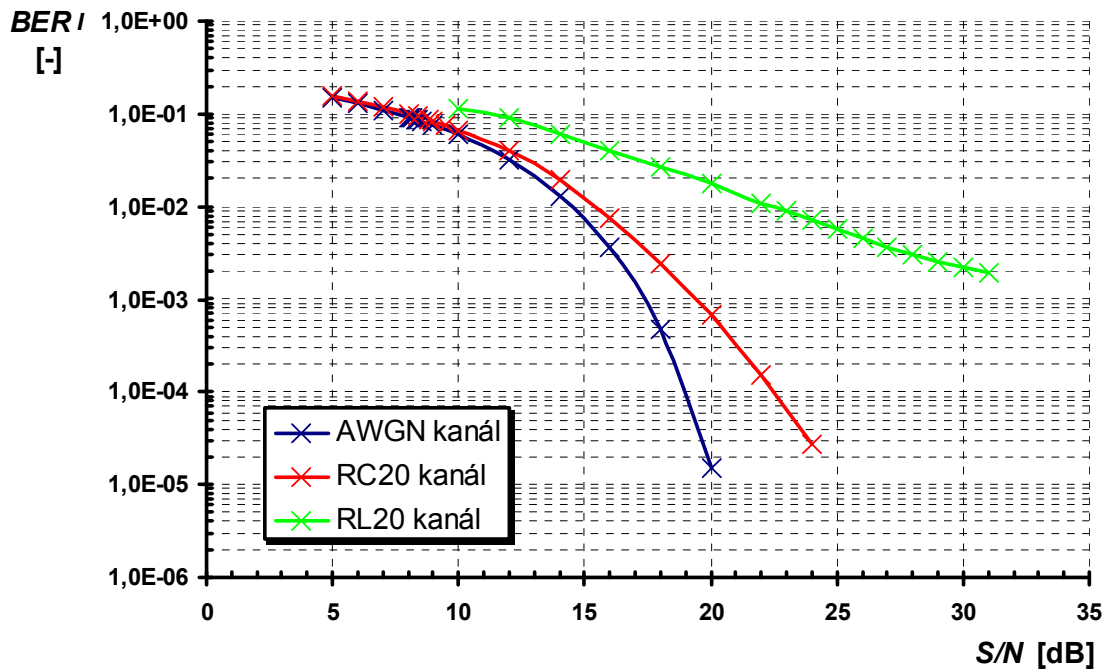
Statická poloha přijímače je charakteristická pro pevný pozemní příjem s typickými parametry modulovaného signálu v režimu OFDM, mód 8k s modulací 64-QAM, hodnota kódového poměru $CR=2/3$ a délka ochranného intervalu $GI=1/4$ pro standard DVB-T/H. Přenosová cesta bez Dopplerova posuvu se vyznačuje přímým signálem pro AWGN přenosový kanál, včetně odražených signálů pro RC_{20} přenosový kanál a pouze nepřímými odraženými signály pro RL_{20} přenosový kanál, definovány v příloze C.1.

9.2.1.1 Simulované hodnoty pevného pozemního příjmu DVB-T2

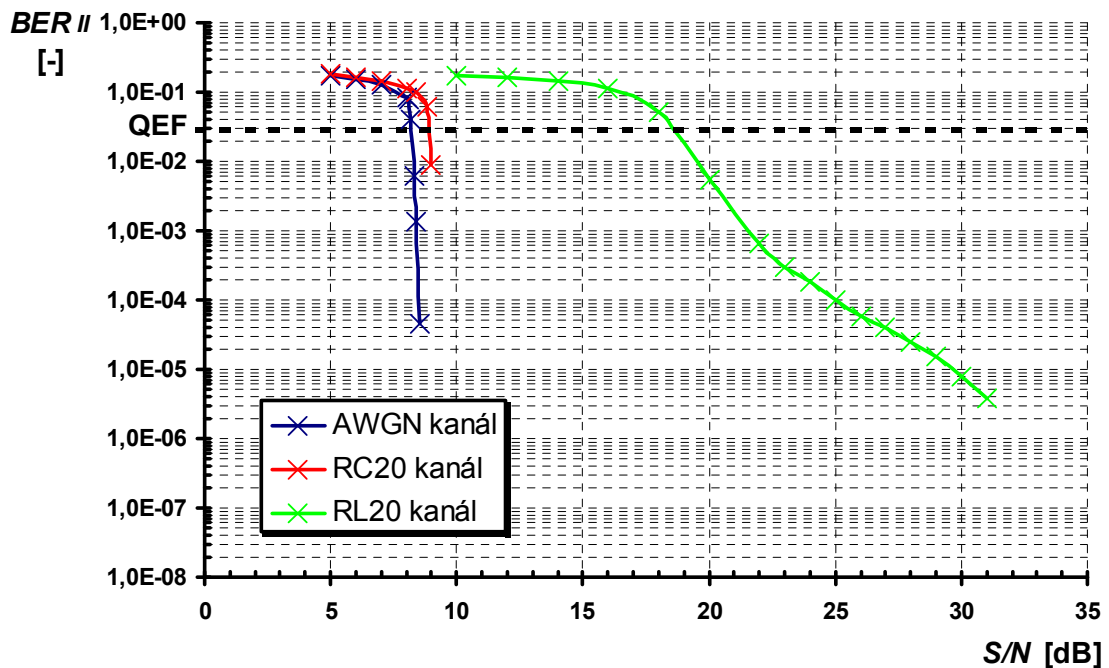
Tab. 9.4: Počítačová simulace DVB-T2 závislosti $BER = f(S/N)$ pro pevný pozemní příjem. Přenosové kanály AWGN, RC_{20} a RL_{20}

S/N	AWGN kanál		S/N	RC_{20} kanál		S/N	RL_{20} kanál	
	BER_I	BER_{II}		BER_I	BER_{II}		BER_I	BER_{II}
[dB]	[-]	[-]	[dB]	[-]	[-]	[dB]	[-]	[-]
20,0	1,54E-05	<1,00E-11	24,0	2,75E-05	<1,00E-11	31,0	1,91E-03	3,88E-06
18,0	4,80E-04	<1,00E-11	22,0	1,51E-04	<1,00E-11	30,0	2,17E-03	7,72E-06
14,0	1,32E-02	<1,00E-11	18,0	2,39E-03	<1,00E-11	28,0	3,02E-03	2,51E-05
12,0	3,21E-02	<1,00E-11	16,0	7,64E-03	<1,00E-11	27,0	3,63E-03	3,98E-05
10,0	6,05E-02	<1,00E-11	14,0	1,94E-02	<1,00E-11	26,0	4,60E-03	5,75E-05
8,5	8,33E-02	4,45E-05	10,0	6,72E-02	<1,00E-11	24,0	7,23E-03	1,82E-04
8,4	8,61E-02	1,33E-03	9,5	7,46E-02	<1,00E-11	23,0	9,19E-03	2,95E-04
8,2	8,97E-02	3,94E-02	8,8	8,59E-02	6,29E-02	20,0	1,74E-02	5,50E-03
8,0	9,19E-02	8,48E-02	8,0	9,95E-02	1,16E-01	16,0	4,08E-02	1,12E-01
7,0	1,10E-01	1,30E-01	7,0	1,18E-01	1,42E-01	14,0	6,15E-02	1,45E-01
6,0	1,28E-01	1,53E-01	6,0	1,36E-01	1,64E-01	12,0	8,89E-02	1,58E-01
5,0	1,47E-01	1,75E-01	5,0	1,55E-01	1,85E-01	10,0	1,14E-01	1,70E-01

9. 2. 1. 2 Grafické závislosti pevného pozemního příjmu DVB-T2

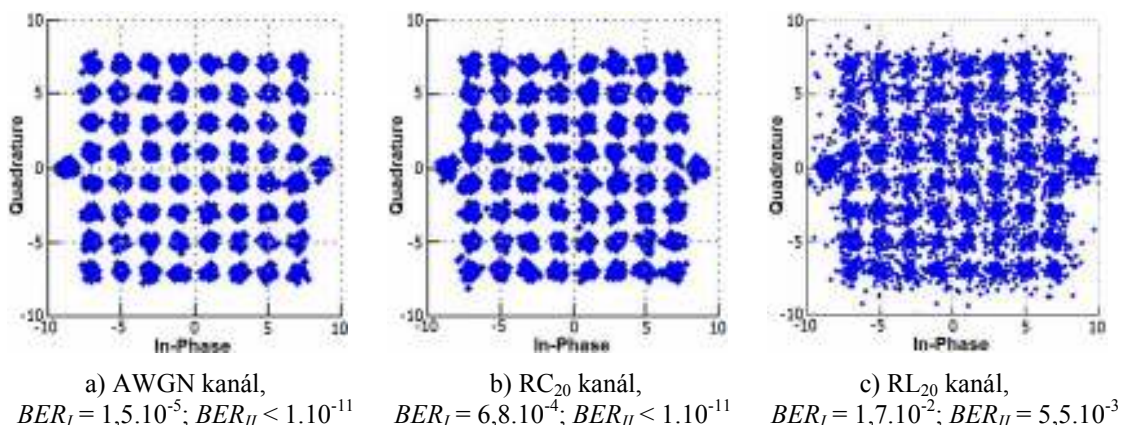


Obr. 9.11: Počítačová simulace DVB-T2 závislosti $BER_I = f(S/N)$ pro pevný pozemní příjem. Přenosové kanály AWGN, RC₂₀ a RL₂₀



Obr. 9.12: Počítačová simulace DVB-T2 závislosti $BER_{II} = f(S/N)$ pro pevný pozemní příjem. Přenosové kanály AWGN, RC₂₀ a RL₂₀

9. 2. 1. 3 Konstelační diagramy pevného pozemního příjmu DVB-T2



Obr. 9.13: Počítačová simulace DVB-T2 I/Q diagramů pevného pozemního příjmu, $S/N = 20\text{dB}$. Přenosové kanály: a) AWGN, b) RC₂₀, c) RL₂₀

9. 2. 1. 4 Vyhodnocení pevného pozemního příjmu DVB-T2

Statický pozemní příjem digitálně modulovaného signálu DVB-T2 je z pohledu zabezpečení proti chybám vzniklým v přenosovém kanále nejméně náročný, a proto je signál modulován hodnotami parametrů uvedených v úvodu pevného příjmu.

Při porovnání hodnot bitových chybovostí BER z tab. 9.4 a grafických závislostí $BER=f(S/N)$ na obr. 9.11 a 9.12 použitých přenosových kanálů pro počítačovou simulaci DVB-T2 pevného pozemního příjmu se nejlépe z pohledu rušení signálu jeví AWGN přenosový kanál, kdy tímto kanálem znehodnocený přijímaný digitální signál dokáže kanálová korekce FEC_{T2} pro poměrovou hodnotu $S/N \geq 8,0\text{dB}$ opravit na tzv. bezchybný signál QEF, jehož hodnota bitové chybovosti BER_{FEC} po celkové kanálové korekci FEC_{T2} je $BER_{\text{FEC}} \leq 1 \cdot 10^{-11}$. Hraniční hodnota bitové chybovosti QEF signálu po LDPC dekódování BER_{II} odpovídá hodnotě $BER_{\text{QEF}} = BER_{II} = 3 \cdot 10^{-2}$. Přenosový kanál RC₂₀ je nepatrně více rušivý vůči AWGN přenosovému kanálu, pro QEF signál je potřeba hodnoty $S/N \geq 9,0\text{dB}$. Výrazně nevhodný pro šíření signálu je RL₂₀ přenosový kanál, ve kterém je zapotřebí hodnoty $S/N \geq 17,0\text{dB}$ pro možnost příjmu QEF signálu po kanálové korekci FEC_{T2}.

Porovnáním konstelačních diagramů, na obr. 9.13, jednotlivých přenosových kanálů pro hodnotu $S/N = 20\text{dB}$ není na první pohled patrné, je-li přenosový AWGN kanál „kvalitnější“ oproti RC₂₀ přenosovému kanálu. Nicméně simulované hodnoty bitových chybovostí BER potvrzují, že přenosový kanál AWGN je „kvalitnější“. Zcela jistě se jako „nejhorší“ pro šíření DVB-T2 signálu jeví přenosový kanál RL₂₀, v jehož I/Q diagramu jsou jednotlivé koncové body jednoznačně nejvíce „rozprostřené“.

9. 2. 2 Přenosný pozemní příjem DVB-T2

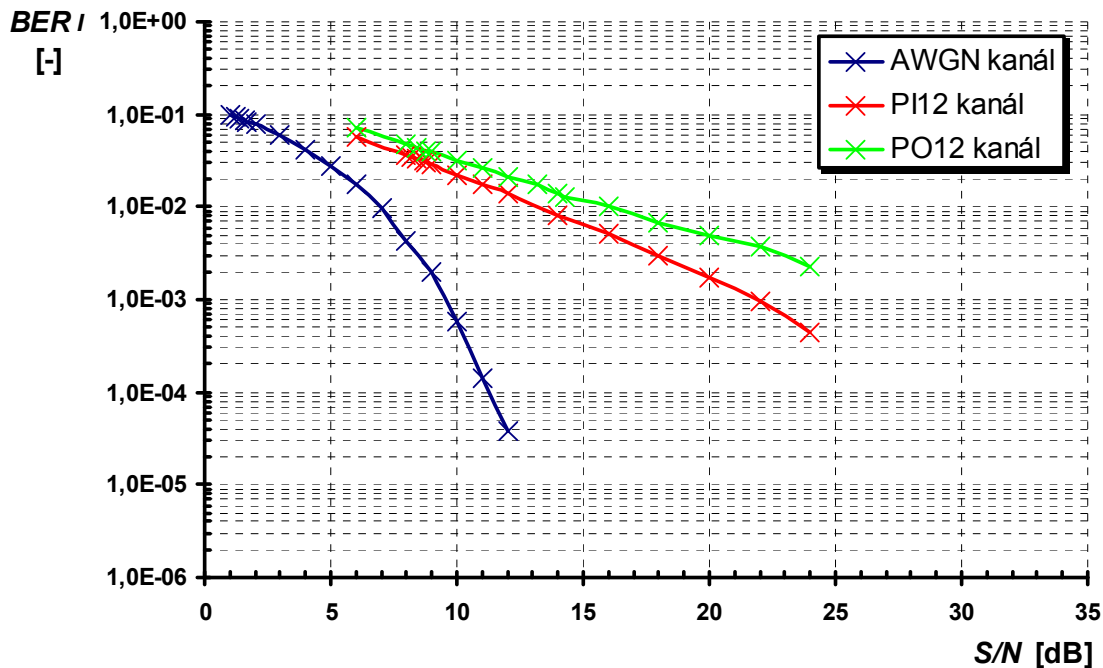
Malá rychlost, řádově jednotky km/h, pohybu přijímače vůči vysílači je charakteristická pro přenosný pozemní příjem s typickými parametry modulovaného signálu v režimu OFDM, mód 4k s modulací 16-QAM, hodnota kódového poměru $CR=2/3$ a délka ochranného intervalu $GI=1/8$ pro standard DVB-T/H. Přenosová cesta se vyznačuje zpravidla mnohacestným příjmem přímých i odražených signálů s Dopplerovým posunem, který dostupná softwarová aplikace podporuje. Data simulací odpovídají pohybu přijímače rychlostí 3km/h. Přenosové kanály PI_{12} a PO_{12} jsou simulovány podle definovaných hodnot v příloze C.2, včetně uvedených distribucí Dopplerova spektra.

9. 2. 2. 1 Simulované hodnoty přenosného pozemního příjmu DVB-T2

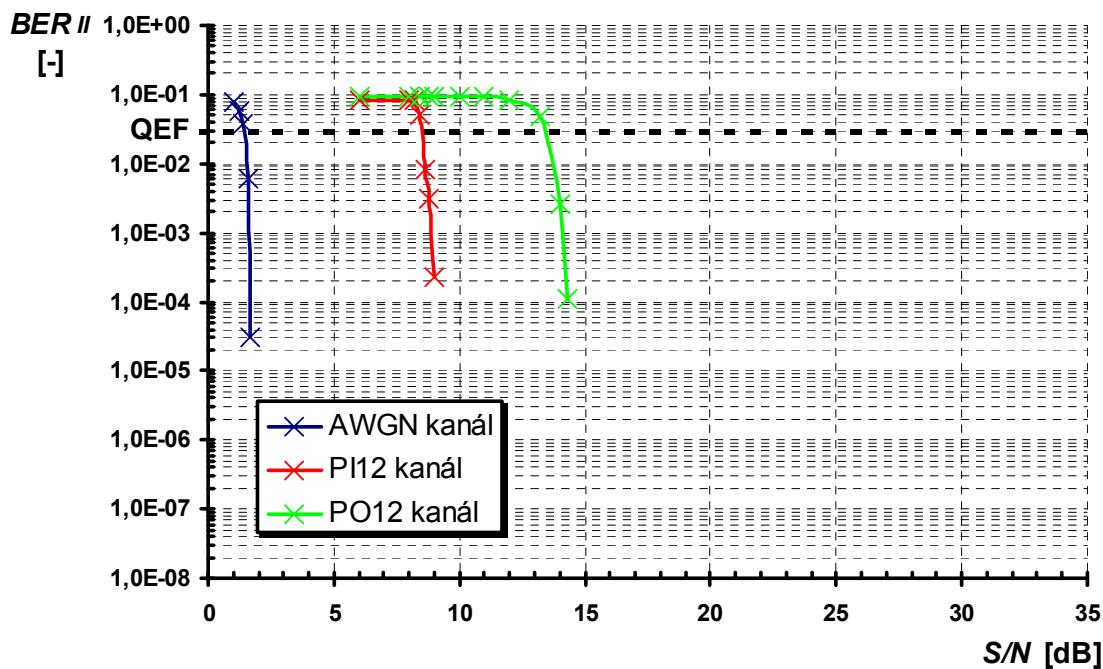
Tab. 9.5: Počítačová simulace DVB-T2 závislosti $BER = f(S/N)$ pro přenosný pozemní příjem. Přenosové kanály AWGN, PI_{12} , a PO_{12}

S/N	AWGN kanál		S/N	PI_{12} kanál		S/N	PO_{12} kanál	
	BER_I	BER_{II}		BER_I	BER_{II}		BER_I	BER_{II}
[dB]	[-]	[-]	[dB]	[-]	[-]	[dB]	[-]	[-]
12,0	3,72E-05	<1,00E-11	24,0	4,48E-04	<1,00E-11	24,0	2,30E-03	<1,00E-11
11,0	1,41E-04	<1,00E-11	22,0	9,57E-04	<1,00E-11	22,0	3,71E-03	<1,00E-11
10,0	5,79E-04	<1,00E-11	20,0	1,75E-03	<1,00E-11	20,0	4,97E-03	<1,00E-11
9,0	1,96E-03	<1,00E-11	18,0	2,99E-03	<1,00E-11	18,0	6,71E-03	<1,00E-11
8,0	4,36E-03	<1,00E-11	16,0	5,14E-03	<1,00E-11	16,0	9,96E-03	<1,00E-11
7,0	9,73E-03	<1,00E-11	14,0	8,15E-03	<1,00E-11	14,3	1,29E-02	1,10E-04
6,0	1,72E-02	<1,00E-11	12,0	1,38E-02	<1,00E-11	14,0	1,39E-02	2,51E-03
5,0	2,79E-02	<1,00E-11	11,0	1,72E-02	<1,00E-11	13,0	1,72E-02	4,90E-02
4,0	4,20E-02	<1,00E-11	10,0	2,24E-02	<1,00E-11	12,0	2,10E-02	8,51E-02
3,0	5,95E-02	<1,00E-11	9,0	2,89E-02	2,24E-04	11,0	2,61E-02	9,10E-02
2,0	7,70E-02	<1,00E-11	8,8	3,04E-02	3,09E-03	10,0	3,23E-02	9,10E-02
1,7	8,32E-02	3,02E-05	8,7	3,17E-02	8,32E-03	9,0	3,89E-02	9,10E-02
1,6	8,54E-02	6,12E-03	8,4	3,27E-02	5,13E-02	8,8	4,06E-02	9,10E-02
1,4	8,93E-02	3,76E-02	8,2	3,51E-02	8,10E-02	8,4	4,43E-02	9,10E-02
1,2	9,37E-02	5,86E-02	8,0	3,67E-02	8,20E-02	8,0	4,82E-02	9,10E-02
1,0	9,90E-02	7,72E-02	6,0	5,70E-02	8,31E-02	6,0	7,03E-02	9,10E-02

9. 2. 2. 2 Grafické závislosti přenosného pozemního příjmu DVB-T2

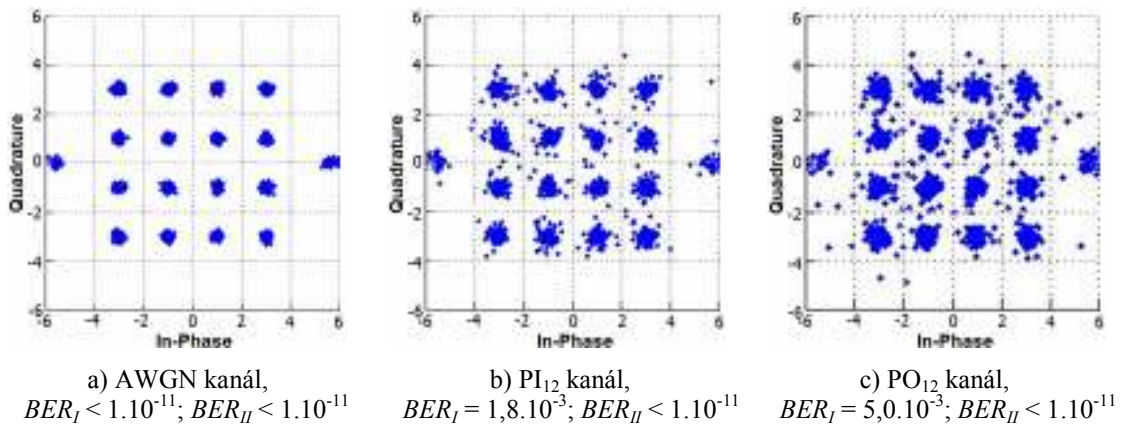


Obr. 9.14: Počítačová simulace DVB-T2 závislosti $BER_I = f(S/N)$ pro přenosný pozemní příjem. Přenosové kanály AWGN, PI_{12} a PO_{12}



Obr. 9.15: Počítačová simulace DVB-T2 závislosti $BER_{II} = f(S/N)$ pro přenosný pozemní příjem. Přenosové kanály AWGN, PI_{12} a PO_{12}

9. 2. 2. 3 Konstelační diagramy přenosného pozemního příjmu DVB-T2



Obr. 9.16: Počítačová simulace DVB-T2 I/Q diagramů přenosného pozemního příjmu, $S/N = 20\text{dB}$. Přenosové kanály: a) AWGN, b) PI_{12} , c) PO_{12}

9. 2. 2. 4 Vyhodnocení přenosného pozemního příjmu DVB-T2

Přenosný pozemní příjem digitálně modulovaného signálu DVB-T2 je z pohledu zabezpečení proti chybám vzniklým v přenosovém kanálu více náročný oproti statickému pozemnímu příjmu. Proto je signál modulován hodnotami parametrů uvedených v úvodu přenosného pozemního příjmu.

Při porovnání hodnot bitových chybovostí BER z tab. 9.5 a grafických závislostí $BER=f(S/N)$ na obr. 9.14 a 9.15 použitých přenosových kanálů pro počítačovou simulaci DVB-T2 přenosného pozemního příjmu se nejlépe z pohledu rušení signálu jeví referenční AWGN přenosový kanál, kdy tímto kanálem znehodnocený přijímaný digitální signál dokáže kanálová korekce FEC_{T2} pro poměrovou hodnotu $S/N \geq 1,5\text{dB}$ opravit na tzv. bezchybný signál QEF. Přenosový kanál PI_{12} je více rušivý oproti AWGN přenosovému kanálu, pro QEF signál je potřeba hodnoty $S/N \geq 8,0\text{dB}$. Nejméně vhodný pro šíření DVB-T/H signálu pozemního příjmu je PO_{12} přenosový kanál, ve kterém je potřeba hodnoty $S/N \geq 13,5\text{dB}$ pro možnost příjmu QEF signálu po kanálové korekci FEC_{T2} .

Porovnání konstelačních diagramů, na obr. 9.16, jednotlivých přenosových kanálů pro hodnotu $S/N = 20\text{dB}$ je patrné, že „nejkvalitnější“ je AWGN přenosový kanál, ve kterém jsou jednotlivé koncové body I/Q diagramu v jednotlivých rozhodovacích úrovních nejméně „rozprostřené“ oproti přenosovému kanálu PI_{12} a PO_{12} . Na první pohled se jako „nejhorší“ pro šíření DVB-T2 signálu jeví přenosový kanál PO_{12} , v jehož I/Q diagramu jsou jednotlivé koncové body jednoznačně nejvíce „rozostřené“.

9. 2. 3 Mobilní pozemní příjem DVB-T2

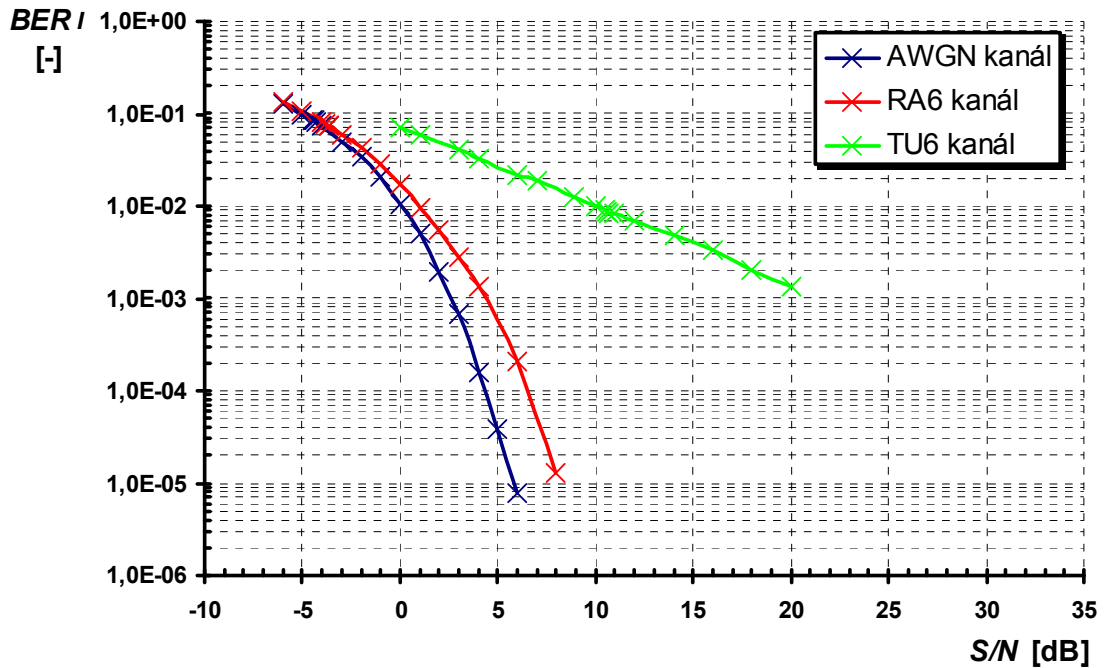
Střední až vysoká rychlost, (30 – 100) km/h, pohybu přijímače vůči vysílači je charakteristická pro mobilní pozemní příjem s typickými parametry modulovaného signálu v režimu OFDM, mód 2k s modulací QPSK, hodnota kódového poměru $CR=1/2$ a délka ochranného intervalu $GI=1/16$ pro standard DVB-T/H. Přenosová cesta se vyznačuje zpravidla mnohacestným příjmem přímých i odražených signálů s Dopplerovým posunem pro přenosový kanál RA_6 a pouze odraženými signály s Dopplerovým posunem pro přenosový kanál TU_6 . Data simulací odpovídají pro přenosový kanál TU_6 rychlosti pohybu přijímače 50km/h, pro přenosový kanál RA_6 pohybu přijímače rychlostí 100km/h. Přenosové kanály TU_6 a RA_6 jsou simulovány podle definovaných hodnot v příloze C.3, včetně uvedených distribucí Dopplerova spektra.

