



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektromagnetického pole

**Příjem signálů pozemního vysílání digitální televize
v sousedních a blízkých kanálech**

Bakalářská práce

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika

Studijní obor: Komunikační technika

Vedoucí práce: Ing. Karel Ulovec, Ph.D.

Kohutka Jiří

Praha 2015

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra elektromagnetického pole

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Jiří Kohutka**

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika
Obor: Komunikační technika

Název tématu: **Přijem signálů pozemního vysílání digitální televize v sousedních a blízkých kanálech**

Pokyny pro vypracování:

Seznamte se stručně se systémy první a druhé generace pro pozemní vysílání digitální televize DVB-T a DVB-T2.

Při příjmu signálu DVB-T/T2 se zabývejte následky výskytu dalšího signálu v sousedním či v blízkém kanále. Navrhněte a realizujte laboratorní testy pro měření vlivu signálu v sousedním či blízkém kanále. Sledujte a vyhodnoťte vliv na příjem pro různé přijímače. Pro měření využijte zařízení v laboratoři Rádiových vysílačů a přijímačů na katedře radioelektroniky.

Zvolte příklad lokality pro příjem DVB-T/T2 a proveďte zde analýzu využití televizních kanálů pro vysílání. Diskutujte výsledky analýzy a výsledky měření. Navrhněte případně opatření vhodná pro snížení vlivu signálu v sousedním či blízkém kanále.

Seznam odborné literatury:

- [1] ETSI TR 101 290: Digital Video Broadcasting (DVB); Measurement guidelines for DVB systems, [doporučení], V1.3.1. ETSI, 2014.
- [2] ČTÚ. Minimální požadavky na přijímací zařízení pro poskytování služeb v sítích DVB-T a DVB-T 2, D-Book, 3.05 [online]. [cit. 2015-01-13]. Dostupné z: http://www.ctu.cz/cs/download/digitalni_vysilani/d-book_2012_7_18_v3-05.pdf.
- [3] ČTÚ. Zemské digitální televizní a rozhlasové vysílání v ČR: Údaje o pokrytí [online]. [cit. 2015-01-13]. Dostupné z: <http://dtv.ctu.cz/>.

Vedoucí: Ing. Karel Ulovec, Ph.D.

Platnost zadání: květen 2016



prof. Ing. Pavel Pechač, Ph.D.
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 13. 1. 2015

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze, 18. 5. 2015

Kohutka Jiří

Poděkování:

Rád bych touto cestou vyjádřil poděkování Karlu Ulovcovi, Ph.D. za jeho ochotu, cenné rady a trpělivost při vedení této bakalářské práce. Samozřejmě velké díky patří celé katedře radioelektroniky za poskytnutí prostorů a měřicích přístrojů.

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá následky výskytu dalšího signálu při příjmu DVB-T/T2 signálu v sousedním a dalším blízkém kanálu. V první části jsou stručně popsány systémy pozemního digitálního vysílání první a druhé generace s důrazem kladeným především na princip zdrojového a kanálového kódování a modulace. Následuje kapitola pojednávající o jednotlivých částech přijímacího řetězce. Další část se věnuje analýze příjmových podmínek v Praze Dejvicích. Stěžejní částí práce jsou laboratorní měření za účelem vyhodnocení vlivu blízkých kanálů na příjem pro různé přijímače. Výsledky měření jsou vyhodnoceny a srovnány s hodnotami relevantních parametrů udávaných v příslušných normách.

Klíčová slova: DVB-T, DVB-T2, C/N, I/C, PLP, FEC, OFDM, příjem sousedních kanálů

Abstract

This thesis deals with the consequences of the occurrence of another DVB-T/T2 signals in adjacent and nearby channel. The first section briefly describes first and second generation of terrestrial digital broadcasting systems with an emphasis mainly on the principle of source and channel coding and modulation. Following section describes parts of the receiver chain. Another section is devoted to the analysis of reception conditions in Dejvice. The main section is based on laboratory measurements in order to evaluate the effect of adjacent and nearby channels on reception for different receivers. The measurement results are evaluated and compared with values given in the respective standards.

Keywords: DVB-T, DVB-T2, C/N, I/C, PLP, FEC, OFDM, Reception in Adjacent and Nearby Channels

Obsah

1. Úvod	10
2. Teoretický úvod	11
2.1. Standard DVB-T	11
2.1.1. Zdrojové kódování.....	12
2.1.2. Multiplexování	13
2.1.3. Protichybové zabezpečení	13
2.1.4. Modulace	14
2.2. Standard DVB-T2	15
2.2.1. Architektura technologie DVB-T2	16
2.2.2. Předzpracování PLP toku.....	17
2.2.3. Kanálové kódování	17
2.2.4. Modulační princip DVB-T2	18
3. Příjem DVB-T/T2.....	19
3.1. Přijímací anténa	19
3.1.1. Pokojové antény.....	20
3.1.2. Venkovní antény	20
3.1.3. Požadavky kladené na přijímací anténu.....	20
3.2. Televizní rozvody.....	21
3.2.1. Individuální domovní televizní rozvody	21
3.2.2. Společné televizní rozvody.....	24
3.3. Přijímače DVB-T/T2	26
3.3.1. Parametry stanovené normou pro přijímače první generace	27
3.3.2. Parametry stanovené normou pro přijímače druhé generace [15]	29
4. Analýza příjmových podmínek	30
4.1. Seznam pražských vysílačů.....	31
4.2. Měření příjmových podmínek.....	32
4.3. Model šíření vln v prostoru	34
5. Vzájemné ovlivňování sousedních kanálů	37
5.1. Minimální úroveň signálu na vstupu přijímačů	39
5.2. Měření odstupu signálu od šumu	43

5.3. Možná opatření pro snížení vlivu sousedních kanálů	50
6. Závěr.....	51
Příloha 1	58

Seznam obrázků

Obr. 1: Zdrojové kódování a multiplexování.....	13
Obr. 2: Bloky protichybové ochrany	14
Obr. 3: Zjednodušené blokové schéma T2 systému [6]	16
Obr. 4: Struktura FEC rámce	17
Obr. 5: Minimální citlivost v závislosti na zařazení zesilovače v obvodu	24
Obr. 6: Základní blokové schéma vstupní části přijímače[1].....	26
Obr. 7: Směrové charakteristiky uvažovaných antén	32
Obr. 8: Příjmové podmínky v Praze Dejvicích	33
Obr. 9: Příjem vysílačů s H polarizací na log-per. anténu.....	36
Obr. 10: Příjem vysílačů s V polarizací na anténě Diamond D130	36
Obr. 11: Příjem na log-per. anténě při nedodržení polarizace vysílací a přijímací antény	36
Obr. 12: Příjem na anténě DIAMOND D130 při nedodržení polarizace vysílací a přijímací antény	36
Obr. 13: Schéma zapojení měřicí sestavy	39
Obr. 14: Měření citlivosti přijímačů bez rušení.....	40
Obr. 15: Citlivost přijímačů při rušení signálem s úrovní 45 a 70 dB μ V v n+1 kanálu	41
Obr. 16: Citlivost přijímačů při rušení 45 dB μ V v n+2 kanálu	42
Obr. 17: Naměřené C/N bez rušení kanálu na přijímačích první generace	44
Obr. 18: Naměřené C/N bez rušení kanálu na přijímačích druhé generace	44
Obr. 19: Naměřené C/N v n+1 kanálu na přijímačích první generace, výkon užitečného signálu 45 dB μ V.....	45
Obr. 20: Naměřené C/N v n+1 kanálu na přijímačích druhé generace, výkon užitečného signálu 45 dB μ V.....	46
Obr. 21: Naměřené C/N v n+2 kanálu na přijímačích první generace, výkon užitečného signálu 45 dB μ V.....	46
Obr. 22: Naměřené C/N v n+2 kanálu na přijímačích druhé generace, výkon užitečného signálu 45 dB μ V.....	46
Obr. 23: Naměřené C/N v n+1 kanálu na přijímačích první generace, výkon užitečného signálu 70 dB μ V.....	48
Obr. 24: Naměřené C/N v n+1 kanálu na přijímačích druhé generace, výkon užitečného signálu 70 dB μ V.....	49
Obr. 25: Naměřené C/N v n+2 kanálu na přijímačích první generace, výkon užitečného signálu 70 dB μ V.....	49
Obr. 26: Naměřené C/N v n+2 kanálu na přijímačích druhé generace, výkon užitečného signálu 70 dB μ V.....	49
Obr. 27: Šumový model.....	58

Seznam tabulek

Tabulka 1: Základní parametry OFDM modulace [4]	15
Tabulka 2: Porovnání technologií DVB-T/T2 [7]	16
Tabulka 3: Pootočení konstelačních bodů diagramu	18
Tabulka 4: Maximální přípustné kolísání úrovně v celém frekvenčním pásmu	21
Tabulka 5: C/N pro dosažení BER = 2×10^{-4} za Viterbiho dekodérem	27
Tabulka 6: Přehled citlivostí pro dosažení BER = 2×10^{-4} za Viterbiho dekodérem	28
Tabulka 7: Hodnoty citlivostí (P_{\min}) a požadovaných odstupů signálu od šumu (C/N) pro zajištění QEF příjmu	29
Tabulka 8: Selektivita DVB-T2 standardu při přítomnosti rušícího DVB-T/T2 signálu	30
Tabulka 9: Přehled pražských vysílačů [16]	31
Tabulka 10: Přehled testovaných přijímačů	38

Seznam použitých zkratek

BCH	Bose-Chaudhuri - Hocquenghem	LDPC	Low Density Parity Check
BER	Bit Error Rate	M-QAM	Quadrature Amplitude Modulation
CA	Conditional Access	MPEG	Moving Picture Experts Group
C/N	Carrier to Noise	PRBS	Pseudo Random Binary Sequence
(C)OFDM	(Coded) Ortogonal Frequency Division Multiplex	PES	Packetized Elementary Stream
DVB-T/T2	Digital Video Broadcasting - Terrestrial	PLP	Physical Layer Pipes
DVB-S	Digital Video Broadcasting - Satellite	QEF	Quasi Error Free
DVB-C	Digital Video Broadcasting – Cable	QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
DVB-H	Digital Video Broadcasting - Handle	RS	Reed Solomon
FEC	Forward Error Correction	SAW	Surface Acoustic wave
FSL	Free Space Lost	SDTV	Standard-Definition Television
FFT	Fast Fourier Transform	SFN	Single Frequency Network
G/T	Gain to noise Temperature	SISO/MISO	Single/Multiple Input, Single Output
GS	Generic Stream	SI	Service Information
I/C	Interference/Carrier	STA	Společná Televizní Anténa
IEC	International Electrotechnical Commission	STB	Set-Top Box
ISI	InterSymbol Interference	TS	Transport Stream
		UHF	Ultra High Frequency

1. Úvod

Cílem této bakalářské práce je stručně se seznámit s oběma generacemi systémů digitálního terestrického vysílání DVB-T/T2 (Digital Video Broadcasting-Terrestrial). Druhá generace pozemního vysílání je nejnovější směr vývoje, který zřejmě v budoucnu nahradí stávající technologii. V práci se zabývám především následky přítomnosti dalšího signálu v sousedním a dalším blízkém kanálu. Toto aktuální téma řeším především z důvodu stále se zvyšující obsazenosti kmitočtového spektra, kdy je nutné vysílat na sousedních kanálech. V praxi běžný příjem sousedních kanálů s rozdílnými úrovněmi výkonů může především v případě individuálních přijímacích soustav zabránit bezproblémovému příjmu. Pro jeho zajištění je nutné volit profesionální, ovšem finančně náročnější přijímací soustavu. Z tohoto důvodu se ve své práci zaměřuji zejména na vyhodnocení mezních úrovní přijímaného signálu v závislosti na přítomnosti dalších signálů v blízkých kanálech. Vliv blízkého signálu na příjem vyhodnocuji na vybraných přijímacích první a druhé generace.

Práce je členěna na 6 hlavních kapitol. Na samotném začátku práce se okrajově věnuji popisu technologií DVB T/T2. Následně detailně rozebírám požadavky na jednotlivé prvky televizního rozvodu v pásmu UHF (Ultra High Frequency). Studuji nejen požadavky na přijímače, ale zohledňuji i parametry antény a uspořádání celého televizního rozvodu. Zmiňuji možná řešení domovního rozvodu a společných televizních antén s ohledem na problematiku příjmu sousedních kanálů.

V kapitole 4 se zabývám analýzou příjmových podmínek v Praze Dejvicích. Proměřil jsem úroveň přijímaných signálů na dvou anténách natočených do dvou základních rovin. K měření jsem využil vertikálně polarizovanou anténu DIAMOND D130 a horizontálně polarizovanou logaritmicko-periodickou anténu umístěnou na střeše budovy ČVUT v Dejvicích. Pro jednoduchost jsem se omezil pouze na měření příjmu signálů pražských vysílačů. Pomocí přenosného televizního měřicího přístroje EFL 340 od firmy Rohde & Schwarz byla proměřena úroveň přijímaného signálu pro obě antény. Ze znalosti vysílacího výkonu, vzdálenosti a naměřeného výkonu jsem se pokusil ověřit možnost odhadu úrovní přijímaného signálu výpočtem pomocí zjednodušeného modelu šíření vln v prostoru.

Dále se zabývám následky výskytu signálu v sousedním a dalším blízkém kanálu. Nejdříve vyhodnocuji, jaký vliv na minimální citlivost má přítomnost signálu v blízkých kanálech. Posléze jsem provedl měření odstupů C/N (Carrier to Noise). Při pevně nastavené úrovni užitečného signálu jsem zvyšoval úroveň rušivého signálu v blízkých kanálech a zaznamenával minimální hodnoty odstupů signál/šum. Následně jsem stanovil kritické hodnoty rušivého signálu, při kterých dochází k definované změně odstupu C/N. Naměřené výsledky jsem vyhodnotil v porovnání s hodnotami definovanými příslušnými normami.

2. Teoretický úvod

2.1. Standard DVB-T

Technologie DVB-T je významným představitelem z řady mezinárodně přijatých standardů pro televizní vysílání. Koncept DVB, neboli Digital Video Broadcasting, poskytuje podporu nejen v pozemních (DVB-Terrestrial), ale i v satelitních (DVB-Satellite), kabelových (DVB - Cabel) a tzv. handheld (DVB-Handheld) technologiích.

Systém DVB-T, jako nástupce analogového vysílání, úspěšně řeší problematiku vyčerpání kmitočtového spektra a zvyšující se nároky na kvalitu obrazu a zvuku. Efektivní využití spektra je umožněno díky režimu jednofrekvenční sítě vysílačů SFN (Single Frequency Network), při kterém vysílá několik televizních vysílačů na stejné frekvenci. Jednofrekvenční síť nezohledňuje polarizaci daného vysílače. To je výhodné při směřování antény na uživatelem zvolený vysílač o dané polarizaci. Režim SFN umožňuje pokrytí většího území a vykrytí míst s problematickými příjmovými podmínkami. U terestrického příjmu DVB-T je nutné uvažovat vzájemné ovlivňování vysílačů. Z tohoto důvodu byla zvolena modulace OFDM (Ortogonal Frequency Division Multiplex), která se řadí mezi modulace s více nosnými kmitočty. Na ortogonálně kmitočtově rozestoupené subnosné vlny je amplitudově-fázovou modulací QAM (Quadrature Amplitude Modulation) modulován vstupní signál. Tato metoda je výhodná zejména z hlediska potlačení vícecestného šíření. Signály se mohou k přijímači dostat od více vysílačů z různých vzdáleností od přijímacího bodu, nebo pomocí

odrazů. Je zřejmé, že signály od vzdálenějšího vysílače nebo signál nasměrovaný pomocí odrazů bude vykazovat větší zpoždění než signál, který dorazí přímou cestou. Z tohoto důvodu se využívá modulace s více nosnými kmitočty, kde před každý OFDM symbol je vložen ochranný interval T_w , kdy se nevysílá žádná nová informace. Na straně přijímače je tak možné dekodovat právě vysílaný symbol i v případě, že přichází z více směrů s různým zpožděním. Ochranný interval řeší problém mezisymbolové interference ISI (InterSymbol Interference) způsobený právě různou dobou šíření signálu od různých vysílačů a potlačuje nežádoucí vliv odražených signálů.

Technologie přenosu DVB-T je založena na principu přenosu sdružených audio-video signálů s doplňkovými signály ve společném datovém kanálu, multiplexu. V jednom multiplexu lze vysílat obvykle 3-5 TV programů ve kvalitě SDTV (Standard Definition Television) společně s rozhlasovými kanály a přidruženými datovými službami.[1] Zdrojové kódování zajišťuje kompresi signálu a operace zvaná multiplexování následně sloučí zakódované obrazové a zvukové signály do společného datového kanálu.

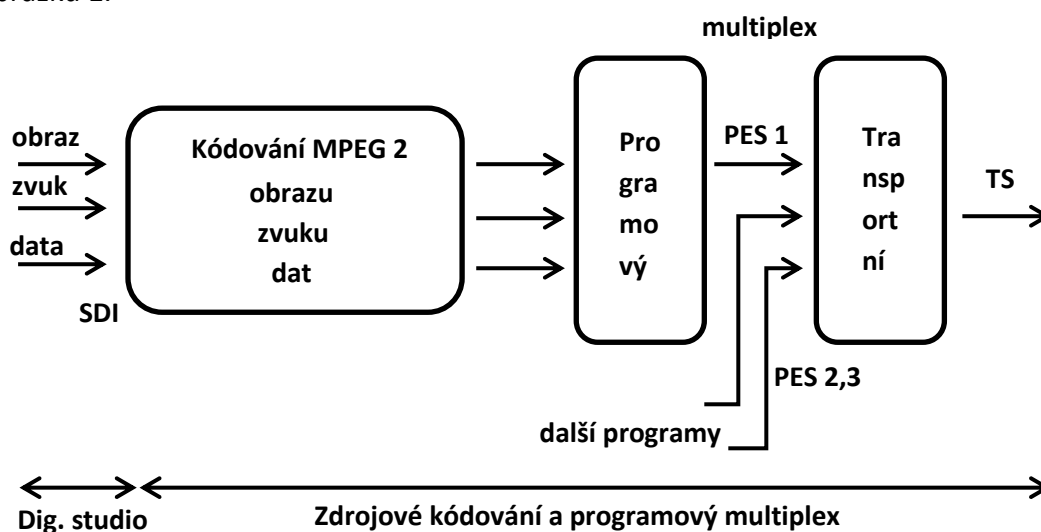
2.1.1. Zdrojové kódování

Přenos digitalizovaného televizního signálu v plné kvalitě vyžaduje vysoký požadavek na kapacitu přenosového kanálu. Bez použití komprese je sériový přenos digitálního obrazového signálu 270 Mbit/s. Z tohoto důvodu musí být komprimován. Ve standardu DVB-T je prováděna komprimace do formátu MPEG-2 (Moving Picture Experts Group). Tento formát umožňuje používat větší počet kvalitativních úrovní charakterizovaných různými hodnotami bitového toku, rozdílnou složitostí a různými kvalitativními parametry. Ačkoliv vlastnosti kodéru nejsou přesně definovány, dekodéry MPEG-2 musí být schopné dekodovat všechny bitové toky až do maximální přípustné hodnoty pro danou úroveň a profil.[2]

Při kompresi dochází k redukci redundantních a irelevantních informací. Snížení redundance se docílí přenosem pouze minimálních vzájemných diferencí snímků obrazového signálu. Irelevanci lze redukovat na principu ignorování detailů v obraze, které lidské oko při rychle se pohybujícím obraze není schopno detekovat. Jelikož se jedná o ztrátovou kompresi, nelze obnovit z komprimovaného signálu signál zcela totožný s původním.

