

**UNIVERZITA PARDUBICE
ÚSTAV ELEKTROTECHNIKY A
INFORMATIKY**

**SIMULACE A ANALÝZA DIGITÁLNÍHO
TELEVIZNÍHO VYSÍLÁNÍ**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

AUTOR PRÁCE: Marek Jonáš

VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. Zdeněk Němec

2007

**UNIVERSITY OF PARDUBICE
INSTITUTE OF ELECTRICAL ENGINEERING
AND INFORMATICS**

**SIMULATION AND ANALYSIS OF DIGITAL
TELEVISION BROADCASTING**

BACHELOR WORK

AUTHOR: Marek Jonáš

SUPERVISOR: Ing. Zdeněk Němec

2007

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 18. 5. 2007

Marek Jonáš

Poděkování

V úvodu bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce, Ing. Zdeňku Němcovi, za rady, připomínky a návrhy týkající se bakalářské práce a za odborné vedení při simulacích prováděných v softwarovém prostředí Matlab a Simulink.

Abstrakt

Tato práce se zabývá popisem vlastností digitálního televizního vysílání, jeho porovnáním s vysíláním analogovým a stavu zavádění celoplošného digitálního vysílání v České republice. Praktická část se věnuje simulaci přenosového kanálu a modulačních technik používaných v systému digitálního vysílání pomocí modelu vytvořeného v softwarovém prostředí Matlab a Simulink.

Obsah

1	Úvod	12
2	Analogový televizní signál	13
3	Digitalizace televizního signálu.....	15
4	Standard DVB.....	18
4.1	Kabelové digitální televizní vysílání (DVB-C)	18
4.2	Satelitní digitální televizní vysílání (DVB-S)	19
4.3	Terestrické digitální televizní vysílání (DVB-T).....	20
5	Zdrojové kódování.....	21
5.1	Standard MPEG-2.....	21
5.1.1	Kódování obrazu.....	21
5.1.2	Kódování zvuku.....	24
6	Kanálové kódování a vysílání.....	25
6.1	Datový tok	25
6.2	Zabezpečení proti chybám.....	25
6.3	Modulační technologie OFDM.....	27
7	Digitální televizní vysílání v ČR	29
7.1	Historie	29
7.2	Digitální multiplexy v ČR	30
7.3	Zavádění celoplošného digitálního vysílání v ČR	31
8	Simulační model	33
9	Výsledky simulací	37
9.1	Modulace QPSK.....	37
9.1.1	Modulace QPSK bez odrazů signálu	37
9.1.2	Modulace QPSK s jedním odrazem signálu	38
9.1.3	Modulace QPSK se dvěma odrazy signálu.....	39
9.2	Modulace 16QAM.....	40
9.2.1	Modulace 16QAM bez odrazů signálu.....	40
9.2.2	Modulace 16QAM s jedním odrazem signálu	41
9.2.3	Modulace 16QAM se dvěma odrazy signálu	42
9.3	Modulace 64QAM.....	43
9.3.1	Modulace 64QAM bez odrazů signálu.....	43

9.3.2	Modulace 64QAM s jedním odrazem signálu.....	45
9.3.3	Modulace 64QAM se dvěma odrazy signálu	46
9.4	Porovnání modulačních technik	46
10	Závěr.....	48

Seznam obrázků

Obr.1 Analogový televizní signál (3)	13
Obr.2 Digitalizace obrazového signálu (3).....	15
Obr.3 Digitální televizní signál (3).....	16
Obr.4 Vysílací řetězec DVB (3)	18
Obr.6 Makroblok 4:2:0 - celkem 6 bloků 8 x 8 hodnot (5)	22
Obr.7 Princip detekce a kompenzace pohybu (5).....	23
Obr.8 Používané způsoby predikce ve skupině obrázků GOP, délka skupiny N, periodičita M (pro obrázky P a I) (5)	23
Obr.9 Princip psychoakustického maskovacího jevu (5)	24
Obr.10 Protichybové zabezpečení DVB (4)	26
Obr.11 Konstelační diagramy modulací M-QAM (7)	27
Obr.13 Spektrum dílčích subnosných OFDM v přenosovém kanálu DVB-T (4)	28
Obr.14 Rozdělení ČR pro přechod na digitální televizní vysílání (1)	32
Obr.15 Model jedné nosné vlny v systému OFDM.....	34
Obr.16 Podobvod simulující první odražený signál	35
Obr.17 Podobvod simulující druhý odražený signál	36
Obr.18 Konstelační diagram modulace QPSK, SNR=22,8dB, BER=0 .37	
Obr.19 Konstelační diagram modulace QPSK, SNR=0dB, BER=0,0044	38
Obr.20 Modulace 16 QAM, SNR=34,8dB, BER=0	40
Obr.21 Modulace 16 QAM, SNR=8dB, BER=0,0005	41
Obr.22 Modulace 16 QAM, odraz 0,17, SNR=15dB, BER=0,0003	42
Obr.23 Modulace 16 QAM, 2 odrazy (jejich amplitudy jsou 10x menší než amplituda přímého signálu), SNR=15 dB, BER=0,0006.....	43
Obr.24 Modulace 64 QAM, bez odrazu , SNR=46,8dB, BER=0.....	44
Obr.25 Modulace 64 QAM, bez odrazu , SNR=11dB, BER=0,02.....	45

Seznam tabulek

Tab.1 Vztah mezi počtem stavů a počtem bitů/symbol (5)	25
Tab.2 Termíny pro spouštění digitálních a vypínání analogových vysílačů (1)	32
Tab.3 Srovnání modulačních technik	47