9. 2. 3. 1 Simulované hodnoty mobilního pozemního příjmu DVB-T2

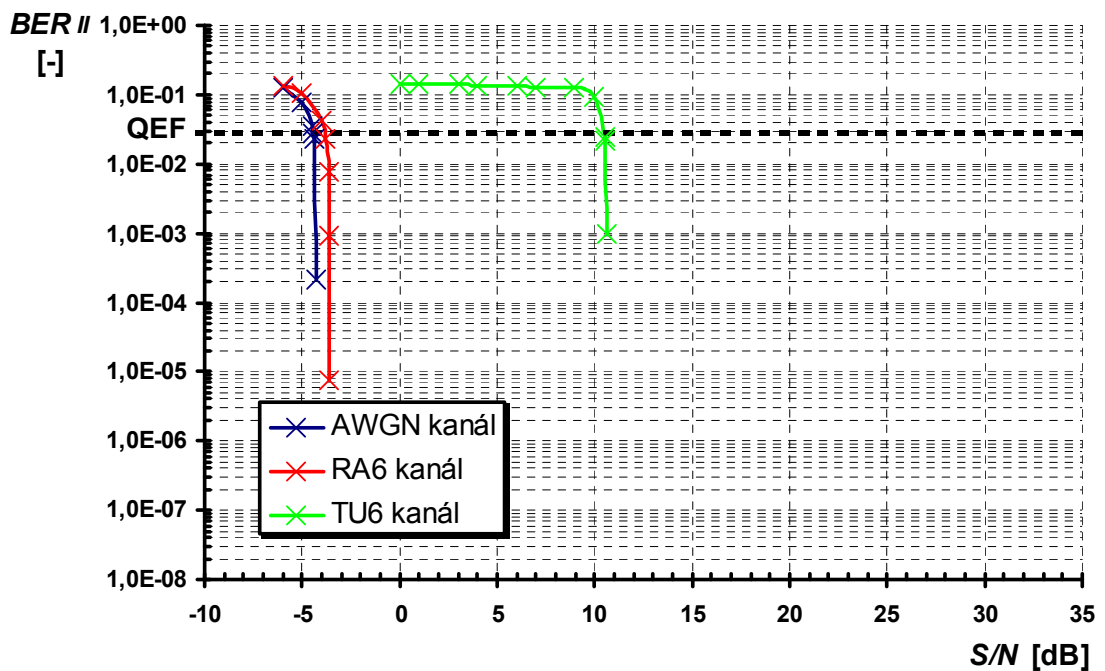
Tab. 9.6: Počítačová simulace DVB-T2 závislosti $BER = f(S/N)$ pro mobilní pozemní příjem. Přenosové kanály AWGN, RA_6 a TU_6

S/N [dB]	AWGN kanál		S/N [dB]	RA_6 kanál		S/N [dB]	TU_6 kanál	
	BER_I [-]	BER_{II} [-]		BER_I [-]	BER_{II} [-]		BER_I [-]	BER_{II} [-]
6,0	7,72E-06	<1,00E-11	8,0	1,31E-05	<1,00E-11	20,0	1,36E-03	<1,00E-11
5,0	3,86E-05	<1,00E-11	6,0	2,09E-04	<1,00E-11	18,0	2,00E-03	<1,00E-11
4,0	1,55E-04	<1,00E-11	4,0	1,33E-03	<1,00E-11	16,0	3,28E-03	<1,00E-11
3,0	6,79E-04	<1,00E-11	3,0	2,73E-03	<1,00E-11	14,0	4,92E-03	<1,00E-11
2,0	1,95E-03	<1,00E-11	2,0	5,62E-03	<1,00E-11	12,0	6,97E-03	<1,00E-11
1,0	5,12E-03	<1,00E-11	1,0	9,54E-03	<1,00E-11	11,0	8,43E-03	<1,00E-11
0,0	1,05E-02	<1,00E-11	0,0	1,75E-02	<1,00E-11	10,7	8,51E-03	1,00E-03
-1,0	2,10E-02	<1,00E-11	-1,0	2,81E-02	<1,00E-11	10,6	8,73E-03	2,20E-02
-2,0	3,44E-02	<1,00E-11	-2,0	4,37E-02	<1,00E-11	10,5	8,93E-03	2,50E-02
-3,0	5,02E-02	<1,00E-11	-3,0	6,03E-02	<1,00E-11	10,0	1,02E-02	9,12E-02
-4,0	7,50E-02	<1,00E-11	-3,5	7,41E-02	7,72E-06	8,9	1,28E-02	1,25E-01
-4,3	8,03E-02	2,08E-04	-3,6	7,36E-02	9,26E-04	7,0	1,86E-02	1,30E-01
-4,4	8,34E-02	2,35E-02	-3,7	7,40E-02	7,84E-03	6,0	2,22E-02	1,35E-01
-4,5	8,52E-02	2,83E-02	-3,8	7,73E-02	2,26E-02	4,0	3,32E-02	1,38E-01
-4,5	8,69E-02	3,61E-02	-4,0	8,14E-02	4,16E-02	3,0	4,05E-02	1,40E-01
-5,0	9,95E-02	7,58E-02	-5,0	1,07E-01	1,03E-01	1,0	6,03E-02	1,43E-01
-6,0	1,27E-01	1,23E-01	-6,0	1,34E-01	1,33E-01	0,0	7,21E-02	1,45E-01

9. 2. 3. 2 Grafické závislosti mobilního pozemního příjmu DVB-T2

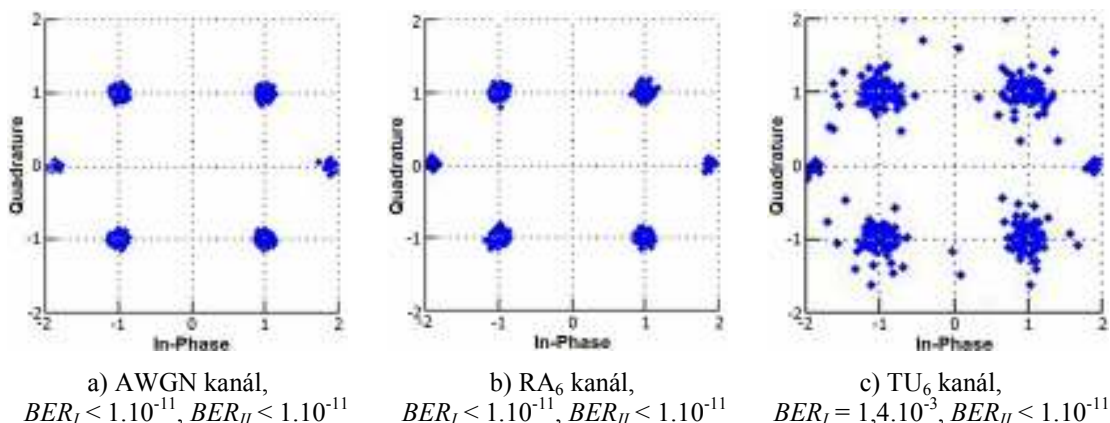


Obr. 9.17: Počítačová simulace DVB-T2 závislosti $BER_I = f(S/N)$ pro mobilní pozemní příjem. Přenosové kanály AWGN, RA₆ a TU₆



Obr. 9.18: Počítačová simulace DVB-T2 závislosti $BER_{II} = f(S/N)$ pro mobilní pozemní příjem. Přenosové kanály AWGN, RA₆ a TU₆

9. 2. 3. 3 Konstelační diagramy mobilního pozemního příjmu DVB-T2



Obr. 9.19: Počítačová simulace DVB-T2 I/Q diagramů mobilního pozemního příjmu, $S/N = 20\text{dB}$. Přenosové kanály: a) AWGN, b) RA₆, c) TU₆

9. 2. 3. 4 Vyhodnocení mobilního pozemního příjmu DVB-T2

Mobilní pozemní příjem digitálně modulovaného signálu DVB-T2 je z pohledu zabezpečení proti chybám vzniklým v přenosovém kanále nejnáročnější oproti statickému a přenosnému pozemnímu příjmu. Proto je signál nejrobustněji zabezpečen proti vlivům přenosového kanálu a modulován hodnotami parametrů uvedených v úvodu mobilního pozemního příjmu.

Při porovnání hodnot bitových chybovostí BER z tab. 9.6 a grafických závislostí $BER=f(S/N)$ na obr. 9.17 a 9.18 použitých přenosových kanálů pro počítačovou simulaci DVB-T2 mobilního pozemního příjmu se nejlépe z pohledu rušení signálu jeví referenční AWGN přenosový kanál, kdy tímto kanálem znehodnocený přijímaný digitální signál dokáže kanálová korekce FEC_{T2} pro poměrovou hodnotu $S/N \geq -5,0\text{dB}$ opravit na tzv. bezchybný signál QEF. Přenosový kanál RA₆ je nepatrně více rušivý oproti AWGN přenosovému kanálu, pro QEF signál je potřeba hodnoty $S/N \geq -4,0\text{dB}$. Záporné hodnoty poměru S/N ukazují, že lze DVB-T2 signál zcela „maskovaný“ šumem po kanálové korekci FEC_{T2} bezchybně přijmout. Nejméně vhodný pro šíření DVB-T2 signálu mobilního příjmu je TU₆ přenosový kanál, ve kterém je potřeba hodnoty $S/N \geq 10,0\text{dB}$ pro možnost příjmu QEF signálu po kanálové korekci FEC_{T2}.

Porovnáním konstelačních diagramů, na obr. 9.19, jednotlivých přenosových kanálů pro hodnotu $S/N = 20\text{dB}$ není na první pohled patrné, je-li přenosový AWGN kanál „kvalitnější“ oproti RA₆ přenosovému kanálu. Nicméně simulované hodnoty bitových chybovostí BER potvrzují, že přenosový kanál AWGN je „kvalitnější“. Zcela jistě se jako „nejhorší“ pro šíření DVB-T2 signálu jeví přenosový kanál TU₆, v jehož I/Q diagramu jsou jednotlivé koncové body jednoznačně nejvíce „rozprostřené“.

9. 2. 4 Pevný pozemní příjem DVB-T2

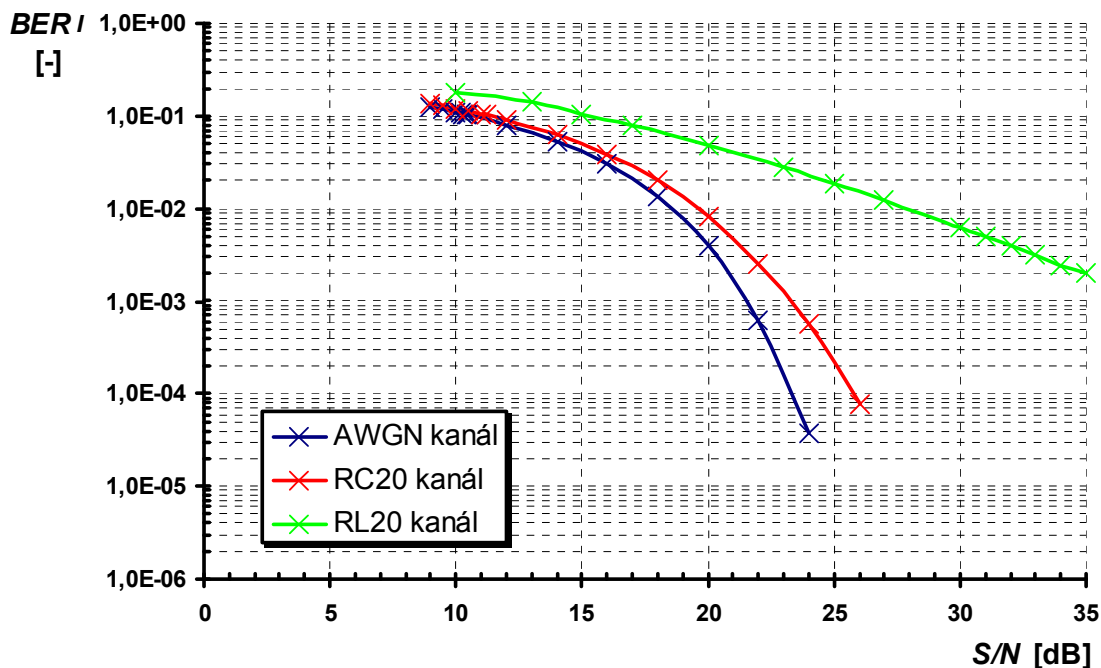
Statická poloha přijímače je charakteristická pro pevný pozemní příjem s typickými parametry modulovaného signálu v režimu OFDM, mód 32k s modulací 256-QAM, hodnota kódového poměru $CR=3/5$ a délka ochranného intervalu $GI=1/16$ pro standard DVB-T2. Přenosová cesta bez Dopplerova posuvu se vyznačuje přímým signálem pro AWGN přenosový kanál, včetně odražených signálů pro RC_{20} přenosový kanál a pouze nepřímými odraženými signály pro RL_{20} přenosový kanál, definovány v příloze C.1.

9. 2. 4. 1 Simulované hodnoty pevného pozemního příjmu DVB-T2

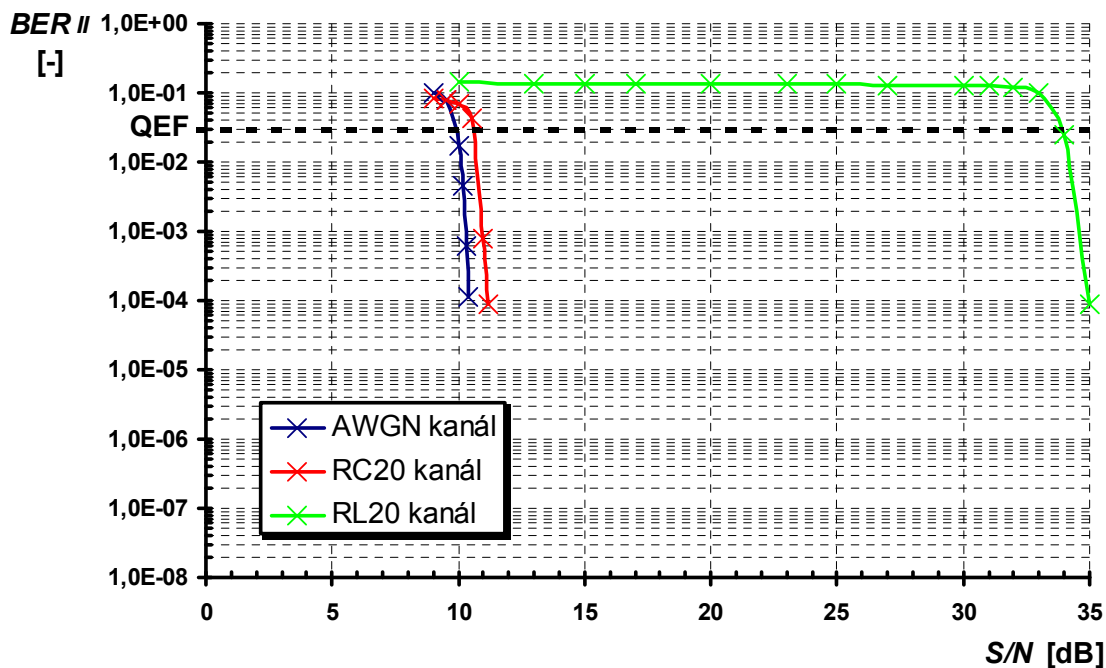
Tab. 9.7: Počítačová simulace DVB-T2 závislosti $BER = f(S/N)$ pro pevný pozemní příjem. Přenosové kanály AWGN, RC_{20} a RL_{20}

S/N	AWGN kanál		S/N	RC_{20} kanál		S/N	RL_{20} kanál	
	BER_I	BER_{II}		BER_I	BER_{II}		BER_I	BER_{II}
[dB]	[-]	[-]	[dB]	[-]	[-]	[dB]	[-]	[-]
24,0	3,79E-05	<1,00E-11	26,0	7,91E-05	<1,00E-11	35,0	2,00E-03	9,00E-05
22,0	6,27E-04	<1,00E-11	24,0	5,59E-04	<1,00E-11	34,0	2,45E-03	2,48E-02
20,0	3,91E-03	<1,00E-11	22,0	2,50E-03	<1,00E-11	33,0	3,17E-03	1,00E-01
18,0	1,34E-02	<1,00E-11	20,0	8,21E-03	<1,00E-11	32,0	4,03E-03	1,20E-01
16,0	3,09E-02	<1,00E-11	18,0	1,99E-02	<1,00E-11	31,0	5,00E-03	1,25E-01
14,0	5,38E-02	<1,00E-11	16,0	3,81E-02	<1,00E-11	30,0	6,31E-03	1,27E-01
12,0	8,04E-02	<1,00E-11	14,0	6,17E-02	<1,00E-11	27,0	1,21E-02	1,30E-01
10,5	1,02E-01	<1,00E-11	12,0	8,92E-02	<1,00E-11	25,0	1,84E-02	1,32E-01
10,4	1,04E-01	1,10E-04	11,2	1,03E-01	8,65E-05	23,0	2,75E-02	1,33E-01
10,3	1,05E-01	6,23E-04	11,0	1,04E-01	8,03E-04	20,0	4,83E-02	1,34E-01
10,2	1,07E-01	4,50E-03	10,5	1,12E-01	4,37E-02	17,0	7,89E-02	1,35E-01
10,0	1,10E-01	1,69E-02	10,0	1,20E-01	6,93E-02	15,0	1,06E-01	1,37E-01
9,5	1,18E-01	7,72E-02	9,5	1,28E-01	7,71E-02	13,0	1,40E-01	1,39E-01
9,0	1,26E-01	1,01E-01	9,0	1,37E-01	8,43E-02	10,0	1,81E-01	1,41E-01

9. 2. 4. 2 Grafické závislosti pevného pozemního příjmu DVB-T2

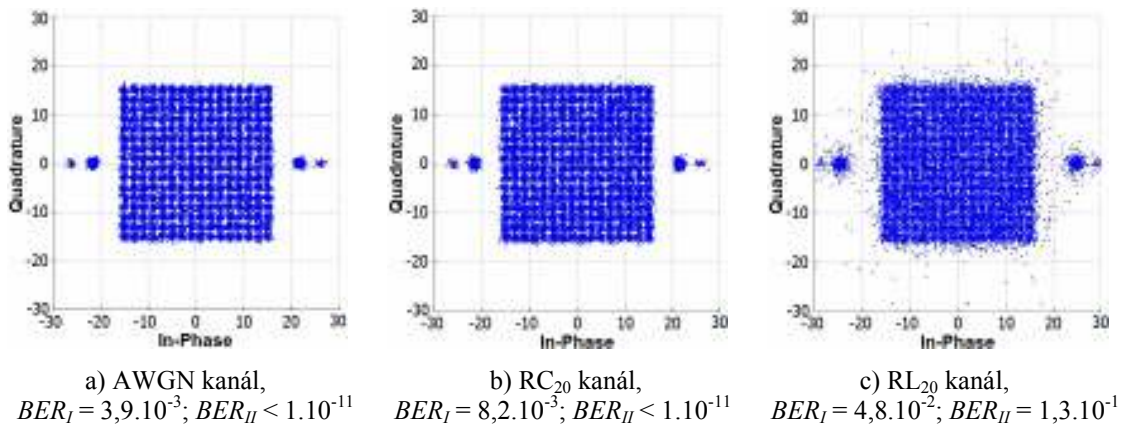


Obr. 9.20: Počítačová simulace DVB-T2 závislosti $BER_I = f(S/N)$ pro pevný pozemní příjem. Přenosové kanály AWGN, RC₂₀ a RL₂₀



Obr. 9.21: Počítačová simulace DVB-T2 závislosti $BER_{II} = f(S/N)$ pro pevný pozemní příjem. Přenosové kanály AWGN, RC₂₀ a RL₂₀

9. 2. 4. 3 Konstelační diagramy pevného pozemního příjmu DVB-T2



Obr. 9.22: Počítačová simulace DVB-T2 I/Q diagramů pevného pozemního příjmu, $S/N = 20\text{dB}$. Přenosové kanály: a) AWGN, b) RC₂₀, c) RL₂₀

9. 2. 4. 4 Vyhodnocení pevného pozemního příjmu DVB-T2

Statický pozemní příjem digitálně modulovaného signálu DVB-T2 je z pohledu zabezpečení proti chybám vzniklým v přenosovém kanále nejméně náročný, a proto je signál modulován hodnotami parametrů uvedených v úvodu pevného příjmu, které odpovídají pilotním testům standardu DVB-T2 na území ČR.

Při porovnání hodnot bitových chybovostí BER z tab. 9.7 a grafických závislostí $BER=f(S/N)$ na obr. 9.20 a 9.21 použitých přenosových kanálů pro počítačovou simulaci DVB-T2 pevného pozemního příjmu se nejlépe z pohledu rušení signálu jeví AWGN přenosový kanál, kdy tímto kanálem znehodnocený přijímaný digitální signál dokáže kanálová korekce FEC_{T2} pro poměrovou hodnotu $S/N \geq 9,5\text{dB}$ opravit na tzv. bezchybný signál QEF. Přenosový kanál RC₂₀ je nepatrně více rušivý vůči AWGN přenosovému kanálu, pro QEF signál je potřeba hodnoty $S/N \geq 11,0\text{dB}$. Výrazně nevhodný pro šíření signálu je RL₂₀ přenosový kanál, ve kterém je zapotřebí hodnoty $S/N \geq 33,5\text{dB}$ pro možnost příjmu QEF signálu po kanálové korekci FEC_{T2}.

Porovnáním konstelačních diagramů, na obr. 9.22, jednotlivých přenosových kanálů pro hodnotu $S/N = 20\text{dB}$ není na první pohled patrné, je-li přenosový AWGN kanál „kvalitnější“ oproti RC₂₀ přenosovému kanálu. Nicméně simulované hodnoty bitových chybovostí BER potvrzují, že přenosový kanál AWGN je „kvalitnější“. Zcela jistě se jako „nejhorší“ pro šíření DVB-T2 signálu jeví přenosový kanál RL₂₀, v jehož I/Q diagramu jsou jednotlivé koncové body nejvíce „rozprostřené“.

10 SHRNU TÍ

Porovnání dosažených výsledků hodnot minimálního poměru S/N pro QEF signál po kanálové korekci FEC, bitových chybovostí BER , grafická zobrazení závislosti $BER_I = f(S/N)$, $BER_{II} = f(S/N)$ a konstelačních diagramů laboratorního měření a počítačových simulací konkrétních přenosových kanálů jednotlivých pozemních příjmů.

10.1 S/N pro QEF signál po kanálové korekci FEC

Porovnání dosažených výsledků laboratorního měření a počítačových simulací hodnot poměru S/N pro bezchybný signál QEF po kanálové korekci FEC. Hodnota hranice bitové chybovosti po Viterbiho dekódování BER_{II} bezchybného signálu QEF pro standard DVB-T/H je $BER_{QEF} = BER_{II} = 2 \cdot 10^{-4}$. Pro standard DVB-T2 je hranice bitové chybovosti po LDPC dekódování BER_{II} bezchybného signálu QEF $BER_{QEF} = BER_{II} = 3 \cdot 10^{-2}$. Tab. 10.1 obsahuje minimální hodnoty S/N , odpovídající bezchybnému signálu QEF po kanálové korekci FEC.

Tab. 10.1: Minimální hodnoty S/N odpovídající QEF signálu po FEC konkrétních přenosových kanálů jednotlivých pozemních příjmů

Minimální hodnoty S/N [dB] pro QEF signál po FEC								
Přenosový kanál								
AWGN	RC ₂₀	RL ₂₀	AWGN	PI ₁₂	PO ₁₂	AWGN	RA ₆	TU ₆
ETSI EN 300 744 (DVB-T/H), 2009								
16,7	17,3	20,3	-	-	-	-	-	-
Laboratorní měření DVB-T/H								
19,0	22,0	24,0	14,0	16,0	17,5	5,0	6,0	7,0
Počítačová simulace DVB-T/H								
16,0	19,0	23,0	9,0	11,0	13,5	1,5	3,0	4,5
ETSI TR 102 831 (DVB-T2), 2009								
13,5 ¹⁾ 16,1	13,8 ¹⁾ 16,3	15,6 ¹⁾ 18,3	-	-	-	-	-	-
Počítačová simulace DVB-T2								
8,0 ¹⁾ 9,5	9,0 ¹⁾ 11,0	17,0 ¹⁾ 33,5	²⁾ 1,5	²⁾ 8,0	²⁾ 13,5	-5,0	-4,0	10,0
Pevný pozemní příjem 64-QAM, 8k ¹⁾ 256-QAM, 32k $CR = 2/3, GI = 1/4$ ¹⁾ $CR = 3/5, GI = 1/16$ AWGN, RC ₂₀ , RL ₂₀			Přenosný pozemní příjem 16-QAM, 8k, ²⁾ (4k) $CR = 2/3, GI = 1/8$ AWGN, PI ₁₂ , PO ₁₂			Mobilní pozemní příjem QPSK, 2k $CR = 1/2, GI = 1/16$ AWGN, RA ₆ , TU ₆		

10.2 Bitové chybovosti BER přenosových kanálů pozemního příjmu

Porovnání dosažených výsledků laboratorního měření a počítačových simulací hodnot bitových chybovostí před Viterbiho dekódování BER_I a po Viterbiho dekódování BER_{II} pro standard DVB-T/H a bitových chybovostí před LDPC dekódováním BER_I a po LDPC dekódování BER_{II} pro standard DVB-T2 obsahuje tab. 10.2. Uvedené bitové chybovosti BER pro hodnotu $S/N = 20\text{dB}$ se vztahují ke konkrétním přenosovým kanálům jednotlivých pozemních příjmů.