2.1.2. Multiplexování

Multiplexování je sloučení zakódovaných audio-video signálů do společného datového toku v zařízení zvaném multiplexer. Po převedení signálů z digitálního studia do formátu MPEG-2 je v primárním (programovém) multiplexeru sloučen obrazový a zvukový signál spolu s doplňkovými datovými službami do společného datového toku reprezentující jeden vysílaný program. Datový tok, který vychází z primárního multiplexeru, je označován jako paketzovaný elementární tok PES (Packetized Elementary Stream). Proces zdrojového kódování a multiplexování je znázorněno na obrázku 1.



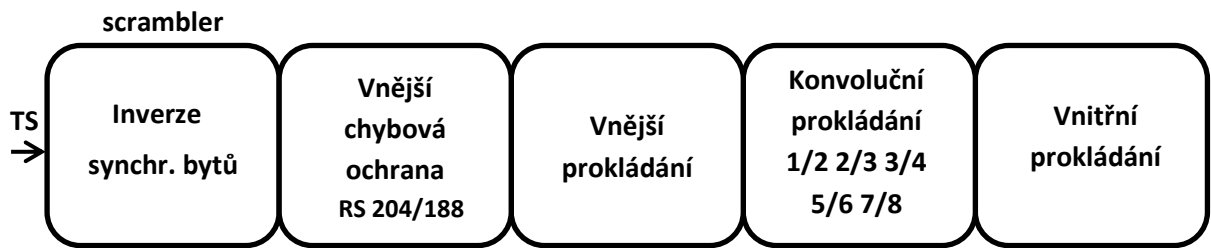
Obr. 1: Zdrojové kódování a multiplexování

Přidáním služebních informací SI (Service Information) včetně informací o podmíněném přístupu CA (Conditional Access) do PES vznikne transportní tok TS (Transport Stream). Servisní data jsou uspořádána v tabulkách, díky kterým lze na přijímací straně obraz zpětně dekódovat. Hlavním úkolem transportního multiplexu je vytvoření servisních dat sloužících k identifikaci jednotlivých komponent výsledného transportního toku a sloučení jednotlivých programů do společného multiplexu.[2]

2.1.3. Protichybové zabezpečení

Vzhledem k redukci nadbytečných informací v datovém toku by při chybně přeneseném bitu došlo ke značné ztrátě informací. To se v oblasti příjmu projeví jako zasekávání nebo vypadávání obrazu. Z tohoto důvodu je potřeba opatřit transportní tok dopřednou protichybovou ochranou FEC (Forward Error Correction). Na úkor

zvýšené redundance vlivem protichybové ochrany dochází ke zvýšení odolnosti signálu proti rušení. Technologie DVB-T využívá několikastupňové protichybové zabezpečení.



Obr. 2: Bloky protichybové ochrany

Nejprve dojde k oddělení synchronizačních dat z transportního toku a na zbytek dat je aplikováno znáhodnění přenásobením vysílaných dat pseudonáhodnou posloupností PRBS (PseudoRandom Binary Sequence), aby se vytvořil signál náhodného charakteru. Na přijímací straně je signál při detekci přenásoben stejnou posloupností, čímž se obnoví původní data. Dalším krokem zabezpečení je blok vnější chybové ochrany užitím Reed-Solomova kódování, při kterém signál rozložený do paketů po 188 bajtech je doplněn 16 zabezpečovacími bajty. Následným krokem je vnější prokládání, které umožňuje rozmístění shlukové chyby na více drobných chyb. Následná vnitřní protichybová ochrana s konvolučním kódováním se využívá pro ochranu samostatných chyb. Používá se několik standardizovaných kódových poměrů ochrany od 1/2 - 7/8, kde zlomek odpovídá poměru počtu informačních bitů a celkového počtu bitů včetně zabezpečovacích. Kódový poměr 1/2 vykazuje největší robustnost, ale zároveň i nejnižší užitečný bitový tok. Následuje vnitřní prokládání, které má stejný účel jako vnější s tím ohledem, že přeskupuje sousední bity, nikoliv bajty.[3]

2.1.4. Modulace

Jak již bylo zmíněno, technologie DVB-T používá OFDM modulaci s více nosnými vlnami, která v kombinaci s protichybovou ochranou FEC bývá označována jako COFDM (Coded OFDM). Každá subnosná vlna je mapována do OFDM/QAM symbolů v závislosti na použité modulaci. V DVB-T se používají vícecestavové modulace QPSK (Quadrature Phase Shift Keying), 16-QAM nebo 64-QAM. V závislosti na konstelaci lze přenášet různý počet bitů - 2 bity (QPSK), 4 bity (16-QAM), 6 bitů (64-QAM). Při porovnání jednotlivých modulací zjistíme, že modulace 64-QAM je méně odolná

proti šumu než QPSK, ovšem vykazuje 3x vyšší přenosovou rychlost. Modulace OFDM je definovaná pro dva módy, přičemž v módu 2K využívá 1705 a v módu 8K 6817 nosných kmitočtů v jednom přenosovém kanále. Další základní parametry OFDM modulace jsou uvedeny v tabulce 1.[4]

Parametr	mód 8K				mód 2K			
Počet subnosných vln K	6817				1705			
Užitečná délka symbolu T_u	896 μ s				224 μ s			
Rozestup subnosných vln $1/T_u$	1116 Hz				4464 Hz			
Šířka pásma $(K-1)/T_u$	7,61 MHz				7,61 MHz			
Ochranný interval Δ/T_u	1/4	1/8	1/16	1/32	1/4	1/8	1/16	1/32
Délka ochranného intervalu Δ	224 μ s	112 μ s	56 μ s	28 μ s	56 μ s	28 μ s	14 μ s	7 μ s
Trvání symbolu $T_s=\Delta+T_u$	1120 μ s	1008 μ s	952 μ s	924 μ s	280 μ s	252 μ s	238 μ s	231 μ s

Tabulka 1: Základní parametry OFDM modulace [4]

2.2. Standard DVB-T2

Standard DVB-T2 je druhá generace digitálního terestrického vysílání. Hlavním přínosem oproti předchozímu standardu DVB-T je, díky zavedení nové vnitřní modulace 256 QAM, zvýšení kapacity datového toku minimálně o 30%. Hlavní změna je provedena jak ve zdrojovém kódování, kde je využit modernější komprimační formát MPEG 4, tak v kanálovém kódování se zdokonaleným FEC kódováním. Komprimační formát MPEG 4 umožňuje za sníženého datového toku přenášet stejné množství informace při zachování kvality obrazu a zvuku. Nelze ovšem spojovat formát MPEG-4 pouze s technologií DVB-T2, protože i předchozí technologie DVB-T umožňuje využívat tento kompresní formát, je-li přijímač dovybaven MPEG-4 dekodérem.

Počet programů v jednom multiplexu se zvýší na 8-10. Přidáním nových módů FFT (Fast Fourier Transform) došlo k rozšíření jedno-frekvenčních sítí SFN. DVB-T2 přináší větší flexibilitu v kmitočtovém spektru a možnost mobilního příjmu. Ačkoliv technologie standardů DVB-T a DVB-T2 používají stejnou COFDM modulaci, nejsou vzájemně technologicky slučitelné. Z tohoto důvodu je při spuštění vysílání DVB-T2 nutné provést výměnu jak modulátoru na vysílací straně, tak demodulátoru a dekodéru na straně přijímací.[5]

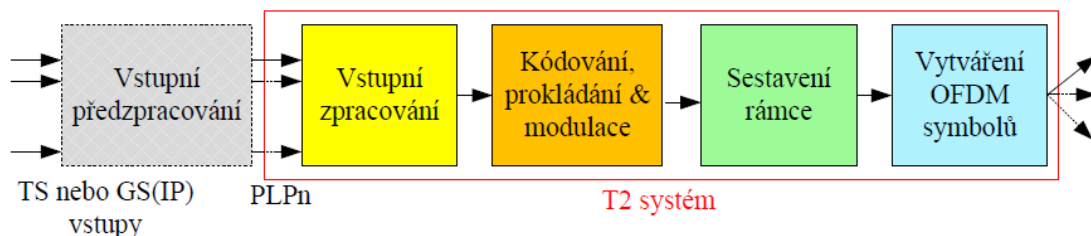
V tabulce 2 lze vidět tučně vyznačené rozdíly mezi první a druhou generací terestrického vysílání.

	DVB-T	DVB-T2
FEC	Konvoluční kódování + Reed Solomon 1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8	LDPC+BCH 1/2, 3/5 , 2/3, 3/4, 4/5 , 5/6
Vnitřní modulace	QPSK, 16QAM, 64QAM	QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM
Ochranný interval	1/4, 1/8, 1/16, 1/32	1/4, 19/256 , 1/8, 19/128 , 1/16, 1/32, 1/128
Počet nosných vln	2k, 8k	1k , 2k, 4k , 8k, 16k , 32k
Šířka pásma	6, 7, 8 MHz	1.7 , 5, 6, 7, 8, 10 MHz

Tabulka 2: Porovnání technologií DVB-T/T2 [7]

2.2.1. Architektura technologie DVB-T2

Technologie DVB-T2 zavádí více vstupních datových toků označovaných jako kanály fyzické vrstvy PLPs (Physical Layer Pipes). Jeden nebo více datových toků TS a/nebo jeden nebo více toků GS (Generic Stream) jsou mapovány vstupní předřazovací jednotkou, která jak je vidět na obrázku 3 není přímo součástí T2 systému. Každá z PLP umožňuje pro přenos různých typů dat jinou modulaci s různou robustností, odlišným kódováním a přenos s různou bitovou rychlostí. [6]



Obr. 3: Zjednodušené blokové schéma T2 systému [6]

Případ, kdy výstupem systému je jeden signál vysílaný jedním vysílačem a na druhé straně přijímaný jedním přijímačem (resp. anténou), označujeme jako SISO (Single Input, Single Output). V síti SFN může více vysílačů vysílat stejná data na jeden přijímač, což při blízkém vysílacím výkonu může způsobit výpadky příjmu, tzv. úniky. Technologie DVB-T2 řeší tento problém použitím Alamoutiho kódování, kde v systému MISO (Multiple Input, Single Output) vysílače pracující na stejném kmitočtu vysílají vzájemně komplexně sdružená data s modifikovaným rozptýlením pilotních nosných

vln. Tento režim ovšem vyžaduje dvojnásobnou hustotu rozptýlených pilotních signálů.[5]

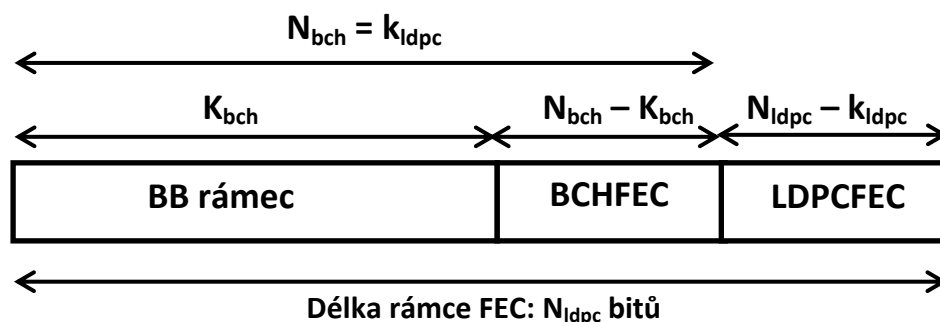
2.2.2. Předzpracování PLP toku

Zpracování vstupního datového toku TS se provádí ve 2 krocích - módu přizpůsobení a módu přizpůsobení datového toku. V módu přizpůsobení se rozdělují vstupní datové toky do tzv. BB rámců, na jehož každý začátek je vložena hlavička. V módu přizpůsobení datového toku se vytváří kompletní BB rámce s konstantní délkou, které jsou následně znáhodněny přenásobením pseudonáhodnou kódovací posloupností PRBS. [19]

2.2.3. Kanálové kódování

Obdobně jako DVB-T využívá také technologie DVB-T2 pro ochranu jednotlivých PLP toků protichybovou ochranu FEC (Forward Error Correction). Zabezpečení dat proti chybám FEC se skládá z vnější ochrany, kde je použit kód BCH (Bose-Chaudhuri-Hocquenghem), a z vnitřní ochrany LDPC (Low Density Parity Check). Součástí kanálového kódování je i prokládání (interleaving) zamezující vzniku shlukových chyb. Zápis zabezpečené bitové posloupnosti se provádí po sloupcích a následné čtení po řádcích.

Na obrázku 4 je znázorněna struktura FEC rámce, která je definována pro dvě velikosti 16200 (krátký FEC rámeček) a 64800 (normální FEC rámeček) bitů. Poměr užitečných přenesených bitů a schopnost korekce chyb (10 nebo 12 bitů) závisí na zvoleném LDPC kódovém poměru.



Obr. 4: Struktura FEC rámce

Standard DVB-T2, využívající kódování BCH a LDPC spolu s rozmanitou volbou parametrů, je v porovnání s technologií DVB-T robustnějším systémem odolnějším vůči šumu a interferencím.

2.2.4. Modulační princip DVB-T2

Bitová posloupnost jednotlivých kanálů fyzické vrstvy PLP je rozdělena demultiplexerem na paralelní větve bitových datových buněk, jejichž počet závisí na zvolené modulaci a délce LDPC kódu. Následným namapováním buněk do konstelačního diagramu vzniknou jednotlivé IQ body v konstelačním diagramu, kde sousední symboly se liší právě v jednom bitu (symbolu). Buňky, které vytvoří jednotlivé body v IQ rovině, se nazývají COFDM buňky.

DVB-T2 technologie oproti předchozímu standardu pozemní televize umožňuje natočení konstelačního diagramu a cyklické zpoždění Q složky. Tato technologie byla zavedena za účelem potlačení úniků přenosových cest ve snaze zefektivnění demodulace na přenosných a mobilních přijímačích.

Modulace, neumožňující natočení konstelačních bodů pro vyhodnocení přijatého digitálně modulovaného signálu, potřebuje informace jak o složce soufázové (I), tak složce kvadrurní (Q). K vyhodnocení přijatého symbolu při natočení konstelačních bodů v rotačním konstelačním digramu o obecný úhel ϕ , definovaný pro různé modulace (viz tabulka 3), postačí přijímači jen jedna složka, neboť složka I i složka Q nese dostatečnou informaci o přenášeném symbolu. [8]

Modulace	Úhel natočení [°]
QPSK	29.0
16-QAM	16.8
64-QAM	8.6
256-QAM	3.6

Tabulka 3: Pootočení konstelačních bodů diagramu

Cyklické zpoždění kvadrurní složky probíhá v rámci jednotlivých FEC bloků. Prokládání aplikované na zpožděnou Q složku zajišťuje oddělení I a Q složky na různé frekvence v různém čase. Proces prokládání zajišťuje vyšší odolnost přenášeného signálu při selektivních únicích, neboť jednotlivé složky jsou nezávislé na sobě. Cyklické zpoždění Q složky je na straně přijímače odstraněno zpožděním I složky. [9]

3. Příjem DVB-T/T2

V této kapitole se budu krátce zabývat vlastnostmi přijímacích antén, možnostmi televizního rozvodu, vlastnostmi a požadavky stanovené příslušnou normou na konstrukci samotných přijímačů.

Jedním z nejdůležitějších parametrů pro vyhodnocení úspěšného příjmu DVB-T/T2 signálu je bitová chybovost BER. Referenční úroveň BER za Viterbiho dekodérem odpovídá chybovosti 2×10^{-4} v případě DVB-T signálu a 1×10^{-7} za LDPC dekodérem v případě DVB-T2. V praxi se bitová chybovost určuje pomocí měřicích přístrojů. V případě, že je nemáme, se jako referenční úroveň BER považuje alespoň 10 s stabilního příjmu bez vizuálních chyb v obrazu.

3.1. Přijímací anténa

Anténu lze definovat jako zařízení určené k příjmu nebo k vysílání rádiových signálů. Jedná se o přechodovou strukturu, o základní prvek radiokomunikačního řetězce. Anténa jako přechodová struktura zprostředkovává změnu charakteru šíření harmonické elektromagnetické vlny tak, že šíření v obecném volném prostoru (např. atmosféra) se přemění na šíření podél vedení (např. koaxiálního) a naopak. Anténa, jako koncový prvek radiokomunikačního řetězce, značně ovlivňuje svými parametry kvalitu celého radiokomunikačního přenosu. Anténa interaguje přímo s elektromagnetickou vlnou, proto je citlivá na frekvenci, směru šíření a polarizaci vlny.

Pro příjem terestrického DVB signálu musíme zvolit anténu pro pásmo UHF, neboť pozemní televizní vysílání využívá IV. a V. TV pásmo (470-862 MHz). Výběr antény by se měl odvíjet podle lokality, příjmových podmínek, zda je přímá viditelnost na požadovaný vysílač a hlavně podle kanálů, které chceme přijímat. Anténu lze volit dle širokopásmovosti, vyzařovací charakteristiky a požadovaného zisku.

Při instalaci přijímací antény je nutné nejen její správné nasměrování, ale i správná volba její polarizace. Většina vysílačů vysílá v horizontální rovině, tudíž natočení antén zůstává stejné jako v analogové éře. Avšak s příchodem DVB-T technologie se v místech s hustou zástavbou začalo vysílat s vertikální polarizací. Pro kvalitní příjem takového vysílače musí být anténa pootočena o 90° .

Při neshodné polarizaci vysílací a přijímací antény dochází k útlumu přibližně 20 dB, což je zpravidla větší útlum, než je zisk samotné antény. Při nedodržení polarizace vysílací a přijímací antény není jisté, zda přijímaný signál přichází z požadovaného vysílače, nebo ze vzdálenějšího vysílače stejně polarizovaného pracujícího v identické síti SFN. Samozřejmě v praxi mohou existovat případy, kdy i při neshodné polarizaci může být přijímaný signál dostačující, ačkoliv je zbytečně utlumen. [10]

3.1.1. Pokojové antény

Pokojové přijímací antény volíme v lokalitách, kde je vysoký výkon přijímaného signálu, tedy v blízkosti vysílačů, například ve velkých městech. Pokojová anténa je zpravidla velmi jednoduchý pasivní prvek v podobě prutu. Jelikož u pokojových antén nepředpokládáme přímou viditelnost vysílače, mnohdy mohou být přijímací podmínky nedostačující. S uvážením značného útlumu železo-betonových opláštěných budov se mnohdy dostáváme na hraniční podmínky příjmu. Jedním, z mého pohledu nepřiliš efektivním řešením, je volba aktivní pokojové antény. V případě velmi slabého signálu ani tato varianta nemusí být řešením bezproblémového příjmu. V tomto případě jedinou možností je venkovní anténa.

3.1.2. Venkovní antény

Vhodným typem venkovních antén pro pásmo UHF jsou antény směrové. Při výběru antény opět záleží na vzdálenosti přijímacího místa od vysílače. Vezmeme-li v úvahu málo členitý profil na vzdálenost několik desítek kilometrů, postačí hojně využívaná logaritmicko-periodická anténa se ziskem okolo 10 dB. Pro větší vzdálenosti s více terénními překážkami je výhodné volit anténu s vyšším ziskem (12-18 dB), např. úzce směrové Yagi antény. V případě potřeby vyššího zesílení lze použít zesilovací členy, které jsou přímo součástí některých antén. Obecně platí, že je vhodné volit raději pasivní anténu s větším ziskem, než „dohánět“ její nedostačující zisk zesilovačem.