Seznam zkratk

BER	(bit error ratio) - chybovost přenosu
DCT	(discrete cosine transform) – diskrétní kosinová transformace
DPCM	(Differential pulse code modulation) – rozdílová pulzně kódomá modulace
DVB	(digital video broadcasting) - standard popisující digitální televizní vysílání
DVB-C	(digital video broadcasting-cable) - kabelové digitální televizní vysílání
DVB-S	(digital video broadcasting-satellite) - satelitní digitální televizní vysílání
DVB-T	(digital video broadcasting-terrestrial) - pozemní digitální televizní vysílání
GOP	(group of Picture) - skupina obrázků ve standardu MPEG-2
MPEG	(moving picture experts group) - standard pro kompresi videa
OFDM	(orthogonal frequency division multiplex) – modulační systém s velkým počtem nosných vln
SNR	(signal to noise ratio) - odstup signálu od šumu
QPSK	(quadrature phase shift keying) - čtyřstavová digitální modulace
16QAM	(quadrature amplitude modulation) - šestnáctistavová digitální modulace
64QAM	(quadrature amplitude modulation) - šedesátičtyřstavová digitální modulace

1 Úvod

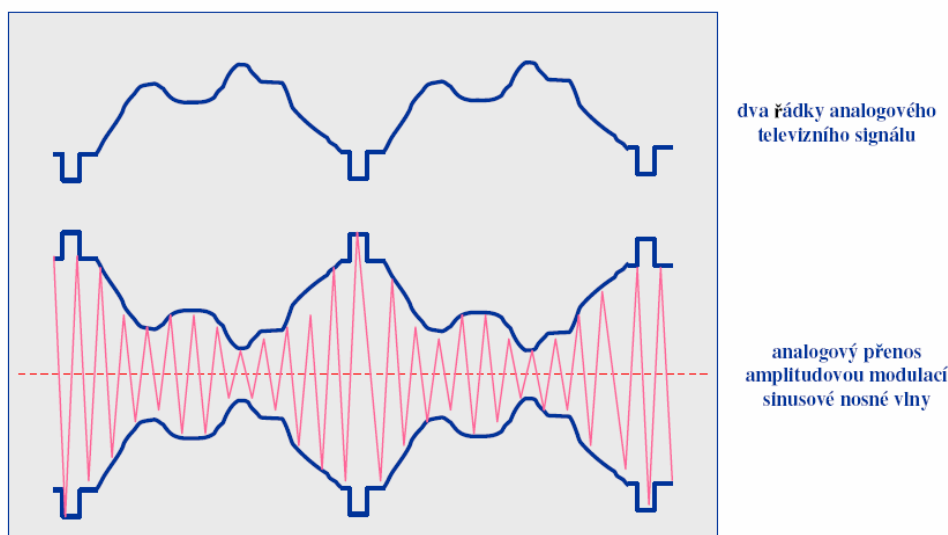
Bakalářská práce je zaměřena na popis technologie digitálního pozemního televizního vysílání (DVB-T) a její porovnání s analogovým televizním vysíláním a stavu zavádění digitálního televizního vysílání v České republice a jeho plánovanému rozšiřování.

Digitální způsob přenosu televizního vysílání [11,12] využívá tzv. multiplexu a umožňuje tak přenášet několik televizních programů v normě MPEG-2 či MPEG-4 a tak lépe využít přenosové pásmo používané při analogovém vysílání. Praktický význam spočívá v tom, že na jednom kanále místo jedné televizní stanice vysílá tzv. multiplex, který může obsahovat hned několik televizních stanic, rozhlasových stanic a doplňkových služeb.

První kapitola bakalářské práce je úvod. Ve druhé kapitole je popisován analogový televizní signál, uvádí se jakým způsobem se skládá obraz na televizní obrazovce. V třetí kapitole je rozbor digitalizace analogového signálu a výčet výhod digitálního vysílání. Čtvrtá kapitola se věnuje popisu standardu DVB, který využívá technologii digitálního televizního vysílání a jeho rozdělení pro vysílání pozemními vysílači, kabelovými rozvody nebo prostřednictvím družic. Pátá kapitola se zabývá zdrojovým kódováním DVB, tedy jeho komprimací a přizpůsobením pro přenos přenosovým prostředím (MPEG-2). Šestá kapitola pojednává o kanálovém kódování, tzn. o zabezpečení datového toku proti vzniku chyb a také o technologii vysílání pozemní digitální televize (OFDM). Sedmá kapitola shrnuje vývoj, současný stav a plán rozšiřování digitálního televizního vysílání v České republice. Osmá kapitola se již zabývá praktickou částí práce, popisuje simulační model vytvořený v softwarovém prostředí Matlab a Simulink. Devátá kapitola popisuje výsledky jednotlivých simulací při použití modulačních technik používaných systémem DVB-T. Poslední desátou kapitolou je závěr. V něm jsou shrnuty výsledky a přínosy bakalářské práce.

2 Analogový televizní signál

Pohyblivý obraz na televizní obrazovce je tvořen rychle se střídajícími nepohyblivými obrázky, které jsou složeny z přesně definovaného počtu obrazových bodů uspořádaných do stanoveného počtu řádků a sloupců (625 řádků, 864 sloupců). Televizní obraz se přenáší přenosovým prostředím tak, že přenášíme jasovou a barvosnou složku těchto bodů [10,11]. Všechny barvy se skládají ze tří základních barev: červené, zelené a modré (soustava RGB - red, green, blue). Přenáší se tedy informace o jasu jednotlivých základních barev v každém jednotlivém bodě obrazu. Jas jednotlivých barev je vyjádřen pomocí velikosti úrovně napětí každé jednotlivé barevné složky $U_R(t)$, $U_G(t)$ a $U_B(t)$. Aby bylo možné přijímat televizní signál jak barevným, tak i černobílým analogovým televizorem nepřenáší se přímo informace o jasu jednotlivých barev (barevné složky $U_R(t)$, $U_G(t)$, $U_B(t)$), ale vypočítává se z nich jasový signál: $U_Y = 0,3 \cdot U_R + 0,59 \cdot U_G + 0,11 \cdot U_B$. Dále se pak přenáší rozdílové barevné složky: $U_{R-Y} = U_R - U_Y$ a $U_{B-Y} = U_B - U_Y$. Ukázka analogového televizního signálu je na Obr.1.