Tab. 10.2: Bitové chybovosti BER pro $S/N = 20\text{dB}$ přenosových kanálů pozemního příjmu

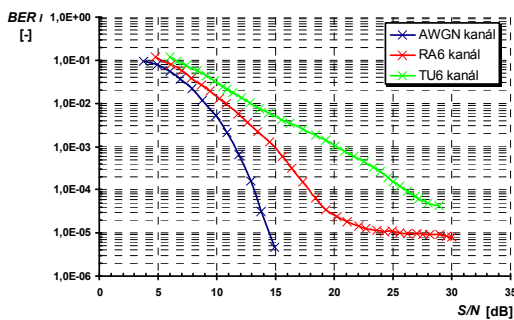
Standard	Parametry modulace	Přenosový kanál	Počítačová simulace		Laboratorní měření	
			BER_I	BER_{II}	BER_I	BER_{II}
			[-]	[-]	[-]	[-]
DVB-T/H	64-QAM 8k 2/3, 1/4	AWGN	$4,3 \cdot 10^{-4}$	$<1,0 \cdot 10^{-11}$	$3,4 \cdot 10^{-2}$	$6,6 \cdot 10^{-5}$
		RC ₂₀	$8,8 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$6,5 \cdot 10^{-2}$	$2,4 \cdot 10^{-3}$
		RL ₂₀	$2,1 \cdot 10^{-2}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$7,9 \cdot 10^{-2}$	$6,7 \cdot 10^{-3}$
	16-QAM 8k 2/3, 1/8	AWGN	$<1,0 \cdot 10^{-11}$	$<1,0 \cdot 10^{-11}$	$5,7 \cdot 10^{-4}$	$<1,0 \cdot 10^{-11}$
		PI ₁₂	$2,6 \cdot 10^{-4}$	$<1,0 \cdot 10^{-11}$	$4,2 \cdot 10^{-3}$	$<1,0 \cdot 10^{-11}$
		PO ₁₂	$2,9 \cdot 10^{-3}$	$2,1 \cdot 10^{-6}$	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$
	QPSK 2k 1/2, 1/16	AWGN	$<1,0 \cdot 10^{-11}$	$<1,0 \cdot 10^{-11}$	$<1,0 \cdot 10^{-11}$	$<1,0 \cdot 10^{-11}$
		RA ₆	$<1,0 \cdot 10^{-11}$	$<1,0 \cdot 10^{-11}$	$2,4 \cdot 10^{-5}$	$<1,0 \cdot 10^{-11}$
		TU ₆	$<1,0 \cdot 10^{-11}$	$<1,0 \cdot 10^{-11}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$<1,0 \cdot 10^{-11}$
DVB-T2	64-QAM 8k 2/3, 1/4	AWGN	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$<1,0 \cdot 10^{-11}$	Pevný pozemní příjem 64-QAM, 8k 256-QAM, 32k $CR = 2/3, GI = 1/4$ $CR = 3/5, GI = 1/16$ AWGN, RC ₂₀ , RL ₂₀	
		RC ₂₀	$6,8 \cdot 10^{-4}$	$<1,0 \cdot 10^{-11}$		
		RL ₂₀	$1,7 \cdot 10^{-2}$	$5,5 \cdot 10^{-3}$		
	16-QAM 4k 2/3, 1/8	AWGN	$<1,0 \cdot 10^{-11}$	$<1,0 \cdot 10^{-11}$	Přenosný pozemní příjem 16-QAM, 4k (8k) $CR = 2/3, GI = 1/8$ AWGN, PI ₁₂ , PO ₁₂	
		PI ₁₂	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$<1,0 \cdot 10^{-11}$		
		PO ₁₂	$5,0 \cdot 10^{-3}$	$<1,0 \cdot 10^{-11}$		
	QPSK 2k 1/2, 1/16	AWGN	$<1,0 \cdot 10^{-11}$	$<1,0 \cdot 10^{-11}$	Mobilní pozemní příjem QPSK, 2k $CR = 1/2, GI = 1/16$ AWGN, RA ₆ , TU ₆	
		RA ₆	$<1,0 \cdot 10^{-11}$	$<1,0 \cdot 10^{-11}$		
		TU ₆	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$<1,0 \cdot 10^{-11}$		
	256-QAM 32k 3/5, 1/16	AWGN	$3,9 \cdot 10^{-3}$	$<1,0 \cdot 10^{-11}$		
		RC ₂₀	$8,2 \cdot 10^{-3}$	$<1,0 \cdot 10^{-11}$		
		RL ₂₀	$4,8 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-1}$		

10.3 Grafické závislosti $BER_I = f(S/N)$, $BER_{II} = f(S/N)$

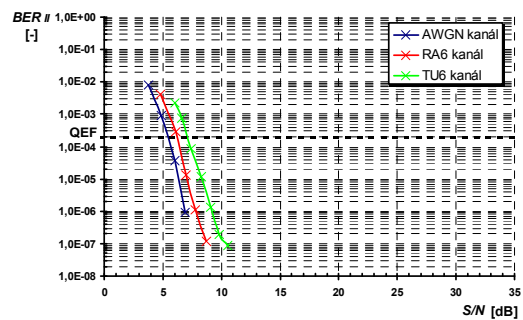
Porovnání dosažených výsledků laboratorního měření a počítačových simulací grafických závislostí $BER_I = f(S/N)$ a $BER_{II} = f(S/N)$ konkrétních přenosových kanálů jednotlivých pozemních příjmů.

10.3.1 Přenosové kanály AWGN, RA₆, TU₆ mobilního pozemního příjmu

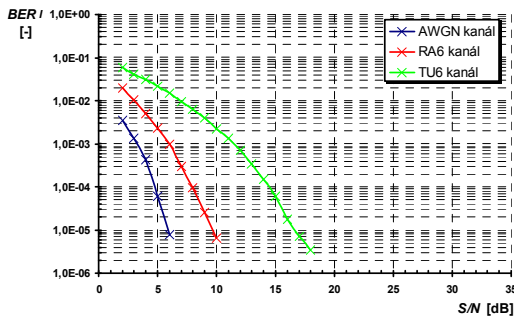
Parametry modulovaného signálu v režimu OFDM, mód 2k s modulací QPSK, hodnota kódového poměru $CR=1/2$ a délka ochranného intervalu $GI=1/16$ pro standard DVB-T/H.



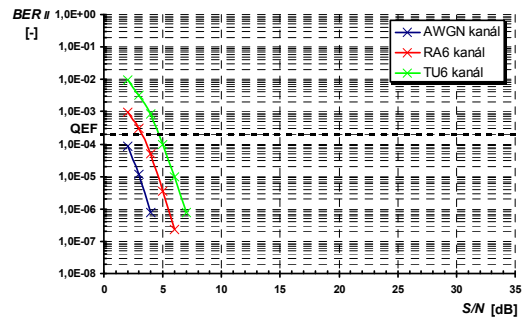
a) Laboratorní měření DVB-T/H závislosti $BER_I = f(S/N)$.



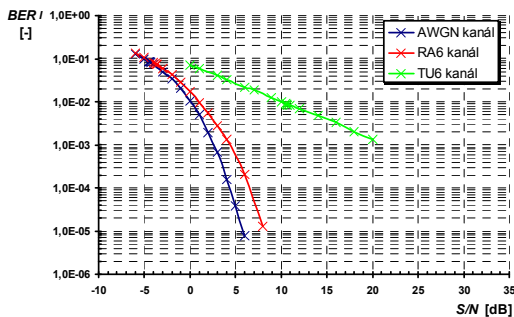
a) Laboratorní měření DVB-T/H závislosti $BER_{II} = f(S/N)$.



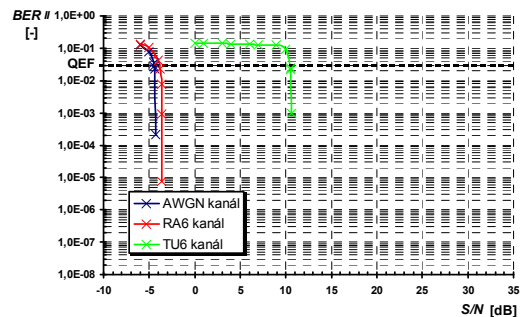
b) Počítačová simulace DVB-T/H závislosti $BER_I = f(S/N)$.



b) Počítačová simulace DVB-T/H závislosti $BER_{II} = f(S/N)$.



c) Počítačová simulace DVB-T2 závislosti $BER_I = f(S/N)$.



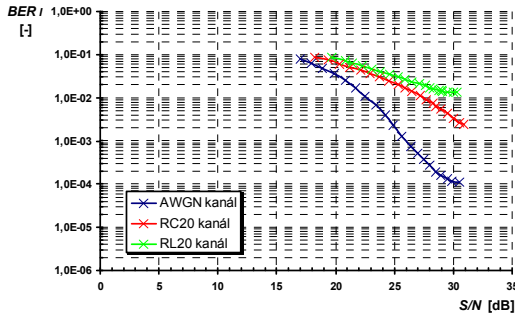
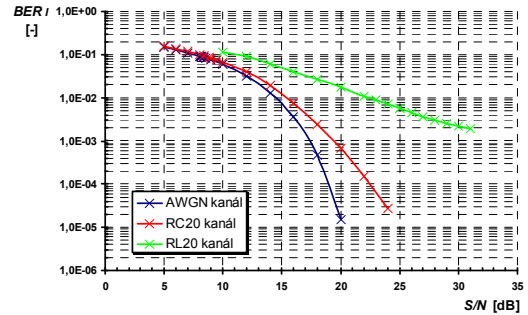
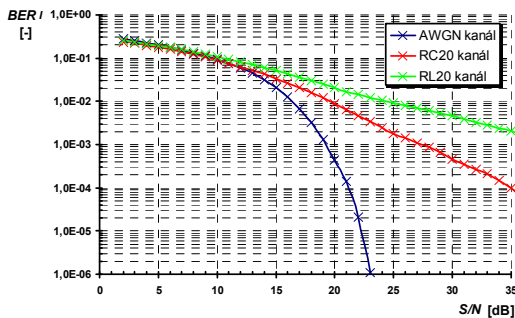
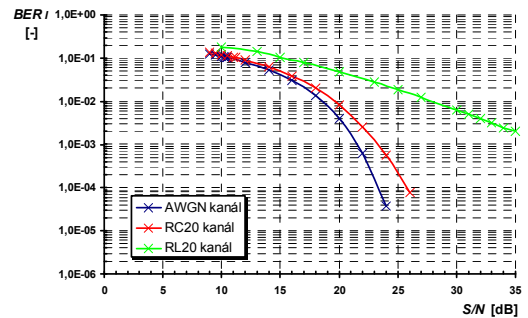
c) Počítačová simulace DVB-T2 závislosti $BER_{II} = f(S/N)$.

Obr. 10.1: $BER_I = f(S/N)$ přenosových kanálů AWGN, RA₆, TU₆ mobilního pozemního příjmu

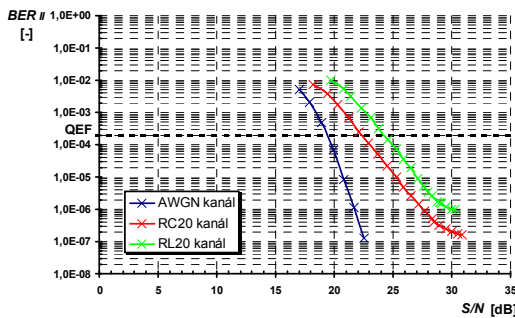
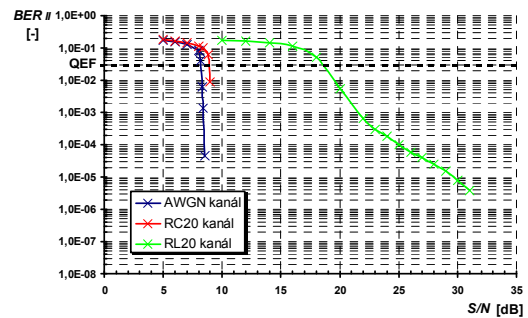
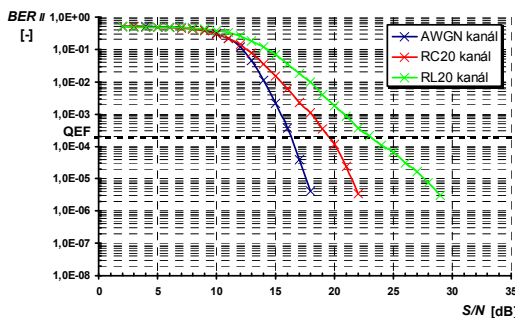
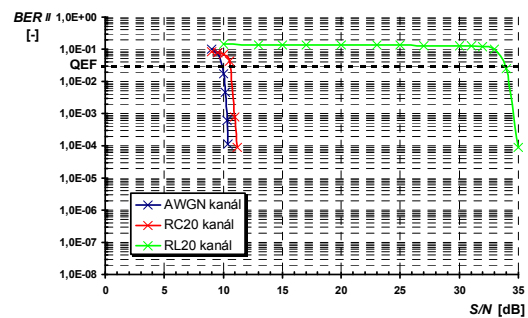
Obr. 10.2: $BER_{II} = f(S/N)$ přenosových kanálů AWGN, RA₆, TU₆ mobilního pozemního příjmu

10. 3. 2 Přenosové kanály AWGN, RC₂₀, RL₂₀ pevného pozemního příjmu

Parametry modulovaného signálu v režimu OFDM, mód 8k s modulací 64-QAM, hodnota kódového poměru $CR=2/3$ a délka ochranného intervalu $GI=1/4$ pro standard DVB-T/H. Mód 32k s modulací 256-QAM, $CR=3/5$, $GI=1/16$ [d] pro DVB-T2.

a) Laboratorní měření DVB-T/H závislosti $BER_I = f(S/N)$.c) Počítačová simulace DVB-T2 závislosti $BER_{II} = f(S/N)$.b) Počítačová simulace DVB-T/H závislosti $BER_I = f(S/N)$.d) Počítačová simulace DVB-T2 závislosti $BER_{II} = f(S/N)$.

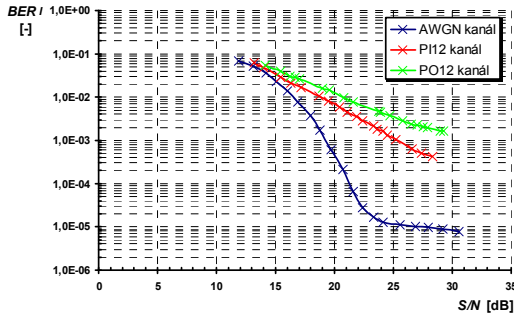
Obr. 10.3: $BER_I = f(S/N)$ přenosových kanálů AWGN, RC₂₀, RL₂₀ pevného pozemního příjmu

a) Laboratorní měření DVB-T/H závislosti $BER_I = f(S/N)$.c) Počítačová simulace DVB-T2 závislosti $BER_{II} = f(S/N)$.b) Počítačová simulace DVB-T/H závislosti $BER_I = f(S/N)$.d) Počítačová simulace DVB-T2 závislosti $BER_{II} = f(S/N)$.

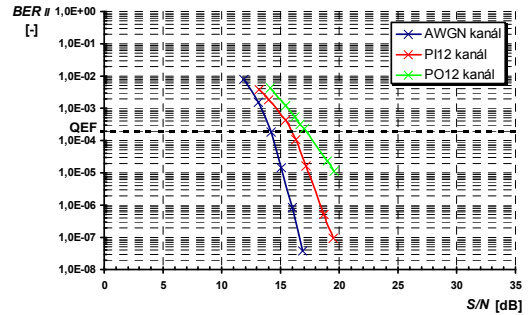
Obr. 10.4: $BER_{II} = f(S/N)$ přenosových kanálů AWGN, RC₂₀, RL₂₀ pevného pozemního příjmu

10. 3. 3 Přenosové kanály AWGN, PI₁₂, PO₁₂ přenosného pozemního příjmu

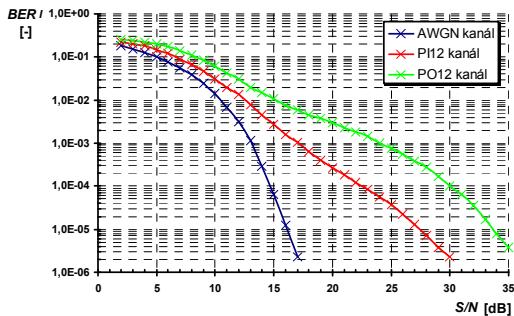
Parametry modulovaného signálu v režimu OFDM, mód 8k [c) 4k] s modulací 16-QAM, hodnota kódového poměru $CR=2/3$ a délka ochranného intervalu $GI=1/8$ pro standard DVB-T/H.



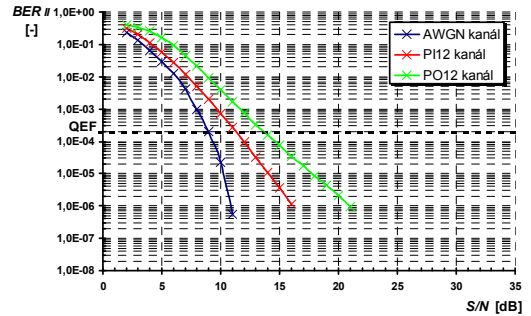
a) Laboratorní měření DVB-T/H závislosti $BER_I = f(S/N)$.



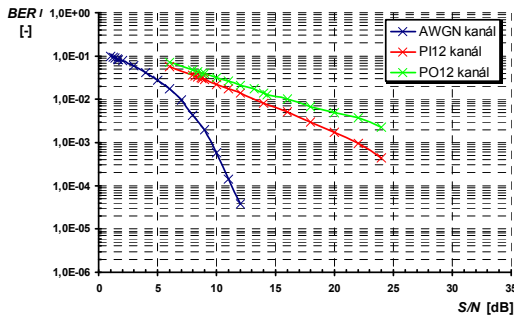
a) Laboratorní měření DVB-T/H závislosti $BER_{II} = f(S/N)$.



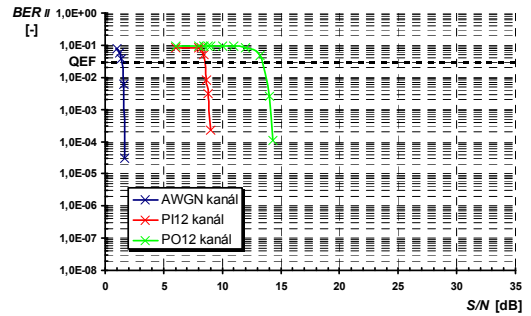
b) Počítačová simulace DVB-T/H závislosti $BER_I = f(S/N)$.



b) Počítačová simulace DVB-T/H závislosti $BER_{II} = f(S/N)$.



c) Počítačová simulace DVB-T2 závislosti $BER_I = f(S/N)$.



c) Počítačová simulace DVB-T2 závislosti $BER_{II} = f(S/N)$.

Obr. 10.5: $BER_I = f(S/N)$ přenosových kanálů AWGN, PI₁₂, PO₁₂ přenosného pozemního příjmu

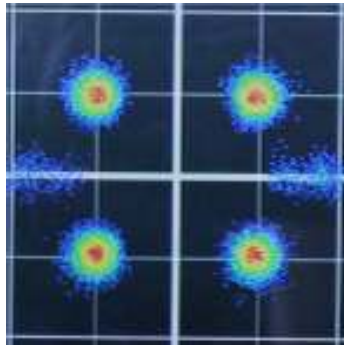
Obr. 10.6: $BER_{II} = f(S/N)$ přenosových kanálů AWGN, PI₁₂, PO₁₂ přenosného pozemního příjmu

10. 4 Konstelační diagramy přenosových kanálů pozemního příjmu

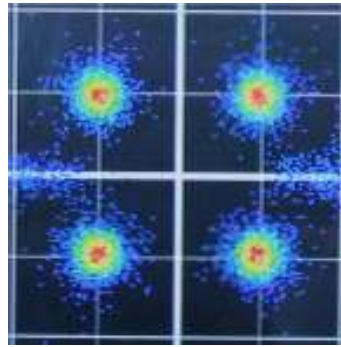
Porovnání dosažených výsledků laboratorního měření a počítačových simulací konstelačních diagramů konkrétních přenosových kanálů jednotlivých pozemních příjmů pro hodnotu $S/N = 20$ dB.

10. 4. 1 Přenosové kanály AWGN, RA₆, TU₆ mobilního pozemního příjmu

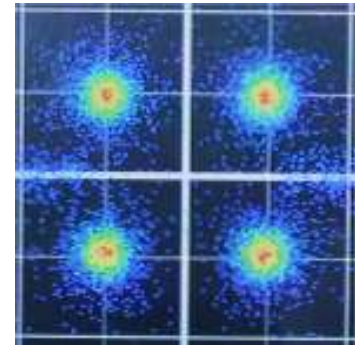
Parametry modulovaného signálu v režimu OFDM, mód 2k s modulací QPSK, hodnota kódového poměru $CR=1/2$ a délka ochranného intervalu $GI=1/16$ pro standard DVB-T/H. I/Q diagramy počítačové simulace DVB-T/H jsou zobrazeny po kanálové korekci a odstranění pomocných nosných.



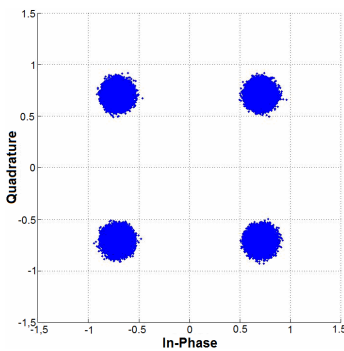
a) AWGN kanál,
 $BER_I < 1.10^{-11}$, $BER_{II} < 1.10^{-11}$



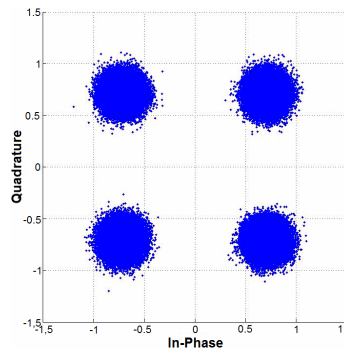
b) RA₆ kanál,
 $BER_I = 2,4.10^{-5}$, $BER_{II} < 1.10^{-11}$



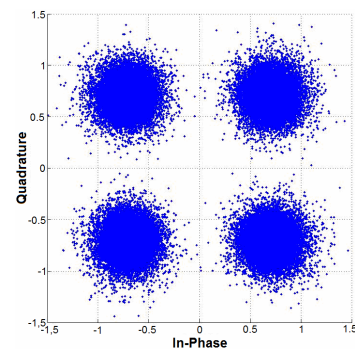
c) TU₆ kanál,
 $BER_I = 1,0.10^{-3}$, $BER_{II} < 1.10^{-11}$



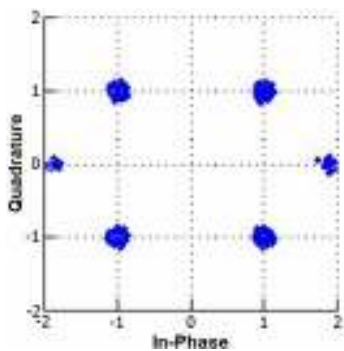
d) AWGN kanál,
 $BER_I < 1.10^{-11}$, $BER_{II} < 1.10^{-11}$



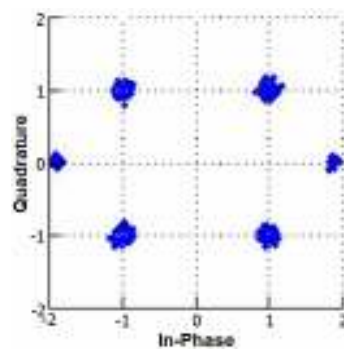
e) RA₆ kanál,
 $BER_I < 1.10^{-11}$, $BER_{II} < 1.10^{-11}$



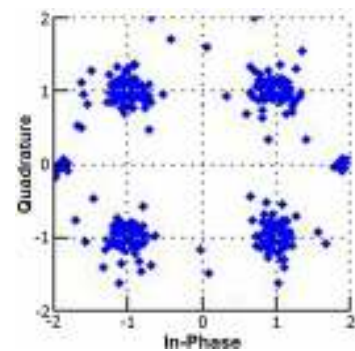
f) TU₆ kanál,
 $BER_I < 1.10^{-11}$, $BER_{II} < 1.10^{-11}$



g) AWGN kanál,
 $BER_I < 1.10^{-11}$, $BER_{II} < 1.10^{-11}$



h) RA₆ kanál,
 $BER_I < 1.10^{-11}$, $BER_{II} < 1.10^{-11}$

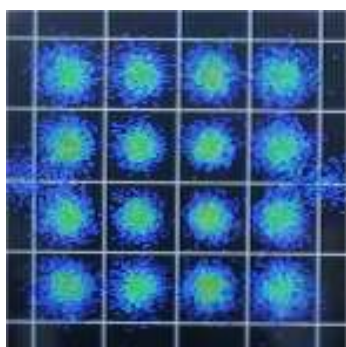


i) TU₆ kanál,
 $BER_I = 1,4.10^{-3}$, $BER_{II} < 1.10^{-11}$

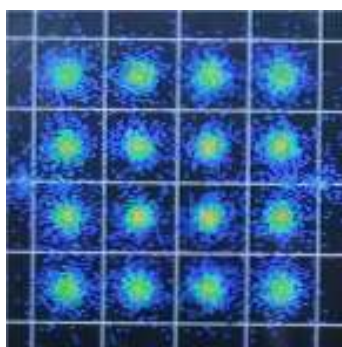
Obr. 10.7: I/Q diagramy AWGN, RA₆ a TU₆ přenosových kanálů mobilního pozemního příjmu pro $S/N = 20\text{dB}$, QPSK: a), b), c) laboratorní měření; d), e), f) PC simulace DVB-T/H; g), h), i) PC simulace DVB-T2

10. 4. 2 Přenosové kanály AWGN, PI₁₂, PO₁₂ přenosného pozemního příjmu

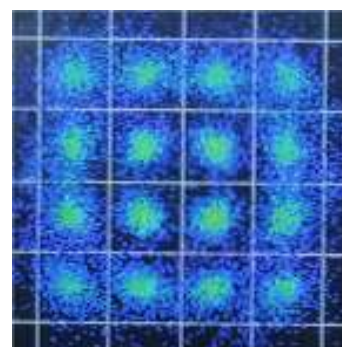
Parametry modulovaného signálu v režimu OFDM, mód 8k [g), h), i) 4k] s modulací 16-QAM, hodnota kódového poměru $CR=2/3$ a délka ochranného intervalu $GI=1/8$ pro standard DVB-T/H. I/Q diagramy počítačové simulace DVB-T/H jsou zobrazeny po kanálové korekci a odstranění pomocných nosných.