3.1.3. Požadavky kladené na přijímací anténu

Jednoduchá konstrukce antén určuje rovinu polarizace, která by neměla být měněna v celém frekvenčním pásmu. Měření účinnosti nebo zisku antény by mělo být prováděno v celém frekvenčním rozsahu v dané rovině. Limitní hodnoty účinnosti

jsou definovány s cílem zajistit dostatečně vysoký odstup signál-šum C/N přijímaného DVB-T/T2 signálu. Účinnost nebo zisk pasivní antény nesmí klesnout v celém frekvenčním pásmu pod uvedenou minimální hodnotu G/T, která v pásmu 470–862 MHz činí -30,4 dB(1/K). G/T je jakostní číselník pozemské přijímací soustavy, kde G je zisk vztažený k ekvivalentní šumové teplotě T přijímače. Uvažované šumové číslo přijímače je 8 dB.

Maximální přípustné kolísání úrovně ("ripples") způsobené přijímací anténou v pásmu kanálu je 4 dB a maximální přípustné kolísání úrovně způsobené přijímací anténou v celém frekvenčním pásmu je uvedeno v tabulce 4.[20]

	aktivní anténa	pasivní anténa
170-230 MHz	10 dB	8 dB
470-606 MHz	10 dB	8 dB
606-862 MHz	15 dB	10 dB

Tabulka 4: Maximální přípustné kolísání úrovně v celém frekvenčním pásmu

3.2. Televizní rozvody

Televizní kabelové rozvody zajišťují distribuci televizního signálu od antény do koncových bodů, tedy k televizním přijímačům. Distribuční rozvody pokrývají různé velké rozsahy budov a komplexů. Složitost rozvodu závisí na počtu přijímacích míst, na síle signálu v dané lokalitě a na počtu použitých prvků. Kabelové rozvody jsou zpravidla zakončené účastnickou zásuvkou. Úroveň digitálního signálu na televizní zásuvce by se měla pohybovat v rozmezí 45 až 70 dB μ V. [1]

3.2.1. Individuální domovní televizní rozvody

Kromě správné volby přijímací antény je důležitá volba koaxiálního kabelu. Při návrhu televizního rozvodu je nutné volit řešení s ohledem na ostatní elektrické rozvody. Většina kabelů má dvojitě stínění tvořené hliníkovou fólií a opletením, avšak zejména ty laciné nedisponují kvalitním stíněním a do kabelu proniká vnější rušení. Dalším rozhodujícím parametrem při výběru koaxiálního kabelu je útlum. U koaxiálních kabelů útlum ovlivňuje průměr vodiče a typ dielektrika. Čím větší průměr kabelu, tím nižší útlum. Zatímco čím vyšší frekvence, tím útlum roste. Hodnoty útlumu koaxiálních kabelů se uvádějí v dB vztažených na jednotku délky, typicky 0,15-0,2 dB/m

ve IV. a V. TV pásnu. Délka domovního rozvodu mnohdy činí několik desítek metrů, kde kvalitativní parametry mohou značně ovlivnit kvalitu přijímaného signálu.

Domácí televizní rozvod nebývá jen přímá cesta koaxiálního kabelu mezi anténou a přijímačem, ale více či méně větvící se struktura s častou potřebou zesílení či utlumení za účelem dosažení požadované úrovně signálu na televizních zásuvkách. Na modelu televizního rozvodu běžného rodinného domu uvedu standardně používané prvky. Uvažujme, že svody od venkovní antény upevněné na střešním anténním stožáru jsou přivedeny do půdní části, kde jsou většinou svedeny do jednoho bodu (rozvodové krabice), odkud bývá systém dále hvězdicovitě rozvětven do více větví, zesílen, či sloučen se signály od jiných antén.

Často používaným prvkem televizního rozvodu je rozbočovač, který se používá pro rozbočení signálů od antény do více větví. Podle počtu výstupů se odvíjí i velikost útlumu. U rozbočovačů se dvěma výstupy útlum dosahuje hodnoty cca 4 dB, se třemi cca 6,5 dB. Zvláštním typem rozbočovače je odbočovač, kde na rozdíl od rozbočovače na jednotlivých výstupech nejsou stejné hodnoty útlumu. Je-li případně napájen anténní zesilovač z přijímače, je nutné volit součástky s průchozí větví pro napájení.

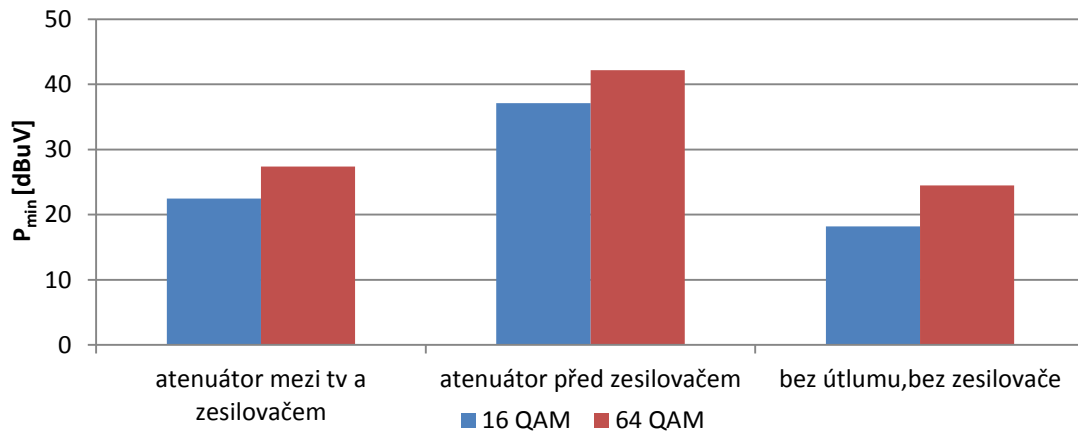
V případě nutnosti sdružení signálů, např. satelitního a terestrického příjmu či sloučení příjmu od více antén, je nutné použít prvek zvaný slučovač. Stejně jako u rozbočovače se lze setkat s pasivní i aktivní variantou.

Jednotlivé větve televizního rozvodu jsou zpravidla zakončené televizní zásuvkou. Útlumy účastnických zásuvek jsou rozdílné podle provedení, průchozí s vyšším oddělovacím a malým průchozím útlumem a zásuvky koncové. Přivedení signálu do vstupní části přijímačů je zajištěno účastnickou propojkou, což je koaxiální kabel opatřený IEC (International Electrotechnical Commission) konektorem typu samice připojeným v účastnické zásuvce a IEC konektorem typu samec pro připojení k přijímači. V případě, že po připojení přijímače zjistíme, že úroveň signálu je nedostačující pro bezporuchový příjem, bude nutné ke kompenzaci útlumu způsobenému pasivními prvky nebo k zesílení slabého signálu na anténě použít aktivní zesilovací prvek. V ideálním případě by měl zesilovač vykazovat zesílení úměrné útlumu televizního rozvodu. Pokud je útlum rozvodu příliš velký, musíme ho rozdělit do více menších větví a případně separovaně zesilovat.

Variant zesilovačů pro UHF pásmo je několik, od anténních předzesilovačů, až po kanálové, linkové, domovní či programovatelné zesilovače a multipřepínače. Při výběru zesilovače nezáleží jen na požadovaném zisku, ale i na šumovém čísle a vybuditelnosti. Volba zisku by měla odpovídat útlumu rozvodu. Na druhou stranu použitím zesilovače s vysokým zesílením může dojít k přebuzení přijímače a kvalita příjmu bude znehodnocena obdobně jako v případě slabého signálu. Mnohdy opomíjeným, ale důležitým parametrem je šumové číslo. Šumové číslo zjednodušeně vyjadřuje poměr výkonu signálu na vstupu ke vstupnímu šumovému výkonu vůči poměru výkonu výstupního signálu a celkového šumového výkonu na výstupu dvoubranu. Zesilovače totiž kromě chtěného zesílení přispívají vlastním šumem k šumovému pozadí přijímaného signálu. Odstup užitečného signálu a nechtěného signálu (šumu) definuje parametr C/N. Tento parametr udává o kolik je užitečný signál silnější než šum. Kvalitní zesilovač má šumové číslo co nejnižší. Úzkopásmové předzesilovače vykazují hodnoty do 1,5 dB, zatímco širokopásmové nebo výkonové zesilovače mají typicky 5 dB. Předzesilovače jsou díky malému šumovému číslu vhodné v případě potřeby zesílení velmi slabého signálu na hranici šumového prahu. Tranzistor takovýchto zesilovačů má mnohem menší vybuditelnost než například zesilovače výkonové. Vybuditelnost je parametr, který udává maximální výstupní úroveň signálu většinou v jednotkách $\text{dB}\mu\text{V}$. Proto u předzesilovačů při zesilování vstupního signálu s vysokou úrovní může lehce dojít k překročení mezní hodnoty a zesilovač se stává nestabilní.

Co se týče zařazení zesilovače do obvodu, doporučuje se jeho zapojení co nejbližší k anténě. Tuto podmínku bezpečně splňují anténní předzesilovače nebo zesilovače venkovní. Pokud se ovšem uživatel rozhodne pro zesílení jen určité větve televizního rozvodu, jistě by v mnohých případech pro něj bylo pohodlnější umístit zesilovač přímo na konec koaxiálního kabelu přivedeného do přijímače. Z tohoto důvodu jsem se rozhodl zkoumat vliv zařazení zesilovače do obvodu na minimální citlivost tuneru. Test jsem prováděl pro dvě vícestavové kvadraturně amplitudové modulace. Konkrétně pro 16 a 64-QAM modulaci s kódovým poměrem 2/3, ochranným intervalem 1/8 v módu 8k. Provedl jsem různé konfigurace zapojení obvodu, kde pro korekci zesílení 20 dB, respektive simulaci vloženého útlumu, byl použit attenuátor o hodnotě 20 dB. Uvedené naměřené hodnoty odpovídají minimální úrovni

DVB-T signálu na generátoru, při které nedochází k rozpadu obrazu na testované televizi LG s integrovaným tunerem.



Obr. 5: Minimální citlivost v závislosti na zařazení zesilovače v obvodu

Z uvedených výsledků je patrné, že naprosto nejlépe se jeví zapojení bez jakéhokoliv pasivního či aktivního prvku. Každý pasivní prvek zavádí do výkonové bilance útlum. Ve snaze korigovat ztráty použitím aktivního prvku docílíme zesílení, ale na úkor zkreslení signálu a snížení odstupu C/N.

3.2.2. Společné televizní rozvody

Koncepce společných televizních rozvodů panelových domů a jiných větších komplexů je značně složitější. Přijatý signál anténní sestavou je přiveden do hlavní stanice, kde dochází k jakostnímu zpracování signálu. Hlavní stanice je tvořena jednotlivými moduly, zesilovači, napájecími zdroji, kmitočtovými konvertory, modulátory apod. Hlavní výhodou centrálních stanic je jejich rozšiřitelnost dle požadavků na množství přijímaných kanálů. Zpracovaný signál je kabelovým rozvodem přiveden do jednotlivých koncových bodů, účastnických zásuvek, s cílem dosažení co nejmenšího rozdílu mezi úrovněmi jednotlivých kanálů, či alespoň dodržení doporučeného rozmezí úrovní 45 až 70 dB μ V.

Příjem digitálního signálu prostřednictvím STA (společné televizní antény) je možný více způsoby. Prvním možným řešením je přímý rozvod digitálních kanálů v pásmu UHF. Digitální signál je rozváděn na stejném kanálu, na jakém je vysílán. V hlavní stanici STA je signál zesilován (kanálově, širokopásmově), případně utlumen, ve snaze vyrovnat výkonové úrovně na výstupu. V praxi může nastat situace, kdy požadované multiplexy jsou vysílány na sousedních kanálech s odlišným vysílacím

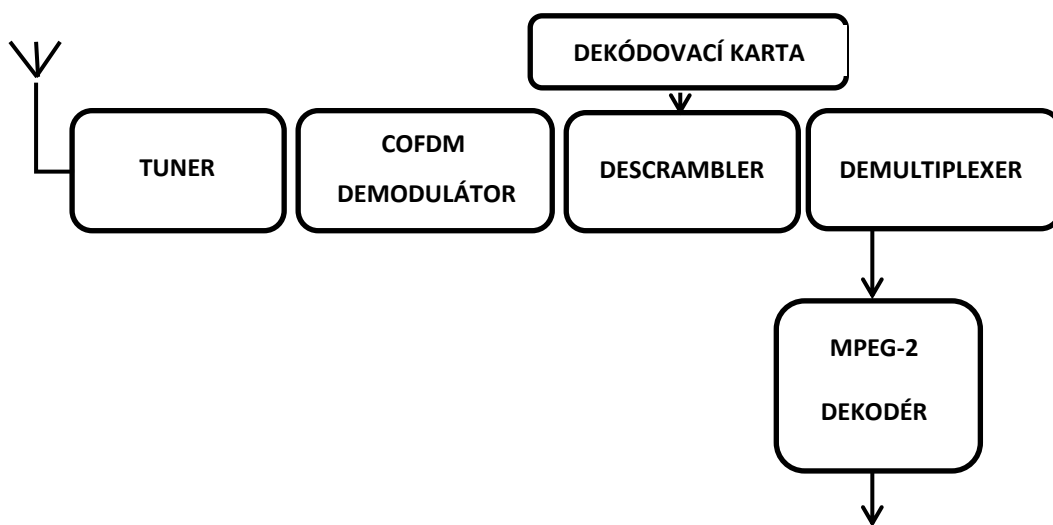
výkonem. Jedním konkrétním případem je situace vysílače Praha Žižkov (41. kanál) vysílající poměrně velkým výkonem a vysílače Novodvorská a Ládví (42 kanál) vysílající výkonem podstatně menším. Ačkoliv uvedené vysílače vysílají s odlišnou polarizací, tak jak jsem uvedl v kapitole 3.1, přijímaný signál na anténě může být dostačující i při nedodržení polarizace vysílací a přijímací antény. Ovšem v tomto případě na přijímací anténě naměříme odlišné úrovně signálů. Zde záleží na tom, z jakého směru jsou signály přijímány. Při příjmu na jednu anténu se nabízí řešení pomocí kanálového zesilovače, při příjmu z různých směrů se nabízí použití dvou antén, kde se přijímané úrovně vyrovnají použitím útlumu o jmenovité hodnotě. V případě použití kanálových zesilovačů, případně pasivních propustí, je nemožné vytvořit tak ostrou charakteristiku, která by propouštěla jen a pouze požadovaný kanál bez pronikání sousedního kanálu. Zde vyvstává řešení použití širokopásmového zesilovače pro zesílení slabšího multiplexu a poté jen zbývá vyřešit otázku sloučení. Nicméně při přímém rozvodu digitálního signálu nejde jen o problém nedostatečně selektivních kanálových zesilovačů, ale především o problém stejného kanálu v rozvodu STA a ve vzduchu. Mnohem větší problém nastává u rozvodů, kde páteřní kabel vede od anténní sestavy do sklepa, odkud je rozvedený do jednotlivých stoupaček a pokračuje po patrech nahoru. V horních patrech na účastnických zásuvkách bude signál relativně slabý, byť v úrovni definované normou, utlumený o několik metrů koaxiálního vedení a o útlumy všech pasivních prvků v rozvodu, zatímco signál ve vzduchu je v horních patrech silný. Celou situaci značně zhoršují běžně používané špatně stíněné účastnické kabely, které v extrémních případech poslouží jako přijímací anténa, čímž způsobují mísení signálu ze vzduchu a rozvodu STA a zamezují bezproblémového příjmu.

Z informací získaných od firmy AnteNet se v praxi, i při správném nastavení hlavní stanice a dosažení přibližně stejné úrovně na účastnických zásuvkách, řada moderních televizí s integrovanými tunery DVB-T/T2 nedokáže vyrovnat s příjmem sousedních kanálů. Proto dodržují zásadu, kde mezi kanály by měl být alespoň jeden kanál volný. Z tohoto důvodu se používá princip kmitočtové konverze. Kmitočtový převod umožňuje převést přijímaný kanál na zvolený jiný kanál, čímž lze bez problému přijímat sousední kanály. Přijímané kanály, vzhledem k útlumu rozvodů, je vhodné převádět na začátek UHF pásma. U nových rozvodů, kde nejsou útlumy tak velké i na vyšších frekvencích, jde spíše o nalezení neobsazeného kanálu, na kterém

nevysílá žádný vysílač. Ovšem ve skutečnosti je často vzhledem k ekonomické situaci digitální signál přenášen na analogových rozvodech, které nebyly konstruované na pásmo UHF. V praxi se zpravidla volí kanály okolo středu UHF pásma, protože kanály na horní hranici pásma jsou nepoužitelné pro obrovský útlum, zatímco na spodní hranici vzhledem k teoreticky nejnižšímu útlumu koaxiálního kabelu paradoxně vykazují značně velké rozdíly mezi útlumy dvou blízkých kanálů. Další možností řešení STA je převod DVB-T signálů na analogové v kmitočtovém pásmu VHF nebo šíření multiplexu s využitím standardu DVB-C. [12]

3.3. Přijímače DVB-T/T2

Pro příjem pozemní digitální televize se používají televizní přijímače s integrovaným tunerem pro digitální televizi, případně set-top boxy v provedení externích zařízení připojitelných k TV. Obrázek 6 popisuje základní blokové schéma vstupních obvodů přijímače.



Obr. 6: Základní blokové schéma vstupní části přijímače[1]

Tuner je vstupní část přijímače umožňující naladění požadovaného kanálu. Blok je opatřený vstupním konektorem IEC samice a vývody do dalších částí obvodu. Šířka pásma kanálu je vyčleněna filtrem s povrchovou akustickou vlnou SAW (Surface Acoustic Wave). Následně dochází ke konvertování vf signálu do základního pásma a k následnému zpracování signálů v dalších blocích. Následující částí blokového schématu je COFDM demodulátor. Demodulátor je integrovaný obvod obsahující

obvody pro FFT, demodulátory QAM a QPSK a obvody RS (Reed Solomon) a Viterbi dekodéru. Další část zvaná descrambler se nachází v přijímačích určených pro příjem placených televizních stanic. Descrambler umožňuje dle kódovacího algoritmu dekódovat služby i programy. Pro sledování placených televizních stanic musí být digitální přijímač vybaven slotem pro přístupovou kartu. V dalším bloku, demultiplexoru, se na základě tabulek nesoucích servisní a programové informace vybírají obrazové, zvukové a datové toky. Část zvaná MPEG-2 dekodér obsahuje tři jednotlivé dekodéry pro obraz, zvuk a data, ve kterých dochází k dekódování komprimovaných signálů. Popisu zpracování signálu v dalších blocích přijímače se vzhledem k rozsahu a náplni této práce nevěnuji.[13]

3.3.1. Parametry stanovené normou pro přijímače první generace

Norma ČSN EN 62216-1 [14] uvádí požadavky kladené na přijímače DVB-T. Norma mj. specifikuje tabulky minimálních potřebných odstupů signálu od šumu (C/N), kde šum společně s nosnou vlnou je aplikován v šířce pásma 7,61 MHz. Při výpočtech je uvažován model uvedený v příloze 1.