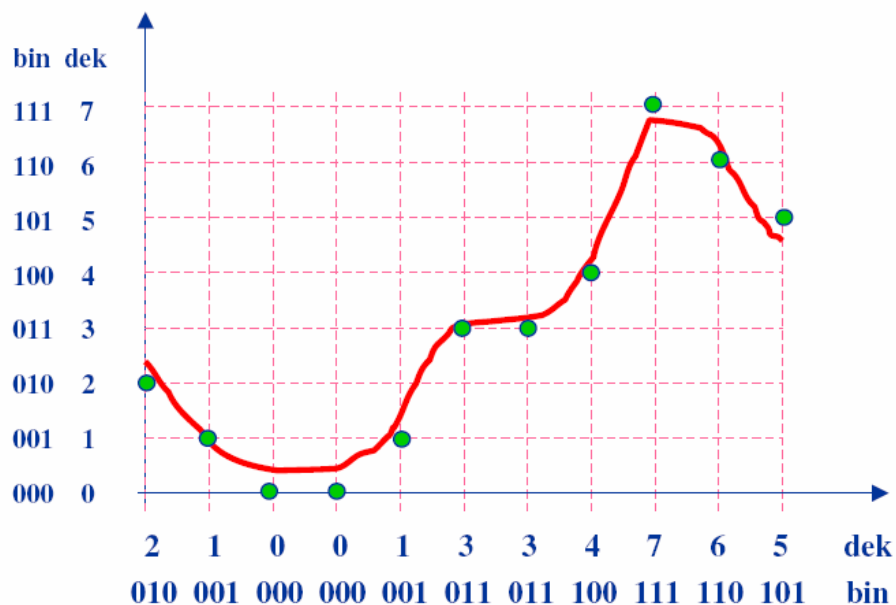


Obr.1 Analogový televizní signál (3)

Pro přenos obrazu existují různé soustavy, např. NTSC, SECAM, PAL. V České republice se k přenosu obrazu používá soustava PAL s počtem 25 snímků za sekundu rozdělovaných na dva půlsnímky. Obraz v analogovém televizoru se vykresluje pomocí „letícího“ paprsku (svazek elektronů, který vzniká v elektronové trysce) v řádcích postupně od horního až po spodní okraj obrazovky. Naproti tomu u digitálního LCD televizoru vzniká obraz pomocí technologie tekutých krystalů, které se vlivem přiloženého elektrického pole natáčejí a mění tak podle potřeby jas a barvu jednotlivých zobrazovacích bodů (pixelů).

3 Digitalizace televizního signálu

Zmínky o digitalizování televizního obrazu je možné nalézt již v sedmdesátých letech minulého století. Jednalo se však o pouhou digitalizaci obrazového signálu, nikoliv o digitální vysílání. Digitalizace se zpočátku používala především pro vytváření televizních triků. Později se také začala rozšiřovat na digitální režijní pracoviště a záznamová zařízení. Výsledným produktem však vždy byl analogový signál na vysílači. Digitální signál obdržíme tak, že zdigitalizujeme původní analogový signál (Obr.2) [3,8,11].



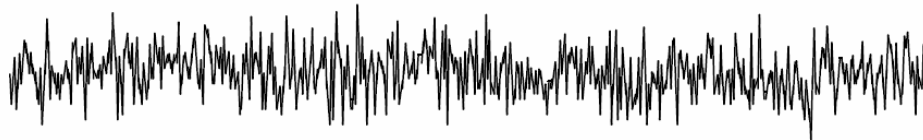
Obr.2 Digitalizace obrazového signálu (3)

Analogový signál nejprve ovzorkujeme, tzn. odebíráme z něj vzorky v konstantních časových intervalech, jejichž délka závisí na vzorkovací frekvenci. Abychom tento signál mohli po přenosu přenosovým kanálem opět obnovit, musí být vzorkovací frekvence minimálně dvojnásobkem horní mezní frekvence původního analogového signálu. Vzorky mohou být tvořeny impulsy s konstantní šířkou a proměnnou napět'ovou úrovní, která vyjadřuje úroveň původního analogového signálu v definovaných okamžicích. Tento signál nazýváme

signál PAM (pulzní amplitudová modulace). Dalším krokem je kvantování signálu PAM a převod do dvojkové soustavy. Každému vzorku je přiřazena nejbližší kvantizační úroveň, která je následně vyjádřena binárním číslem. Vznikne tak signál PCM (pulzně kodová modulace). Takto je původní analogová informace převedena na digitální a máme již k dispozici digitální signál, tedy signál vyjádřený posloupností logických úrovní „0“ a „1“ (Obr.3)



Digitální signál v televizním studiu



Digitální signál při terestriálním vysílání DVB

Obr.3 Digitální televizní signál (3)

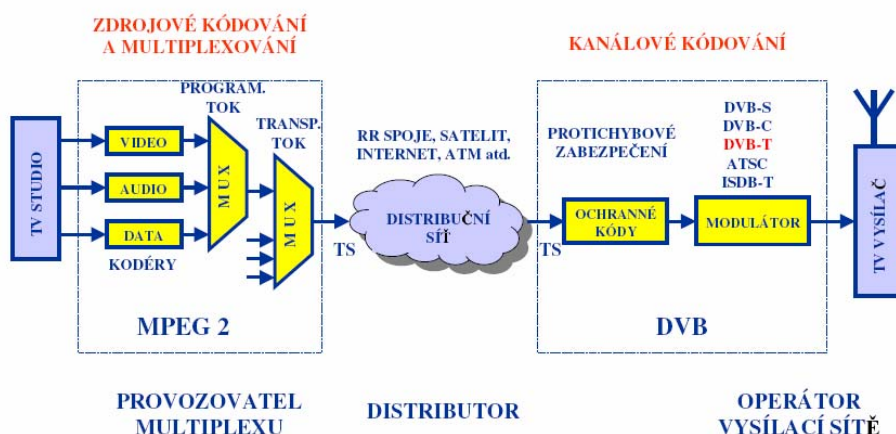
Pro vzorkování obrazového signálu existují různé diskretizační struktury [8], například pro soustavy s neprokládaným řádkováním struktura ORR a pro soustavy s prokládaným řádkováním struktura ORT, nebo QL.