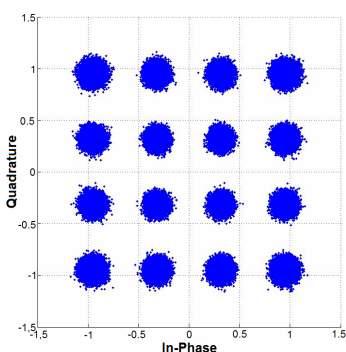
a) AWGN kanál,
 $BER_I = 5,7 \cdot 10^{-4}$; $BER_{II} < 1 \cdot 10^{-11}$



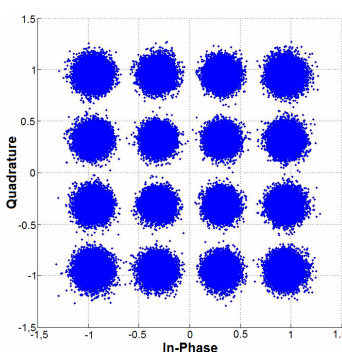
b) PI₁₂ kanál,
 $BER_I = 4,2 \cdot 10^{-3}$; $BER_{II} < 1 \cdot 10^{-11}$



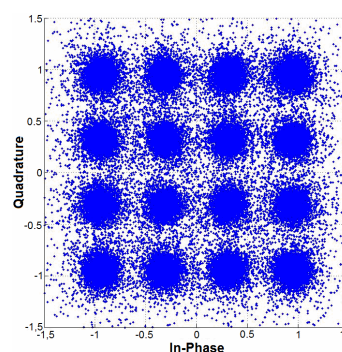
c) PO₁₂ kanál,
 $BER_I = 1,1 \cdot 10^{-2}$; $BER_{II} = 1,0 \cdot 10^{-5}$



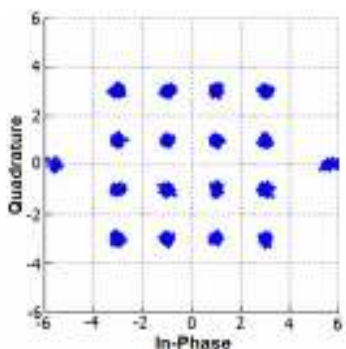
d) AWGN kanál,
 $BER_I < 1 \cdot 10^{-11}$; $BER_{II} < 1 \cdot 10^{-11}$



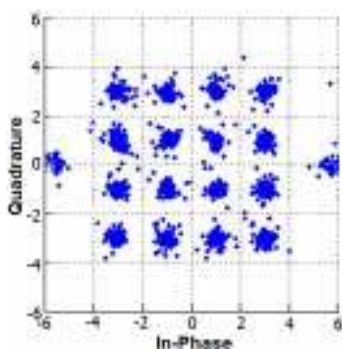
e) PI₁₂ kanál,
 $BER_I = 2,6 \cdot 10^{-4}$; $BER_{II} < 1 \cdot 10^{-11}$



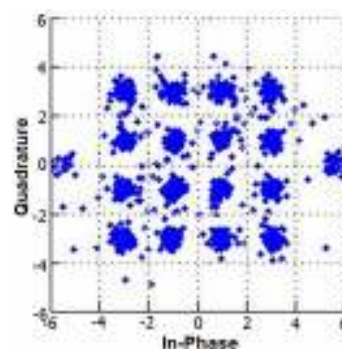
f) PO₁₂ kanál,
 $BER_I = 2,9 \cdot 10^{-3}$; $BER_{II} = 2,1 \cdot 10^{-6}$



g) AWGN kanál,
 $BER_I < 1 \cdot 10^{-11}$; $BER_{II} < 1 \cdot 10^{-11}$



h) PI₁₂ kanál,
 $BER_I = 1,8 \cdot 10^{-3}$; $BER_{II} < 1 \cdot 10^{-11}$

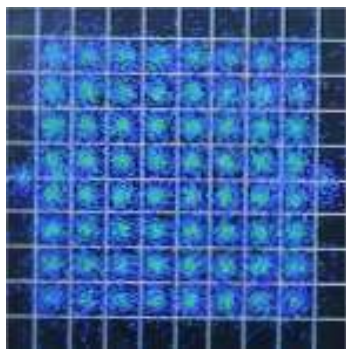


i) PO₁₂ kanál,
 $BER_I = 5,0 \cdot 10^{-3}$; $BER_{II} < 1 \cdot 10^{-11}$

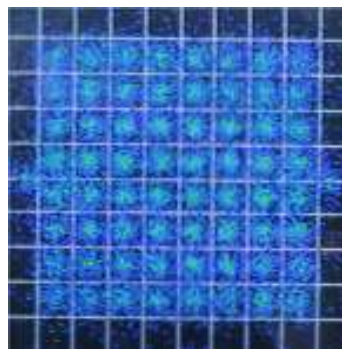
Obr. 10.8: I/Q diagramy AWGN, PI₁₂ a PO₁₂ přenosových kanálů přenosného pozemního příjmu pro $S/N = 20\text{dB}$, 16-QAM: a), b), c) laboratorní měření; d), e), f) PC simulace DVB-T/H; g), h), i) PC simulace DVB-T2

10. 4. 3 Přenosové kanály AWGN, RC₂₀, RL₂₀ pevného pozemního příjmu

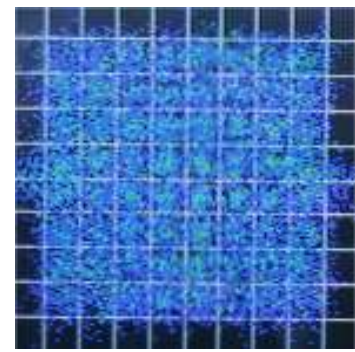
Parametry modulovaného signálu v režimu OFDM, mód 8k s modulací 64-QAM, hodnota kódového poměru $CR=2/3$ a délka ochranného intervalu $GI=1/4$ pro standard DVB-T/H. Mód 32k s modulací 256-QAM pro standard DVB-T2. I/Q diagramy počítačové simulace DVB-T/H jsou zobrazeny po kanálové korekci a odstranění pomocných nosných.



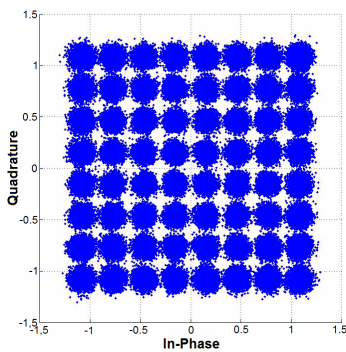
a) AWGN kanál,
 $BER_I = 3,4 \cdot 10^{-2}$; $BER_{II} = 6,6 \cdot 10^{-5}$



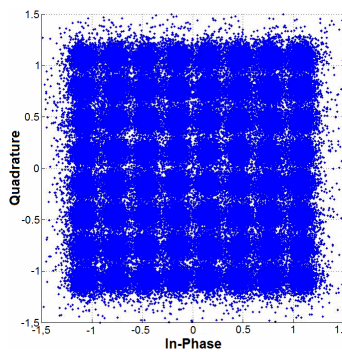
b) RC₂₀ kanál,
 $BER_I = 6,5 \cdot 10^{-2}$; $BER_{II} = 2,4 \cdot 10^{-3}$



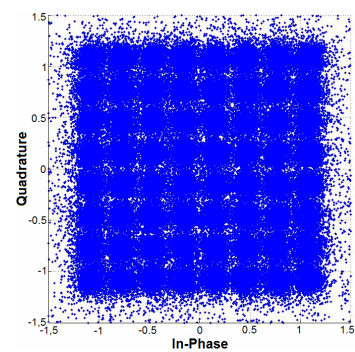
c) RL₂₀ kanál,
 $BER_I = 7,9 \cdot 10^{-2}$; $BER_{II} = 6,7 \cdot 10^{-3}$



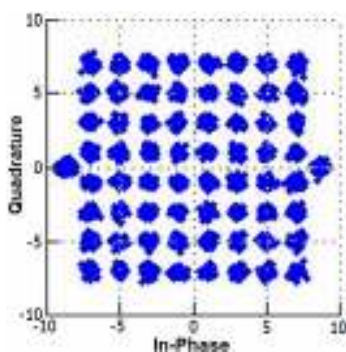
d) AWGN kanál,
 $BER_I = 4,3 \cdot 10^{-4}$; $BER_{II} < 1 \cdot 10^{-11}$



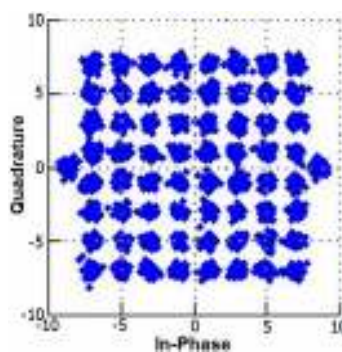
e) RC₂₀ kanál,
 $BER_I = 8,8 \cdot 10^{-3}$; $BER_{II} = 1,2 \cdot 10^{-4}$



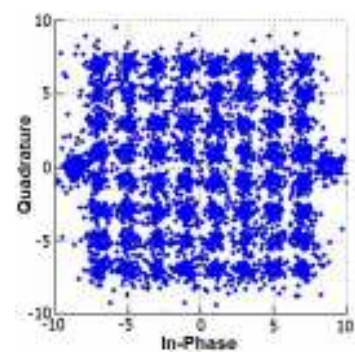
f) RL₂₀ kanál,
 $BER_I = 2,1 \cdot 10^{-2}$; $BER_{II} = 1,8 \cdot 10^{-3}$



g) AWGN kanál,
 $BER_I = 1,5 \cdot 10^{-5}$; $BER_{II} < 1 \cdot 10^{-11}$

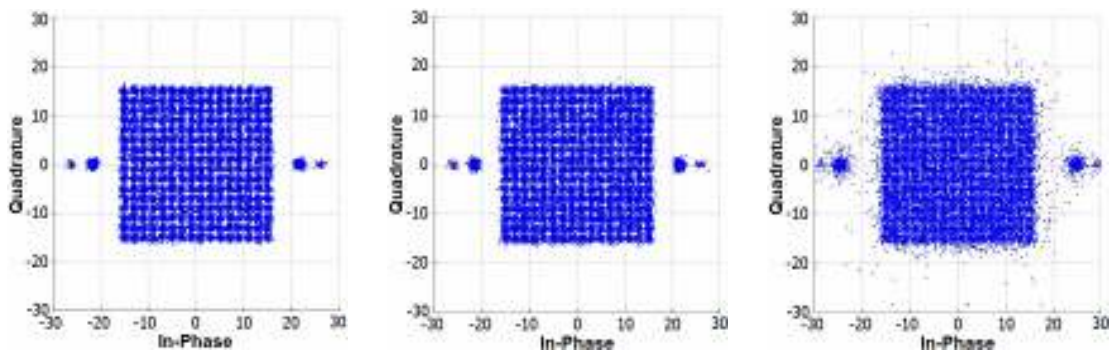


h) RC₂₀ kanál,
 $BER_I = 6,8 \cdot 10^{-4}$; $BER_{II} < 1 \cdot 10^{-11}$



i) RL₂₀ kanál,
 $BER_I = 1,7 \cdot 10^{-2}$; $BER_{II} = 5,5 \cdot 10^{-3}$

Obr. 10.9: I/Q diagramy AWGN, RC₂₀ a RL₂₀ přenosových kanálů pevného pozemního příjmu pro $S/N = 20\text{dB}$, 64-QAM: a), b), c) laboratorní měření; d), e), f) PC simulace DVB-T/H; g), h), i) PC simulace DVB-T2



a) AWGN kanál, $BER_I = 3,9 \cdot 10^{-3}$; $BER_{II} < 1 \cdot 10^{-11}$ b) RC_{20} kanál, $BER_I = 8,2 \cdot 10^{-3}$; $BER_{II} < 1 \cdot 10^{-11}$ c) RL_{20} kanál, $BER_I = 4,8 \cdot 10^{-2}$; $BER_{II} = 1,3 \cdot 10^{-1}$

Obr. 10.10: I/Q diagramy pevného pozemního příjmu, PC simulace DVB-T2 pro $S/N = 20\text{dB}$, 256-QAM. Přenosové kanály: a) AWGN, b) RC_{20} , c) RL_{20}

ZÁVĚR

Úvodní kapitoly diplomové práce jsou věnovány teoretickému srovnání standardů pozemního digitálního televizního vysílání první generace DVB-T/H a druhé generace DVB-T2, zejména zaměřeny na kanálové zabezpečení signálu proti vlivu rušení přenosového prostředí a na samotnou modulaci signálu. Následuje popis konkrétních komunikačních kanálů pro pevný, přenosný a mobilní příjem pozemního digitálního signálu.

Experimentální laboratorní měření bylo provedeno na přenosovém systému pro vysílání pozemního digitálního televizního vysílání podle standardu DVB-T/H v laboratoři televizní techniky Ústavu radioelektroniky. Z důvodu nedostupnosti potřebného přístrojového vybavení pro laboratorní měření přenosového systému vysílání pozemního digitálního televizního vysílání dle standardu DVB-T2 není toto měření realizováno. Samotné laboratorní měření, na obr. 7.1, nebylo možné dle původního plánu realizovat na přenosovém systému pro vysílání pozemního digitálního televizního vysílání DVB-T/H, graficky uvedeného v příloze B, neboť přenosová propustnost PCI slotů „boxu“ od firmy Magma není dostatečná. Modulátor DTA-110T byl proto vložen do PCI slotu „klasického“ stolního PC, pomocí něhož bylo laboratorní měření realizováno.

Pro počítačové modelování a simulace přenosových systémů pozemního digitálního televizního vysílání DVB-T/H a DVB-T2 byl použit softwarový produkt Matlab firmy Mathworks. Programové aplikace pro jednotlivé standardy byly vytvořeny studenty doktorského studia Ústavu radioelektroniky.

Jednotlivá laboratorní měření či počítačové simulace jsou vždy v úvodu krátce popsány, tzn. charakteristika daného pozemního příjmu, definice typických parametrů modulovaného signálu a popis konkrétních přenosových kanálů. Následují naměřené či simulované hodnoty bitových chybovostí BER v závislosti na poměrové hodnotě S/N , jež jsou následně graficky zobrazeny $BER=f(S/N)$. Součástí jednotlivých laboratorních měření a počítačových simulací jsou konstelační diagramy jednotlivých přenosových kanálů pro hodnotu $S/N = 20\text{dB}$ s následným vyhodnocením celého konkrétního laboratorního měření či počítačové simulace.

Vyhodnocení výsledků laboratorního měření a počítačových simulací statického pozemního příjmu odpovídá teorii jednotlivých přenosových kanálů, kdy v AWGN kanálu je přímý digitální signál ovlivněn pouze mírou bílého Gaussova šumu, v přenosovém kanálu RC_{20} je k uvedenému AWGN kanálu přidáno mnohacestné šíření signálu definováno 20-ti přenosovými cestami, které jsou totožné pro RL_{20} přenosový kanál, který ovšem postrádá dominantní přímý signál LOS mezi vysílačem a přijímačem. RL_{20} přenosový kanál požaduje pro QEF signál po kanálové korekci FEC hodnotu S/N o cca (4-7)dB větší vůči AWGN přenosovému kanálu a RC_{20} přenosový kanál vyšší o cca 3dB. Zvýšení hodnoty poměru S/N o (4-7)dB vyžaduje zhruba (2,5-5)x vyšší přenášený výkon, zvýšení hodnoty poměru S/N o 3dB zhruba 2x vyšší přenášený výkon.

Výsledky laboratorního měření a počítačových simulací přenosného pozemního příjmu pro standard DVB-T/H jsou zatíženy nepřesnostmi. Laboratorní měření bylo provedeno pro mód 8k OFDM režimu z důvodu neschopnosti měřícího přijímače analyzovat digitálně modulovaný signál v módu 4k, určený pro přenosný pozemní příjem. V počítačové simulaci přenosného pozemního příjmu standardu DVB-T/H nejsou zahrnuty pro přenosové kanály PI_{12} a PO_{12} distribuce Dopplerova spektra, uvedené v příloze C.2 a získaná data odpovídají použitému módu 8k OFDM režimu. Důvodem je nemožnost nastavení těchto parametrů v použité programové aplikaci. Data získaná pomocí softwarové aplikace pro standard DVB-T2 jsou již korektní, přenosové kanály PI_{12} a PO_{12} jsou simulovány včetně distribuce Dopplerova spektra a zahrnují mód 4k. Nicméně přes veškeré nedostatky, vyhodnocení výsledků laboratorního měření a počítačových simulací přenosného pozemního příjmu odpovídá teoretickým předpokladům jednotlivých přenosových kanálů. AWGN přenosový kanál je uvažován jako referenční, pro PI_{12} přenosový kanál [28] definuje pro jednotlivé i -té přenosové cesty šíření signálu nižší útlum [dB] oproti PO_{12} přenosovému kanálu. PI_{12} přenosový kanál požaduje pro QEF signál po kanálové korekci FEC hodnotu S/N o cca 2dB větší vůči AWGN přenosovému kanálu a PO_{12} přenosový kanál vyšší o cca 4dB. Zvýšení hodnoty poměru S/N o 2dB vyžaduje zhruba 1,5x vyšší přenášený výkon, zvýšení hodnoty poměru S/N o 4dB zhruba 2,5x vyšší přenášený výkon.

Výsledek počítačové simulace mobilního pozemního příjmu pro standard DVB-T/H je ovlivněn chybou, jejíž podstatou je simulace přenosových kanálů TU_6 a RA_6 podle definovaných hodnot v příloze C.3, avšak bez uvedených distribucí Dopplerova spektra. Přesto vyhodnocení výsledků laboratorního měření a počítačových simulací mobilního pozemního příjmu odpovídá teoretickým předpokladům jednotlivých přenosových kanálů, kdy pro přenosový kanál TU_6 norma [12] definuje sice menší útlumy jednotlivých i -tých přenosových cest odrazů oproti přenosovému kanálu RA_6 , avšak statistika šíření signálu je pro přenosový kanál RA_6 charakterizována Dopplerovým spektrem s Riceovou distribucí pro první přenosovou cestu šíření signálu a Rayleighovou distribucí pro ostatní přenosové cesty. Pro přenosový kanál TU_6 je statistika šíření signálu charakterizována Dopplerovým spektrem s Rayleighovou distribucí. AWGN přenosový kanál je uvažován opět jako referenční. RA_6 přenosový kanál požaduje pro QEF signál po kanálové korekci FEC hodnotu S/N o cca 1dB větší vůči AWGN přenosovému kanálu a TU_6 přenosový kanál vyšší o cca (2-3)dB. Zvýšení hodnoty poměru S/N o 1dB vyžaduje zhruba 1,3x vyšší přenášený výkon, zvýšení hodnoty poměru S/N o (2-3)dB zhruba (1,5-2)x vyšší přenášený výkon. Záporné hodnoty poměru S/N ukazují, že systém DVB-T2 lze zcela zašuměný přijatý digitální signál „maskovaný“ šumem po kanálové korekci FEC_{T2} bezchybně přijmout a vyhodnotit jako QEF mobilní pozemní příjem.

Z grafických závislostí $BER=f(S/N)$, přesněji z $BER_{II}=f(S/N)$ je patrný vliv kanálového zabezpečení FEC digitálního signálu standardů DVB-T/H a DVB-T2. Se snižující se hodnotou poměru S/N roste bitová chybovost po Viretbiho dekódování

pozvolněji oproti skokovému prudkému nárůstu bitové chybovosti po LDPC dekódování u standardu DVB-T2. Účinnost kanálové korekce FEC_{T2} standardu DVB-T2 opravit přenosovým prostředím znehodnocený přijímaný digitální signál je vyšší, kdy hranice bitové chybovosti po LDPC dekódování pro QEF signál po FEC_{T2} je $BER_{QEF} = BER_{II} = 3 \cdot 10^{-2}$ oproti účinnosti kanálové korekce FEC_{T/H} standardu DVB-T/H, kdy hranice bitové chybovosti po Viterbiho dekódování pro QEF signál po FEC_{T/H} je $BER_{QEF} = BER_{II} = 2 \cdot 10^{-4}$. AWGN přenosový kanál jednoznačně zajišťuje přijímači nejlepší podmínky příjmu.

Ze získaných hodnot laboratorního měření a počítačových simulací s následným grafickým vyjádřením závislosti $BER=f(S/N)$, potažmo I/Q diagramů lze jednoznačně konstatovat, že statický příjem digitálně modulovaného signálu je z pohledu zabezpečení proti chybám v přenosovém prostředí ve srovnání s přenosným a mobilním pozemním příjmem nejméně náročný a k zajištění pokrytí území „kvalitním“ signálem postačuje méně robustní zabezpečení přenášeného signálu.

Konec diplomové práce je věnován celkovému shrnutí, tedy ucelené prezentaci dosažených výsledků laboratorního měření a počítačových simulací, jež obsahuje hodnoty minimálního poměru S/N pro QEF signál po kanálové korekci FEC, bitových chybovostí BER a konstelačních diagramů pro hodnotu $S/N = 20\text{dB}$. Porovnává grafické závislosti $BER_I = f(S/N)$ a $BER_{II} = f(S/N)$ konkrétních přenosových kanálů pro jednotlivé pozemní příjmy.

Výstupem diplomové práce je vytvořená vzorová laboratorní úloha pro předmět Digitální televizní a rozhlasové systémy včetně jejího vzorového vypracování, jejíž účelem je laboratorní měření vlivu reálného přenosového prostředí na DVB-T signál pro pevný, přenosný a mobilní pozemní příjem. Jednotlivé druhy pozemního příjmu jsou modelovány přenosovými kanály AWGN, RC₂₀, RL₂₀, PI₁₂, PO₁₂, RA₆ a TU₆. Během měření získají studenti pomocí měřicího přijímače základní představu o tvaru spektra přijímaného signálu digitální pozemní televize pro jednotlivé přenosové kanály, konstelačním diagramu vnitřní modulace, chybovosti přenosu, poměru S/N v přenosovém kanále a dále si pomocí měřicího přijímače ověří obsah transportního toku MPEG-2 TS a parametry kódování vysílaného signálu DVB-T.

LITERATURA

Řazena chronologicky podle abecedy.

- [1] BEDNÁŘ, J. *Digitální televize*. Praha: Sdělovací technika, 2006. 115 s. ISBN 80-86645-11-8
- [2] DekTec. *DtLoop*. 2010 [cit. 10. prosince 2010]. Dostupné na www: <http://www.dektec.com/Downloads/Utilities.asp>
- [3] DekTec. *StreamXpress*. 2009 [cit. 10. prosince 2010]. Dostupné na www: <http://www.dektec.com/Downloads/Applications.asp>
- [4] DekTec. *DTA-110T Multi-Standard Modulator with UHF Upconverter for PCI Bus*. 2008 [cit. 10. prosince 2010]. Dostupné na www: <http://www.dektec.com/products/PCI/DTA-110T/>; <<http://www.dektec.com/Products/PCI/DTA-110T/Downloads/DTA-110T%20Leaflet.pdf>>.
- [5] DekTec. *DTA-145 Multi-Purpose Dual ASI/SDI Adapter for PCI Bus*. 2007 [cit. 10. prosince 2010]. Dostupné na www: <http://www.dektec.com/Products/PCI/DTA-145/index.asp>; <<http://www.dektec.com/Products/PCI/DTA-145/Downloads/DTA-145%20Leaflet.pdf>>.
- [6] DVB-T2. TR 102 831 V0.10.4. *Digital Video Broadcasting (DVB); Implementation guidelines for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2)*. 2010.
- [7] DVB-T2. DVB Fact Sheet - March 2010. *2nd Generation Terrestrial. The World's Most Advanced Digital Terrestrial TV System*. 2010.
- [8] DVB-T2. 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)*. 2009.
- [9] DVB-T2. ETSI TS 102 773 V1.1.1 (2009-09). *Digital Video Broadcasting (DVB); Modulator Interface (T2-MI) for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2)*. 2009.
- [10] DVB-T. DVB Fact Sheet - September 2010. *Digital Terrestrial Television*. 2010.
- [11] DVB-T. ETSI EN 300 744 V1.6.1 (2009-01). *Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television*. 2009.

- [12] DVB-T. ETSI TR 101 290 V1.2.1 (2001-05). *Digital Video Broadcasting (DVB); Measurement guidelines for DVB systems*. 2001.
- [13] DVB-H. ETSI TR 102 377 V1.4.1 (2009-06). *Digital Video Broadcasting (DVB); DVB-H Implementation Guidelines*. 2009.
- [14] DVB-H. ETSI TR 102 401 V1.1.1 (2005-05). *Digital Video Broadcasting (DVB); Transmission to Handheld Terminals (DVB-H); Validation Task Force Report*. 2005.
- [15] DVB-H. ETSI EN 302 304 V1.1.1 (2004-11). *Digital Video Broadcasting (DVB); Transmission System for Handheld Terminals (DVB-H)*. 2004.
- [16] DVB-SCENE. *T2 time* [online]. 2009 [cit. 5. října 2010]. Dostupné na [www: <http://dvb.org/news_events/dvbscene_magazine/DVB-SCENE31.pdf>](http://dvb.org/news_events/dvbscene_magazine/DVB-SCENE31.pdf).
- [17] DVB-SCENE. *T2 extra terrestrial* [online]. 2008 [cit. 5. října 2010]. Dostupné na [www: <http://dvb.org/news_events/dvbscene_magazine/DVB-SCENE27.pdf>](http://dvb.org/news_events/dvbscene_magazine/DVB-SCENE27.pdf).
- [18] FISCHER, W. *Digital Video and Audio Broadcasting Technology. A practical Engineering Guide (Second Edition)*. Springer, 2009.
- [19] HANUS, S. *Rádiové a mobilní komunikace*. Elektronické skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně, 2008.
- [20] HANUS, S. *Základy televizní techniky*. Elektronické texty. Brno: FEKT VUT v Brně, 2007.
- [21] KALLER, O. *Analýza přenosu a měření signálu digitální televize DVB-S/S2*. Diplomová práce. Brno: FEKT VUT v Brně, 2010.
- [22] KAŠPAR, J. *Zabezpečení přenosu dat BCH kódy*. Diplomová práce. Brno: FEKT VUT v Brně, 2008.
- [23] KRATOCHVÍL, T. *Digitální televize DVB: Standardy druhé generace a rozvoj služeb HDTV* [online]. Brno: Ústav radioelektroniky, FEKT VUT v Brně, radioelektronické semináře 2010 [cit. 3. listopadu 2010]. Dostupné na [www: <http://www.urel.feec.vutbr.cz/web_documents/seminare/2010/hdtv10_prezentace.pdf>](http://www.urel.feec.vutbr.cz/web_documents/seminare/2010/hdtv10_prezentace.pdf).
- [24] KRATOCHVÍL, T. *Digitální televizní systémy – Simulovaný přenos digitální televize podle standardu DVB-T*. Laboratorní úloha. Brno: FEKT VUT v Brně, 2010.
- [25] KRATOCHVÍL, T. *Digitální televizní systémy*. Elektronické texty. Brno: FEKT VUT v Brně, 2007.