Modulace	Kódový poměr	Gaussův kanál[dB]	Pevný příjem [dB]	Přenosný příjem [dB]
QPSK	1/2	5,60	6,10	7,90
	2/3	7,40	8,20	10,90
	3/4	8,40	9,30	13,20
	5/6	9,40	10,50	15,70
	7/8	10,20	11,20	19,00
16-QAM	1/2	11,30	12,10	13,80
	2/3	13,70	14,20	16,80
	3/4	15,10	15,60	18,40
	5/6	16,10	17,00	22,10
	7/8	16,50	17,60	26,10
64/QAM	1/2	17,00	17,30	18,70
	2/3	19,20	19,80	22,10
	3/4	20,80	21,40	24,80
	5/6	22,10	22,90	29,40
	7/8	23,00	24,00	33,90

Tabulka 5: C/N pro dosažení BER = 2×10^{-4} za Viterbiho dekodérem

V tabulce 6 jsou poměry C/N přepočítány na hodnoty minimální vstupní úrovně (citlivosti) signálu pro dosažení referenční bitové chybovosti BER (Bit Error Rate) 2×10^{-4} za Viterbiho dekodérem. Šumové číslo přijímačů by mělo být lepší než 8 dB.

Modulace	Kódový poměr	Gaussův kanál [dB μ V]	Pevný příjem [dB μ V]	Přenosný příjem [dB μ V]
QPSK	1/2	15,40	15,90	17,70
	2/3	17,20	18,00	20,70
	3/4	18,20	19,10	23,00
	5/6	19,20	20,30	25,50
	7/8	20,00	21,00	28,80
16-QAM	1/2	21,10	21,90	23,60
	2/3	23,50	24,00	26,60
	3/4	24,90	25,40	28,20
	5/6	25,90	26,80	31,90
	7/8	26,30	27,40	35,90
64/QAM	1/2	26,80	27,10	28,50
	2/3	29,00	29,60	31,90
	3/4	30,60	31,20	34,60
	5/6	31,90	32,70	39,20
	7/8	32,80	33,80	43,70

Tabulka 6: Přehled citlivostí pro dosažení BER = 2×10^{-4} za Viterbiho dekodérem

Definovaná maximální úroveň vstupního signálu, kterou musí být přijímače DVB-T schopné zpracovat, je -35 dBm (tj. 72 dB μ V¹). U analogových signálů je hodnota o 10 dB větší. Norma [14] uvádí taktéž odstup signálů v sousedních kanálech. Přijímač by měl vykazovat referenční úroveň BER při až 25 dB silnějším signálu v sousedním kanálu. Všechny ostatní kanály mohou během poskytování referenční bitové chybovosti mít až o 40 dB vyšší úroveň, zrcadlové kanály o 30 dB.²

¹Uvedené hodnoty v dB μ V odpovídají impedanci 50 Ω , viz kapitola 5.

²Uvedené hodnoty se vztahují k režimu {8k, 64-QAM, CR=2/3, Δ /Tu=1/8} a {8k, 64-QAM, CR=2/3, Δ /Tu=1/4}

3.3.2. Parametry stanovené normou pro přijímače druhé generace [15]

Hodnoty citlivostí (P_{\min}) a požadovaných odstupů signálu od šumu (C/N) jednotlivých módů DVB-T2 signálu pro dosažení chybovosti BER (10^{-7} za LDPC dekodérem) pro Gaussův kanál jsou uvedeny v následující tabulce.

Modulace	Kódový poměr	Gaussův kanál C/N [dB] pro 32k, PP2	Gaussův kanál C/N [dB] pro 32k, PP4	P_{\min} [dB μ V] pro 32k, PP2	P_{\min} [dB μ V] pro 32k, PP4
QPSK	1/2	3,50	3,10	11,5	11
	3/5	4,70	4,30	12,7	12,2
	2/3	5,60	5,20	13,6	13,1
	3/4	6,60	6,20	14,6	14,1
	4/5	7,20	6,80	15,2	14,7
	5/6	7,70	7,30	15,7	15,2
16-QAM	1/2	8,70	8,30	16,7	16,2
	3/5	10,10	9,70	18,1	17,6
	2/3	11,40	11,00	19,4	19
	3/4	12,50	12,10	20,5	20,1
	4/5	13,30	12,90	21,3	20,9
	5/6	13,80	13,40	21,8	21,4
64-QAM	1/2	13,00	12,60	21	20,6
	3/5	14,80	14,40	22,8	22,4
	2/3	16,20	15,70	24,1	23,7
	3/4	17,70	17,30	25,7	25,2
	4/5	18,70	18,30	26,7	26,3
	5/6	19,40	18,90	27,3	26,9
256-QAM	1/2	17,00	16,50	25	24,5
	3/5	19,40	18,90	27,3	26,9
	2/3	20,80	20,40	28,8	28,4
	3/4	22,90	22,40	30,8	30,4
	4/5	24,30	23,80	32,3	31,8
	5/6	25,10	24,60	33,1	32,6

Tabulka 7: Hodnoty citlivostí (P_{\min}) a požadovaných odstupů signálu od šumu (C/N) pro zajištění QEF příjmu

Hodnoty minimálního odstupů signál šum potřebných pro dosažení kvazi bezchybného QEF (Quasi Error Free) příjmu jsou přepočítány na hodnoty minimálních citlivostí pro jednotlivé módy dle rovnice 8 a 9 uvedené v příloze 1.

Maximální úroveň vstupního signálu, pro který musí přijímače DVB-T2 umožnit QEF příjem, je -25 dBm (tj. 82 dB μ V). Z hlediska selektivity nesmí přijímače pro zajištění QEF příjmu při přítomnosti rušícího DVB-T/T2 signálu na sousedních, zrcadlových, či jiných kanálech překročit povolené poměry rušícího a užitečného signálu I/C (Interference/Carrier) dle následující tabulky 8.

Pásmo	šířka kanálu [MHz]	max. poměr I/C [dB]		
		sousední kanály	ostatní kanály	zrcadlové kanály
III. TV pásmo	7	28	38	-
IV. TV pásmo	8	28	38	28
V. TV pásmo	8	28	38	28

Tabulka 8: Selektivita DVB-T2 standardu při přítomnosti rušícího DVB-T/T2 signálu

4. Analýza příjmových podmínek

Analýza se týkala měření úrovně přijímaného signálu na zvoleném měřicím stanovišti v učebně radiových vysílačů a přijímačů na katedře radioelektroniky fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze Dejvicích. Vzhledem k poloze měřícího místa se omezují na ověření příjmových podmínek pouze pražských vysílačů a vysílače Cukrák, který sice spadá do Středočeského kraje, ale díky vysokému vysílacímu výkonu je dominantním vysílačem s horizontální polarizací i pro oblast Prahy.

4.1. Seznam pražských vysílačů

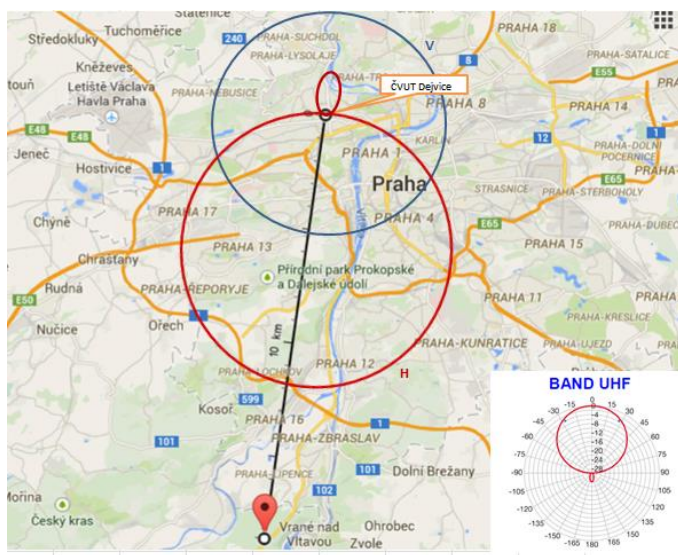
Tabulka 9 obsahuje seznam pražských vysílačů včetně vysílacích výkonů, roviny polarizace, a kmitočtů, na kterých vysílají. Vysílače v tabulce jsou řazeny chronologicky dle čísla kanálu.

Vysílač	Lokalita	Kanál	Program/síť	Výkon ERP [kW]	Výkon ERP [dBw]	Polarizace	Nadm. výška [m.n.m]	Kmitočtový rozsah kanálu [MHz]	Frekvence DVB-T [MHz]
Praha – Ládví	Praha – Ládví	37	Regionální síť 7	20	43	H	359	598 – 606	602
Praha - Novodvorská	Praha – Novodvorská	37	Regionální síť 7	10	40	H	305	598 – 606	602
Praha-město	Mahlerovy sady	41	DVB-T síť 2	32	45	V	258	630 – 638	634
Praha	Praha-Cukrák	41	DVB-T síť 2	100	50	H	399	630 – 638	634
Praha – Ládví	Praha – Ládví	42	DVB-T síť 4	20	43	H	359	638 – 646	642
Praha - Novodvorská	Praha – Novodvorská	42	DVB-T síť 4	5	37	H	305	638 – 646	642
Praha - ÚTB Olšanská	Praha - ÚTB Olšanská	42	DVB-T síť 4	10	40	V	250	638 – 646	642
Praha - Ládví	Praha – Ládví	46	Regionální síť 4	5	37	H	355	670 – 678	674
Praha-Strahov	Praha-Strahov	46	Regionální síť 4	10	40	H	348	670 – 678	674
Praha - Zelený Pruh	Praha - Zelený Pruh	46	Regionální síť 4	4	36	H	265	670 – 678	674
Praha-město	Mahlerovy sady	47	Regionální síť 12	5	37	V	258	678 – 686	682
Praha-město	Mahlerovy sady	51	Regionální síť 8	5	37	V	258	710 – 718	714
Praha-město	Mahlerovy sady	53	DVB-T síť 1	32	45	V	258	726 – 734	730
Praha	Praha-Cukrák	53	DVB-T síť 1	100	50	H	399	726 – 734	730
Praha – Malešice	Praha – Malešice	57	Regionální síť 1	1	30	H	263	758 – 766	762
Praha-město	Mahlerovy sady	59	DVB-T síť 3	32	45	V	258	774 – 782	778
Praha	Praha-Cukrák	59	DVB-T síť 3	100	50	H	399	774 – 782	778

Tabulka 9: Přehled pražských vysílačů [16]

4.2. Měření příjmových podmínek

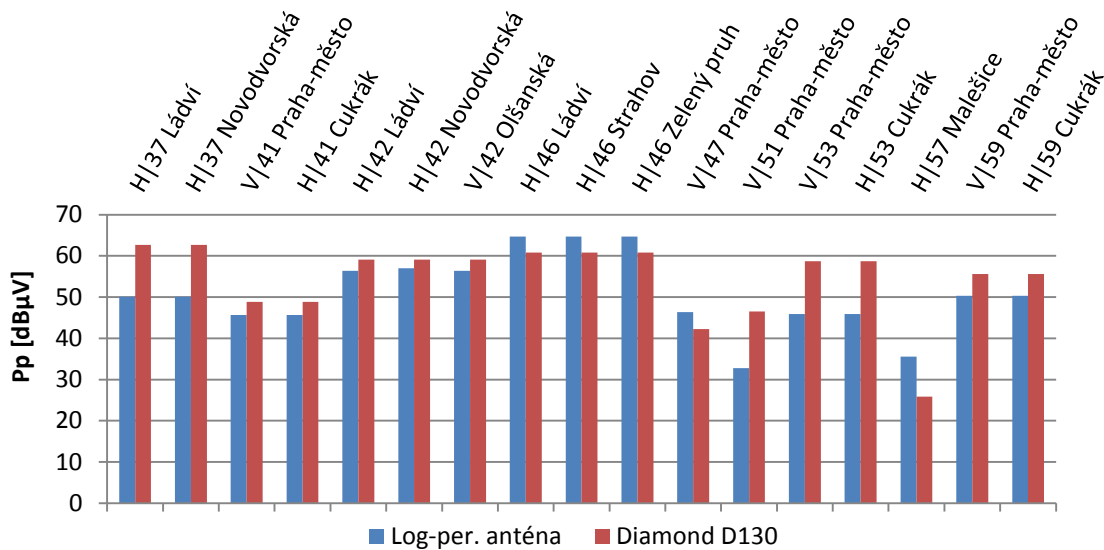
Na základě zpracovaného seznamu vysílačů (viz tabulka 9) jsem pomocí přenosného měřicího přístroje EFL 340 od firmy Rohde&Schwarz proměřil vlastnosti DVB-T příjmu. K testu byly použity dvě přijímací antény nasměrované ve dvou odlišných rovinách. V rovině horizontální byla použita širokopásmová směrová logaritmicko-periodická anténa nasměrovaná na vysílač Praha – Cukrák, pro vertikální polarizaci stojatá anténa DIAMOND D130 se všesměrovou charakteristikou. Situace je znázorněna na obrázku č. 7.



Obr. 7: Směrové charakteristiky uvažovaných antén

Antény se liší nejen zmiňovanou polarizací a směrovou charakteristikou, ale i ziskem. Vertikálně orientovaná anténa má zisk 1, resp. 0 dB, zatímco logaritmicko-periodická anténa přibližně 10 dB. Příjem digitálního signálu od různých vysílačů ovlivňuje mnoho faktorů jako je terénní profil a s tím související přímá viditelnost, vzdálenost a výkon, kterým daný vysílač vysílá. Nutno tedy upozornit, že příjmové podmínky na různých místech budou jistě odlišné.

Pro zjištění příjmových podmínek byla změřena hodnota výkonu přijímaného signálu v šířce kanálu 8 MHz. Měření bylo provedeno pro obě zmiňované antény na všech kanálech uvedených vysílačů.



Obr. 8: Příjmové podmínky v Praze Dejvicích

Měření jsem nejdříve provedl při manuální volbě kanálů a následně funkcí automatického režimu, kde dojde k proladění celého IV. a V. televizního pásma. Při ověřování příjmových podmínek doporučuji použít ruční volbu kanálu, protože při automatickém režimu jsou detekovány jen silné signály.

Naměřené hodnoty výkonu na anténě uvedené v obrázku 8 byly zjištěny při manuální volbě kanálů. Minimální úroveň přijímaného signálu na log-per. anténě odpovídá příjmu 57. kanálu z vysílače Malešice (35,6 dBμV) při uvažování horizontálně vysílajících vysílačů a 51. kanál (32,8 dBμV) v případě vertikálně polarizovaných vysílačů. Na vertikálně polarizované anténě Diamond D130 nejmenší naměřený přijímaný výkon odpovídá příjmu 47. kanálu z vertikálně polarizovaného vysílače Praha město (42,3 dBμV), z horizontálně vysílajících vysílačů 57. kanál (25,9 dBμV), vysílač Malešice. Příjem 57. kanálu z vysílače Malešice vykazuje nejnižší naměřené úrovně na anténě, protože v porovnání s ostatními kanály je vysílán s podstatně nižším výkonem (viz tabulka 9). Přestože se jedná o nejslabší signál naměřený na anténě, tak oproti normou udaným citlivostem je silnější. Maximální úroveň naměřená na horizontálně orientované anténě odpovídá příjmu 46. kanálu (64,7 dBμV), což v porovnání s nejnižší naměřenou úrovní na anténě odpovídá rozdílu 31,9 dB. Nejsilnější signál naměřený na anténě Diamond D130 odpovídá příjmu 37. kanálu (62,7 dBμV), tedy o 36,8 dB více v porovnání s nejnižší naměřenou úrovní (57. kanál). Nejsilnější změřený signál je na obou testovaných anténách nižší než maximální úroveň

definovaná normou ČSN EN 62216-1, tedy nedochází k přebuzení přijímače. Největší rozdíl mezi min. a max. naměřeným výkonem pro signály vzdálené o více než jeden kanál odpovídá 36,8 dB, což dle normy [14] znamená bezproblémový příjem. Srovnám-li naměřené výkony v sousedních kanálech, zjistím, že rozdíl naměřených výkonů mezi 41. a 42. kanálem činí v případě log-per. antény 10,5 dB, na vertikálně polarizované anténě DIAMOND D130 10 dB. Mezi dalšími sousedícími kanály (H|46. a V|47. kanál) je rozdíl úrovní sousedních kanálů na horizontálně polarizované anténě roven 18,3 dB, na vertikálně polarizované anténě 18,5 dB. Dle normy a nároků na selektivitu přijímačů by neměly uvedené rozdíly úrovní sousedních kanálů způsobit potíže při příjmu DVB-T signálů. Je zřejmé, že kdybych do měření zahrnul i dálkový příjem nebo jinou lokalitu, naměřené rozdíly výkonů by byly větší. Záměrem měření bylo kromě analýzy příjmových podmínek sledovat chování přijímačů při dodržení, případně překročení, definované hodnoty I/C (více v kapitole 5.2). Nicméně v testu jsem se omezil pouze na pražské vysílače, kde odstup sousedních kanálů (25 dB) ani ostatních (40 dB) nebyl překonán.

V síti SFN pracuje více vysílačů na stejné frekvenci, resp. na stejném kanálu, což může být značně omezující faktor při snaze určit, z jakého vysílače pochází přijímaný signál. Při měření nebylo možno s anténami manipulovat, natáčet je či přemísťovat. V Praze tato situace nastává pro vysílač Žižkov a Cukrák, byť vysílají s odlišnou polarizací, a pro 46. kanál, kde vysílače Strahov a Ládví vysílají se stejnou polarizací. Jistým řešením může být určení impulzní odezvy přijímaných DVB-T signálů v síti SFN. Změřením impulzní odezvy lze získat informaci o úrovni signálů a odrazů vzhledem k časovému zpoždění vůči hlavnímu přijímanému signálu. Časové zpoždění lze přepočítat na kilometrickou vzdálenost a tím získat nástin příjmové situace.

4.3. Model šíření vln v prostoru

Pro měření digitálních DVB-T/T2 signálů se používají ať už profesionální nebo cenově dostupnější měřicí přístroje. Ačkoliv naprostá většina uživatelů není vybavena žádným takovým zařízením, snaží se dosáhnout dobrých příjmacích podmínek zkoumou experimentální metodou. Jistý přibližný odhad mohou přinést výpočetní metody. Pro šíření vln ve volném prostoru nebo i v zástavbě existují sofistikované

výpočetní softwary přinášející teoretické hodnoty definující příjmové podmínky. Je samozřejmé, že se v praxi využívají přímá měření pro dané lokality, ale pouze pro přibližný náhled srovnávám naměřené hodnoty výkonů s jednoduchým matematickým výpočtem.