Digitální signál je pro přenos mnohem výhodnější než původní analogový signál, protože se skládá pouze ze dvou logických úrovní. Tyto úrovně jsou reprezentovány dvěma zvolenými úrovněmi napětí. Na přijímací straně tedy musíme rozlišit pouze dvě napěťové úrovně v náhodném pořadí, tzn. mohou nastat pouze dvě úrovně napětí, jejichž velikost předem známe, na rozdíl od signálu analogového, který je v amplitudě spojitý. To znamená, že digitální signál by měl být odolnější proti rušení. Při vysílání digitálního signálu potřebujeme také mnohem menší výkon vysílače, až 10x menší. Digitálně vysílaný televizní

program má také menší šířku pásma než analogový. Proto můžeme místo jednoho analogového televizního nebo rozhlasového programu vysílat hned několik digitálních. Analogový televizní kanál má původní šířku pásma 8 MHz. Při digitálním vysílání v jednom analogovém kanále (tedy místo jednoho analogového programu) vysílá takzvaný digitální programový multiplex, který může obsahovat (podle formy komprese digitálních toků jednotlivých programů) například 4 až 6 digitálně vysílaných televizních programů. Výhoda digitální reprezentace dat spočívá také v tom, že se přenáší informace jen v nezbytně nutném rozsahu. Digitální datový tok lze totiž redukovat pomocí různých komprimačních metod.

4 Standard DVB

DVB je standard popisující digitální televizní vysílání a to kabelové, satelitní a terestrické [3,4,5,8]. Blokové schéma vysílacího řetězce ve standardu DVB ukazuje Obr. 4.



Obr.4 Vysílací řetězec DVB (3)

4.1 Kabelové digitální televizní vysílání (DVB-C)

Digitální televizní vysílání v kabelových sítích (DVB-C) [2] přináší další možnosti pro využití současných kabelových rozvodů. Kabelové kanály jsou nejkvalitnější, a proto u nich lze použít menší zabezpečení datového toku proti chybám. Zavádění DVB-C je záležitostí jednotlivých operátorů. Z technického hlediska je DVB-C jedním ze skupiny standardů DVB (založený na kódování MPEG-2), ovšem používá se jiný způsob modulace než u satelitního a pozemního vysílání, a tak nejsou ani přijímače mezi sebou zaměnitelné. Pro DVB-C se využívají kanály v I. až IV. televizním pásmu. Používá se modulace M-QAM, nejčastěji 64QAM, což umožní v jednom pásmu 8 MHz přenášet datový tok přes 30 Mbit/s, využitelných pro 6 - 12 programů v závislosti na datovém toku každého programu. Určitou nevýhodou DVB-C jsou

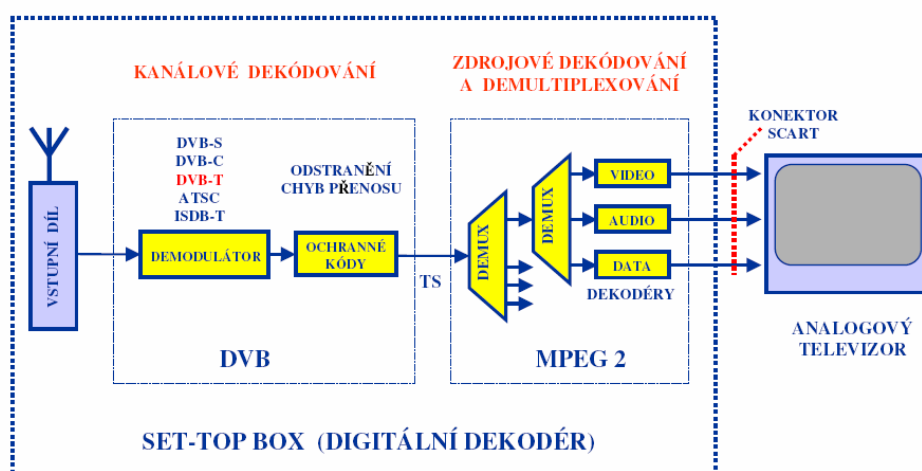
nároky na kvalitu sítě, kdy například odrazy signálu v síti mohou způsobovat "pixelizaci" obrazu a výpadky, výhodou je naopak poměrně dobrá odolnost proti rušení - uživatel i při nižším odstupu šumu od signálu vidí stále dobrý obraz (zatímco u klasického analogového vysílání by již viděl obraz hodně zarušený), pokud je šum již příliš silný, je příjem a dekódování obrazové informace nemožné.