- [26] LBA. *MSK-200 TV Signal Analyzer*. 2009 [cit. 10. prosince 2010]. Dostupné na www: http://www.lbagroup.com/technology/msk200_digital_analyzer.php
- [27] LEGÍŇ, M. *Televizní technika DVB-T*. Praha: BEN – technická literatura, 2006. 286s. ISBN 80-7300-204-3
- [28] LÓPEZ, F. *Wing TV: Services to Wireless, Integrated, Nomadic, GPRS-UMTS & TV Handheld Terminals; Validating DVB-H Concept*. 2006.
- [29] MORSHED, S. *Synchronization Performance in DVB-T2 System*. Master of Science Thesis. Tampere University of Technology, 2009.
- [30] PACHER, J. *Protichybové systémy využívající blokové kódy*. Bakalářská práce. Brno: FEKT VUT v Brně, 2008.
- [31] 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.
- [32] PETERSON, W.W. *Error-Correcting Codes*. Cambridge: The MIT Press, 1963.
- [33] POLÁK, L.; KRATOCHVÍL, T. *Simulation and Measurement of the Transmission Distortions of the Digital Television DVB-T/H Part 3: Transmission in Fading Channels*. Radioengineering, 2010, roč. 19, č. 4, s. 703-711. ISSN: 1210- 2512.
- [34] PROKEŠ, A. *Komunikační systémy*. Elektronické skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně, 2008.
- [35] ŘÍČNÝ, V., KRATOCHVÍL, T. *Základy televizní techniky*. Elektronické skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně, 2007.
- [36] VÍT, V. *Televizní technika – přenosové barevné soustavy*. BEN – technická literatura, Praha, 1997.
- [37] ZEMAN, T. *Základy datové komunikace*. Elektronické texty. Praha: Fakulta elektrotechniky ČVUT v Praze, 2008.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

α	primitivní prvek Galoisova tělesa
f_0	nosná frekvence signálu
f_D	Dopplerova frekvence
k	opravné bity, symboly
K_{bch}	informační bity nezabezpečené zprávy
K_{ldpc}	bity zabezpečené BCH kódem
m	informační bity, symboly nezabezpečené zprávy
n	celkový počet bitů
n_r	rámec vnějšího kódu
N_{bch}	bity zabezpečené BCH kódem
N_{ldpc}	zabezpečená zpráva FEC _{T2}
x_p	vstupní posloupnost
y_p	výstupní posloupnost
v	rychlost pohybu přijímače
v_h	počet cest vnitřního bitového prokladače
γ	rychlost elektromagnetického vlnění
θ_i	fázový posuv i -té cesty
ρ_i	zisk i -té cesty
τ_i	relativní zpoždění i -té cesty
Δ_2	vzájemné zpoždění vysílačů
f_{Δ}	frekvenční offset mezi vysílači
A	vzájemný útlum vysílačů
G	generující mnohočlen
$H(q)$	permutační funkce
H	paritní matice
I	hloubka prokládání konvolučního prokladače
K_j	Riceův faktor

M	základní zpoždění konvolučního prokladače
N	počet odrazů
N_c	počet sloupců bitového prokladače FEC _{T2}
N_r	počet řádků bitového prokladače FEC _{T2}
S	stupeň generujícího mnohočlenu
S_i	spínač, přepínač
AAC	<i>(Advanced Audio Coding)</i> – druh audio kodeku
AFC	<i>(Automatic Frequency Control)</i> – automatické „doladování“ kmitočtu
AVC	<i>(Advanced Video Coding)</i> – zdokonalené kódování obrazu
ARQ	<i>(Automatic Repeat reQest)</i> – bezpečnostní kódy umožňující detekovat chybu
ASI	<i>(Asynchronous Serial Interface)</i> – asynchronní sériové rozhraní
ATV	<i>(Analog TeleVision)</i> – analogový přenosový systém
AWGN	<i>(Additive White Gaussian Noise)</i> – aditivní Gaussův bílý šum
BCH	<i>(Bose, Chaudhuri, Hocquengham)</i> – moderní kanálové zabezpečení užitečného obsahu dat
BER	<i>(Bit Error Ratio)</i> – poměr chybně přenesených bitů k celkovému množství bitů za jednotku času
BNC	<i>(Bayonet Neill Concelman)</i> – typ konektoru, portu
CBR	<i>(Constant Bit Rate)</i> – konstantní přenosová rychlost
COFDM	<i>(Coded Orthogonal Frequency Division Multiplex)</i> – kódový ortogonální multiplex s frekvenčním dělením; modulace s více nosnými vlnami zabezpečená FEC
CR	<i>(Code Rate)</i> – kódový poměr
CRC-8	<i>(Cyclic Redundancy Check)</i> – cyklický kódér používající systematický 8-bitový kód k detekci chyb
DBPSK	<i>(Differential Binary Phase Shift Keying)</i> – rozdílové binární klíčování s posuvem fáze
DFL	<i>(Data Field Length)</i> – délka datového pole
DFT	<i>(Discrete Fourier Transform)</i> – diskrétní Fourierova transformace
DTV	<i>(Digital TeleVision)</i> – digitální přenosový systém

DVB	<i>(Digital Video Broadcasting)</i> – skupina společností a organizací, která vyvinula systém digitální televize pro pozemní vysílání DVB-T, satelitní DVB-S a kabelovou verzi DVB-C
ES	<i>(Elementary Stream)</i> – elementární tok, např. komprimované video a audio toky při kódování MPEG
ETSI	<i>(European Telecommunications Standards Institute)</i> – evropský institut pro normalizaci v telekomunikacích
EVM	<i>(Error Vector Magnitude)</i> – modulační chyba
FEC	<i>(Forward Error Correction)</i> – dopředná korekce chyb, ochrana proti chybám vytvořená pomocí korekčních kódů a zabezpečovacích bitů
GCS	<i>(Generic Continuous Stream)</i> – formát datového toku
GF	<i>(Galois Field)</i> – pole s omezeným počtem různých prvků
GFPS	<i>(Generic Fixed-length Packetized Stream)</i> – formát datového toku
GI	<i>(Guard Interval)</i> – ochranný interval
GSE	<i>(Generic Encapsulated Stream)</i> – formát datového toku
HDTV	<i>(High Definition TeleVision)</i> – televize s vysokou rozlišovací schopností
HP	<i>(High Priority path)</i> – cesta s vyšší prioritou
IDFT	<i>(Inverse Discrete Fourier Transform)</i> – zpětná diskrétní Fourierova transformace
IFFT	<i>(Inverse Fast Fourier Transform)</i> – zpětná rychlá Fourierova transformace
IDTV	<i>(Integrated Digital TeleVision)</i> – přijímač s integrovaným digitálním dílem
IF	<i>(Intermediate Frequency)</i> – mezifrekvenční např. pásmo, ...
ISI	<i>(InterSymbol Interference)</i> – mezisymbolové interference \approx rušení, které způsobují zejména odrazy
ISSY	<i>(Input Stream SYNchronization)</i> – synchronizace více vstupních datových toků
IP	<i>(Internet Protocol)</i> – datový protokol používaný pro přenos dat přes paketové sítě
LCM	<i>(Least Common Multiple)</i> – nejmenší společný násobek
LDPC	<i>(Low Density Parity Check)</i> – nízká hustota kontroly parity, moderní kanálové zabezpečení užitečného obsahu dat
LDTV	<i>(Low Definition TeleVision)</i> – televize s nízkou rozlišovací schopností

LOS	<i>(Line Of Sight)</i> – přímé šíření signálu
LP	<i>(Low Priority path)</i> – cesta s nižší prioritou
MCM	<i>(Multi Carrier Modulation)</i> – modulace s více nosnými kmitočty
MER	<i>(Modulation Error Ratio)</i> – modulační chyba
MISO	<i>(Multiple Inputs Single Output)</i> – komunikační systém s více vstupy a jedním výstupem
MPE	<i>(Multi Protocol Encapsulation)</i> – způsob zapouzdření dat
MPE-FEC	<i>(Multi Protocol Encapsulation – Forward Error Correction)</i> – dopředná korekce chyb na úrovni MPE
MPEG	<i>(Moving Pictures Expert Group)</i> – metoda zdrojového kódování obrazu a zvuku
M-QAM	<i>(M-Quadrature Amplitude Modulation)</i> – <i>M</i> -stavová kvadrurní amplitudová modulace
MSB	<i>(Most Significant Bit)</i> – nejvýznamnější bit
OFDM	<i>(Orthogonal Frequency Division Multiplex)</i> – ortogonální multiplex s frekvenčním dělením; modulace s více nosnými vlnami
PAPR	<i>(Peak to Average Power Ratio)</i> – dynamika signálu, poměr mezi špičkovou a střední hodnotou signálu
PCI	<i>(Peripheral Component Interconnect)</i> – počítačové rozhraní
PDA	<i>(Personal Data Assistent)</i> – příruční osobní počítač
PES	<i>(Packetized Elementary Stream)</i> – paketový datový tok
PI	<i>(Pedestrián Indoor)</i> – komunikační kanál pro přenosný příjem
PID	<i>(Packet IDentifier)</i> – paketový identifikátor
PLP	<i>(Physical Layer Pipes)</i> – datové toky standardu DVB-T2
PO	<i>(Pedestrian Outdoor)</i> – komunikační kanál pro přenosný příjem
PRBS	<i>(PseudoRandom Binary Sequence)</i> – pseudonáhodná bitová sekvence
QEF	<i>(Quasi Error Free)</i> – bezchybný signál
QPSK	<i>(Quadrature Phase Shift Keying)</i> – kvadrurní klíčování s posuvem fáze
RA	<i>(Rural Area)</i> – komunikační kanál pro mobilní příjem
RCD	<i>(Rotated Constellation Diagram)</i> – natočení konstelačního diagramu, moderní modulační metoda
RF	<i>(Radio Frequency)</i> – radiofrekvenční např. vstup, výstup, pásmo, ...
RMS	<i>(Root Mean Square)</i> – efektivní hodnota veličiny

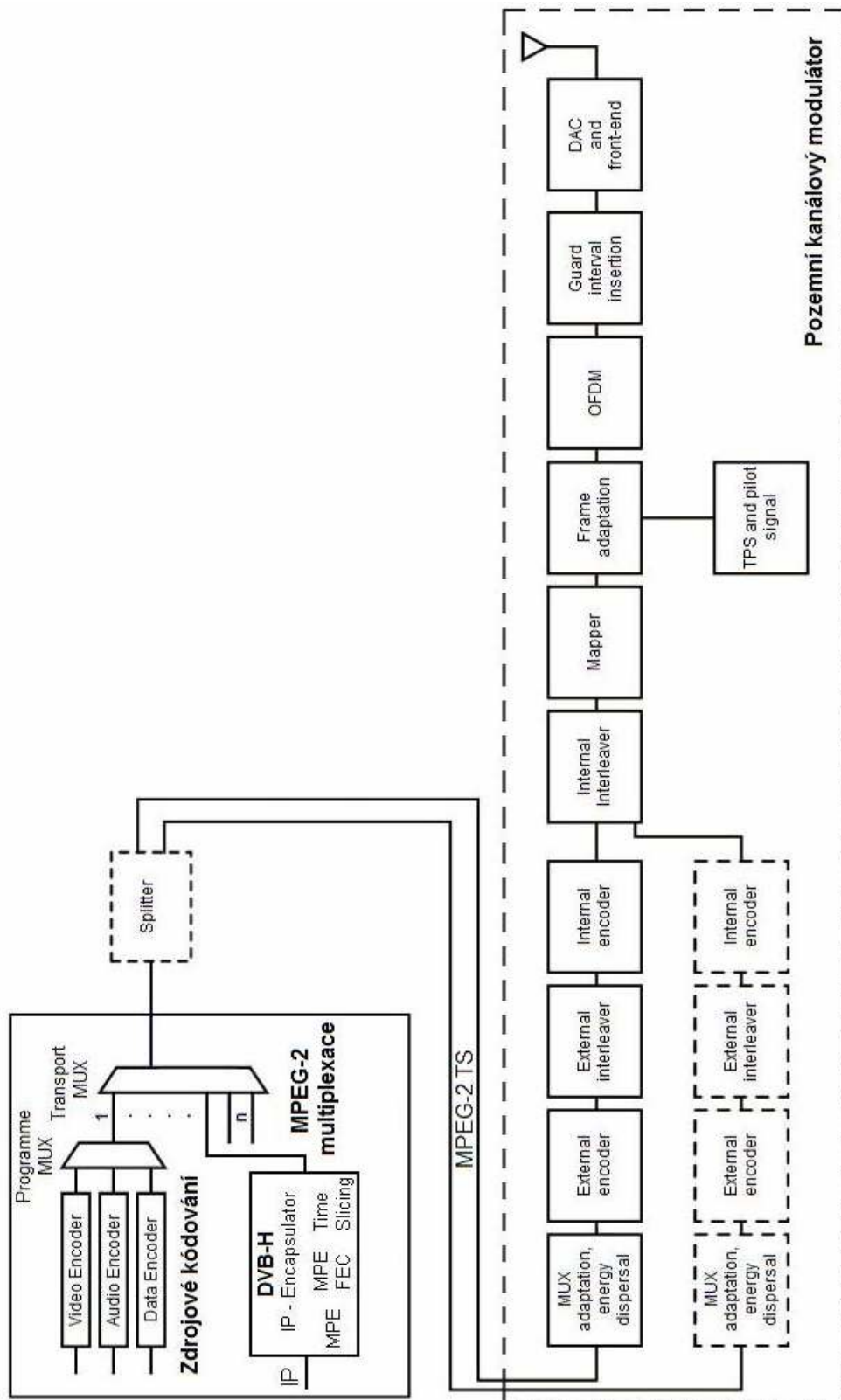
RS	<i>(Reed Solomon)</i> – Reed Solomonovo kódování
SDI	<i>(Serial Digital Interface)</i> – sériové digitální rozhraní
SDTV	<i>(Standard Definition TeleVision)</i> – televize se standardní rozlišovací schopností
SISO	<i>(Single Input Single Output)</i> – komunikační systém s jedním vstupem a jedním výstupem
SNR	<i>(Signal Noise Ratio)</i> – poměr výkonových hodnot signálu a šumu
STB	<i>(Set-Top Box)</i> – přijímač digitálního televizního signálu
TPS	<i>(Transmission Parameters Signalling)</i> – rychlý informační kanál pro přijímač obsahující přenosové parametry
TS	<i>(Transport Stream)</i> – transportní tok, souhrnný datový tok skládající se z dílčích datových toků, náležejícím jednotlivým televizním či rozhlasovým programům a doplňkovým službám
TU	<i>(Typical Urban)</i> – komunikační kanál pro mobilní příjem
VSB	<i>(Vestigial SideBand)</i> – modulace s potlačeným postraním pásmem
XOR	<i>(eXclusive OR)</i> – výlučný součet

SEZNAM PŘÍLOH

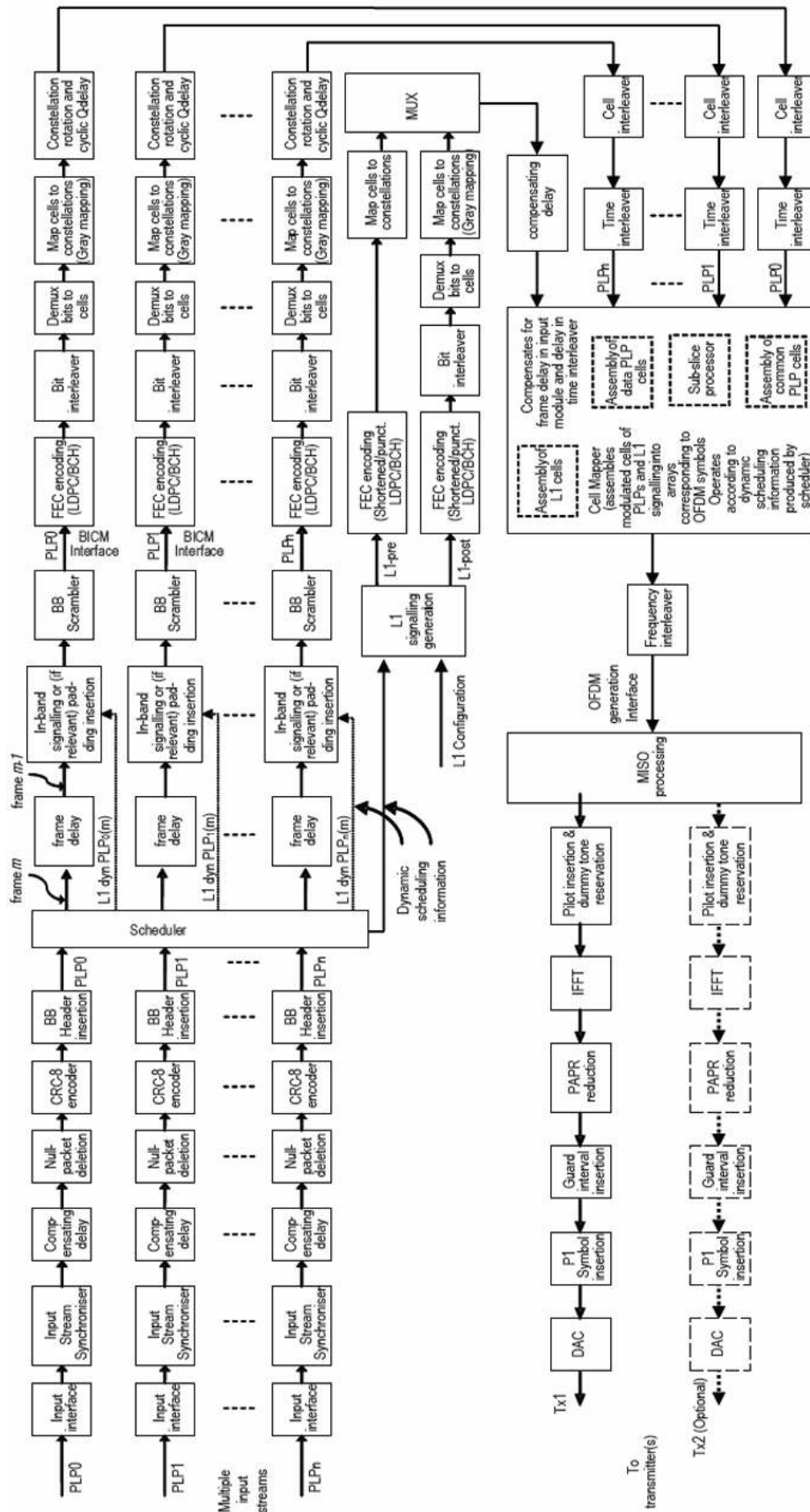
A	BLOKOVÁ SCHÉMATA DVB-T/H & DVB-T2	95
A.1	Blokové schéma systému DVB-T/H.....	95
A.2	Blokové schéma systému DVB-T2.....	96
B	LABORATORNÍ PRACOVÍŠTĚ.....	97
C	DEFINICE PŘENOSOVÝCH KANÁLŮ	98
C.1	Hodnoty parametrů přenosových kanálů RC_{20} a RL_{20}	98
C.2	Hodnoty parametrů přenosových kanálů PI_{12} a PO_{12}	98
C.3	Hodnoty parametrů přenosových kanálů TU_6 a RA_6	99
D	VZOROVÁ LABORATORNÍ ÚLOHA	100
E	VYPRACOVÁNÍ VZOROVÉ LABORATORNÍ ÚLOHY	108
F	OBSAH PŘILOŽENÉHO NOSIČE CD-ROM	120
F.1	Elektronická verze diplomové práce ve formátu .pdf a .doc	120
F.2	Licenční smlouva ve formátu .pdf a .doc.....	120
F.3	Metadata ve formátu .pdf a .doc	120
F.4	Prohlášení o shodě listinné a elektronické formy diplomové práce ve formátu .pdf a .doc.....	120
F.5	Naměřená a nasimulovaná data ve formátu .xls a .jpeg.....	120
F.6	Vzorová laboratorní úloha pro předmět Digitální televizní a rozhlasové systémy ve formátu .doc a .pdf.....	120
F.7	Vypracování vzorové laboratorní úlohy pro předmět Digitální televizní a rozhlasové systémy ve formátu .doc a .pdf.....	120

A BLOKOVÁ SCHÉMATA DVB-T/H & DVB-T2

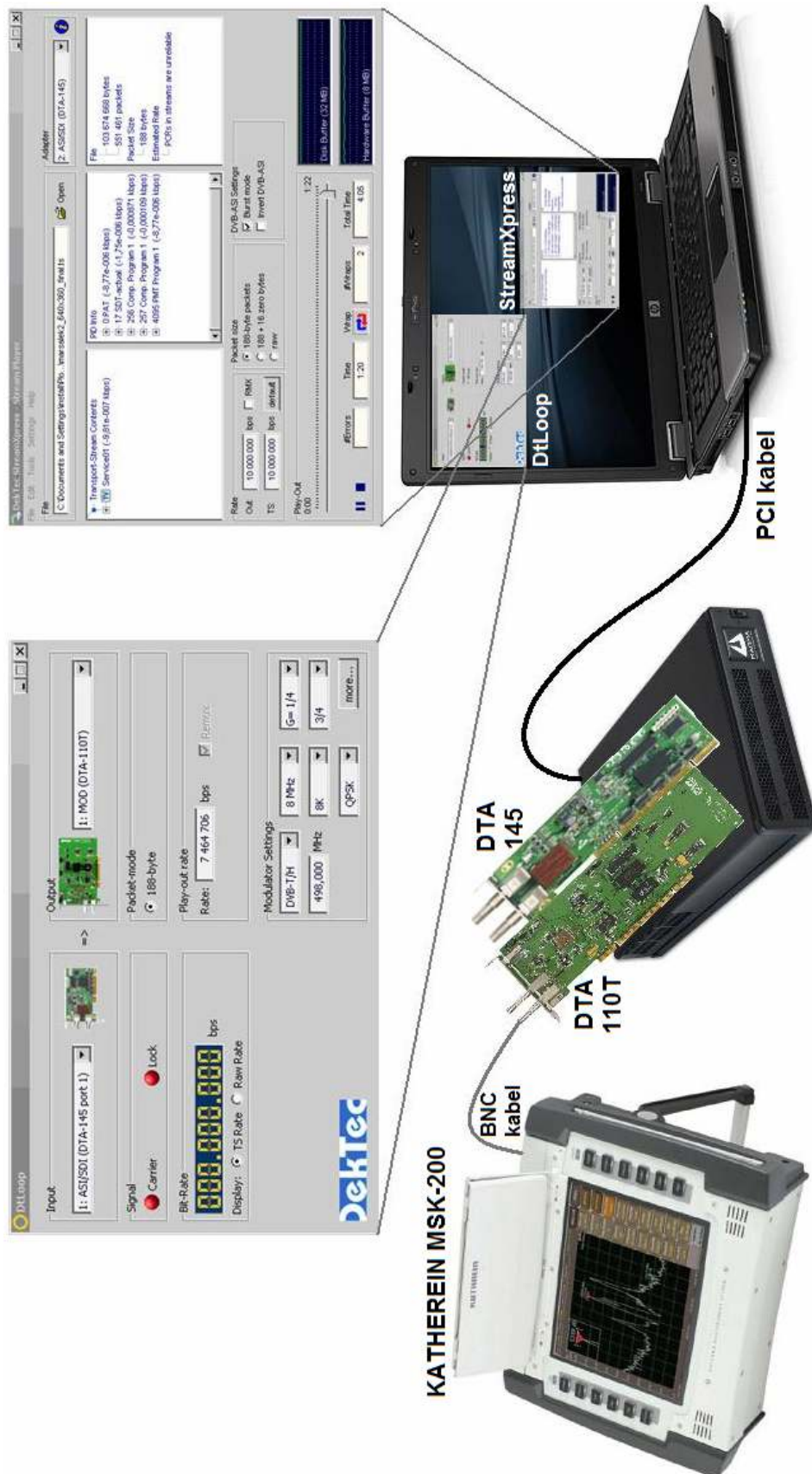
A.1 Blokové schéma systému DVB-T/H [11], [15]



A.2 Blokové schéma systému DVB-T2 [8]



B LABORATORNÍ PRACOVNÍSTĚ



C DEFINICE PŘENOSOVÝCH KANÁLŮ

C.1 Hodnoty parametrů přenosových kanálů RC₂₀ a RL₂₀ [11]

<i>i</i> -tá cesta	ρ_i	τ_i	θ_i	$\rho_{2,i}$	$\tau_{2,i}$	$\theta_{2,i}$
[-]	[-]	[μ s]	[rad]	[-]	[μ s]	[rad]
1	0,057662	1,003019	4,855212	0,057662	2,003019	1,855121
2	0,176809	5,422091	3,419109	0,176809	2,422091	2,419109
3	0,407163	0,518650	5,864470	0,407163	1,518650	3,864470
4	0,303585	2,751772	2,215894	0,303585	0,751772	1,215894
5	0,258782	0,602895	3,758058	0,258782	3,602895	0,758058
6	0,061831	1,016585	5,430202	0,061831	0,016585	2,430202
7	0,150340	0,143556	3,952093	0,150340	5,143556	4,952093
8	0,051534	0,153832	1,093586	0,051534	1,153832	0,093586
9	0,185074	3,324866	5,775198	0,185074	2,324866	4,775198
10	0,400967	1,935570	0,154459	0,400967	4,935570	6,154459
11	0,295723	0,429948	5,928383	0,295723	3,429948	1,928383
12	0,350825	3,228872	3,053023	0,350825	1,228872	2,053023
13	0,262909	0,848831	0,628578	0,262909	1,848831	1,628578
14	0,225894	0,073883	2,128544	0,225894	3,073883	2,128544
15	0,170996	0,203952	1,099463	0,170996	1,203952	4,099463
16	0,149723	0,194207	3,462951	0,149723	4,194207	3,462951
17	0,240140	0,924450	3,664773	0,240140	1,924450	3,664773
18	0,116587	1,381320	2,833799	0,116587	2,381320	3,833799
19	0,221155	0,640512	3,334290	0,221155	0,640512	3,334290
20	0,259730	1,368671	0,393889	0,259730	3,368671	0,393889

C.2 Hodnoty parametrů přenosových kanálů PI₁₂ a PO₁₂ [28]

<i>i</i> -tá cesta	PI ₁₂			PO ₁₂		
	ρ_i	τ_i	<i>Dopplerovo spektrum</i>	ρ_i	τ_i	<i>Dopplerovo spektrum</i>
[-]	[dB]	[μ s]	[distribuce]	[dB]	[μ s]	[distribuce]
1	0,0	0,0	Riceovo	0,0	0,0	Riceovo
2	-6,4	0,1	Rayleighovo	-1,5	0,2	Rayleighovo
3	-10,4	0,2	Rayleighovo	-3,8	0,6	Rayleighovo
4	-13,0	0,4	Rayleighovo	-7,3	1,0	Rayleighovo
5	-13,3	0,6	Rayleighovo	-9,8	1,4	Rayleighovo
6	-13,7	0,8	Rayleighovo	-13,3	1,8	Rayleighovo
7	-16,2	1,0	Rayleighovo	-15,9	2,3	Rayleighovo
8	-15,2	1,6	Rayleighovo	-20,6	3,4	Rayleighovo
9	-14,9	8,1	Rayleighovo	-19,0	4,5	Rayleighovo
10	-16,2	8,8	Rayleighovo	-17,7	5,0	Rayleighovo
11	-11,1	9,0	Rayleighovo	-18,0	5,3	Rayleighovo
12	-11,2	9,2	Rayleighovo	-19,3	5,7	Rayleighovo

C.3 Hodnoty parametrů přenosových kanálů TU₆ a RA₆ [12]

<i>i</i> -tá cesta	TU ₆			RA ₆		
	ρ_i	τ_i	<i>Dopplerovo spektrum</i>	ρ_i	τ_i	<i>Dopplerovo spektrum</i>
[-]	[dB]	[μ s]	[distribuce]	[dB]	[μ s]	[distribuce]
1	-3	0,0	Rayleighovo	0	0,0	Riceovo
2	0	0,2	Rayleighovo	-4	0,1	Rayleighovo
3	-2	0,5	Rayleighovo	-8	0,2	Rayleighovo
4	-6	1,6	Rayleighovo	-12	0,3	Rayleighovo
5	-8	2,3	Rayleighovo	-16	0,4	Rayleighovo
6	-10	5,0	Rayleighovo	-20	0,5	Rayleighovo

D VZOROVÁ LABORATORNÍ ÚLOHA

Digitální televizní a rozhlasové systémy (MDTV, LDTV)

Laboratorní úloha č. X

Vliv přenosového prostředí na DVB-T/H signál pro pevný, přenosný a mobilní pozemní příjem

Účelem laboratorní úlohy je měření vlivu reálného přenosového prostředí na DVB-T/H signál pro pevný, přenosný a mobilní pozemní příjem. Jednotlivé druhy pozemního příjmu jsou modelovány přenosovými kanály AWGN, RC_{20} , RL_{20} , PI_{12} , PO_{12} , RA_6 a TU_6 . Během měření získáte pomocí měřicího přijímače Kathrein MSK-33 základní představu o tvaru spektra přijímaného signálu digitální pozemní televize pro jednotlivé přenosové kanály, konstelačním diagramu vnitřní modulace, chybovosti přenosu, poměru S/N v přenosovém kanále a dále si pomocí měřicího přijímače ověříte obsah transportního toku MPEG-2 TS a parametry kódování vysílaného signálu DVB-T/H.