Šíření vln vychází z vlnové rovnice odvozené z Maxwellových rovnic. Charakter šířící se vlny ovlivňuje prostředí, kterým se šíří. Překážky a nehomogenity vlny tlumí, odráží, ohýbají či rozptylují. Nezanedbatelným ovlivňujícím faktorem jsou i atmosférické vlivy. Protože teorie šíření elektromagnetických vln je velmi složitá problematika přesahující rozsah této práce, omezím se pouze na výpočet použitím Friisova vztahu vycházejícího z radiokomunikační rovnice (1), ve které je uvedena do souladu hodnota výkonu přijímaného signálu a výkon vysílaného signálu, zisk vysílací a přijímací antény a ztráty šířením. Rovnice (2-4) modifikuje radiokomunikační rovnici zavedením efektivního vyzářeného výkonu vysílače. [17]

$$P_p = P_v - FSL(d) + G_v + G_p \quad (1)$$

$$ERP = P_v + G_v - L_v \quad (2)$$

$$P_p = ERP - FSL(d) + G_p \quad (3)$$

$$P_p = ERP - 10n \log \left(\frac{4\pi d}{c} \right) + G_p \quad (4)$$

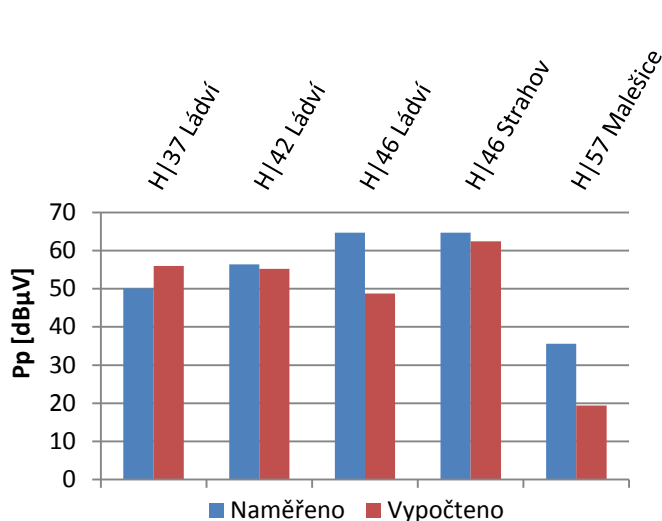
P_p - přijímaný výkon [dBm] G_p - zisk přijímací antény [dBi] FSL - ztráty volným prostorem [dB]

P_v - vysílaný výkon [dBm] G_v - zisk vysílací antény [dBi] L_v - ztráty na vysílači [dBm]

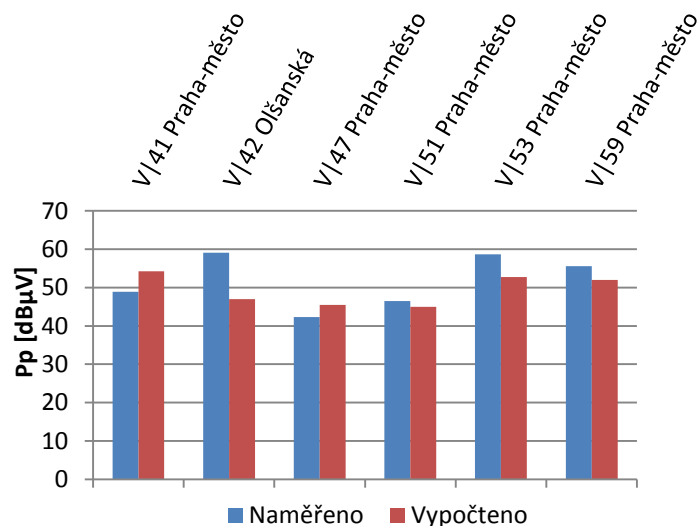
d - vzdálenost antén [m] ERP - efektivní vyzářený výkon f - frekvence [GHz]

n - spádový koeficient (pro hustou zástavbu 2,5 - 4) c - rychlost světla [m/s]

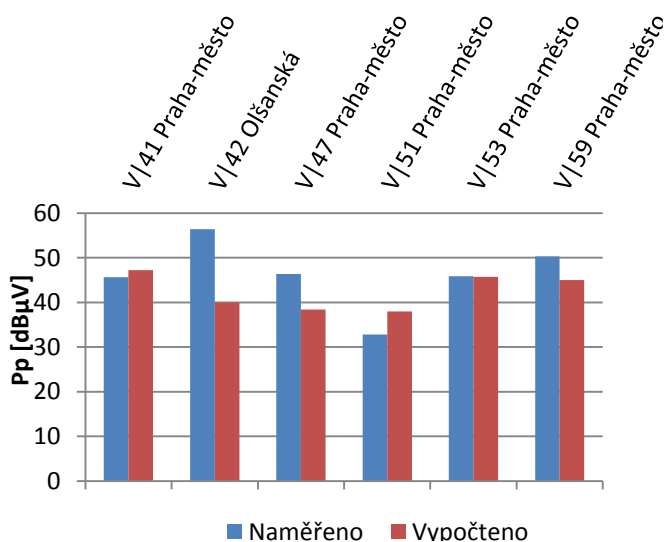
Při výpočtu s log-per. anténou byl uvažován směrový diagram antény (viz Obrázek 7) a správně voleny hodnoty G_p .



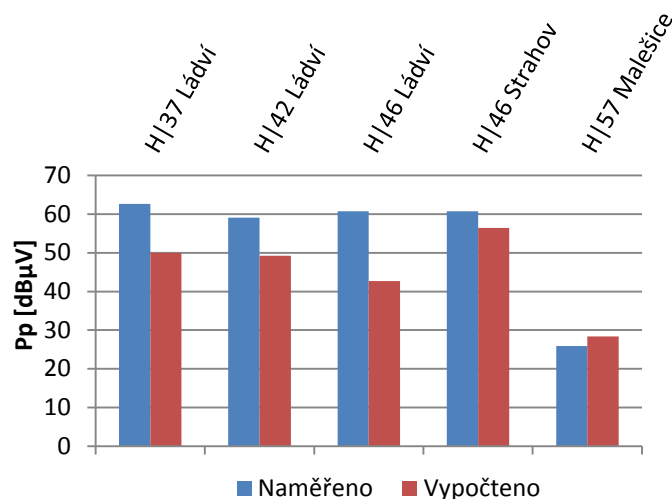
Obr. 9: Příjem vysílačů s H polarizací na log-per. anténu



Obr. 10: Příjem vysílačů s V polarizací na anténě Diamond D130



Obr. 11: Příjem na log-per. anténě při nedodržení polarizace vysílačí a přijímací antény



Obr. 12: Příjem na anténě DIAMOND D130 při nedodržení polarizace vysílačí a přijímací antény

Výpočet omezuji pouze na vysílače s přímou viditelností. Nejdříve bylo nutné zjistit vzdálenosti mezi přijímací anténou umístěnou na střeše budovy ČVUT a jednotlivými vysílači. Hodnota vzdálenosti je nezbytná pro určení ztrát volným prostorem (FSL - Free Space Lost). Výsledky uvedené v obrázku 9 až 12 jsou vypočteny pro spádový koeficient roven 2,5. Z mapy pokrytí [16] a úvahy, že se jedná o pražské vysílače a nikoliv pohraniční, uvažuji kruhovou všesměrovou charakteristiku v horizontálním směru.

Grafy zobrazují porovnání naměřených a vypočtených výkonů jak při souhlasné polarizaci vysílací a přijímací antény (obr. 9, 10), tak při jejich vzájemně ortogonálním natočení (obr. 11, 12). Lze si všimnout, že na 37. kanálu z Ládví (horizontální polarizace) je naměřen na vertikálně polarizované anténě Diamond D130 silnější signál než v případě horizontálně natočené log-periodické antény. To souvisí se směrovou charakteristikou antén. Anténa Diamond D130 má všesměrovou charakteristiku, zatímco na směrovou log-per. anténu orientovanou na vysílač Cukrák dopadají, z hlediska geografického rozložení vysílačů, signály z vysílače Ládví zezadu.

Při vertikální polarizaci vysílače i přijímací antény se rozdíl výpočtu a skutečné naměřené hodnoty liší přibližně o 5 dB, pouze u vysílače Olšanská o 12 dB. Při horizontální konfiguraci jsou naměřené hodnoty a výpočet na 42. a 46. kanálu (Strahov) velmi blízké (1 dB, respektive 2 dB). Rozdíl na 37. kanálu činí 5 dB, na 46. kanálu (Ládví) a 57. kanálu dokonce 15 dB. Zde lze pokračovat v diskuzi určení příjmu stejného kanálu od více vysílačů v síti SFN, konkrétně 46. kanálu. V předešlé úvaze jsem zvažoval řešení pomocí impulzní odezvy, zde mě napadá jistá souvislost vzdálenosti vysílací a přijímací antény promítnutá ve výpočtu výkonu přijímaného signálu. Z menší hodnoty rozdílu výpočtu a měření lze usuzovat, že signál pochází z vysílače Strahov. Dále z grafů odpovídajícím příjmu na logaritmicke-periodické anténě vyplývá, že přijímaný výkon naměřený na 42. kanále odpovídá vysílači s H polarizací Ládví.

Největší rozdíl min. a max. výkonu vypočteného pro horizontální konfiguraci antén činí 43 dB, pro vertikální polarizaci 9 dB.

Tyto úvahy musí být brány s rezervou, stejně jako ukázka tohoto výpočetního modelu. Zanedbáním mnoha faktorů lze získat pouze orientační výsledky, ovšem ve skutečnosti je tato problematika mnohem složitější.

5. *Vzájemné ovlivňování sousedních kanálů*

V této kapitole analyzuji vliv blízkých kanálů na příjem požadovaného signálu. Při příjmu sousedních kanálů dochází k degradaci signálů vlivem intermodulačních produktů přijímaného signálu i signálu sousedního kanálu.

Nejdříve jsem sledoval vliv na citlivost tunerů DVB-T/T2 přijímačů při různých úrovních signálu v sousedním a dalším blízkém kanálu. Dále jsem sledoval vzájemné rušení sousedních kanálů a to tak, že jsem proměřil minimální odstup nosného signálu k šumu (C/N) při různých úrovních rušivého signálu. Minimální odstup C/N vyjadřuje nejmenší rozdíl výkonu užitečného signálu a intenzity šumového pozadí, při kterém alespoň po dobu 10 sekund nedocházelo k chybám v obrazu.

Měření jsem provedl v simulovaném Gaussově kanálu, kde jsem při dostatečně silném užitečném signálu sledoval minimální odstup C/N v závislosti na změně úrovně rušivého signálu v sousedním a dalším blízkém kanálu. Vzájemné rušení sousedních kanálů jsem sledoval na 4 přijímačích první generace a 2 přijímačích druhé generace. Testovanými přijímači první generace byla televize LG FLATRON M2762D s integrovaným digitálním tunerem pro DVB-T, digitální set-top box Hauppauge Dec 2000 Terrestrial, přenosný měřicí přijímač od firmy R&S EFL 340 a USB klíčenka PCTV NanoStick. Poslední dva zmiňované přijímače byly proměřeny i ve standardu DVB-T2 při dvou různých kódových poměrech. Protože měřicí přijímač EFL 340 slouží jako širokopásmový spektrální analyzátor, byl při měření citlivosti na vstupu přijímače zařazen 20 dB zesilovač pro televizní pásma, čímž byly lépe přizpůsobeny jeho vstupní obvody pro příjem DVB-T/T2. Zisk zesilovače byl následně korigován.

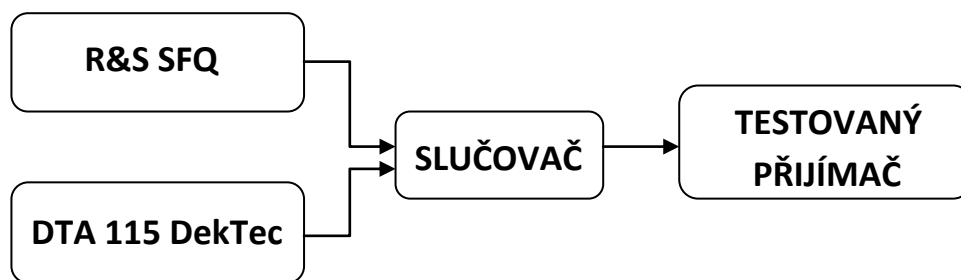
Přijímače DVB-T	Přijímače DVB-T2
LG FLATRON M2762D	R&S EFL 340
Hauppauge Dec 2000 Terrestrial	PCTV NanoStick
R&S EFL 340	
PCTV NanoStick	

Tabulka 10: Přehled testovaných přijímačů

Všechna měření na přijímačích první generace proběhla v jednom z doporučených módů pro ČR dle [15], konkrétně při modulaci 64-QAM, kódovém poměru FEC 2/3 a ochranném intervalu 1/4, v módu 8k. Druhá generace terestrických přijímačů byla proměřena nejdříve při stejné konfiguraci a poté při změně kódového poměru na 3/5. Tato změna byla provedena za účelem porovnání obou generací terestrických přijímačů při podobné datové rychlosti (19,9 Mbit/s první generace, 19,76 Mbit/s druhá generace). Pro měření byly zvoleny kanály uprostřed UHF pásma (618-634 MHz).

Užitečný signál, vysílaný z televizní karty DTA 115 DekTec na frekvenci 618 MHz, byl přiveden na 6 dB slučovač, kde byl sloučen společně s rušivým signálem přivedeným od generátoru SFQ R&S a výstup byl připojen na vstup příslušného digitálního přijímače. Parametry generovaného užitečného signálu jsou nastaveny pomocí programu StreamXpress. Při testu byl užitečný a rušivý signál nejdříve vzdálen o jeden kanál, tedy o 8 MHz, následně o 16 MHz. Útlumy způsobené kabely a konektory nejsou korigovány.

Generátory testovacího DVB-T/T2 signálu a propojovací kabely mají impedanci 50 Ω. Vstupní impedance digitálních přijímačů má impedanci 75 Ω. Připojí-li se k vedení zátěž s odlišnou impedancí od impedance vedení, nepřenese se celá část vysokofrekvenční energie do zátěže, ale část se odrazí zpět ke generátoru. Vlivem zanedbání impedančního nepřizpůsobení se mohou naměřené hodnoty citlivostí mírně lišit od skutečných. Při měření odstupů C/N se tím, že posuzují rozdíl mezi oběma signály, vliv nepřizpůsobení eliminuje.

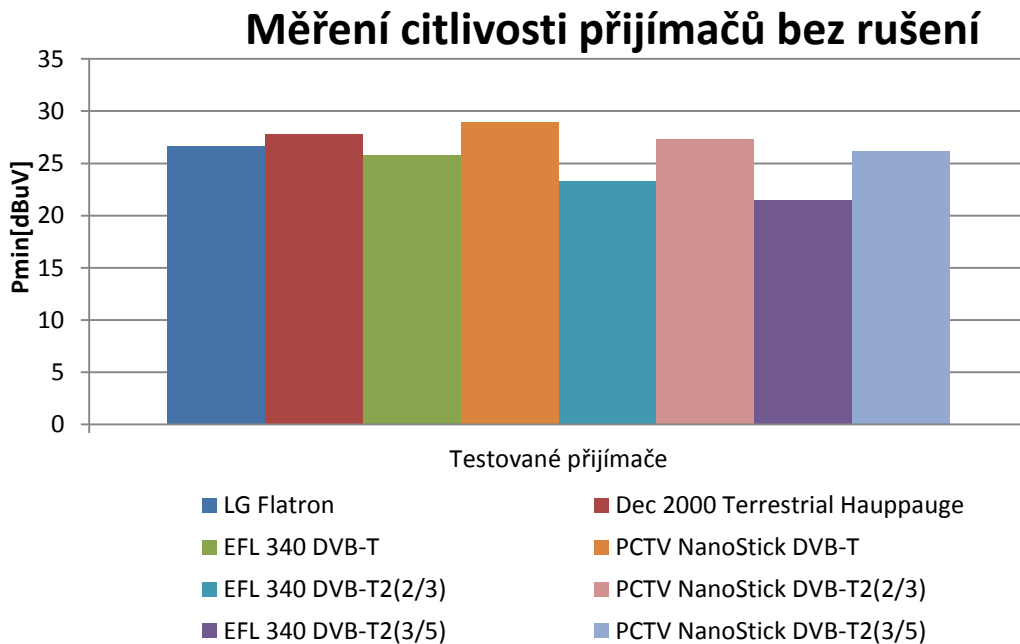


Obr. 13: Schéma zapojení měřicí sestavy

5.1. Minimální úroveň signálu na vstupu přijímačů

V prvním bodě měření jsem zkoumal citlivosti jednotlivých přijímačů bez rušení signálem v sousedním nebo dalším blízkém kanálu. Postupným snižováním úrovně testovaného signálu jsem zjistil minimální hodnoty výkonu, které zajistily příjem bez rozpadu obrazu. Minimální potřebné úrovně pro dosažení kvazibezchybného příjmu odpovídají dle [18] chybovosti BER přibližně 10^{-7} po LDPC dekodéru v případě T2 signálu, a menší než 2×10^{-4} před RS dekodérem v případě DVB-T signálu.

Hodnoty citlivosti udávané normou pro dané módy příslušných modulací jsou uvedeny v tabulkách 6 a 7.



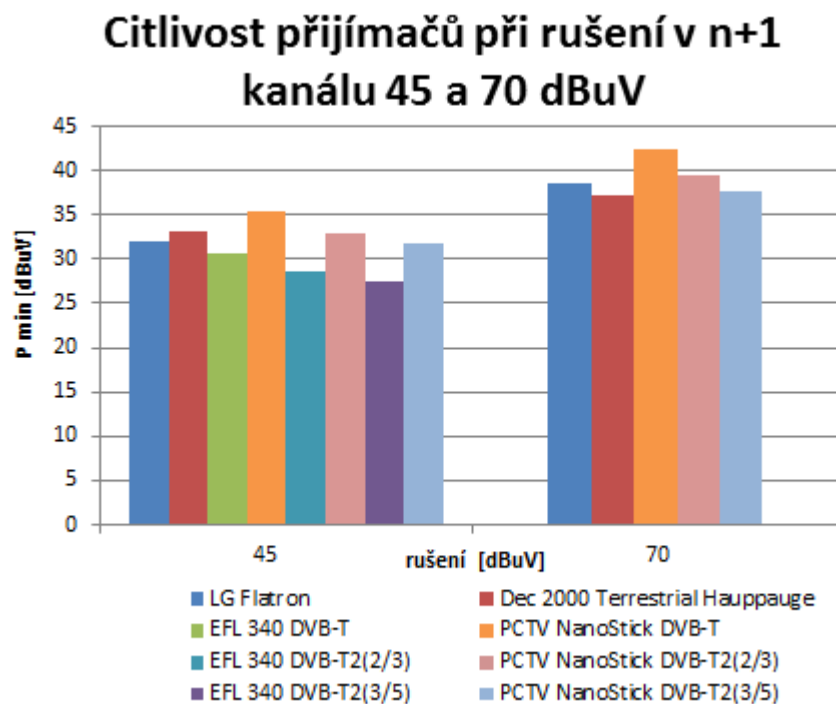
Obr. 14: Měření citlivosti přijímačů bez rušení

V obrázku 14 lze vidět, že všechny testované přijímače první generace splňují normu, byť USB klíčenka PCTV NanoStick DVB-T těsně. Přijímač EFL 340 DVB-T a LG Flatron splňuje normu s rezervou přibližně 3 dB, digitální STB Dec 2000 s rezervou 2 dB. Rozdíl mezi citlivostmi přijímačů první generace je až 3 dB. Požadavky normy kladené na přijímače druhé generace splňuje měřicí přístroj EFL 340 DVB-T pro oba módy robustnosti, zatímco USB klíčenka PCTV NanoStick DVB-T2 nikoliv. Rozdíl mezi přijímači v rámci generace je přibližně až 5 dB. Zajímavé je srovnání stejného přijímače v rámci různých generací při nastavení stejných parametrů. Testovaný přijímač EFL 340 v režimu DVB-T požaduje na vstupu pro bezchybný příjem 26,6 dB μ V, v režimu DVB-T2 při stejném nastavení parametrů o 2,5 dB méně. Stejný přijímač při zvýšení robustnosti z kódového poměru 2/3 na 3/5 požaduje na vstupu přijímače 21,5 dB μ V, což je zhruba při stejné datové rychlosti o 5 dB méně v porovnání s první generací. Provedu-li stejné porovnání pro přijímač PCTV NanoStick, zjistím, že naměřená citlivost při příjmu DVB-T odpovídá minimální hodnotě normy (29 dB μ V), v režimu DVB-T2 při ochranném poměru 2/3 27 dB μ V, při ochranném poměru 3/5 26 dB μ V.