4.2 Satelitní digitální televizní vysílání (DVB-S)

Zde se jedná o digitální televizní vysílání pomocí satelitních vysílačů a přijímačů. Tento způsob přenosu televize se vyvíjel poněkud odlišně od pozemního digitálního vysílání (DVB-T). Satelitní digitální vysílání totiž nebylo od počátku zatíženo požadavkem úzkého přenosového kanálu a vysokou odolností proti odrazům signálu v přenosovém prostředí. Šířku kanálu je možné celkem libovolně upravovat dle potřeby. Přesto i DVB-S používá MPEG kompresi pro zmenšení datového toku. Pokud jde o vícecestné šíření signálu, pak na cestě signálu z družice k parabolické anténě v místě příjmu nejsou žádné překážky, které by mohly zapříčinit nějaký významný odraz. Úzký úhel příjmu parabolické antény ještě toto nebezpečí dále snižuje. Velkou výhodou DVB-S je schopnost velkého pokrytí vybraného území, velmi rychlá realizace a možnost velmi vysoké kvality přenosu, a to díky velké rezervě datového toku. Naopak nevýhodou jsou ještě stále vcelku vysoké náklady na pořízení přijímacího zařízení. Problematická montáž v nájemních a panelových domech, spolu s nutností odborné instalace, je další nevýhodou této technologie. Vysílání ve standardu DVB-S využívá kmitočtová pásma 12GHz a vyšší, používá se modulace QPSK. Datový tok se kóduje dle standardu MPEG-2, a používá se vnější a vnitřní ochranné kódování.

4.3 Terestrické digitální televizní vysílání (DVB-T)

DVB-T je technologie, která umožňuje přenos digitálního televizního signálu prostřednictvím pozemních vysílačů. Jedná se o podobný způsob jako v případě pozemní analogové televize. Používá se I. až V. televizní pásmo, modulační technologie OFDM a komprese datového toku podle standardu MPEG-2. Při vysílání ve standardu DVB-T se používá také zabezpečení proti chybám ve formě vnějšího (blokového) zabezpečovacího kódování (opravuje symbolové chyby – shlukové chyby) a vnitřního (konvolučního) zabezpečovacího kódování (opravuje jednotlivé bity). Největším problémem při šíření signálu digitální televize pozemními vysílači jsou odrazy od různých překážek (budovy, terénní nerovnosti, atd. ...). Tento problém řeší ochranný interval. Signál se po příjmu ihned nedemoduluje, ale zpracování probíhá po definovaném časovém intervalu, při správném nastavení se pak odrazy přicházející s různým zpožděním sčítají a zajišťují tak dokonce vyšší úroveň přijímaného signálu. Přijímací řetězec digitální televize je na Obr.5.



Obr.5 Přijímací řetězec DVB (3)

5 Zdrojové kódování

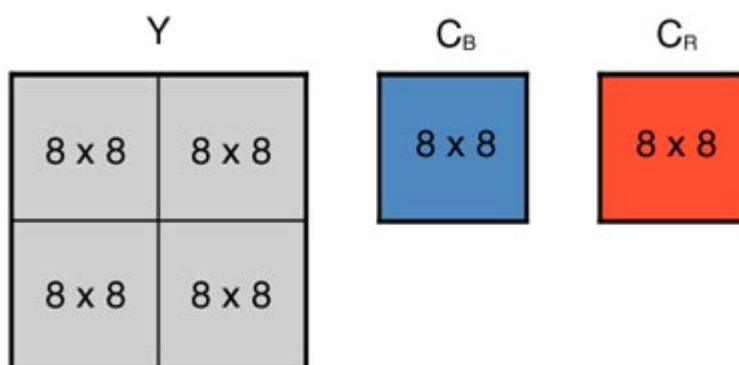
DVB muselo překonat jednu velkou překážku. Tou byla potřeba přenosu velkého množství dat pro stejně kvalitní obraz, jaký má analogová televize. Tento problém vyřešily až kompresní technologie MPEG a vícestavová digitální modulace signálu. Při pokusech se ukázalo, že klasický televizní obraz obsahuje velké množství informací, které jsou ve výsledném obrazu nepodstatné a je možné je bez vážného znehodnocení výsledného obrazu postrádat. Z tohoto důvodu se komprese MPEG nazývá „ztrátová“, neboť v průběhu komprimování dochází k částečným ztrátám obrazové informace. Další metoda úspory datového toku, která je obsažena v MPEGu, spočívá v tom, že jen některé snímky obsahují kompletní informaci o celém obrazu. Za takovýmto snímkem následuje několik „snímků“, které přenášejí jen informaci o rozdílech mezi dvěma po sobě jdoucími snímky. Tímto způsobem lze ušetřit obrovské množství dat a dosáhnout tak velkého kompresního poměru. Bitový tok nekomprimovaného obrazového signálu přibližně 216 Mbit/s je nutno prostředky zdrojového kódování zredukovat na 3 až 6 Mbit/s, tj. dosáhnout kompresních poměrů kolem 50:1, případně i vyšších. To zajišťují komprimační metody: MPEG-1, MPEG-2 a MPEG-4, v současné době se při digitálním televizním vysílání používá nejčastěji MPEG-2 [5,8,11]. Tato metoda bude ale postupně nahrazována metodou MPEG-4, která je vyspělejší a nabízí ještě větší komprimaci digitálního obrazového signálu a tudíž ještě více televizních programů v jednom multiplexu. Metoda MPEG-4 se v současné době uplatňuje hlavně u HDTV (televize s vysokým rozlišením).

5.1 Standard MPEG-2

5.1.1 Kódování obrazu

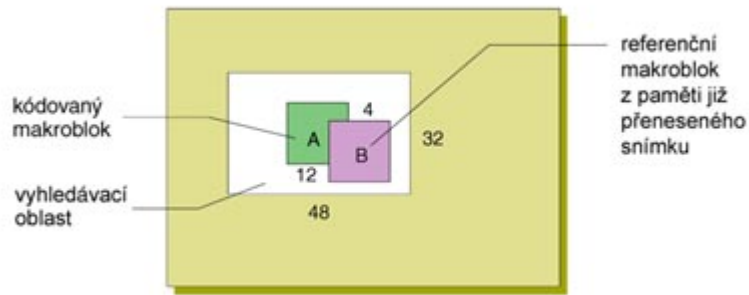
Zkratka MPEG-2 vznikla z názvu skupiny expertů pro pohyblivé obrazy (Moving Picture Experts Group). MPEG-2 rozeznává tyto hierarchické struktury televizního obrazu: sekvence, skupina obrázků

GOP (Group of Pictures), obrázek (picture), tj. snímek nebo půlsnímek, pruh makrobloků (slice), makroblok, blok a vzorek (sample). Vzorky jsou reprezentovány osmibitovými informacemi o jasů nebo chrominanci obrazových prvků. Skupina 8 x 8 jasových nebo chrominančních vzorků tvoří blok, čtyři jasové bloky Y spolu s odpovídajícími chrominančními bloky C_B a C_R tvoří makroblok (Obr. 6).