Teoretický úvod

Pozemní přenosové prostředí je charakterizováno nízkým odstupem signálu od šumu S/N a je vystaveno mnoha interferenčním vlivům, kromě AWGN (*Additive White Gaussian Noise*) je to zejména vliv odrazů. Vícecestné šíření způsobuje značné problémy při příjmu, jenž je velmi závislý na okamžitém stavu odražených signálů, které jsou určeny zejména výkonovou ztrátou (útlumem), zpožděním a fázovým úhlem vzhledem k přímému šíření signálu LOS (*Line Of Sight*) v závislosti na přenosové cestě. Za účelem využití přijímače lze definovat různé druhy pozemních příjmů, a to pevný (*fixed*) příjem, přenosný (*portable*) příjem a mobilní (*mobile*) příjem, které mají specifické vlastnosti a jsou přesně definovány standardy ETSI a normami DVB.

Pevný pozemní příjem je charakterizován statickou polohou přijímače s typickými parametry modulovaného signálu v režimu OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplex*), mód 8k s modulací 64-QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*), hodnota kódového poměru $CR=2/3$ a délka ochranného intervalu $GI=1/4$. Přenosová cesta se vyznačuje LOS signálem včetně odražených signálů bez Dopplerova posuvu definována přenosovými kanály: Gaussův (AWGN) kanál, Riceův (RC_{20}) kanál a Rayleighův (RL_{20}) kanál. AWGN přenosový kanál se vyznačuje přímou viditelností přijímače na vysílač. Signály jsou přijímány pouze přímou cestou bez jakýchkoli odrazů, přenosovým prostředím jsou pouze více či méně utlumeny a ovlivněny mírou bílého Gaussova šumu AWGN, který je generován zejména samotným přijímačem. Tento šum je charakterizován konstantní výkonovou hustotou v celém jeho spektru s pravděpodobností výskytu amplitud danou Gaussovým rozložením. Gaussův kanál zajišťuje přijímači nejlepší podmínky příjmu. RC_{20} přenosový kanál, rozšířen z AWGN kanálu, uvažuje vedle přímých přenosových cest signálu vliv vícecestného šíření signálu. Statistika šíření vícecestného signálu je charakterizována Riceovou distribucí. Odrazy v případě DVB signálu způsobují nárůst mezisymbolových interferencí ISI (*InterSymbol Interference*), které způsobují nárůst bitové chybovosti BER (*Bit Error Ratio*). Tento nárůst bývá korigován např. zvýšením přenášeného výkonu. Popis

matematického modelu Riceova přenosového kanálu využívá 20-ti odrazů, přičemž jednotlivé i -té odražené signály jsou definovány ziskem ρ_i [-], relativním časovým posunem τ_i [μ s] a fázovým úhlem θ_i [rad], uvedené v tab. X.1. RL_{20} přenosový kanál je odvozen z RC_{20} kanálu se změnou, kdy v důsledku narušení přímé viditelnosti mezi vysílačem a přijímačem je příjem možný pouze díky odrazům, jejichž rozložení odpovídá Rayleighově distribuci.

Přenosný pozemní příjem je charakterizován malou rychlostí, řádově jednotky km/h, pohybu přijímače vůči vysílači s typickými parametry modulovaného signálu v režimu OFDM, mód 4k s modulací 16-QAM, hodnota kódového poměru $CR=2/3$ a délka ochranného intervalu $GI=1/8$. Přenosová cesta se vyznačuje zpravidla mnohacestným příjmem přímých i odražených signálů s Dopplerovým posunem, definovaná přenosovými kanály Portable Indoor (PI_{12}) a Portable Outdoor (PO_{12}). PI_{12} přenosový kanál je definován pro šíření signálu uvnitř budovy s rychlostí pohybu přijímače 3 km/h. Statistika šíření signálu je charakterizována Dopplerovým spektrem s Riceovou distribucí pro první cestu šíření signálu a Rayleighovou distribucí pro ostatní cesty. [4] popisuje vlastnosti matematického modelu PI_{12} kanálu 12-ti odrazy, přičemž jednotlivé i -té odražené signály jsou definovány ziskem ρ_i [dB] a relativním časovým posunem τ_i [μ s], viz tab. X.2. PO_{12} přenosový kanál je definován pro šíření signálu vně budovy s rychlostí pohybu přijímače 3 km/h. Statistika šíření signálu a vlastnosti matematického modelu PO_{12} kanálu jsou totožné s přenosovým kanálem PI_{12} .

Mobilní pozemní příjem je charakterizován střední až vysokou rychlostí, (30 – 100) km/h, pohybu přijímače vůči vysílači s typickými parametry modulovaného signálu v režimu OFDM, mód 2k s modulací QPSK, hodnota kódového poměru $CR=1/2$ a délka ochranného intervalu $GI=1/16$. Přenosová cesta se vyznačuje zpravidla mnohacestným příjmem přímých i odražených signálů s Dopplerovým posunem, definovaná přenosovými kanály Typical Urban (TU_6) a Rural Area (RA_6). TU_6 přenosový kanál je definován pro šíření signálu v zastavěném městském prostředí s rychlostí pohybu přijímače 50 km/h. Statistika šíření signálu je charakterizována Dopplerovým spektrem s Rayleighovou distribucí. Norma [1] využívá k popisu a stanovení vlastností matematického modelu TU_6 kanálu 6-ti odrazů, přičemž jednotlivé i -té odražené signály jsou definovány ziskem ρ_i [dB] a relativním časovým posunem τ_i [μ s], viz tab. X.3. RA_6 přenosový kanál je definován pro šíření signálu ve venkovském prostředí s rychlostí pohybu přijímače 100 km/h. Je odvozen z TU_6 kanálu, statistika šíření signálu je charakterizována Dopplerovým spektrem s Riceovou distribucí pro první cestu šíření signálu a Rayleighovou distribucí pro ostatní cesty. Norma [1] využívá k popisu a stanovení vlastností matematického modelu RA_6 kanálu 6-ti odrazů, viz tab. X.3.

Dopplerův jev: pokud je přijímač vzhledem k vysílači v pohybu s určitou rychlostí, dojde vlivem Dopplerova jevu k posunu frekvence Δf_D definované zjednodušeným vztahem:

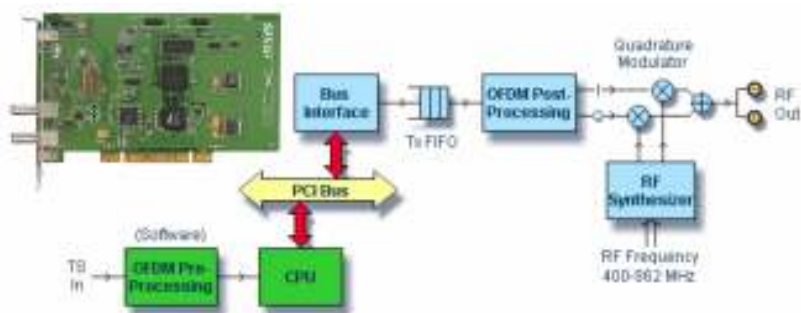
$$\Delta f_D = v \cdot \frac{f_0}{\gamma} \quad [\text{Hz}], \quad (1)$$

kde: v [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] - rychlost pohybu přijímače,
 f_0 [Hz] - nosná frekvence signálu,
 γ [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] - rychlost elektromagnetického vlnění.

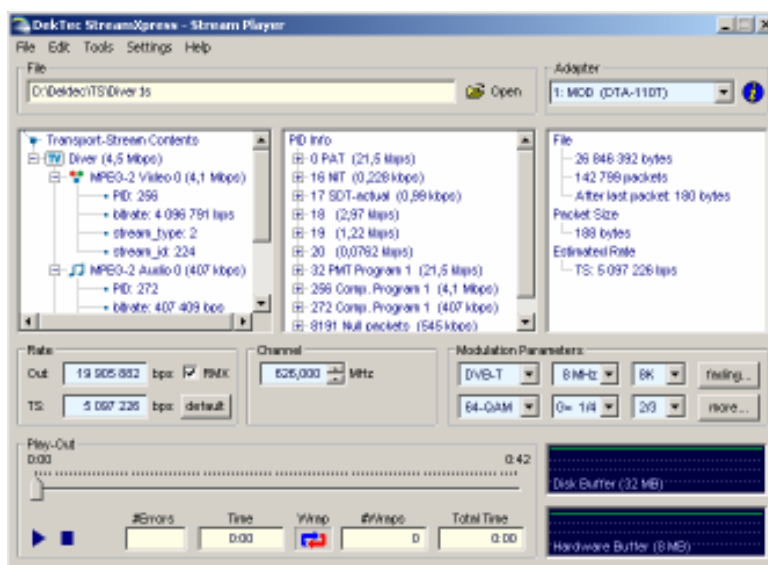
Dopplerův posuv se odráží ve frekvenčním posuvu přijímaných OFDM nosných a ten je funkcí rychlosti a směru pohybu přijímače. Pokud je známá rychlost přijímače v a přenášená nosná frekvence f_0 , lze posuv frekvence Δf_D kompenzovat pomocí automatického doladování kmitočtu AFC (*Automatic Frequency Control*).

Laboratorní úloha využívá pro realizaci modulátoru kartu DTA-110T, na obr. X.1 spolu s blokovým schématem modulátoru, která je osazena v PCI slotu počítače PC. Modulátor podporuje vícestavové QAM, OFDM a VSB (*Vestigial SideBand*) modulace s šířkou pásma (5-8)MHz, disponuje RF (*Radio Frequency*) výstupem s úrovní (-29 ± 2) dBm.

Karta je opatřena dvěma výstupními konektory typu F (75Ω). Samotný modulátor se softwarově ovládá pomocí programu StreamXpress-Stream Player, na obr. X.2, jehož součástí je implementovaný kanálový simulátor přenosového prostředí, viz obr. X.3.



Obr. X.1: PCI karta a blokové schéma modulátoru DTA-110T



Obr. X.2: Přehrávač transportních toků TS včetně modulátoru StreamXpress-Stream Player



Obr. X.3: Kanálový simulátor přenosového prostředí StreamXpress-Chanel Simulator

Tab. X.1: Hodnoty parametrů přenosových kanálů RC₂₀ a RL₂₀

<i>i</i> -tá cesta	ρ_i	τ_i	θ_i
[-]	[-]	[μ s]	[rad]
1	0,057662	1,003019	4,855212
2	0,176809	5,422091	3,419109
3	0,407163	0,518650	5,864470
4	0,303585	2,751772	2,215894
5	0,258782	0,602895	3,758058
6	0,061831	1,016585	5,430202
7	0,150340	0,143556	3,952093
8	0,051534	0,153832	1,093586
9	0,185074	3,324866	5,775198
10	0,400967	1,935570	0,154459
11	0,295723	0,429948	5,928383
12	0,350825	3,228872	3,053023
13	0,262909	0,848831	0,628578
14	0,225894	0,073883	2,128544
15	0,170996	0,203952	1,099463
16	0,149723	0,194207	3,462951
17	0,240140	0,924450	3,664773
18	0,116587	1,381320	2,833799
19	0,221155	0,640512	3,334290
20	0,259730	1,368671	0,393889

Tab. X.2: Hodnoty parametrů přenosových kanálů PI₁₂ a PO₁₂

<i>i</i> -tá cesta	PI ₁₂			PO ₁₂		
	ρ_i	τ_i	<i>Dopplerovo spektrum</i>	ρ_i	τ_i	<i>Dopplerovo spektrum</i>
[-]	[dB]	[μ s]	[distribuce]	[dB]	[μ s]	[distribuce]
1	0,0	0,0	Riceovo	0,0	0,0	Riceovo
2	-6,4	0,1	Rayleighovo	-1,5	0,2	Rayleighovo
3	-10,4	0,2	Rayleighovo	-3,8	0,6	Rayleighovo
4	-13,0	0,4	Rayleighovo	-7,3	1,0	Rayleighovo
5	-13,3	0,6	Rayleighovo	-9,8	1,4	Rayleighovo
6	-13,7	0,8	Rayleighovo	-13,3	1,8	Rayleighovo
7	-16,2	1,0	Rayleighovo	-15,9	2,3	Rayleighovo
8	-15,2	1,6	Rayleighovo	-20,6	3,4	Rayleighovo
9	-14,9	8,1	Rayleighovo	-19,0	4,5	Rayleighovo
10	-16,2	8,8	Rayleighovo	-17,7	5,0	Rayleighovo
11	-11,1	9,0	Rayleighovo	-18,0	5,3	Rayleighovo
12	-11,2	9,2	Rayleighovo	-19,3	5,7	Rayleighovo

Tab. X.3: Hodnoty parametrů přenosových kanálů TU₆ a RA₆

<i>i</i> -tá cesta	TU ₆			RA ₆		
	ρ_i	τ_i	<i>Dopplerovo spektrum</i>	ρ_i	τ_i	<i>Dopplerovo spektrum</i>
[-]	[dB]	[μ s]	[distribuce]	[dB]	[μ s]	[distribuce]
1	-3	0,0	Rayleighovo	0	0,0	Riceovo
2	0	0,2	Rayleighovo	-4	0,1	Rayleighovo
3	-2	0,5	Rayleighovo	-8	0,2	Rayleighovo
4	-6	1,6	Rayleighovo	-12	0,3	Rayleighovo
5	-8	2,3	Rayleighovo	-16	0,4	Rayleighovo
6	-10	5,0	Rayleighovo	-20	0,5	Rayleighovo

Zadání a postup měření

1. Vypočtete podle vztahu (1) Dopplerův frekvenční posuv Δf_D pro jednotlivé přenosové kanály přenosného a mobilního pozemního příjmu. Číslo kanálu, na kterém budete laboratorní úlohu realizovat, vám sdělí na požádání váš vyučující. V průběhu měření porovnejte vámi vypočtené hodnoty Dopplerova posuvu Δf_D s hodnotami kanálového simulátoru přenosového prostředí, který po zadání jednotlivých požadovaných rychlostí v odpovídající konkrétním přenosovým kanálům automaticky Dopplerův posuv Δf_D dopočítá.
2. Seznamte se s obsluhou přístrojového a softwarového vybavení laboratorního pracoviště (měřicí přijímač Kathrein MSK-33, přehrávač transportních toků TS StreamXpress-Stream Player). Spust'te program „StreamXpress“, zástupce s ikonou „duhy“ naleznete na ploše počítače. Návod k měřicímu přijímači je součástí pracoviště laboratorní úlohy, ovládání přehrávače transportních toků TS je intuitivní.
3. V programu „StreamXpress“ načt'ete přes volbu *File->Open* z adresáře D:\Dektec\TS transportní tok MPEG-2 TS Diver.ts, viz obr. X.2. Nastavte nosný kmitočet f_0 signálu dle vámi přiděleného čísla kanálu a parametry modulace podle obr. X.2. Pomocí tlačítka „Play“ spust'ete přehrávání transportního toku TS. Nalad'ete na měřicím přijímači MTP nosný kmitočet f_0 přijímaného signálu. Vyzkoušejte si ladění přijímače po kanálech a průběžně po kmitočtu.

Postup: Stisk tlačítka *TV – < > rf chan C40 (< > rf frq 626 MHz)* – přepnout na měření *digit. DVBT* (další možnosti měření *analog a DVBC*) – *TV MEASURE – ch BW 8 MHz – measure – min/max*.

4. Poznamenejte si z programu „StreamXpress“ identifikátory paketů MPEG-2 TS tzv. Video-PID a Audio-PID, typ použité komprese MPEG a údaj o kryptování (CA ano/ne) transportního toku Diver.ts. Zobrazte na obrazovce měřicího přijímače MTP identifikátory transportního toku MPEG-2 TS a porovnejte je s údaji uvedenými v programu „StreamXpress“.

Postup: Stisk tlačítka *MPEG Picture* – (počkat na hlášení *Waiting for Front End, Waiting for PAT*) – na obrazovce údaje Video-PID, Audio-PID, typ komprese MPEG, televizní norma, kryptování CA, status.

5. Pro měření simulace přenosového prostředí pevného pozemního příjmu nastavte v programu „StreamXpress“: mód 8k s modulací 64-QAM v režimu OFDM, hodnotu kódového poměru $CR=2/3$ a délku ochranného intervalu $GI=1/4$. Přeb volbu „fading“ otevřete softwarový kanálový simulátor přenosového prostředí, na obr. X.3. Po aktivaci generátoru šumu AWGN lze nastavovat poměr S/N [dB]. Volbou simulace mnoho-cestného šíření signálu lze modelovat jednotlivé i -té přenosové cesty signálu přenosových kanálů RC_{20} a RL_{20} , dle tab. X.1. Nastavte počáteční hodnotu poměru $S/N=30$ dB a pomocí tlačítka „Play“ („StreamXpress“) spust'ete přehrávání transportního toku TS. Během měření kontinuálně snižujte hodnotu S/N s krokem 1dB, pomocí MTP měřte bitovou chybovost před Viterbiho dekódováním (BER_I) a po Viterbiho dekódování (BER_{II}) v závislosti na odečtené hodnotě S/N [dB] do doby, kdy MTP již nedokáže přijímaný transportní tok MPEG-2 TS analyzovat. Takto proměřte přenosové kanály AWGN, RC_{20} a RL_{20} . Konfiguraci přenosových kanálů RC_{20} a RL_{20} si uložte přes volbu *Profile->Save* pod patřičným názvem do adresáře D:\Dektec\Přenosové_kanály pro pozdější použití. Naměřené hodnoty vyneste do grafických závislostí $BER_I=f(S/N)$ a $BER_{II}=f(S/N)$. U závislosti $BER_{II}=f(S/N)$ vyneste křivku znázorňující hranici bezchybného příjmu, tzv. QEF (*Quasi Error Free*).

Zobrazte a ověřte si informace o parametrech vysílání (mód modulace, vnitřní modulace, kódový poměr CR , ochranný interval GI , číslo kanálu a kmitočet).

Postup: Stisk tlačítka *Mode – CONST.* – *ch BW 8 MHz – param on/off* (zobrazí informace o parametrech vysílání).

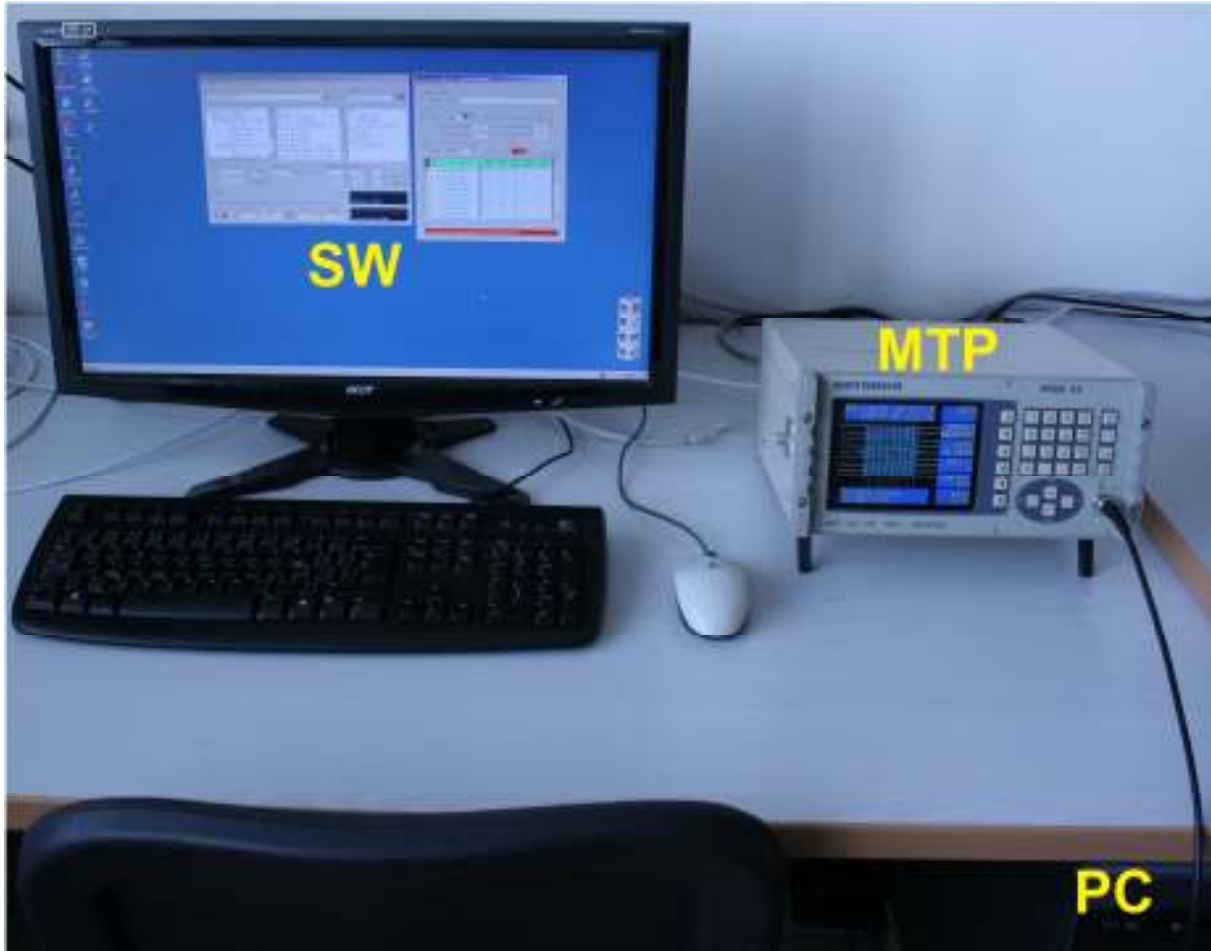
6. Pro měření simulace přenosového prostředí přenosného pozemního příjmu nastavte v programu „StreamXpress“: mód 8k s modulací 16-QAM v režimu OFDM, hodnotu kódového poměru $CR=2/3$ a délku ochranného intervalu $GI=1/8$. Při měření postupujte analogicky, viz předchozí bod měření. Proměřte a graficky zpracujte závislosti $BER=f(S/N)$ pro přenosové kanály AWGN, PI_{12} a PO_{12} . Konfiguraci přenosových kanálů PI_{12} a PO_{12} si uložte.
7. Pro měření simulace přenosového prostředí mobilního pozemního příjmu nastavte v programu „StreamXpress“: mód 2k s modulací QPSK v režimu OFDM, hodnotu kódového poměru $CR=1/2$ a délku ochranného intervalu $GI=1/16$. Při měření postupujte analogicky, viz 5. bod měření. Proměřte a graficky zpracujte závislosti $BER=f(S/N)$ pro přenosové kanály AWGN, RA_6 a TU_6 . Konfiguraci přenosových kanálů RA_6 a TU_6 si uložte.
8. Zobrazte tvar spektra jednotlivých přenosových kanálů AWGN, RC_{20} a RL_{20} pro pevný pozemní příjem, PI_{12} a PO_{12} pro přenosný pozemní příjem, RA_6 a TU_6 pro mobilní pozemní příjem. V programu „StreamXpress“ nastavte jednotlivé parametry modulace dle druhu pozemního příjmu a v softwarovém kanálovém simulátoru přenosového prostředí si přes volbu *Profile->Open* načtete jednotlivé vaše uložené přenosové kanály.

Postup: Stisk tlačítka *Mode – SPECTR.* – *span small – marker dig. – max on – \wedge \vee* změna referenční úrovně spektra (zobrazení stupnice na displeji – min 70-30 dB μ V, max 130-90 dB μ V) – ovládání kurzorů $\langle \rangle$.

Poznámky k měření

1. K laboratornímu počítači se přihlásíte jako „Workstation only“, login „student“, password „student“. Během měření je zakázáno prohlížet www stránky a připojovat se k FTP serverům. Pokud během laboratorního cvičení počítač nabídne aktualizaci některého programu, zavolejte vyučujícího nebo ji zrušte. Současně je zakázáno používat Wi-Fi a vlastní USB paměti (klíčenky apod.).
2. Při nastavování jednotlivých hodnot parametrů modulace a parametrů jednotlivých kanálů kanálového simulátoru přenosového prostředí je vhodné mít pozastaveno přehrávání transportního toku TS, předejde se tak případnému selhání programu „StreamXpress“.
3. Při zadávání hodnot jednotlivých veličin v kanálovém simulátoru přenosového prostředí, definující konkrétní přenosové pozemní kanály dle tab. X.1, X.2 a X.3, pozor na jednotky veličin.
4. V teoretickém úvodu je pro přenosný pozemní příjem definován mód 4k v režimu OFDM. V parametrech modulace programu „StreamXpress“ lze tuto hodnotu nastavit, ale jelikož měřicí přijímač Kathrein MSK-33 při analýze přijatého digitálně modulovaného signálu nepodporuje mód 4k, pro měřicí účely je zvolen mód 8k.

5. Po skončení měření laboratorní úlohy vraťte nastavení měřicího přijímače MTP, programu „StreamXpress“ a především kanálového simulátoru přenosového prostředí do původního nastavení, nezapomeňte po sobě smazat z adresáře D:\Dektec\ Přenosové_kanály vámi vytvořené přenosové kanály.