Následným měřením jsem zjišťoval, jaký vliv na citlivost přijímače má přítomnost signálu v sousedním a dalším blízkém kanálu. Měření jsem provedl při dvou

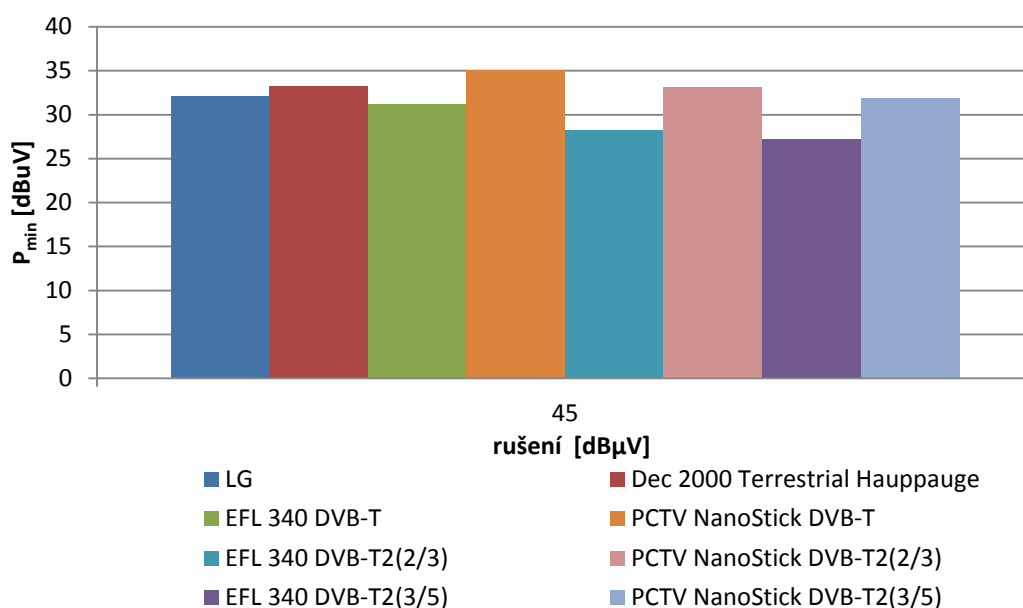
úrovních rušivého signálu (45 a 70 dB μ V) při rušení v sousedním (n+1) kanálu a při jedné úrovni (45 dB μ V) při rušení signálem v dalším blízkém (n+2) kanálu. Při silném rušivém signálu (70 dB μ V) v sousedním kanálu při zařazeném předzesilovači na měřicím přijímači EFL 340 nebyly hodnoty citlivostí zaznamenány z důvodu přebuzení vstupní části přijímače.

Obrázek 15 zobrazuje snížení citlivosti přijímačů vlivem rušivého signálu v sousedním kanálu a obrázek 16 zobrazuje vliv dalšího blízkého kanálu.



Obr. 15: Citlivost přijímačů při rušení signálem s úrovní 45 a 70 dB μ V v n+1 kanálu

Citlivost přijímačů při rušení v n+2 kanálu 45 dB μ V



Obr. 16: Citlivost přijímačů při rušení 45 dB μ V v n+2 kanálu

Výsledky měření ukazují, že přítomnost rušivého signálu (45 dB μ V) v sousedním kanálu snížila citlivost přibližně o 6 dB, tedy přibližně 4x. Rušivý signál o výkonu 70 dB μ V snižuje citlivost testovaných přijímačů o 10-13 dB. Co se týče dodržení minimálních citlivostí definovaných normou, tak těmto hodnotám se i za přítomnosti 45 dB μ V signálu v sousedním kanálu přibližuje pouze EFL 340 v módu DVB-T. Přítomnost rušivého signálu v kanále o 16 MHz vzdáleném při úrovni rušivého signálu 45 dB μ V má přibližně stejný vliv na citlivost jako v případě kanálu n+1 při stejné úrovni rušivého signálu.

V rámci testovaných přijímačů první generace je nejcitlivějším přijímačem EFL 340 DVB-T, který je v případě bez rušení sousedním kanálem o 3 dB citlivější oproti nejméně citlivému PCTV Nanostick DVB-T, v případě rušení sousedním signálem (45 dB μ V) dokonce o 5 dB. Tento přijímač obstál nejlépe i v režimu DVB-T2, kde nejnižší hodnoty citlivosti vykazoval při zvýšené robustnosti (3/5), tedy sníženém datovém toku, a to až o 5 dB v porovnání s USB klíčenkou PCTV Nanostick DVB-T2 (3/5). Srovnám-li stejný přijímač v rámci generací, zjistím, že měřicí přijímač EFL 340 v režimu DVB-T požaduje na vstupu pro bezchybný příjem 26,6 dB μ V, v režimu DVB-T2 při stejném nastavení parametrů o 2,5 dB méně. Stejný přijímač při zvýšení

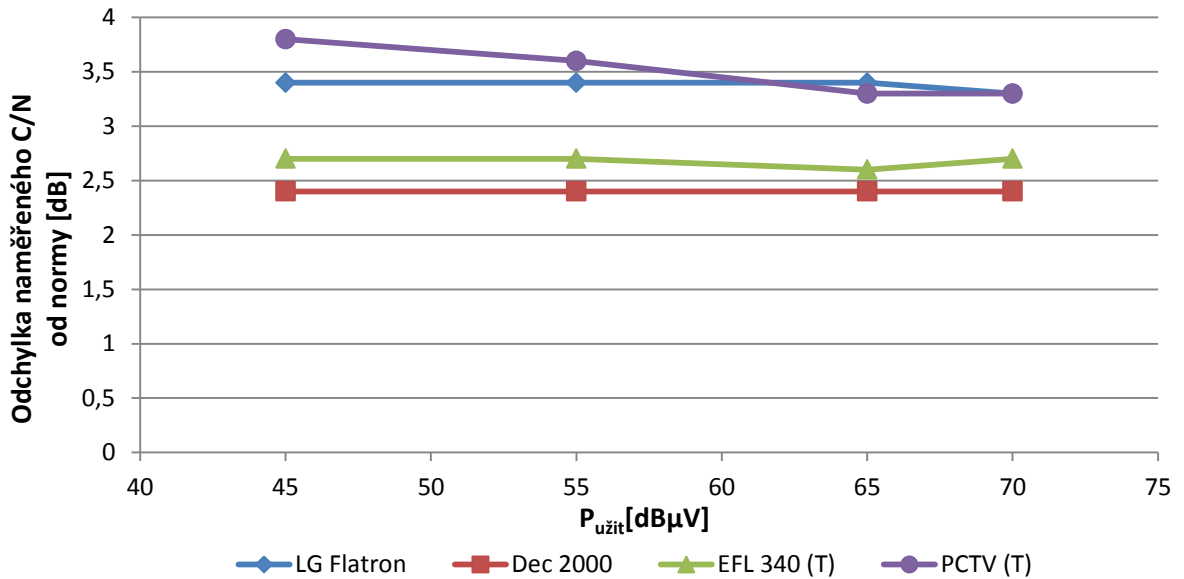
robustnosti z kódového poměru 2/3 na 3/5 požaduje na vstupu přijímače 21,5 dB μ V, což je zhruba při stejné datové rychlosti o 5 dB méně v porovnání s první generací.

5.2. Měření odstupu signálu od šumu

V této části jsem proměřil poměr výkonů nosného signálu k šumu potřebného pro příjem bez chyb v obraze v závislosti na změně úrovně rušivého signálu. Stejně jako v předchozí kapitole jsem začal měřením parametru bez rušení signálem v sousedním či dalším blízkém kanálu, posléze při přítomnosti signálu v sousedním (n+1) a dalším blízkém (n+2) kanálu.

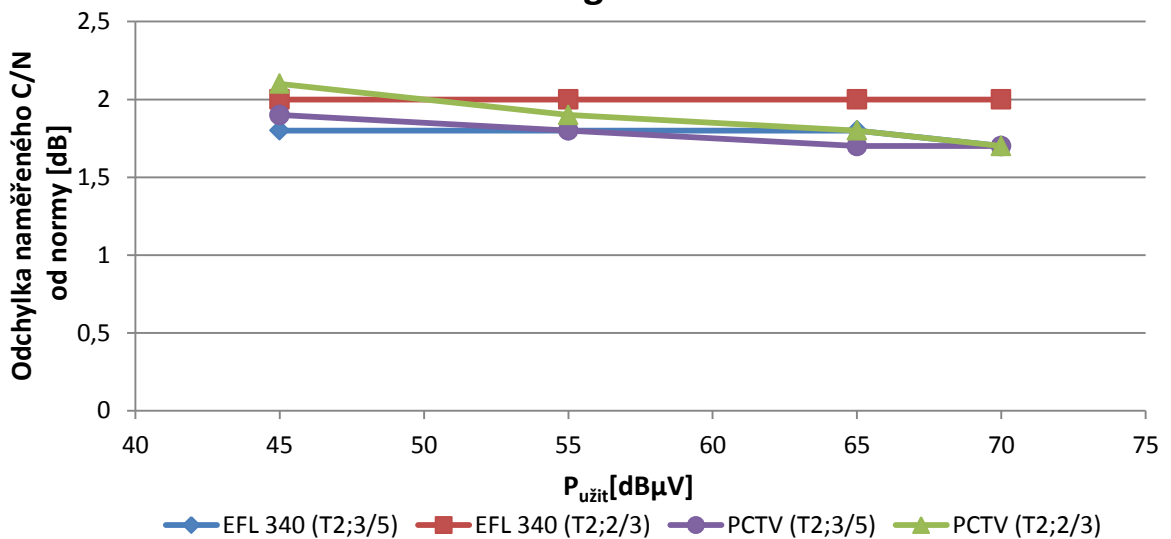
Při měření bez rušení jsem postupně snižoval rozdíl výkonových úrovní testovacího signálu a šumového prahu v rámci šířky kanálu na minimální hraniční hodnotu C/N, při které nedocházelo k rozpadu obrazu, a to pro různé hodnoty výkonu užitečného signálu. Naměřené hodnoty jsem následně porovnal s minimálními odstupy C/N definovanými normami (tabulky 5,7) a vynesl je jako difference do grafů v závislosti na změně výkonu užitečného signálu.

Naměřené C/N bez rušení kanálu na přijímačích první generace



Obr. 17: Naměřené C/N bez rušení kanálu na přijímačích první generace

Naměřené C/N bez rušení kanálu na přijímačích druhé generace

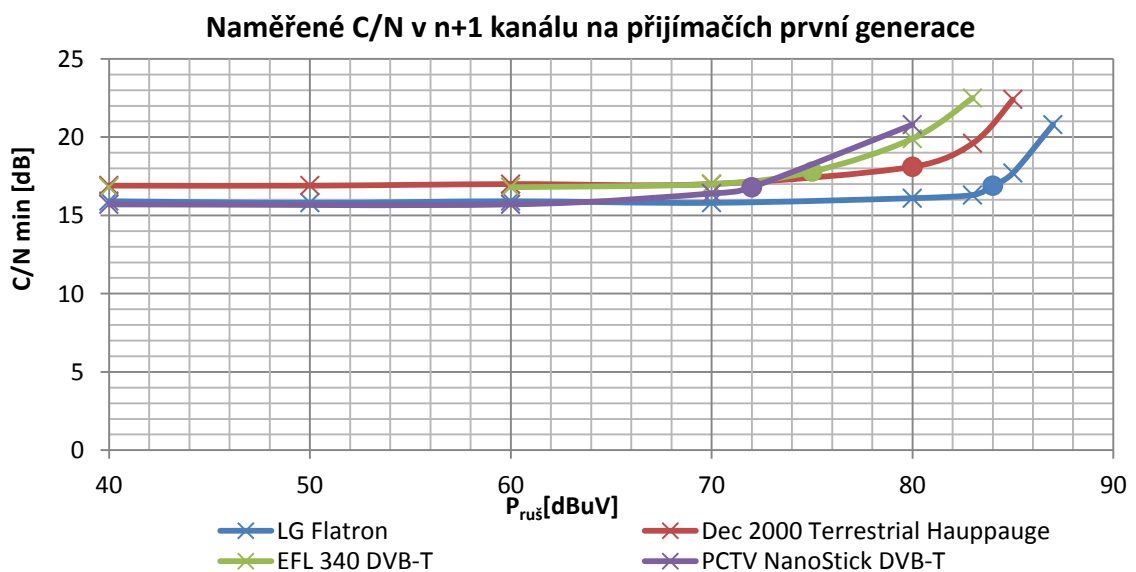


Obr. 18: Naměřené C/N bez rušení kanálu na přijímačích druhé generace

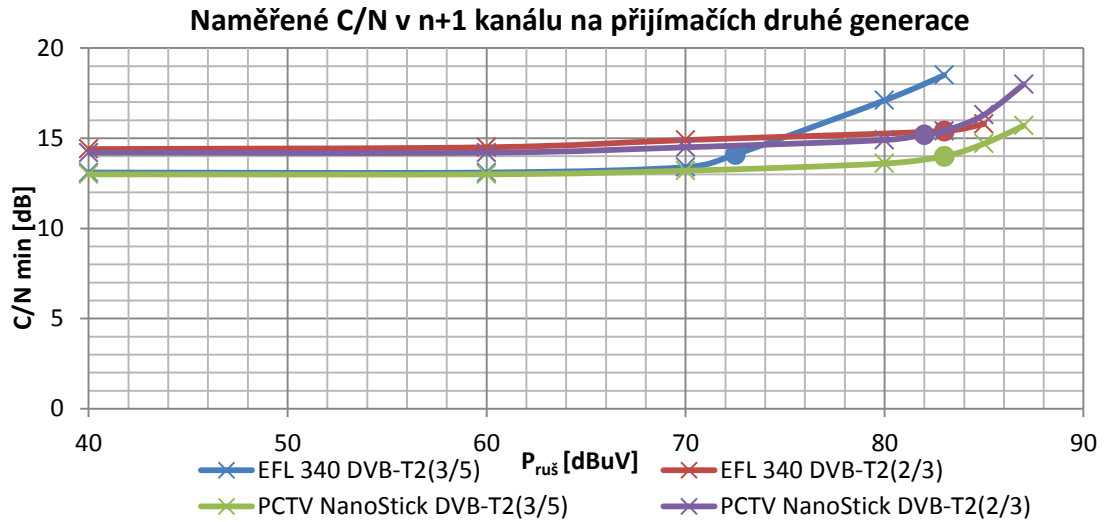
Grafům lze rozumět tak, že body vynesené v kladné polorovině splňují požadavek normy, případné záporné body nikoliv. Pak je tedy zřejmé, že v případě testovacího signálu bez rušení z okolních kanálů všechny testované přijímače bezpečně splnily minimální požadované odstupy C/N pro testované hodnoty výkonu užitečného signálu 45 až 70 dB μ V. Označení T/T2 značí generaci přijímače, označení 2/3, 3/5 kódové poměry.

Z testovaných přijímačů první generace nejnižší hodnoty C/N až do výkonu užitečného signálu 55 dB μ V dosahuje přijímač PCTV(T), který má oproti normě rezervu více než 3,5 dB. Při výkonu užitečného signálu 65 dB μ V a více nejmenší odstupy signál/šum vykazuje rovněž PCTV(T) a televize LG Flatron. Všechny testované přijímače podporující standard DVB-T2 vykazují rezervu okolo 2 dB oproti normě, a to i bez ohledu na změnu kódového poměru.

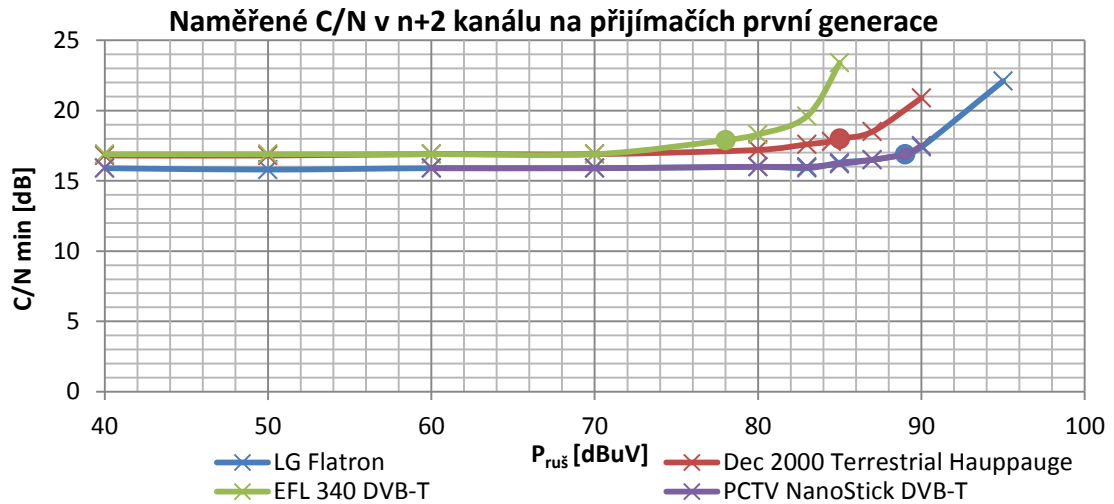
Jak jsem uvedl v kapitole týkající se televizních rozvodů, doporučená úroveň užitečného signálu na účastnických zásuvkách se pohybuje v rozmezí 45-70 dB μ V. Při měření za přítomnosti rušivého signálu byla pevně nastavena hodnota na generátoru užitečného signálu o útlum slučovače vyšší, aby na vstupech přijímačů bylo dosaženo právě oněch hraničních hodnot, tj. v jednom měření 45 dB μ V a v dalším následně 70 dB μ V. S postupným zvyšováním úrovně rušivého signálu jsem zaznamenával minimální hodnoty odstupu C/N potřebné pro příjem bez chyb v obraze.



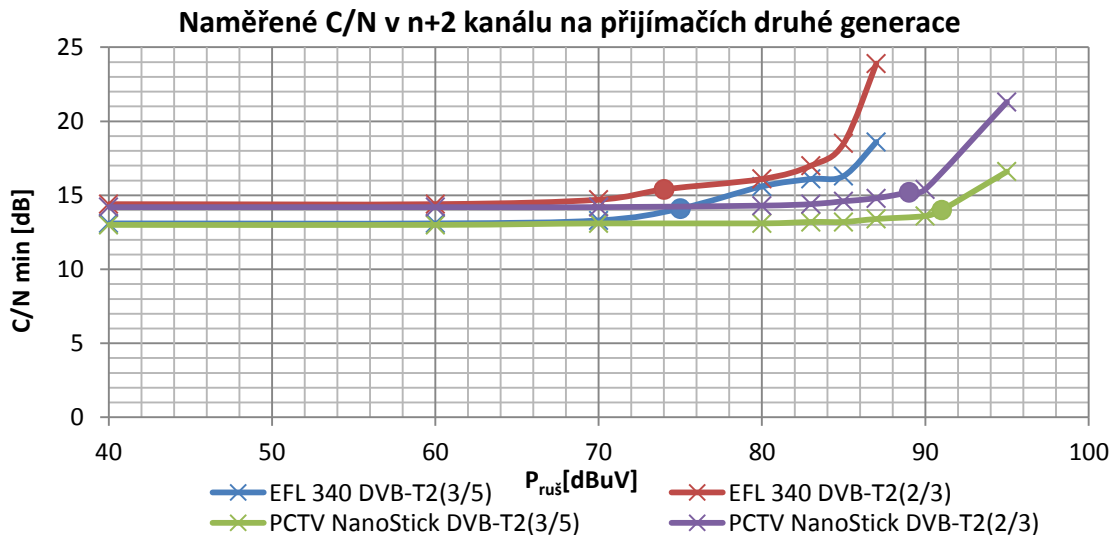
Obr. 19: Naměřené C/N v n+1 kanálu na přijímačích první generace, výkon užitečného signálu 45 dB μ V



Obr. 20: Naměřené C/N v n+1 kanálu na přijímačích druhé generace, výkon užitečného signálu 45 dB μ V



Obr. 21: Naměřené C/N v n+2 kanálu na přijímačích první generace, výkon užitečného signálu 45 dB μ V



Obr. 22: Naměřené C/N v n+2 kanálu na přijímačích druhé generace, výkon užitečného signálu 45 dB μ V

Obrázky 19-22 zobrazují zhoršení odstupu C/N vlivem rušení v sousedním a dalším blízkém kanálu při úrovni užitečného signálu 45 dB μ V. Z naměřených dat vyhodnocuji na vybraných přijímačích, jak moc rozdílné úrovně signálů dokáží zpracovat. Stanovuji hodnoty rušivého signálu, resp. odstupy I/C, při kterých dojde ke zvýšení potřebného odstupu signál/šum o 1 dB. Tyto hodnoty jsou v grafu znázorněny puntíkem. Definované maximální hodnoty I/C uvedené v [14][15], tedy maximální rozdíly výkonu rušivého a užitečného signálu pro zajištění QEF příjmu v případě n+1 kanálu, odpovídají 25 dB v případě DVB-T a 28 dB v případě DVB-T2. Pro ostatní kanály, kromě zrcadlových, definovaná hodnota I/C odpovídá 40 dB v případě DVB-T a 38 dB v případě DVB-T2.