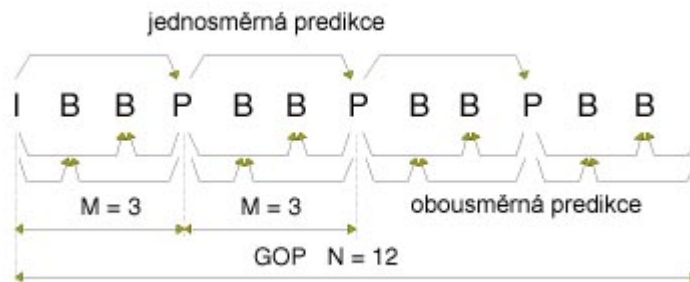
Obr.6 Makroblok 4:2:0 - celkem 6 bloků 8 x 8 hodnot (5)

Dalším stupněm je obrázek tvořený buď jedním televizním půlsnímkiem, nebo snímkem. Rozlišujeme obrázky typu I, P a B. Obrázek I (intraframe) nemá žádnou vazbu na předcházející a následující obrázky. Obrázek P (predicted) je kódován ve vztahu k předcházejícímu obrázku I nebo P na základě diferenční pulzně kódové modulace DPCM. Kódování probíhá po makroblocích (a blocích), přenášejí se pouze rozdíly signálu vzhledem k již přenesenému referenčnímu makrobloku z předcházejícího obrázku, přičemž polohu referenčního makrobloku v paměti udává tzv. pohybový vektor (Obr. 7). Pohybové vektory se vytváří v kodéru podle složitých algoritmů analýzou všech makrobloků ve vyhledávací oblasti, do dekodérů jsou přenášeny spolu se signálem. Na základě souřadnic pohybového vektoru vyhledá dekodér ve své paměti již přenesený makroblok a přidá k němu přenášený rozdíl, a tak získá původní hodnoty právě kódovaného makrobloku.



Obr.7 Princip detekce a kompenzace pohybu (5)

Obrázek B (bidirectionally predicted) může používat jako referenci makrobloky jak z předcházejícího, tak i následujícího obrázku I nebo P. Aby dekodér v přijímači mohl používat i následující obrázky, mění kódér jejich pořadí při vysílání tak, že při přenosu obrázku B jsou příslušné referenční obrázky I nebo P již uloženy v paměti přijímače. Správné pořadí pro zobrazení zajišťuje dekodér.



Obr.8 Používané způsoby predikce ve skupině obrázků GOP, délka skupiny N, periodičita M (pro obrázky P a I) (5)

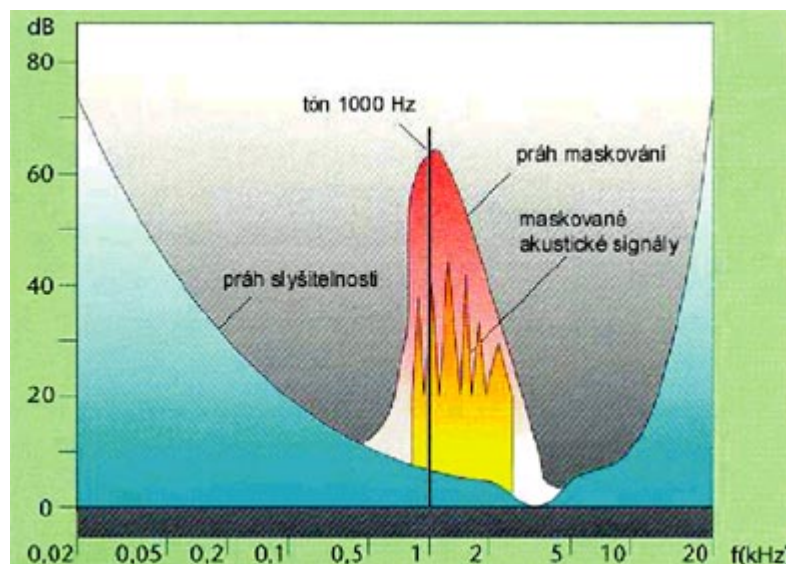
Skupina obrázků GOP je tvořena několika obrázky mezi dvěma obrázky typu I. Pro GOP je charakteristická jeho celková délka N a periodičita M (Obr. 8) udávající, jak se opakují obrázky typu P (včetně obrázků I). Těmito dvěma konstantami je stanoveno pořadí obrázků různých typů ve skupině GOP (mezery mezi obrázky I a P jsou vyplněny obrázky B).

Sekvence je nejvyšší struktura při kódování obrazu ve standardu MPEG-2, je tvořena skupinami GOP. V záhlaví sekvence se přenáší údaje týkající se způsobu kódování celé sekvence.

Kompresi bitového toku v systému MPEG-2 je založena na diskretní kosinové transformaci DCT, pohybově kompenzované mezisnímkové predikci na principu DPCM, kvantizaci koeficientů DCT a jejich kódování kódem vycházejícím ze skutečnosti, že krátké série nul jsou pravděpodobnější než dlouhé a že malé hodnoty koeficientů jsou pravděpodobnější než velké. Transformace DCT spolu s pohybově kompenzovanou DPCM se nazývá hybridní DCT.