Obr. X.4: Rozmístění přístrojů laboratorního pracoviště – úloha č. X

Použité měřicí přístroje

- PC** počítač PC Intel (R) Core (TM)2 CPU, 2.13GHz, 2.98 GB RAM
MTP měřicí televizní přijímač PAL/DVB-C/DVB-T Kathrein MSK-33
SW software StreamXpress-Stream Player + hardwarový klíč
 software StreamXpress-Channel Simulator
 propojovací vodič 1 x BNC-BNC

Závěr

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

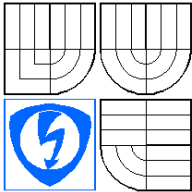
Kontrolní otázky

1. Na kterých veličinách závisí Dopplerův posun frekvence Δf_D a jak ho lze kompenzovat?
2. Kterými parametry se posuzuje kvalita přijímaného signálu DVB-T a jaký je rozdíl mezi kanálovou chybovostí a chybovostí po Viterbiho dekódování?
3. Jaké hodnotě bitové chybovosti (řádově) po Viterbiho dekódování odpovídá příjem označený na měřicím přijímači jako QEF (*Quasi Error Free*)?
4. Který z pozemních příjmů DVB-T signálu má nejrobustnější protichybové zabezpečení, jaké jsou jeho výhody a nevýhody?
5. Který z přenosových kanálů je pro šíření DVB-T signálu pro jednotlivé druhy pozemního příjmu nejméně vhodný a který naopak nejvhodnější? Zdůvodněte.

Použitá a doporučená literatura

- [1] DVB-T. ETSI TR 101 290 V1.2.1 (2001-05). *Digital Video Broadcasting (DVB); Measurement guidelines for DVB systems*. 2001.
- [2] FISCHER, W. *Digital Television. A practical Guide for Engineers*. Springer, 2004.
- [3] LEGÍŇ, M. *Televizní technika DVB-T*. Praha: BEN – technická literatura, 2006. 286s. ISBN 80-7300-204-3
- [4] LÓPEZ, F. *Wing TV: Services to Wireless, Integrated, Nomadic, GPRS-UMTS & TV Handheld Terminals; Validating DVB-H Concept*. 2006.
- [5] REIMERS, U. *DVB. The Family of International Standards for Digital Video Broadcasting*. Springer, 2005.

E VYPRACOVÁNÍ VZOROVÉ LABORATORNÍ ÚLOHY

 VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ	Předmět: Digitální televizní a rozhlasové systémy	
	Příjmení, jméno: Pospíchal Martin	
	Ročník: 2.	Studijní skupina: M2EST/06
	Spolupracoval:	Měřeno dne: 11. 5. 2011
Kontroloval:	Hodnocení:	Odevzdáno dne: 20. 5. 2011
Číslo úlohy: X.	Název úlohy: Vliv přenosového prostředí na DVB-T/H signál pro pevný, přenosný a mobilní pozemní příjem	

Zadání

- Vypočtete podle vztahu (1) Dopplerův frekvenční posuv Δf_D pro jednotlivé přenosové kanály přenosného a mobilního pozemního příjmu. Číslo kanálu, na kterém budete laboratorní úlohu realizovat, vám sdělí na požádání váš vyučující. V průběhu měření porovnejte vámi vypočtené hodnoty Dopplerova posuvu Δf_D s hodnotami kanálového simulátoru přenosového prostředí.
- Seznamte se s obsluhou přístrojového a softwarového vybavení laboratorního pracoviště (měřicí přijímač Kathrein MSK-33, přehrávač transportních toků TS StreamXpress-Stream Player).
- V programu „StreamXpress“ načtete přes volbu *File->Open* z adresáře D:\Dektec\TS transportní tok MPEG-2 TS Diver.ts. Nastavte nosný kmitočet f_0 signálu dle vámi přiděleného čísla kanálu a parametry modulace. Naladte na měřicím přijímači MTP nosný kmitočet f_0 přijímaného signálu. Vyzkoušejte si ladění přijímače po kanálech a průběžně po kmitočtu.
- Poznamenejte si z programu „StreamXpress“ identifikátory paketů MPEG-2 TS tzv. Video-PID a Audio-PID, typ použité komprese MPEG a údaj o kryptování (CA ano/ne) transportního toku Diver.ts. Zobrazte na obrazovce měřicího přijímače MTP identifikátory transportního toku MPEG-2 TS a porovnejte je s údaji uvedenými v programu „StreamXpress“.
- Pro měření simulace přenosového prostředí pevného pozemního příjmu nastavte v programu „StreamXpress“: mód 8k s modulací 64-QAM v režimu OFDM, hodnotu kódového poměru $CR=2/3$ a délku ochranného intervalu $GI=1/4$. Přebu volbu „fading“ otevřete softwarový kanálový simulátor přenosového prostředí. Po aktivaci generátoru šumu AWGN lze nastavovat poměr S/N [dB]. Volbou simulace mnohocestného šíření signálu lze modelovat jednotlivé i -té přenosové cesty signálu přenosových kanálů RC_{20} a RL_{20} . Nastavte počáteční hodnotu poměru $S/N=30$ dB a pomocí tlačítka „Play“ („StreamXpress“) spusťte přehrávání transportního toku TS. Během měření

kontinuálně snižujte hodnotu S/N s krokem 1dB, pomocí MTP měřte bitovou chybovost před Viterbiho dekódováním (BER_I) a po Viterbiho dekódování (BER_{II}) v závislosti na odečtené hodnotě S/N [dB] do doby, kdy MTP již nedokáže přijímaný transportní tok MPEG-2 TS analyzovat. Takto proměřte přenosové kanály AWGN, RC₂₀ a RL₂₀. Konfiguraci přenosových kanálů RC₂₀ a RL₂₀ si uložte přes volbu *Profile->Save* pod patřičným názvem do adresáře D:\Dektec\Přenosové_kanály pro pozdější použití. Naměřené hodnoty vyneste do grafických závislostí $BER_I=f(S/N)$ a $BER_{II}=f(S/N)$. U závislosti $BER_{II}=f(S/N)$ vyneste křivku znázorňující hranici bezchybného příjmu, tzv. QEF (*Quasi Error Free*). Zobrazte a ověřte si informace o parametrech vysílání (mód modulace, vnitřní modulace, kódový poměr CR , ochranný interval GI , číslo kanálu a kmitočet).

6. Pro měření simulace přenosového prostředí přenosného pozemního příjmu nastavte v programu „StreamXpress“: mód 8k s modulací 16-QAM v režimu OFDM, hodnotu kódového poměru $CR=2/3$ a délku ochranného intervalu $GI=1/8$. Proměřte a graficky zpracujte závislosti $BER=f(S/N)$ pro přenosové kanály AWGN, PI₁₂ a PO₁₂. Konfiguraci přenosových kanálů PI₁₂ a PO₁₂ si uložte.
7. Pro měření simulace přenosového prostředí mobilního pozemního příjmu nastavte v programu „StreamXpress“: mód 2k s modulací QPSK v režimu OFDM, hodnotu kódového poměru $CR=1/2$ a délku ochranného intervalu $GI=1/16$. Proměřte a graficky zpracujte závislosti $BER=f(S/N)$ pro přenosové kanály AWGN, RA₆ a TU₆. Konfiguraci přenosových kanálů RA₆ a TU₆ si uložte.
8. Zobrazte tvar spektra jednotlivých přenosových kanálů AWGN, RC₂₀ a RL₂₀ pro pevný pozemní příjem, PI₁₂ a PO₁₂ pro přenosný pozemní příjem, RA₆ a TU₆ pro mobilní pozemní příjem.

Teoretický úvod

Pozemní přenosové prostředí je charakterizováno nízkým odstupem signálu od šumu S/N a je vystaveno mnoha interferenčním vlivům, kromě AWGN (*Additive White Gaussian Noise*) je to zejména vliv odrazů. Vícecestné šíření způsobuje značné problémy při příjmu, jenž je velmi závislý na okamžitém stavu odražených signálů, které jsou určeny zejména výkonovou ztrátou (útlumem), zpožděním a fázovým úhlem vzhledem k přímému šíření signálu LOS (*Line Of Sight*) v závislosti na přenosové cestě. Za účelem využití přijímače lze definovat různé druhy pozemních příjmů, a to pevný (*fixed*) příjem, přenosný (*portable*) příjem a mobilní (*mobile*) příjem, které mají specifické vlastnosti a jsou přesně definovány standardy ETSI a normami DVB.

Pevný pozemní příjem je charakterizován statickou polohou přijímače s typickými parametry modulovaného signálu v režimu OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplex*), mód 8k s modulací 64-QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*), hodnota kódového poměru $CR=2/3$ a délka ochranného intervalu $GI=1/4$. Přenosová cesta se vyznačuje LOS signálem včetně odražených signálů bez Dopplerova posuvu definována přenosovými kanály: Gaussův (AWGN) kanál, Riceův (RC₂₀) kanál a Rayleighův (RL₂₀) kanál. AWGN přenosový kanál se vyznačuje přímou viditelností přijímače na vysílač. Signály jsou přijímány pouze přímou přenosovou cestou bez jakýchkoli odrazů, přenosovým prostředím jsou pouze více či méně utlumeny a ovlivněny mírou bílého Gaussova šumu AWGN, který je generován zejména samotným přijímačem. Gaussův přenosový kanál zajišťuje přijímači nejlepší podmínky příjmu. RC₂₀ přenosový kanál, rozšířen z AWGN kanálu, uvažuje vedle přímých přenosových cest signálu vliv vícecestného šíření signálu.

RL₂₀ přenosový kanál je odvozen z RC₂₀ kanálu se změnou, kdy v důsledku narušení přímé viditelnosti mezi vysílačem a přijímačem je příjem možný pouze díky odrazům.

Přenosný pozemní příjem je charakterizován malou rychlostí, řádově jednotky km/h, pohybu přijímače vůči vysílači s typickými parametry modulovaného signálu v režimu OFDM, mód 4k s modulací 16-QAM, hodnota kódového poměru $CR=2/3$ a délka ochranného intervalu $GI=1/8$. Přenosová cesta se vyznačuje zpravidla mnohacestným příjmem přímých i odražených signálů s Dopplerovým posunem, definovaná přenosovými kanály Portable Indoor (PI₁₂) a Portable Outdoor (PO₁₂). PI₁₂ přenosový kanál je definován pro šíření signálu uvnitř budovy s rychlostí pohybu přijímače 3 km/h. PO₁₂ přenosový kanál je definován pro šíření signálu vně budovy s rychlostí pohybu přijímače 3 km/h.

Mobilní pozemní příjem je charakterizován střední až vysokou rychlostí, (30 – 100) km/h, pohybu přijímače vůči vysílači s typickými parametry modulovaného signálu v režimu OFDM, mód 2k s modulací QPSK, hodnota kódového poměru $CR=1/2$ a délka ochranného intervalu $GI=1/16$. Přenosová cesta se vyznačuje zpravidla mnohacestným příjmem přímých i odražených signálů s Dopplerovým posunem, definovaná přenosovými kanály Typical Urban (TU₆) a Rural Area (RA₆). TU₆ přenosový kanál je definován pro šíření signálu v zastavěném městském prostředí s rychlostí pohybu přijímače 50 km/h. RA₆ přenosový kanál je definován pro šíření signálu ve venkovském prostředí s rychlostí pohybu přijímače 100 km/h.

Dopplerův jev: pokud je přijímač vzhledem k vysílači v pohybu s určitou rychlostí, dojde vlivem Dopplerova jevu k posunu frekvence Δf_D definované zjednodušeným vztahem:

$$\Delta f_D = v \cdot \frac{f_0}{\gamma} \quad [\text{Hz}], \quad (1)$$

kde: v [m.s⁻¹] - rychlost pohybu přijímače,
 f_0 [Hz] - nosná frekvence signálu,
 γ [m.s⁻¹] - rychlost elektromagnetického vlnění,

Dopplerův posuv se odráží ve frekvenčním posuvu přijímaných OFDM nosných a ten je funkcí rychlosti a směru pohybu přijímače. Pokud je známá rychlost přijímače v a přenášená nosná frekvence f_0 , lze posuv frekvence Δf_D kompenzovat pomocí automatického doladování kmitočtu AFC (*Automatic Frequency Control*).

Vypracování

Ad 1. Dopplerův frekvenční posuv Δf_D pro jednotlivé přenosové kanály přenosného a mobilního pozemního příjmu. Kanál č. 40 => $f_0 = 626\text{MHz}$.

Dopplerův frekvenční posuv Δf_D pro přenosové kanály PI₁₂ a PO₁₂ přenosného pozemního příjmu. Rychlost pohybu přijímače pro oba kanály $v = 3\text{km/h}$. Rychlost elektromagnetického vlnění $\gamma = 3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$.

$$\Delta f_D = v \cdot \frac{f_0}{\gamma} = \frac{3 \cdot 626 \cdot 10^6}{3,6 \cdot 3 \cdot 10^8} = 1,74 \text{ Hz}$$

Dopplerův frekvenční posuv Δf_D pro přenosové kanály TU₆ a RA₆ mobilního pozemního příjmu. Rychlost pohybu přijímače pro přenosový kanál TU₆ $v = 50\text{km/h}$, rychlost pohybu přijímače pro přenosový kanál RA₆ $v = 100\text{km/h}$. Rychlost elektromagnetického vlnění $\gamma = 3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$.

$$\Delta f_D = v \cdot \frac{f_0}{\gamma} = \frac{50 \cdot 626 \cdot 10^6}{3,6 \cdot 3 \cdot 10^8} = 28,98 \text{ Hz}$$

$$\Delta f_D = v \cdot \frac{f_0}{\gamma} = \frac{100 \cdot 626 \cdot 10^6}{3,6 \cdot 3 \cdot 10^8} = 57,96 \text{ Hz}$$

Ad 4. Identifikátory paketů MPEG-2 TS tzv. Video-PID a Audio-PID, typ použité komprese MPEG a údaj o kryptování (CA ano/ne) transportního toku Diver.ts.

Identifikátory paketů MPEG-2 TS: Video-PID: 256
 Audio-PID: 272
 Komprese: MPEG-2
 Kryptování CA: ne

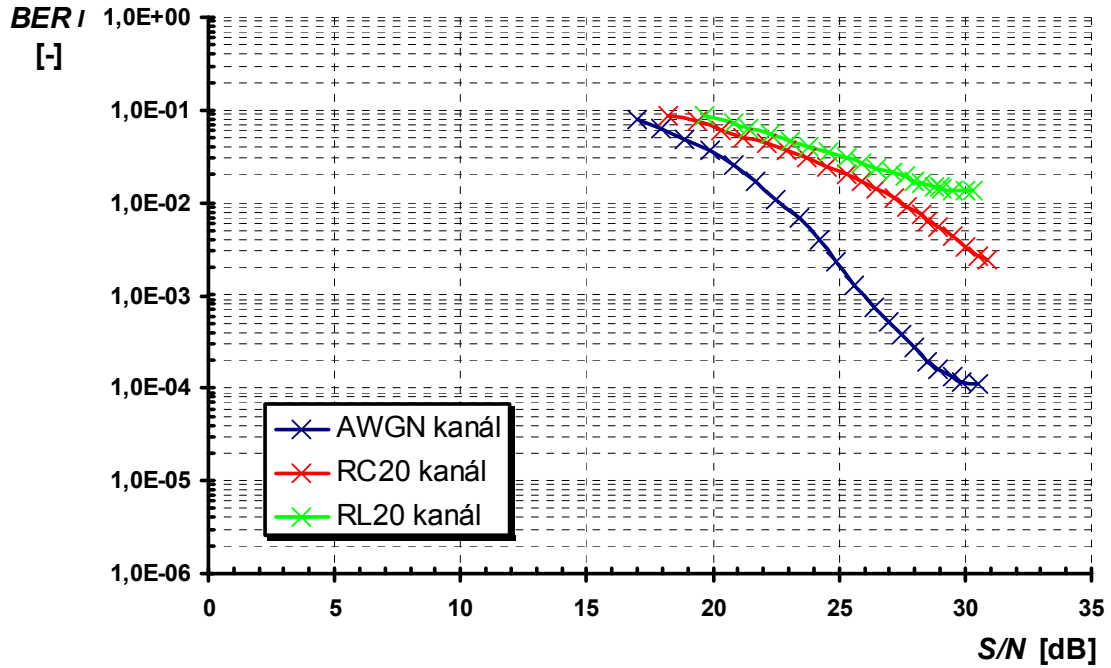
Po zobrazení identifikátorů transportního toku MPEG-2 TS na obrazovce měřicího přístroje MTP se s výše uvedenými údaji dále zobrazilo:

Televizní norma: dig. television
 Status: running

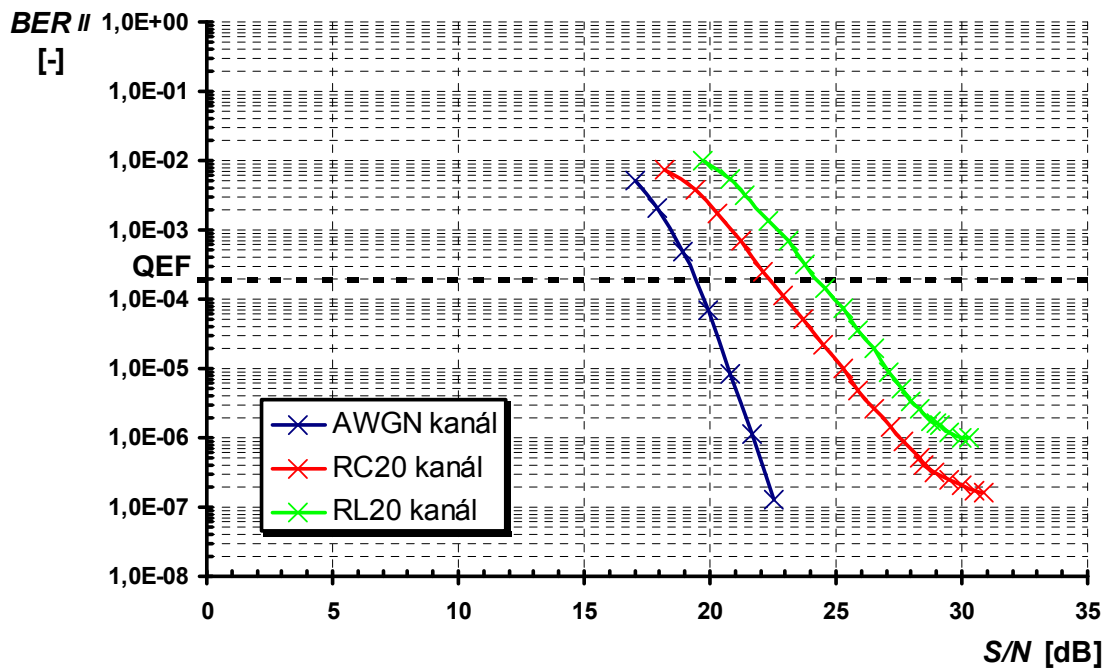
Ad 5. Měření simulace přenosového prostředí pevného pozemního příjmu pro přenosové kanály AWGN, RC₂₀ a RL₂₀. Parametry modulace: mód 8k s modulací 64-QAM v režimu OFDM, hodnota kódového poměru CR=2/3 a délka ochranného intervalu GI=1/4.

Tab. X.1: Naměřené hodnoty závislosti BER = f(S/N) pro pevný pozemní příjem.
 Přenosové kanály AWGN, RC₂₀ a RL₂₀

S/N [dB]	AWGN kanál		S/N [dB]	RC ₂₀ kanál		S/N [dB]	RL ₂₀ kanál	
	BER _I [-]	BER _{II} [-]		BER _I [-]	BER _{II} [-]		BER _I [-]	BER _{II} [-]
30,5	1,10E-04	<1,00E-11	30,9	2,50E-03	1,60E-07	30,3	1,30E-02	9,80E-07
29,9	1,20E-04	<1,00E-11	30,5	2,70E-03	1,70E-07	30,0	1,30E-02	9,80E-07
29,5	1,30E-04	<1,00E-11	30,0	3,40E-03	2,00E-07	29,5	1,40E-02	1,20E-06
28,9	1,60E-04	<1,00E-11	29,5	4,40E-03	2,50E-07	29,1	1,40E-02	1,50E-06
28,5	1,90E-04	<1,00E-11	28,9	5,50E-03	3,20E-07	29,0	1,50E-02	1,60E-06
28,0	2,70E-04	<1,00E-11	28,5	6,10E-03	4,10E-07	28,8	1,50E-02	1,80E-06
27,5	3,80E-04	<1,00E-11	28,3	7,40E-03	5,30E-07	28,3	1,60E-02	2,60E-06
27,0	5,20E-04	<1,00E-11	27,7	9,10E-03	8,90E-07	28,0	1,70E-02	3,40E-06
26,4	7,60E-04	<1,00E-11	27,2	1,10E-02	1,40E-06	27,6	1,90E-02	5,20E-06
25,6	1,30E-03	<1,00E-11	26,5	1,40E-02	2,70E-06	27,1	2,10E-02	8,90E-06
24,9	2,30E-03	9,60E-09	25,9	1,70E-02	4,90E-06	26,5	2,30E-02	1,90E-05
24,2	3,90E-03	9,60E-09	25,3	2,10E-02	9,80E-06	25,9	2,70E-02	3,50E-05
23,4	6,80E-03	1,00E-11	24,5	2,50E-02	2,20E-05	25,3	3,00E-02	7,20E-05
22,5	1,10E-02	1,30E-07	23,7	3,10E-02	5,20E-05	24,6	3,50E-02	1,40E-04
21,7	1,70E-02	1,10E-06	22,9	3,60E-02	1,10E-04	23,8	4,00E-02	3,10E-04
20,8	2,50E-02	8,30E-06	22,1	4,30E-02	2,50E-04	23,1	4,70E-02	6,80E-04
19,9	3,60E-02	7,10E-05	21,2	5,10E-02	6,90E-04	22,3	5,40E-02	1,40E-03
18,9	4,80E-02	4,80E-04	20,3	6,10E-02	1,70E-03	21,4	6,20E-02	3,10E-03
17,9	6,20E-02	2,10E-03	19,4	7,40E-02	3,80E-03	20,8	7,30E-02	5,30E-03
17,0	7,90E-02	5,10E-03	18,2	8,50E-02	7,50E-03	19,7	8,50E-02	9,70E-03



Obr. X.1: Grafická závislost $BER_I = f(S/N)$ pro pevný pozemní příjem.
Přenosové kanály AWGN, RC₂₀ a RL₂₀

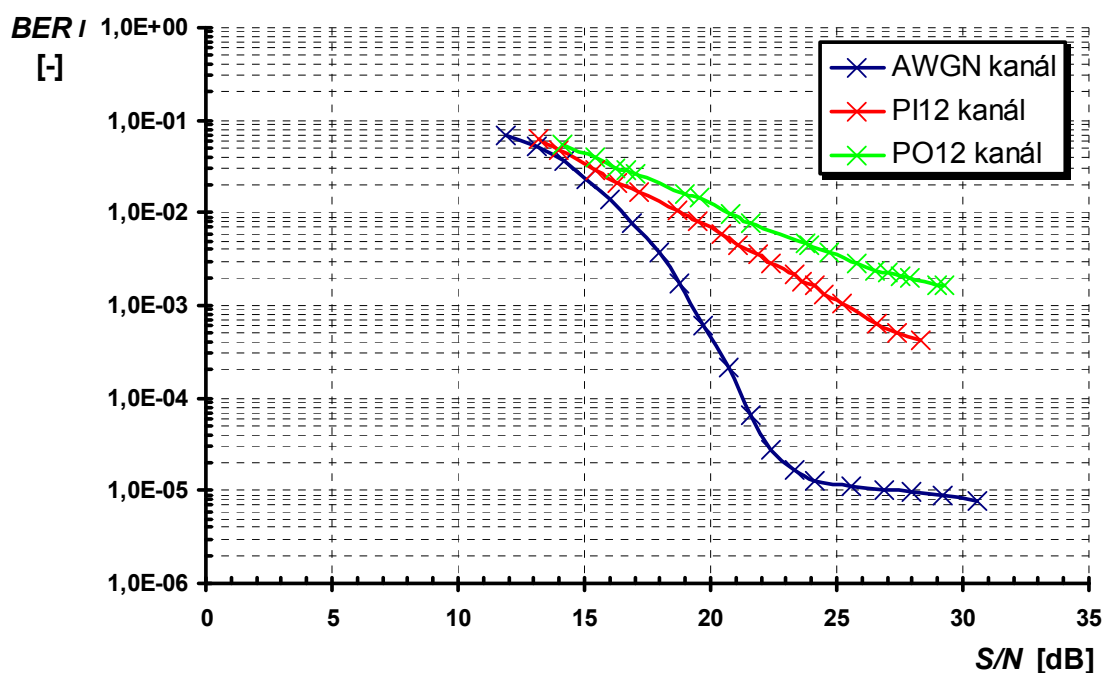


Obr. X.2: Grafická závislost $BER_{II} = f(S/N)$ pro pevný pozemní příjem.
Přenosové kanály AWGN, RC₂₀ a RL₂₀

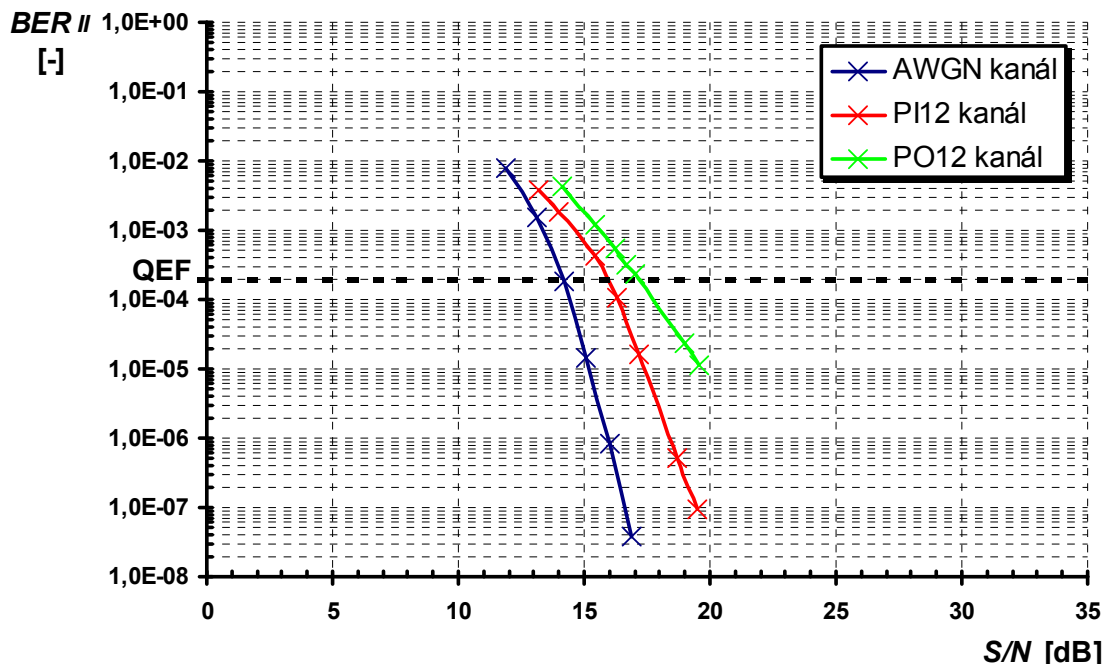
Ad 6. Měření simulace přenosového prostředí přenosného pozemního příjmu pro přenosové kanály AWGN, PI₁₂ a PO₁₂. Parametry modulace: mód 8k s modulací 16-QAM v režimu OFDM, hodnota kódového poměru $CR=2/3$ a délka ochranného intervalu $GI=1/8$.