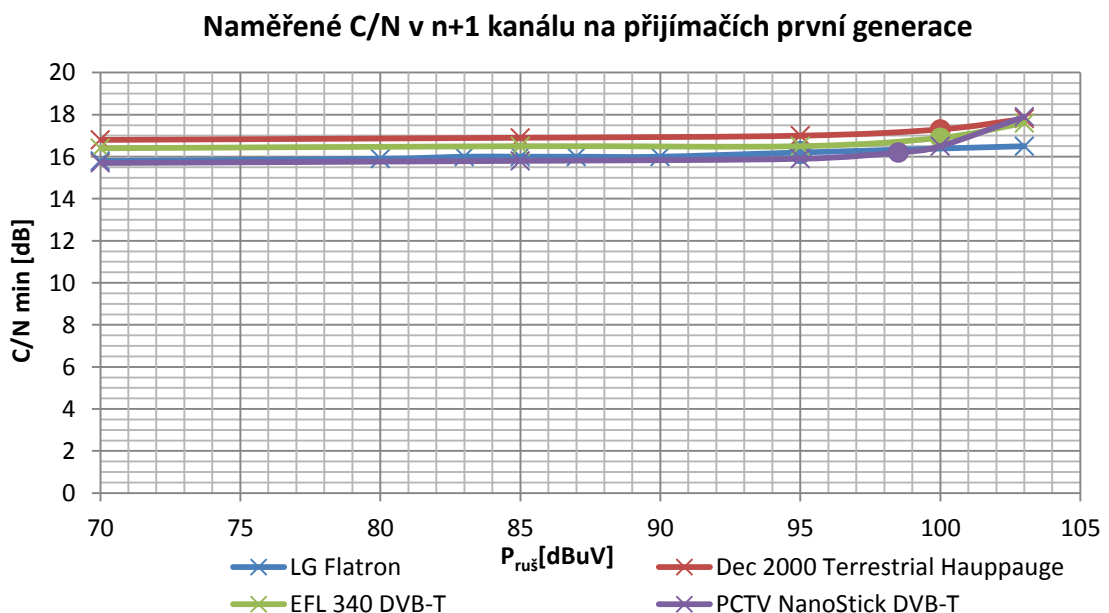
V rámci přijímačů první generace a rušení v n+1 kanálu vykazuje přijímač LG Flatron 1dB změnu C/N při o 39 dB silnějším rušivém signálu, tj. 84 dB μ V. Digitální STB Dec 2000 při 80 dB μ V (I/C = 35 dB), EFL 340 DVB-T při 75 dB μ V (I/C = 30 dB) a PCTV Nanostick DVB-T dosáhne decibelové změny odstupu C/N při 72 dB μ V (I/C = 27 dB). Provedené měření na stejných přijímačích ukázalo, že při rušení n+2 kanálem, dosahuje LG Flatron a PCTV NanoStick decibelové změny odstupu C/N při rušení o 44 dB silnějším signálem (tj. 89 dB μ V), zatímco DEC 2000 při 40dB silnějším rušivém signálu (85 dB μ V). Měřicí přijímač EFL 340 DVB-T dosahuje 1dB změny odstupu signál/šum při úrovni rušivého signálu 78 dB μ V (I/C = 33 dB).

Druhá generace testovaných terestrických přijímačů za přítomnosti signálu v sousedním kanálu v případě měřicího přijímače EFL 340 DVB-T2 (2/3) a PCTV NanoStick DVB-T2 (3/5) dosahuje kritické hodnoty při 83 dB μ V (I/C = 38 dB) rušivého signálu. PCTV NanoStick (2/3) při 82 dB μ V (I/C = 37 dB) a EFL 340 DVB-T2 (3/5) při rozdílu 28 dB mezi užitečným signálem a rušením (tj. rušivý signál 73 dB μ V). USB PCTV NanoStick DVB-T2 (3/5) při rušení n+2 kanálem dosahuje navýšení poměru C/N o 1 dB při 91 dB μ V rušivého signálu (tj. I/C 46 dB), změnou kódového poměru na 2/3 při 89 dB μ V (I/C = 44 dB). Měřicí přijímač EFL 340 DVB-T2 (3/5) dosahuje kritické hodnoty při odstupu I/C 30 dB (tedy 75 dB μ V). Za snížené robustnosti na 2/3 je 1dB změny C/N dosaženo při hodnotě I/C 29 dB, tedy 74 dB μ V rušivého signálu.

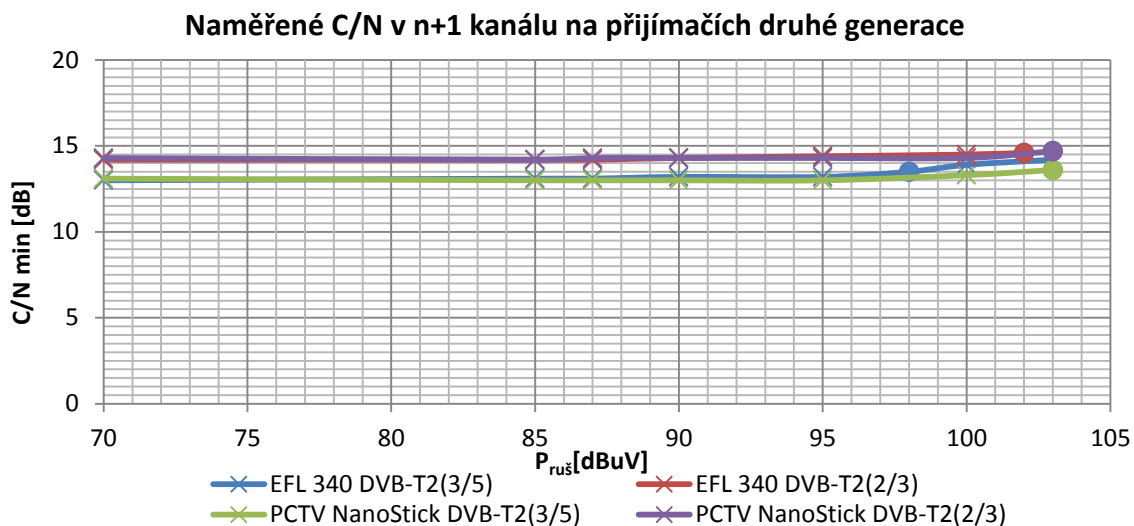
Z hlediska selektivity referenční úroveň BER, resp. odpovídající odstupy C/N, splňují všechny přijímače první generace, LG Flatron a Dec 2000 dokonce i při více

než 10 dB vyšším rozdílu úrovně signálů v sousedních kanálech než definuje norma. Normou udanou hodnotu I/C pro ostatní kanály, resp. n+2 kanál, splňuje přijímač PCTV NanoStick, LG Flatron a přijímač DEC 2000, zatímco EFL 340 DVB-T nikoliv. Co se týče přijímačů druhé generace, požadavky na selektivitu, resp. poměr I/C v sousedních a blízkých kanálech, splňují všechny testované přijímače kromě EFL 340(T2), který při ponechání jednoho volného kanálu mezi užitečným a rušivým signálem požadavkům nevyhovuje. Snížením poměru I/C nemusí dojít k vizuální degradaci příjmu, ale každopádně dojde ke snížení rezervy pro případné rušení a zvýšení chybovosti BER.

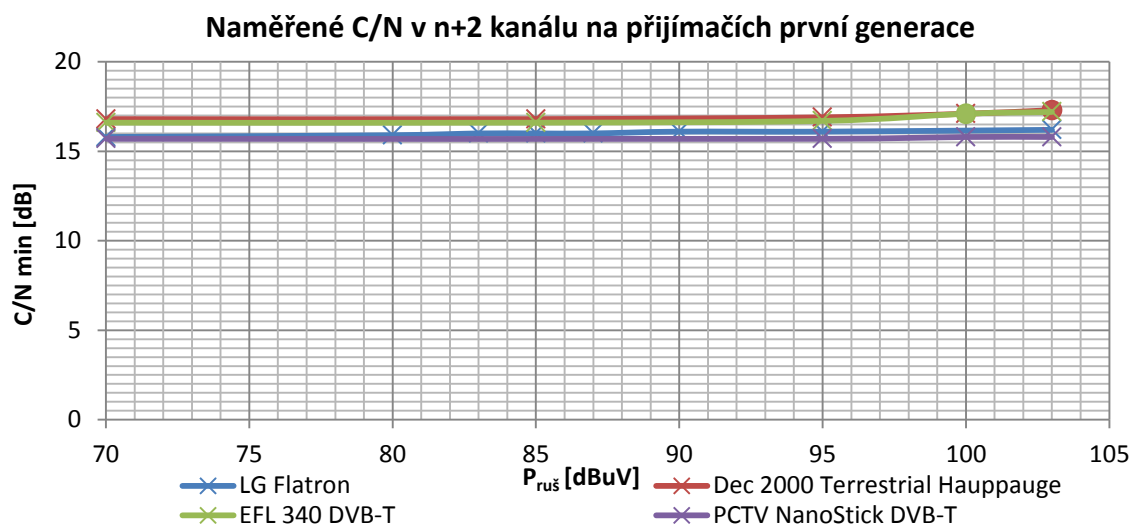
Při silném užitečném signálu (70 dB μ V) nemá úroveň rušivého signálu (do testované hodnoty 103 dB μ V) na užitečný téměř žádný vliv. Maximální hodnota rušivého signálu byla zvolena z důvodu limitace výstupního výkonu generátoru a odpovídá i reálným možnostem, které mohou nastat v případě použití zesilovače s velkým ziskem. Ačkoliv maximální výkon rušícího signálu je téměř o 35 dB větší ve srovnání s výkonem užitečného signálu, poměr C/N se změní v řádu desetin dB. Z tohoto důvodu byly hledány kritické hodnoty rušivého signálu, resp. odpovídající odstupy I/C, při kterých dojde ke změně C/N o 0,5 dB. Obrázek 23-26 zobrazuje naměřené odstupy signál/šum při užitečném signálu 70 dB μ V v závislosti na zvyšujícím se výkonu rušivého signálu.



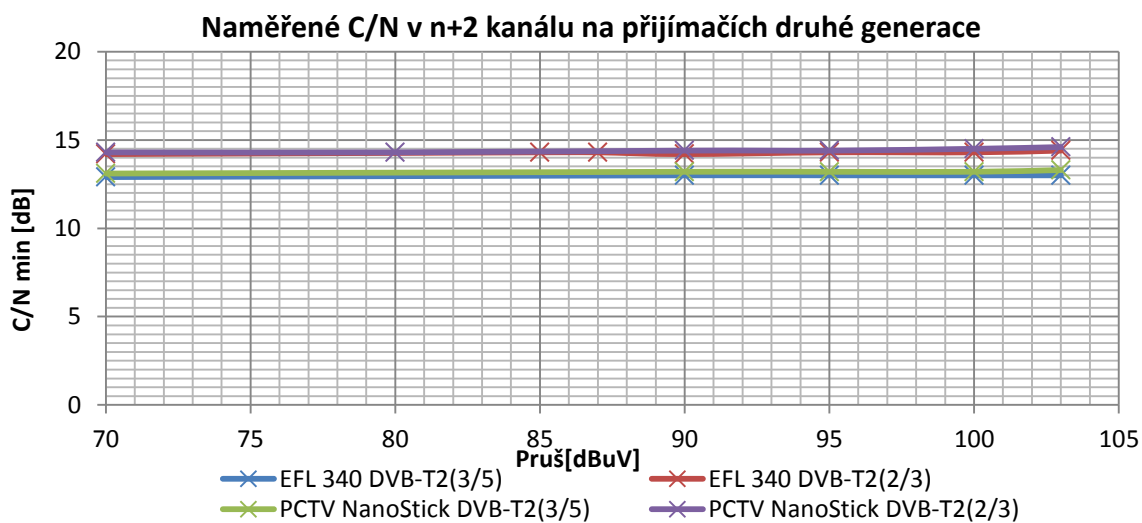
Obr. 23: Naměřené C/N v n+1 kanálu na přijímačích první generace, výkon užitečného signálu 70 dB μ V



Obr. 24: Naměřené C/N v n+1 kanálu na přijímačích druhé generace, výkon užitečného signálu 70 dB μ V



Obr. 25: Naměřené C/N v n+2 kanálu na přijímačích první generace, výkon užitečného signálu 70 dB μ V



Obr. 26: Naměřené C/N v n+2 kanálu na přijímačích druhé generace, výkon užitečného signálu 70 dB μ V

Vzájemným srovnáním přijímačů v rámci první generace zjistíme, že v případě televize LG Flatron je půl decibelové změny C/N dosaženo za přítomnosti rušivého signálu 95 dB μ V (tj. I/C 25 dB) v sousedním kanálu, u ostatních testovaných přijímačů první generace při až o 5 dB silnějším nežádoucím signálu (I/C = 30 dB). V případě ponechání jednoho volného kanálu mezi užitečným a rušivým signálem se při hodnotě rušivého signálu 100 dB μ V (I/C = 30 dB) zvýšil odstup signál/šum o 0,5 dB u přijímače EFL 340, při 103 dB μ V (I/C = 33 dB) u přijímače DEC 2000, u ostatních přijímačů půl decibelová změna nenastala. Na druhé generaci terestrických přijímačů je názorně vidět, že při zvýšené robustnosti signálu je bezchybný příjem zajištěn při nižším odstupě signál/šum. Při rušení sousedním kanálem přijímač EFL 340 (T2,3/5) vykazuje 0,5dB zvýšení C/N při úrovni rušivého signálu 98 dB μ V (tj. I/C 28 dB), změnou kódového poměru na 2/3 při o 4 dB silnějším rušivém signálu (I/C = 32 dB). PCTV NanoStick DVB-T2 při nižším i vyšším nastavení robustnosti dosahuje o 0,5 dB vyšší poměr C/N při maximální měřené hodnotě rušivého signálu (103 dB μ V), což odpovídá I/C 33 dB. Situace v n+2 kanálu ukazuje, že všechny testované přijímače podporující standard DVB-T2 nedosahují ani půl decibelové změny C/N i při úrovni rušivého signálu 103 dB μ V.

Všechny testované přijímače, i při maximálním rozdílu mezi užitečným a nežádoucím signálem (33 dB), splňují požadavky kladené na selektivitu v sousedním (n+1) kanálu. Norma pro n+2 kanál nemohla být ověřena z důvodu menšího rozdílu I/C (33 dB), než který sama definuje (38 dB resp. 40 dB).

5.3. Možná opatření pro snížení vlivu sousedních kanálů

Při příjmu signálů s rozdílnými výkonovými úrovněmi v sousedních kanálech může při nesprávné realizaci televizních rozvodů dojít k zamezení příjmu. Jistým řešením je použití kanálových zesilovačů, případně pasivních propustí, nelze ovšem vyselektovat jen a pouze požadovaný kanál bez pronikání sousedních signálů. Efektivním řešením je použití kmitočtových konvertorů, které umožňují převést přijímaný kanál na zvolený jiný kanál, čímž lze bez problému přijímat sousední kanály. Z finančního hlediska je zmíněné řešení nákladné.

Dalším možným řešením je použití dvou antén a následné sloučení signálů. Z analýzy geografického rozložení vysílačů a směrového diagramu antény lze vhodným nasměrováním antény dosáhnout toho, že při bočním příjmu bude signál od požadovaného kanálu daného vysílače dostatečný a nežádoucí kanál bude potlačen.

V neposlední řadě, jak ukázala měření, je i správná volba přijímače důležitá. Příjem sousedních kanálů je vždy otázkou individuální realizace a příjmových podmínek dané lokality. Uvedené možnosti vedoucí ke snížení vlivu sousedních kanálů uvádím pouze rámcově a rád bych je detailněji zkoumal v navazující diplomové práci.

6. Závěr

Úvodní část bakalářské práce je věnována stručnému popisu technologií digitálního pozemního vysílání první a druhé generace DVB-T/T2. V této teoretické části jsem se zabýval nejen vlastnostmi digitálního televizního signálu, jeho zabezpečením proti vlivu rušení v přenosovém kanálu a modulací, ale i jednotlivými funkčními bloky přijímačů. V následující kapitole jsou uvedeny požadavky kladené na přijímače stanovené příslušnými evropskými normami, kde jsou kromě definovaných citlivostí a odstupů C/N pro jednotlivé modulační schémata definovány hodnoty I/C. Hodnoty I/C pro rušivé signály odpovídají 25 dB (DVB-T) a 28 dB (DVB-T2) pro sousední kanály. Pro ostatní kanály vyjma zrcadlových odpovídají hodnotám 40 dB (DVB-T) a 38 dB (DVB-T2). Spolu s požadavky kladenými na přijímače jsem se věnoval i dalším nezbytným součástem přenosového řetězce jako je anténa a samotné televizní rozvody.

Dále řeším, jaký vliv má zařazení zesilovače do obvodu. Určoval jsem minimální úroveň přijímaného signálu v závislosti na konfiguraci zapojení. Ukázalo se, že nejhorším možným řešením je zapojit zesilovač co nejbližší k přijímači. Dochází totiž k deformaci signálu v předchozím útlumovém článku simulující útlum vedení. Pominu-li zapojení bez útlumového článku a zesilovače, které vykazuje minimální potřebnou úroveň přijímaného signálu, je nejlepším řešením zařazení zesilovače co nejbližší k anténě.