5.1.2 Kódování zvuku

Kódování zvuku ve standardu MPEG-2 je založeno na rozdělení zvukového signálu v kmitočtové oblasti do 32 subpásem a využití tzv. psychoakustického maskovacího jevu lidského sluchu v každém z těchto subpásem. Princip tohoto jevu je znázorněn na obr. 9, kde čistý tón 1000 Hz vysoké intenzity maskuje (tj. zcela překrývá) slabší zvukové signály v blízkém okolí, nalézající se pod prahem maskování. V důsledku maskovacího jevu silnější zvukové signály potlačují vnímání slabších spektrálních složek v dané oblasti kmitočtů, které pak není nutno kódovat..



Obr.9 Princip psychoakustického maskovacího jevu (5)

6 Kanálové kódování a vysílání

6.1 Datový tok

Přenášený bitový tok závisí na symbolové rychlosti vynásobené počtem b bitů přenesených jedním symbolem. Jestliže se každým symbolem přenáší jeden bit (dva stavy, $m = 2$), potom je číselné vyjádření přenosové rychlosti v symbolech/s a bitového toku v bitech/s stejné. Vztah mezi počtem stavů m a koeficientem b udává Tab.1.

Tab.1 Vztah mezi počtem stavů a počtem bitů/symbol (5)

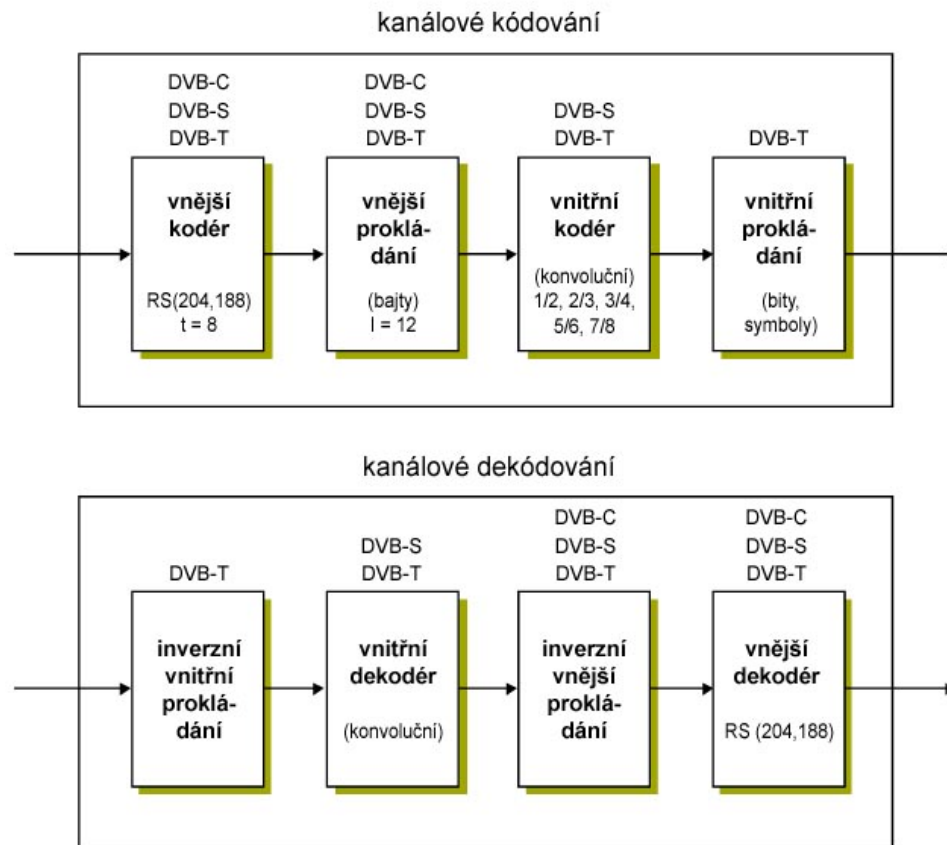
Počet stavů (m)	2	4	8	16	32	64	128	256	512	1024	...
Počet bitů (b)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	...

Se zvyšováním počtu stavů se bitový tok, který lze přenést v daném kanálu, b -krát zvyšuje, ale současně se snižuje odolnost proti rušení. Ta je dána rozlišitelností jednotlivých stavů za přítomnosti šumu a rušení a v podstatě vzdáleností sousedních stavů v tzv. konstelačních diagramech. Souhrnně lze říci, že pro celkový bitový tok, který lze přenést v daném přenosovém kanálu, je rozhodující počet bitů b přenesený jedním symbolem a kmitočtová šířka kanálu..

6.2 Zabezpečení proti chybám

Digitální televizní signál je také možné zabezpečit proti chybám při přenosu pomocí různých zabezpečovacích kódů [4,8,11], samozřejmě ale za cenu zvýšení objemu přenášených dat. Signál je díky ochrannému kódování možné po průchodu přenosovou cestou do určité míry opravit. I Když se při přenosu přenosovým kanálem část informace ztratí, pak při použití opravného kódu lze na přijímací straně zjistit původní hodnotu

tohoto čísla a informaci rekonstruovat. Schopnost přenést příslušnou informaci v nezměněné podobě, i v případě chyby v přenosu, je samozřejmě omezena dokonalostí zabezpečovacího kódu a nikdy není neomezená.

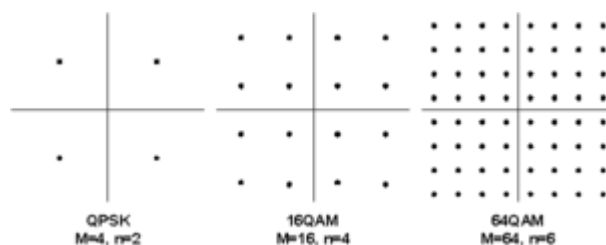


Obr.10 Protichybové zabezpečení DVB (4)

Užitečný bitový tok se doplňuje zabezpečovacími bity proti přenosovým chybám. Vzniká tak celkový hrubý bitový tok, který se pomocí vícestavové digitální modulace přenáší v daném kmitočtovém pásmu. Základní obvody protichybového zabezpečení digitálních systémů jsou naznačeny na Obr. 10. Toto zabezpečení bylo navrženo v rámci projektu DVB, aby vyhovovalo družicové, terestriální i kabelové digitální televizi s tím, že každé médium využívá zabezpečení podle svých specifických požadavků.