Tab. X.2: Naměřené hodnoty závislosti $BER = f(S/N)$ pro přenosný pozemní příjem. Přenosové kanály AWGN, PI₁₂ a PO₁₂

S/N	AWGN kanál		S/N	PI ₁₂ kanál		S/N	PO ₁₂ kanál	
	BER _I	BER _{II}		BER _I	BER _{II}		BER _I	BER _{II}
[dB]	[-]	[-]	[dB]	[-]	[-]	[dB]	[-]	[-]
30,6	7,80E-06	<1,00E-11	28,3	4,30E-04	<1,00E-11	29,3	1,60E-03	<1,00E-11
29,2	8,90E-06	<1,00E-11	27,4	5,00E-04	<1,00E-11	29,0	1,70E-03	<1,00E-11
28,0	9,80E-06	<1,00E-11	26,6	6,50E-04	<1,00E-11	27,9	1,90E-03	<1,00E-11
26,9	1,00E-05	<1,00E-11	25,2	1,00E-03	<1,00E-11	27,5	2,00E-03	<1,00E-11
25,6	1,10E-05	<1,00E-11	24,5	1,30E-03	<1,00E-11	27,0	2,20E-03	<1,00E-11
24,1	1,30E-05	<1,00E-11	24,1	1,60E-03	<1,00E-11	26,5	2,30E-03	<1,00E-11
23,3	1,70E-05	<1,00E-11	23,6	1,80E-03	<1,00E-11	25,8	2,90E-03	<1,00E-11
22,4	2,80E-05	<1,00E-11	23,3	2,10E-03	<1,00E-11	24,7	3,70E-03	<1,00E-11
21,6	6,60E-05	<1,00E-11	22,4	2,90E-03	<1,00E-11	23,9	4,60E-03	<1,00E-11
20,7	2,10E-04	<1,00E-11	21,9	3,60E-03	<1,00E-11	23,8	4,70E-03	<1,00E-11
19,7	6,20E-04	<1,00E-11	21,1	4,60E-03	<1,00E-11	21,6	7,60E-03	<1,00E-11
18,8	1,70E-03	<1,00E-11	20,4	5,90E-03	<1,00E-11	20,8	9,60E-03	<1,00E-11
18,0	3,80E-03	<1,00E-11	19,5	7,90E-03	9,60E-08	19,6	1,50E-02	1,20E-05
16,9	7,80E-03	3,90E-08	18,7	1,10E-02	5,00E-07	19,0	1,60E-02	2,30E-05
16,0	1,40E-02	8,40E-07	17,2	1,70E-02	1,60E-05	17,0	2,60E-02	2,30E-04
15,1	2,30E-02	1,40E-05	16,3	2,10E-02	1,10E-04	16,7	2,90E-02	3,20E-04
14,2	3,60E-02	1,80E-04	15,4	2,90E-02	4,20E-04	16,2	3,10E-02	5,50E-04
13,1	5,10E-02	1,50E-03	14,0	4,70E-02	1,80E-03	15,4	3,90E-02	1,20E-03
11,9	6,90E-02	7,80E-03	13,2	6,30E-02	3,70E-03	14,1	5,50E-02	4,20E-03



Obr. X.3: Grafická závislost $BER_I = f(S/N)$ pro přenosný pozemní příjem. Přenosové kanály AWGN, PI₁₂ a PO₁₂



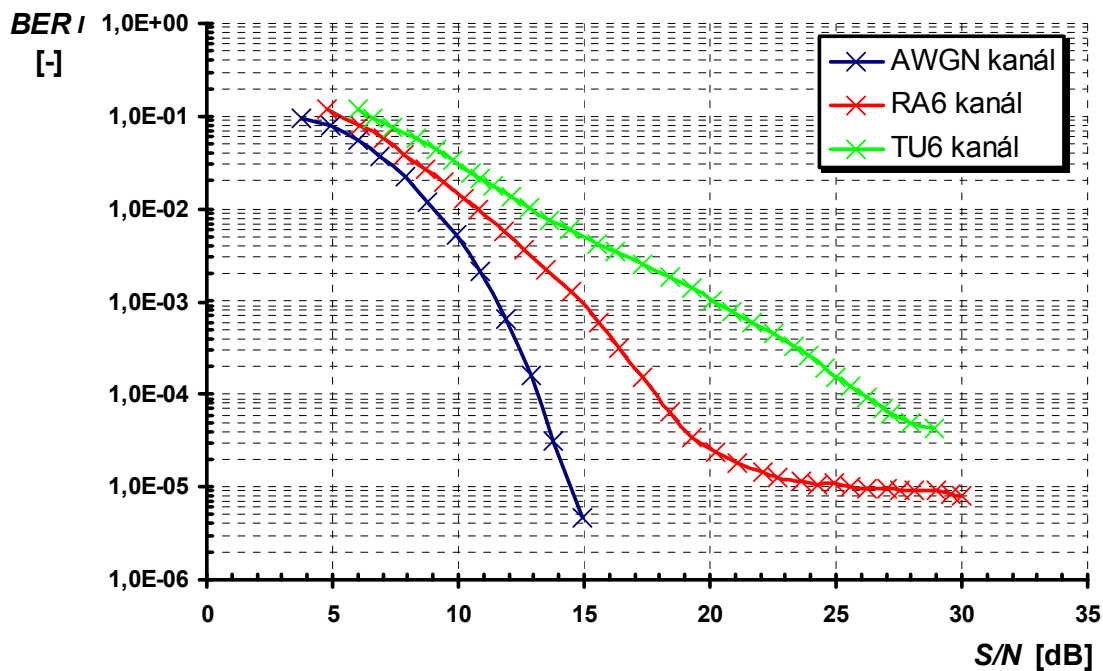
Obr. X.4: Grafická závislost $BER_{II} = f(S/N)$ pro přenosný pozemní příjem.
Přenosové kanály AWGN, PI_{12} , a PO_{12}

Ad 7. Měření simulace přenosového prostředí mobilního pozemního příjmu pro přenosové kanály AWGN, RA_6 a TU_6 . Parametry modulace: mód 2k s modulací QPSK v režimu OFDM, hodnota kódového poměru $CR=1/2$ a délka ochranného intervalu $GI=1/16$.

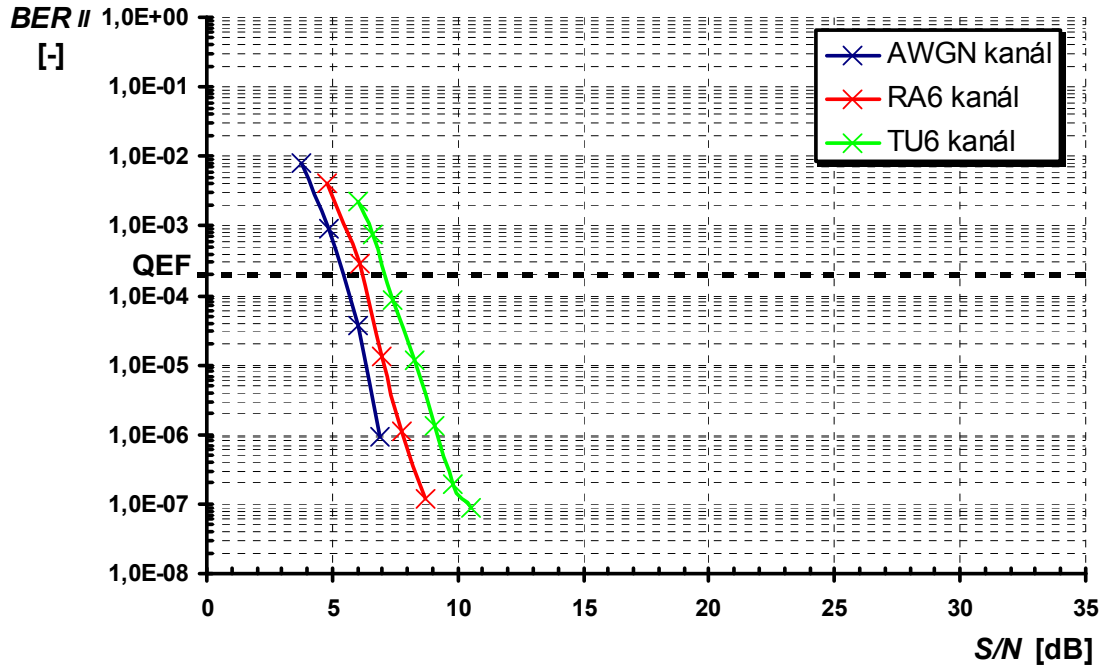
Tab. X.3: Naměřené hodnoty závislosti $BER = f(S/N)$ pro mobilní pozemní příjem.
Přenosové kanály AWGN, RA_6 a TU_6

S/N [dB]	AWGN kanál		S/N [dB]	RA_6 kanál		S/N [dB]	TU_6 kanál	
	BER_I [-]	BER_{II} [-]		BER_I [-]	BER_{II} [-]		BER_I [-]	BER_{II} [-]
30,6	<1,00E-11	<1,00E-11	30,0	8,10E-06	<1,00E-11	28,9	4,30E-05	<1,00E-11
29,9	<1,00E-11	<1,00E-11	29,6	8,50E-06	<1,00E-11	28,0	4,90E-05	<1,00E-11
29,4	<1,00E-11	<1,00E-11	29,0	9,10E-06	<1,00E-11	27,2	6,30E-05	<1,00E-11
29,0	<1,00E-11	<1,00E-11	28,1	9,10E-06	<1,00E-11	26,9	7,00E-05	<1,00E-11
28,1	<1,00E-11	<1,00E-11	27,5	9,30E-06	<1,00E-11	26,2	9,50E-05	<1,00E-11
27,6	<1,00E-11	<1,00E-11	27,0	9,50E-06	<1,00E-11	25,6	1,20E-04	<1,00E-11
27,1	<1,00E-11	<1,00E-11	26,2	9,50E-06	<1,00E-11	25,0	1,50E-04	<1,00E-11
26,3	<1,00E-11	<1,00E-11	25,6	1,00E-05	<1,00E-11	24,6	1,90E-04	<1,00E-11
25,6	<1,00E-11	<1,00E-11	24,9	1,10E-05	<1,00E-11	23,9	2,60E-04	<1,00E-11
24,9	<1,00E-11	<1,00E-11	24,3	1,10E-05	<1,00E-11	23,3	3,40E-04	<1,00E-11
24,1	<1,00E-11	<1,00E-11	23,6	1,20E-05	<1,00E-11	22,5	4,40E-04	<1,00E-11
23,3	<1,00E-11	<1,00E-11	22,7	1,30E-05	<1,00E-11	21,7	5,80E-04	<1,00E-11
22,4	<1,00E-11	<1,00E-11	22,1	1,40E-05	<1,00E-11	20,9	7,70E-04	<1,00E-11
21,5	<1,00E-11	<1,00E-11	21,1	1,80E-05	<1,00E-11	20,1	1,00E-03	<1,00E-11
20,7	<1,00E-11	<1,00E-11	20,2	2,40E-05	<1,00E-11	19,3	1,40E-03	<1,00E-11
19,8	<1,00E-11	<1,00E-11	19,3	3,50E-05	<1,00E-11	18,4	1,90E-03	<1,00E-11
18,8	<1,00E-11	<1,00E-11	18,4	6,60E-05	<1,00E-11	17,3	2,50E-03	<1,00E-11
17,7	<1,00E-11	<1,00E-11	17,3	1,50E-04	<1,00E-11	16,2	3,50E-03	<1,00E-11
16,8	6,70E-08	<1,00E-11	16,4	3,10E-04	<1,00E-11	15,5	4,20E-03	<1,00E-11

AWGN kanál			RA ₆ kanál			TU ₆ kanál		
S/N	BER _I	BER _{II}	S/N	BER _I	BER _{II}	S/N	BER _I	BER _{II}
[dB]	[-]	[-]	[dB]	[-]	[-]	[dB]	[-]	[-]
15,9	5,60E-07	<1,00E-11	15,6	5,90E-04	<1,00E-11	14,4	5,90E-03	<1,00E-11
14,9	4,70E-06	<1,00E-11	14,5	1,30E-03	<1,00E-11	13,6	7,70E-03	<1,00E-11
13,8	3,10E-05	<1,00E-11	13,5	2,20E-03	<1,00E-11	12,8	1,00E-02	<1,00E-11
12,9	1,60E-04	<1,00E-11	12,6	3,70E-03	<1,00E-11	12,1	1,40E-02	<1,00E-11
11,9	6,60E-04	<1,00E-11	11,8	5,80E-03	<1,00E-11	11,4	1,80E-02	<1,00E-11
10,9	2,10E-03	<1,00E-11	10,8	9,80E-03	<1,00E-11	10,9	2,10E-02	<1,00E-11
9,9	5,30E-03	<1,00E-11	10,2	1,30E-02	<1,00E-11	10,5	2,40E-02	8,80E-08
8,8	1,20E-02	<1,00E-11	9,4	1,90E-02	<1,00E-11	9,8	3,40E-02	1,90E-07
7,9	2,20E-02	<1,00E-11	8,7	2,60E-02	1,20E-07	9,1	4,40E-02	1,30E-06
6,9	3,60E-02	9,40E-07	7,8	3,90E-02	1,10E-06	8,3	5,80E-02	1,20E-05
6,0	5,60E-02	3,80E-05	7,0	5,70E-02	1,30E-05	7,4	7,60E-02	8,80E-05
4,9	8,00E-02	8,80E-04	6,1	7,80E-02	2,80E-04	6,6	9,60E-02	7,50E-04
3,8	9,70E-02	7,80E-03	4,8	1,20E-01	4,10E-03	6,0	1,20E-01	2,30E-03

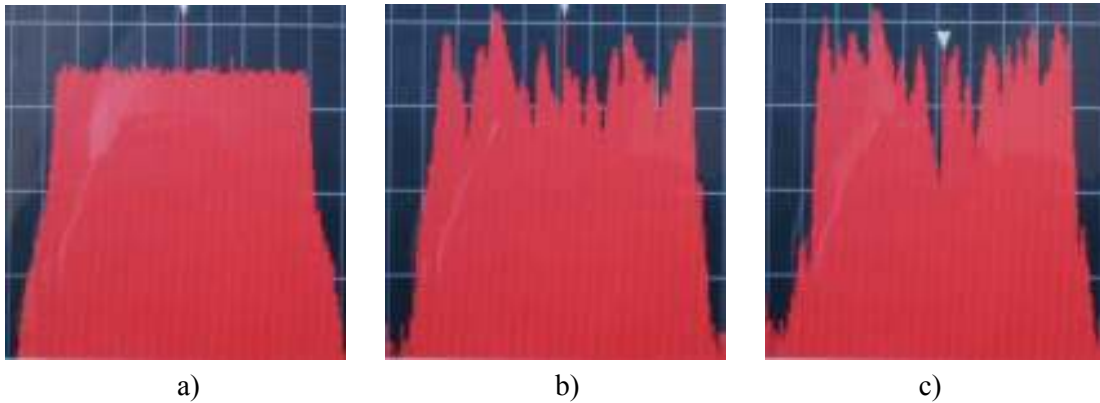


Obr. X.5: Grafická závislost $BER_I = f(S/N)$ pro mobilní pozemní příjem. Přenosové kanály AWGN, RA₆ a TU₆

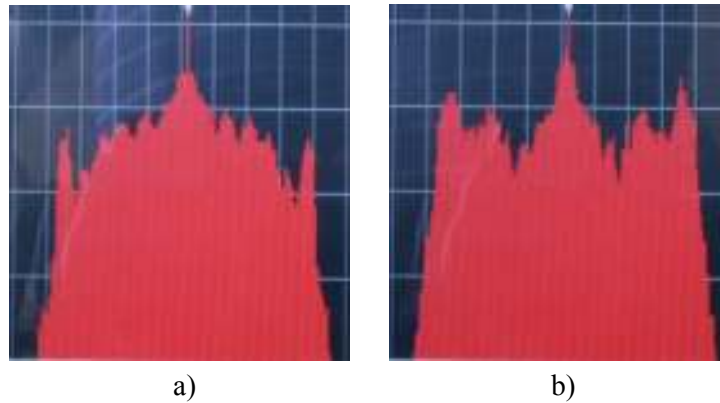


Obr. X.6: Grafická závislost $BER_{II} = f(S/N)$ pro mobilní pozemní příjem. Přenosové kanály AWGN, RA₆ a TU₆

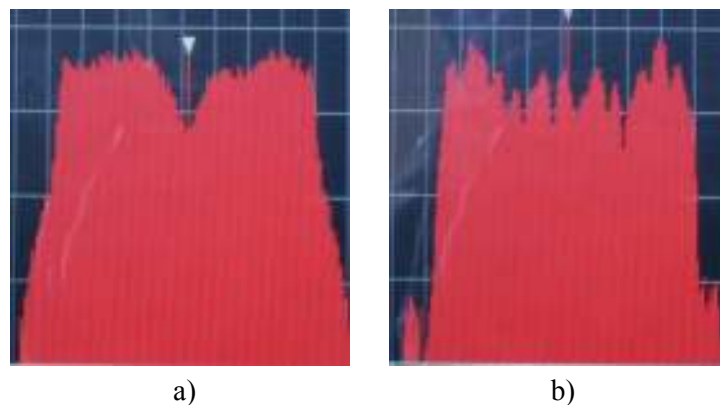
Ad 8. Tvar spektra jednotlivých přenosových kanálů AWGN, RC₂₀ a RL₂₀ pro pevný pozemní příjem, PI₁₂ a PO₁₂ pro přenosný pozemní příjem, RA₆ a TU₆ pro mobilní pozemní příjem.



Obr. X.7: Tvar spektra přenosových kanálů pro pevný pozemní příjem: a) AWGN, b) RC₂₀, c) RL₂₀



Obr. X.8: Tvar spektra přenosových kanálů pro přenosný pozemní příjem: a) PI₁₂, b) PO₁₂



Obr. X.9: Tvar spektra přenosových kanálů pro mobilní pozemní příjem: a) RA₆, b) TU₆

Použité měřicí přístroje a pomůcky

- **PC** počítač PC Intel (R) Core (TM)2 CPU, 2.13GHz, 2.98 GB RAM
- **MTP** měřicí televizní přijímač PAL/DVB-C/DVB-T Kathrein MSK-33
- **SW** software StreamXpress-Stream Player + hardwarový klíč
software StreamXpress-Channel Simulator
- propojovací vodič 1 x BNC-BNC

Závěr

Podle vztahu (1) byl vypočten Dopplerův frekvenční posuv Δf_D pro kanál č. 40 $\Rightarrow f_0 = 626\text{MHz}$ pro jednotlivé přenosové kanály přenosného a mobilního pozemního příjmu. Pro oba přenosové kanály (PI₁₂ a PO₁₂) přenosného pozemního příjmu z důvodu stejné rychlosti $v = 3\text{km/h}$ pohybu přijímače byla vypočtena hodnota Dopplerova frekvenčního posuvu $\Delta f_D = 1,74\text{Hz}$. Vypočtená hodnota Dopplerova posuvu frekvence Δf_D mobilního pozemního příjmu pro přenosový kanál TU₆, kdy rychlost pohybu přijímače je $v = 50\text{km/h}$ odpovídá hodnotě $\Delta f_D = 28,98\text{Hz}$ a pro přenosový kanál RA₆ $\Delta f_D = 57,96\text{Hz}$, při pohybu rychlosti přijímače $v = 100\text{km/h}$. Rozdíl mezi vypočtenými a kanálovým simulátorem přenosového prostředí po zadání konkrétní rychlosti v automaticky doplněnými hodnotami Dopplerova posuvu frekvence Δf_D byl řádově v setinách Hz. Rozdíl je dán automatickým zaokrouhlováním hodnoty Δf_D kanálového simulátoru přenosového prostředí.

Z programu „StreamXpress“ byly zaznamenány identifikátory paketů MPEG-2 TS, Video-PID: 256, Audio-PID: 272, typ použité komprese MPEG-2 a údaj o kryptování CA: ne. Po zobrazení identifikátorů transportního toku MPEG-2 TS na obrazovce měřicího přístroje MTP se dále zobrazily údaje: Televizní norma: dig. television, Status: running.

Z naměřených hodnot pro přenosové kanály AWGN, RC₂₀ a RL₂₀ pevného pozemního příjmu byly vytvořeny grafické závislosti $BER_I=f(S/N)$ a $BER_{II}=f(S/N)$. U závislosti $BER_{II}=f(S/N)$ je vynesena křivka znázorňující hranici bezchybného příjmu, tzv. QEF (*Quasi Error Free*), jejíž hodnota bitové chybovosti po Viterbiho dekódování je $BER_{II} = 2 \cdot 10^{-4}$. Pro přenosový kanál AWGN odpovídá hranici QEF hodnota $S/N \approx 19,0\text{dB}$, přenosovému kanálu RC₂₀ hodnota $S/N \approx 22,0\text{dB}$ a přenosovému kanálu RL₂₀ hodnota $S/N \approx 24,0\text{dB}$. Z odečtených hodnot S/N pro QEF a ze samotných grafických závislostí je patrné, že z pohledu bitových chybovostí je pro přenášený signál DVB-T nejméně vhodný přenosový kanál RL₂₀, zatímco AWGN kanál zajišťuje přijímači nejlepší podmínky příjmu. Uvedené výsledky odpovídají teoretickému předpokladu, kdy pro přenosový kanál RL₂₀ v důsledku narušení přímé viditelnosti mezi vysílačem a přijímačem je příjem možný pouze díky odrazům, pro přenosový kanál RC₂₀ se k odrazům přidává přímý signál a u přenosového kanálu AWGN je přímý signál bez jakýchkoli odrazů více či méně utlumen a ovlivněn pouze mírou bílého Gaussova šumu. Na měřicím přijímači MTP jsme si ověřili informace o parametrech vysílání pro pevný pozemní příjem, tedy: mód 8k s modulací 64-QAM, hodnota kódového poměru $CR=2/3$, délka ochranného intervalu $GI=1/4$, kanál č. 40 a jeho nosný kmitočet $f_0 = 626\text{MHz}$.

Vyhodnocením naměřených hodnot pro přenosové kanály AWGN, PI₁₂ a PO₁₂ přenosného pozemního příjmu byly vytvořeny grafické závislosti $BER_I=f(S/N)$ a $BER_{II}=f(S/N)$, přičemž u závislosti $BER_{II}=f(S/N)$ je vynesena křivka znázorňující hranici bezchybného příjmu QEF. Pro přenosový kanál AWGN odpovídá hranici QEF hodnota $S/N \approx 14,0\text{dB}$, přenosovému kanálu PI₁₂ hodnota $S/N \approx 16,0\text{dB}$ a přenosovému kanálu PO₁₂ hodnota $S/N \approx 17,5\text{dB}$. Z odečtených hodnot S/N pro QEF a ze samotných grafických závislostí je patrné, že z pohledu bitových chybovostí je pro přenášený signál DVB-T nejméně vhodný přenosový kanál PO₁₂, zatímco AWGN přenosový kanál je nejméně rušivý. Uvedené výsledky odpovídají teoretickému předpokladu, kdy pro přenosový kanál PO₁₂ [4] definuje větší útlumy jednotlivých i -tých cest odrazů oproti přenosovému kanálu PI₁₂. Na měřicím přijímači MTP jsme si ověřili informace o parametrech vysílání pro přenosný pozemní příjem, tedy: mód 8k s modulací 16-QAM, hodnota kódového poměru $CR=2/3$, délka ochranného intervalu $GI=1/8$, kanál č. 40 a jeho nosný kmitočet $f_0 = 626\text{MHz}$.

Z naměřených hodnot pro přenosové kanály AWGN, RA₆ a TU₆ mobilního pozemního příjmu byly opět vytvořeny grafické závislosti $BER_I=f(S/N)$ a $BER_{II}=f(S/N)$, u závislosti $BER_{II}=f(S/N)$ je vynesena křivka znázorňující hranici bezchybného příjmu QEF. Pro přenosový kanál AWGN odpovídá hranici QEF hodnota $S/N \approx 5,5\text{dB}$, přenosovému kanálu RA₆ hodnota $S/N \approx 6,5\text{dB}$ a přenosovému kanálu TU₆ hodnota $S/N \approx 7,5\text{dB}$. Z odečtených hodnot S/N pro QEF a ze samotných grafických závislostí je patrné, že z pohledu bitových chybovostí je pro přenášený signál DVB-T nejméně vhodný přenosový kanál TU₆, zatímco AWGN přenosový kanál je nejvhodnější. Uvedené výsledky opět odpovídají teoretickému předpokladu, kdy pro přenosový kanál TU₆ norma [1] definuje sice menší útlumy jednotlivých i -tých cest odrazů oproti přenosovému kanálu RA₆, avšak statistika šíření signálu je pro přenosový kanál RA₆ charakterizována Dopplerovým spektrem s Riceovou distribucí pro první cestu šíření signálu a Rayleighovou distribucí pro ostatní cesty. Pro přenosový kanál TU₆ je statistika šíření signálu charakterizována Dopplerovým spektrem s Rayleighovou distribucí. Na měřicím přijímači MTP jsme si ověřili informace o parametrech vysílání pro přenosný pozemní příjem, tedy: mód 2k s modulací QPSK, hodnota kódového poměru $CR=1/2$, délka ochranného intervalu $GI=1/16$, kanál č. 40 a jeho nosný kmitočet $f_0 = 626\text{MHz}$.

V samotném závěru laboratorního měření je zobrazen tvar spektra jednotlivých přenosových kanálů AWGN, RC₂₀ a RL₂₀ pro pevný pozemní příjem, PI₁₂ a PO₁₂ pro přenosný pozemní příjem, RA₆ a TU₆ pro mobilní pozemní příjem. U všech přenosových kanálů s výjimkou AWGN přenosového kanálu je patrný vliv simulace mnohacestného příjmu, kdy se ve spektru odražené signály jednoznačně projevují. Ze spekter pro pevný pozemní příjem je pohledem patrné, že nejméně vhodný pro přenos DVB-T signálu je přenosový kanál RL₂₀, zatímco spektrum AWGN přenosového kanálu je bez jakýchkoli odrazů a tedy nejvhodnější z pohledu příjmu. Ze spekter pro přenosný a mobilní pozemní příjem už není tak zcela jednoznačně patrné, který z přenosových kanálů je více či méně vhodný pro přenos DVB-T signálu.



.....
podpis

F OBSAH PŘILOŽENÉHO NOSIČE CD-ROM

- F.1 Elektronická verze diplomové práce ve formátu .pdf a .doc**
- F.2 Licenční smlouva ve formátu .pdf a .doc**
- F.3 Metadata ve formátu .pdf a .doc**
- F.4 Prohlášení o shodě listinné a elektronické formy diplomové práce ve formátu .pdf a .doc**
- F.5 Naměřená a nasimulovaná data ve formátu .xls a .jpeg**
- F.6 Vzorová laboratorní úloha pro předmět Digitální televizní a rozhlasové systémy ve formátu .doc a .pdf**
- F.7 Vypracování vzorové laboratorní úlohy pro předmět Digitální televizní a rozhlasové systémy ve formátu .doc a .pdf**