V dalším bloku praktické části jsem zpracoval seznam pražských vysílačů spolu s podrobnými údaji o každém z nich. Následně byly ověřeny příjmové podmínky pro

dvě různě polarizované antény umístěné na střeše budovy ČVUT v Dejvicích. Z naměřených hodnot si lze nejen vytvořit představu o dominantních vysílačích pro uvedenou lokalitu, ale hlavně o výkonových rozdílech mezi sousedními kanály nebo minimálním a maximálním výkonu naměřeném na různých signálech přijatých anténou. Minimální naměřená úroveň přijímaného signálu na log-per. anténě při uvažování horizontálně vysílajících vysílačů odpovídá příjmu 57. kanálu z vysílače Malešice (35,6 dB μ V) a 51. kanálu (32,8 dB μ V) v případě vertikálně polarizovaných vysílačů. Maximální úroveň naměřená na horizontálně orientované log-per. anténě odpovídá příjmu 46. kanálu (64,7 dB μ V), což v porovnání s absolutně nejnižší úrovní naměřené na anténě odpovídá rozdílu 31,9 dB. Na vertikálně polarizované anténě Diamond D130 byl změřen nejmenší přijímaný výkon na 47. kanálu z vertikálně polarizovaného vysílače Praha město (42,3 dB μ V), z horizontálně vysílajících vysílačů na 57. kanálu (25,9 dB μ V) vysílače Malešice. Nejsilnější signál naměřený na anténě Diamond D130 odpovídá příjmu 37. kanálu (62,7 dB μ V), tedy o 36,8 dB více v porovnání s nejnižší naměřenou úrovní (57. kanál). Největší naměřený rozdíl mezi sousedícími kanály bez ohledu na anténu činí 18,5 dB, mezi ostatními kanály 36,8 dB. Naměřené rozdíly nepřevyšují normou definované maximální hodnoty I/C.

Další, řekl bych spíše experimentální částí, byla snaha přiblížit se výpočtem naměřeným minimálním a maximálním výkonům signálů, resp. zjistit o kolik se bude lišit výpočet od měření. Při výpočtu jsem použil Friisův vztah vycházející z radiokomunikační rovnice. Výpočet je pouze přibližný, protože je omezen několika zjednodušeními. Ve výpočtu jsem uvažoval jen vysílače s přímou viditelností. Při dodržení polarizace antény s polarizací vysílače jsem dostal výsledky blízké naměřeným. Při vertikální polarizaci vysílače i přijímací antény se rozdíl výpočtu a skutečné naměřené hodnoty lišil o přibližně 5 dB, pouze u vysílače Olšanská o 12 dB. Při horizontální konfiguraci jsou rozdíly podobné (rovněž cca do 5 dB) a na 46. a 57. kanálu jsou vyšší (okolo 15 dB). Zde se lze zabývat určením příjmu stejného kanálu od více vysílačů v síti SFN, konkrétně 46. kanálu, což z nižšího rozdílu naměřené vypočtené hodnoty odpovídá vysílači Strahov. Rozdíl maximálního a minimálního vypočteného výkonu na log-per. anténě je 33 dB, na vertikálně polarizované anténě Diamond D130 28 dB. Chci zdůraznit, že tento výpočetní model je

spíše ilustrativní a rád bych ho detailněji zpracoval v diplomové práci, zejména v oblasti mnohocestného šíření a z toho plynoucích úniků.

V další kapitole jsem se zabýval měřením citlivosti a potřebného poměru výkonů signál/šum za přítomnosti rušivého signálu v sousedním a dalším blízkém kanálu. Laboratorní měření byla provedena v simulovaném Gaussově kanálu. Zkoumal jsem rušení jak sousedních, tak dalších vedlejších kanálů na čtyřech přijímačích první generace (televizor LG s integrovaným DVB-T tunerem, Set-top box Dec 2000 Terrestrial, měřicí přístroj R&S EFL 340 a USB klíčenka PCTV NanoStick). Poslední dva uvedené přijímače byly proměřeny i ve standardu DVB-T2. Nejdříve jsem ověřil citlivosti testovaných přijímačů, zda splňují normou definované hodnoty. Všechny proměřované přijímače první generace splnily normou definované citlivosti, zatímco z testovaných přijímačů druhé generace normu splnil pouze R&S EFL 340 při obou testovaných módech robustnosti. Výsledky měření umožnily srovnání stejného přijímače v rámci obou generací při nastavení stejných parametrů, resp. podobných datových rychlostí. Testovaný přijímač EFL 340 v režimu DVB-T požaduje na vstupu pro bezchybný příjem 26,6 dB μ V, v režimu DVB-T2 při stejném nastavení parametrů o 2,5 dB méně. Stejný přijímač při zvýšení robustnosti z kódového poměru 2/3 na 3/5 požaduje na vstupu přijímače 21,5 dB μ V, což je zhruba při stejné datové rychlosti o 5 dB méně v porovnání s první generací. Porovná-li přijímač PCTV NanoStick v rámci generací, zjistím, že naměřená citlivost při příjmu DVB-T odpovídá 29 dB μ V, v režimu DVB-T2 při ochranném poměru 2/3 27 dB μ V, při ochranném poměru 3/5 ještě o decibel méně, tedy 26 dB μ V.

Následně jsem sledoval, jaký vliv na citlivost má přítomnost signálu v sousedním a dalším blízkém kanálu. Přítomnost rušivého signálu 45 dB μ V v sousedním kanálu snížila citlivost řádově o 6 dB, při úrovni rušivého signálu 70 dB μ V došlo ke snížení citlivosti řádově o 10-13 dB. Přítomnost nežádoucího signálu v n+2 kanálu při úrovni rušivého signálu 45 dB μ V má přibližně stejný vliv na citlivost jako v případě kanálu n+1 při stejné úrovni rušivého signálu.

V další části práce jsem proměřil potřebný poměr výkonů nosného signálu k šumu (C/N) bez rušení i v případě rušení n+1 a n+2 kanály. Všechny přijímače bez rušení sousedních kanálů bezpečně splňují minimální odstupy C/N dané normou.

Dále byly proměřeny poměry C/N při úrovni užitečného signálu 45 a 70 dB μ V v závislosti na změně úrovně rušivého signálu. Z naměřených dat jsem vyhodnotil kritické hodnoty rušivého signálu, při kterých došlo ke změně C/N o 1 dB v případě užitečného signálu 45 dB μ V a o 0,5 dB v případě užitečného signálu 70 dB μ V. Následně jsem stanovil hodnoty poměru výkonů rušivého signálu k užitečnému (I/C) pro jednotlivé testované přijímače a sledoval jejich dodržení z hlediska normy.

Při rušení užitečného signálu o výkonu 45 dB μ V sousedním kanálem přijímač první generace LG Flatron vykazuje 1dB změnu C/N při o 39 dB silnějším rušivém signálu (84 dB μ V), přijímač Dec 2000 při o 35 dB silnějším rušivém signálu (80 dB μ V) a EFL 340 DVB-T při rozdílu rušivého a užitečného signálu 30 dB (75 dB μ V). PCTV NanosStick DVB-T vykazuje 1dB změnu C/N při o 27 dB silnějším rušivém signálu (72 dB μ V). Rozdíl mezi nejméně a nejvíce odolným přijímačem činí 12 dB (27 dB vs. 39 dB). Při rušení n+2 kanálem dosahuje LG Flatron a PCTV NanoStick decibelové změny odstupu C/N při hodnotě I/C 44 dB (89 dB μ V), zatímco DEC 2000 při 40dB silnějším rušivém signálu (85 dB μ V). Měřicí přijímač EFL 340 DVB-T dosahuje 1dB změny odstupu signál/šum při o 33 dB silnějším rušivém signálu (78 dB μ V). Rozdíl mezi nejméně a nejvíce odolným přijímačem činí 11 dB (33 dB vs. 44 dB).

Druhá generace přijímačů za přítomnosti signálu v sousedním kanálu v případě EFL 340 DVB-T2 (2/3) a PCTV NanoStick DVB-T2 (3/5) dosahuje kritické hodnoty při o 38 dB silnějším rušivém signálu (83 dB μ V), PCTV NanoStick (2/3) při 37dB rozdílu užitečného a rušivého signálu (82 dB μ V) a EFL 340 DVB-T2 (3/5) při rozdílu 28 dB (tedy 73 dB μ V), tj. rozdíl až 10 dB. Při rušení n+2 kanálem přijímač EFL 340 DVB-T2 v obou módech robustnosti vykazuje změnu C/N o 1 dB při hodnotě I/C přibližně 30 dB (cca 75 dB μ V), PCTV NanoStick DVB-T2 při hodnotě I/C přibližně 45 dB (cca 90 dB μ V), tj. rozdíl 15 dB.

Porovná-li stanovené odstupy I/C s normou definovanými hodnotami, zjistím, že LG Flatron a Dec 2000 je splňuje dokonce s více než 10dB vyšším rozdílem úrovně signálů v sousedních kanálech. Normou udanou hodnotu I/C pro ostatní kanály, resp. n+2 kanál, splňují všechny přijímače kromě EFL 340 DVB-T. Všechny testované přijímače druhé generace splňují normu pro sousední i ostatní kanály, jen přijímač EFL 340 DVB-T2 pro oba módy robustnosti při rušení n+2 kanálem normu nespĺňuje.

Při silném rušivém signálu (70 dB μ V) byly hledány kritické hodnoty rušivého signálu odpovídající změně C/N o 0,5 dB. Všechny testované přijímače první i druhé generace při rušení n+1 kanálem dosahují půl decibelové změny C/N při odstupech I/C rovných nebo větších než definuje norma.

V případě ponechání jednoho volného kanálu mezi užitečným a rušivým signálem nastala 0,5dB změna C/N pouze u přijímače EFL 340 DVB-T a to při o 30 dB silnějším rušivém signálu (100 dB μ V) a u přijímače DEC 2000 při odstupu I/C 33 dB (103 dB μ V). U ostatních přijímačů půl decibelová změna C/N nenastala.

Provedu-li závěrečné porovnání výsledků měření a hodnot I/C uvedených v normě, zjistím, že v případě rušení n+1 kanálem všechny testované přijímače bez ohledu na generaci normu splňují. V případě rušení n+2 kanálem všechny testované přijímače rovněž hodnotu I/C splňují, jen EFL 340 při užitečném signálu 45 dB μ V definovanou hodnotu I/C nesplňuje, a to v rámci obou generací. Při užitečném signálu 70 dB μ V nemohla být norma pro n+2 kanál ověřena z důvodu menšího rozdílu I/C (33 dB), než který sama definuje (38 dB resp. 40 dB).

V poslední kapitole okrajově zmiňuji případné možnosti pro snížení vlivu sousedních kanálů.

Řešenou problematiku bych rád dále rozšířil v diplomové práci, kde bych provedl měření nejen pro Gaussův kanál, ale i pro skutečný příjem na anténě (fixed a portable příjem). Jistě by bylo zajímavé se nadále zabývat výpočetním modelem, který by mohl široké veřejnosti pomoci s vytvořením představy o příjmových podmínkách v dané lokalitě. Hlavní část navazující diplomové práce bych však rád věnoval případným opatřením pro snížení vlivu sousedních a blízkých kanálů.

Použitá literatura

- [1] LEGÍŇ, M., *Televizní technika DVB-T*, 1. vydání, Praha, BEN - technická literatura, 2006, 286 s. ISBN 80-7300-204-3.
- [2] KUBA, P., VÍT, V., *Televizní technika: Studiové zpracování televizního signálu*, 1. vydání, Praha, BEN - technická literatura, 2000, 223 s. ISBN 80-86056-88-0.
- [3] GREGORA, P., *Televizní technika: Zařízení pro přenos a vysílání televizního signálu*, 1. vydání, Praha, BEN - technická literatura, 2000, 175 s. ISBN 80-86056-89-9.
- [4] DVB-T, ETSI EN 300 744 V1.6.1, Digital Video Broadcasting (DVB), *Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television*, 2009.
- [5] ETSI TS 102 831 V1.2.1, Digital Video Broadcasting (DVB), *Implementation guidelines for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2)*, 2012.
- [6] ETSI EN 302 755 V1.1.1, Digital Video Broadcasting (DVB), *Framing structure, channel coding and modulation for a second generation digital terrestrial broadcasting system (DVB-T2)*, 2010.
- [7] DVB-T2, DVB Fact Sheet, *2nd Generation Terrestrial, The World's Most Advanced Digital Terrestrial TV System 2015* [on-line], citace 2. 5. 2015, dostupné na: https://www.dvb.org/resources/public/factsheets/dvb-t2_factsheet.pdf.
- [8] PEREZ- CALDERÓN, D., ORIA, C., GARCÍA, J., LOPÉZ, P., BAENA, V., LACADENA, I., *Rotated Constellation for DVB-T2*, Sevilla: Electronic Engineering Department, University of Seville, 2010.
- [9] POSPÍCHAL, M., *Digitální pozemní televizní vysílání DVB-T/H a DVB-T2*: diplomová práce, Brno: FEKT VUT v Brně, 2011.
- [10] MACOUN, J., *Antény a příjem digitální televize (DVB-T)* [on-line], citace 6. 12. 2014, dostupné na: www.anteny-info.cz.
- [11] DEUTSCHE TV PLATFORM, *Minimum requirements for DVB-T receiving antennas for portable indoor and portable outdoor reception* [on-line], citace 5. 12. 2014, dostupné na: www.tv-plattform.de.

- [12] SKÁLA, J., TETOUR J., KRAMOSIL J., Stanovisko technické pracovní skupiny NKS č. 01/2007, *Alternativy řešení příjmu signálu DVB-T prostřednictvím STA* [on-line], citace 6. 1. 2015, dostupné na:
http://www.digitalnitelevice.cz/prilohy/2007_alternativy_reseni_prijmu_signalu_dvb_t_prostrednictvim_sta.pdf.
- [13] KOBZA, J., *Měření přijímače pro pozemní digitální televizi DVB-T*: diplomová práce, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010.
- [14] ČSN EN 62216-1, *Digitální televizní přijímače pro systém DVB-T- Část 1: Základní specifikace přijímače*, 2003.
- [15] D-Book V.4.02, *Minimální požadavky na přijímací zařízení pro poskytování služeb v sítích DVB-T a DVB-T2*, září 2014.
- [16] ČTÚ, *Zemské digitální televizní a rozhlasové vysílání v ČR: Mapa pokrytí* [on-line], citace 13. 1. 2015, dostupné na: <http://dtv.ctu.cz>.
- [17] MAZÁNEK, M., PECHAČ, P., VRBA, J., *Základy antén, šíření vln a mikrovlnné techniky*, ČVUT, Praha 2008.
- [18] ETSI TR 101 290 V.1.3.1, *Digital Video Broadcasting (DVB), Measurement guidelines for DVB systems*, 2014.
- [19] STROUHAL, A., *Simulace RF přenosového kanálu pro DVB-T2*: diplomová práce, Brno: Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2011.
- [20] DEUTSCHE TV PLATFORM, *Minimum requirements for DVB-T receiving antennas for portable indoor and portable outdoor reception* [on-line], citace 5. 12. 2014, dostupné na: www.tv-plattform.de.

Příloha 1

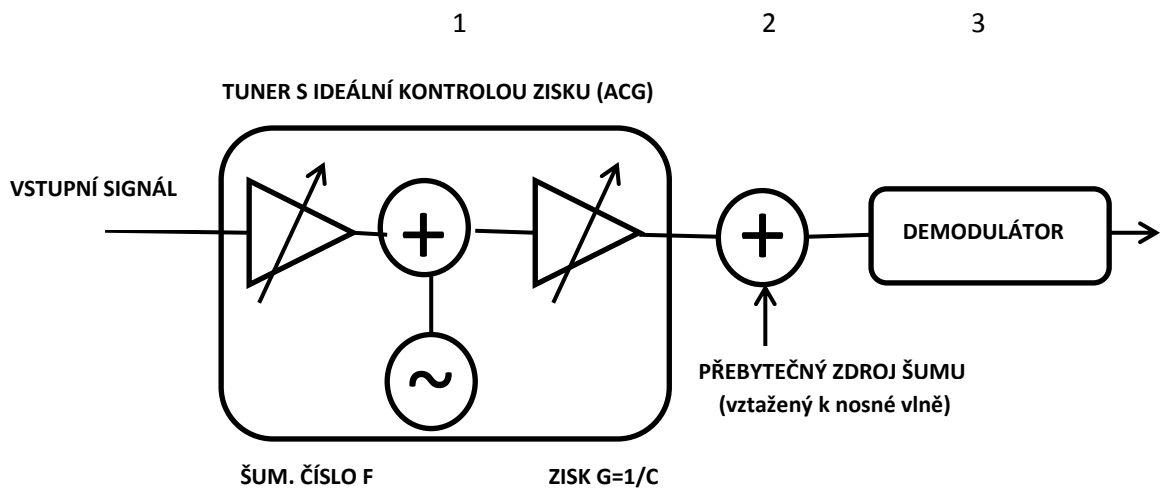
Výpočet citlivosti (P_{\min}) z minimálních odstupů C/N

a) Přijímače první generace

Norma ČSN EN 62216-1 uvádí tabulky minimálních potřebných odstupů signálu od šumu (C/N), kde je šum společně s nosnou vlnou aplikován v šířce pásma 7,61 MHz. Při výpočtech se uvažuje rezerva 2,5 dB a hodnota šumu přijímače $P_x = -33$ dBc. Je uvažován ideální vysílač. [14]

Při výpočtu je uvažován model zahrnující následující části:

1. Vstupní blok s šumovým číslem F a tuner s automatickou kontrolou zesílení (AGC). Důsledkem působení AGC je výstupem tuneru zisk $1/C$.
2. Přebytečný zdroj šumu P_x v bodě po řízeném zesílení (vztažený k nosné vlně).
3. Demodulátor s rychlým kanálovým ekvalizérem uvažujícím 2-3 dB rezervu.



Obr. 27: Šumový model

Nadbytečný šum přijímače zahrnuje fázový šum lokálního oscilátoru, kvantizační šum vznikající při analog-digitální konverzi, tepelný šum a vliv intermodulace.

$$C/N \text{ na vstupu modelu} \quad C/N \text{ [dB]} = 10 \log \left(\frac{C}{kTB} \right) \quad (5)$$

$$C/N \text{ na vstupu demodulátoru je dán vztahem} \quad C/N \text{ [dB]} = 10 \log \left(\frac{C}{kTBF + CP_x} \right) \quad (6)$$

C – výkon vstupního signálu

B – šumová šířka pásma přijímače [Hz]

C/N – minimální odstup signálu od šumu požadovaný systémem [dB]

F – šumové číslo přijímače [dB]

P_x – vstupní šumový výkon přijímače [dBm]

k – Boltzmannova konstanta = $1,38 \times 10^{-23}$ Ws/K

T – absolutní teplota = 290 K

Minimální požadovaná vstupní úroveň signálu pro dosažení BER = 2×10^{-4} za Viterbiho dekodérem je:

$$P_{\min} = -97,2 \text{ dBm} + C/N \text{ [dB]} \text{ pro kanál o šířce 8 MHz} \quad (7)$$

b) Přijímače druhé generace

Hodnoty minimálního odstupu signál/šum potřebných pro dosažení kvazi bezchybného QEF (Quasi Error Free) příjmu jsou přepočítány na hodnoty minimálních citlivostí pro jednotlivé módy dle rovnice 8 a 9.

$$P_n \text{ [dBm]} = F + 10 \log(kT_0B) + 30 \quad (8)$$

$$P_{\min} \text{ [dBm]} = P_n + C/N \quad (9)$$

B - šumová šířka pásma přijímače [Hz]

C/N - minimální odstup signálu od šumu [dB]

F - šumové číslo přijímače [dB]

P_n – vstupní šumový výkon přijímače [dBm]

k – Boltzmannova konstanta

T_0 – absolutní teplota = 290 K

P_{\min} – minimální výkon signálu na vstupu přijímače [dBm]

Minimální úrovně potřebné pro QEF příjem uvedené v tabulce 7 jsou uvedeny pro šířku pásma B= 7,77 MHz (odpovídající kanálu 8 MHz) a šumové číslo přijímače F= 6 dB.