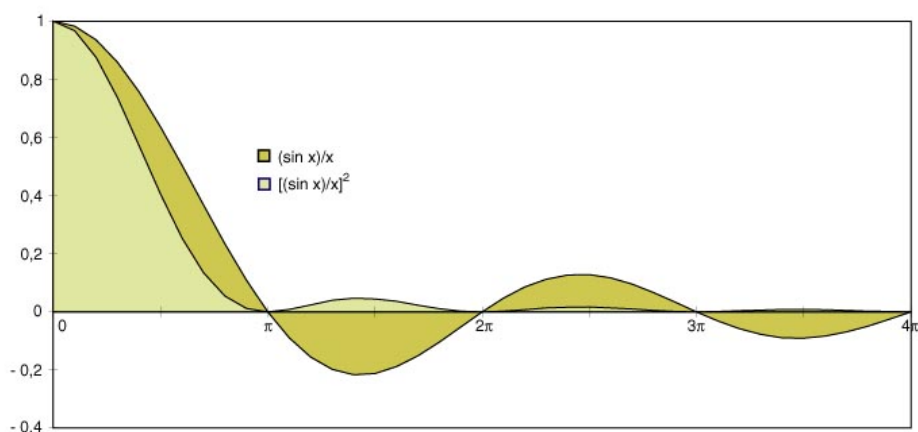
6.3 Modulační technologie OFDM

Standard DVB-T používá pro digitální terestriální vysílání ortogonální frekvenčně dělený multiplex OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex) [4,7,9,11]. Modulační systém OFDM je založený na použití velkého počtu dílčích digitálně modulovaných subnosných vln umístěných rovnoměrně v přenosovém kanálu 8 MHz (případně 7 nebo 6 MHz). Standard připouští dva základní módy s rozdílným počtem nosných vln, 2k (2048 nosných vln) a 8k (8192 nosných vln). Každá dílčí vlna je digitálně modulována s využitím modulačního schématu QPSK, 16-QAM nebo 64-QAM, přenáší tedy současně 2, 4 nebo 6 bitů (Obr.11.)



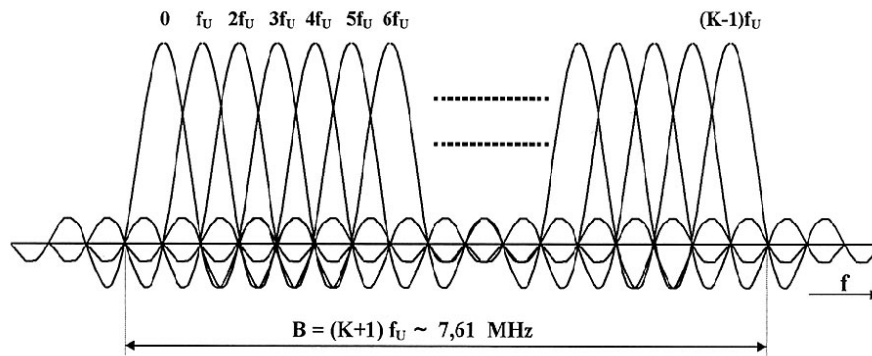
Obr.11 Konstelační diagramy modulací M-QAM (7)

Spektrum každé modulované subnosné má tvar podle Obr. 12 a odpovídá spektru obdélníkového signálu.



Obr.12 Ilustrace spektra modulovaného signálu (4)

Umístění jednotlivých subnosných v kanálu o šířce 8 MHz je patrné z Obr. 13.



Obr.13 Spektrum dílčích subnosných OFDM v přenosovém kanálu DVB-T (4)

Celkové spektrum multiplexu OFDM je dáno součtem všech dílčích spekter znázorněných na Obr. 13. To je v celém kanálu velmi rovnoměrné a na okrajích prudce klesá. Optimální využití přenosového kanálu patří k dalším podstatným výhodám OFDM. Důsledkem rovnoměrného spektra signálu OFDM v celém přenosovém kanálu je, že časový průběh signálu má charakter šumu (Obr.3). Ve skutečnosti je však tento "šumový" signál zcela přesně definován a velmi důkladně zabezpečen proti přenosovým chybám. K modulaci dílčích subnosných v kodéru se používá algoritmus inverzní rychlé Fourierovy transformace IFFT. V dekodéru se pak využívá algoritmus přímé Fourierovy transformace FFT.

7 Digitální televizní vysílání v ČR

7.1 Historie

Přechod na technologii DVB-T vyžaduje přizpůsobit celou síť vysílačů a převaděčů. Všechna tato vysílací zařízení je nutné upravit pro nový způsob vysílání a osadit je novou vysílací technologií. V přeplněném vysílacím pásmu už není dostatek místa pro umístění celoplošného multiplexu, který by fungoval spolu se stávajícím analogovým vysíláním. Zavádění DVB-T tak bude probíhat postupně a stejně tak bude ustupovat analogové vysílání. K celoplošnému pokrytí území digitálním signálem by mělo dojít mezi lety 2009 a 2012.

Přínosem DVB-T však bezesporu bude možnost přenosu většího počtu programů, než máme dnes. V současné době jsou na území ČR čtyři „celoplošné“ sítě a jejich další rozšiřování nebo případné zvyšování jejich počtu už nepřichází v úvahu, jednotlivé vysílače se už dnes v některých místech vzájemně ruší.

Historie digitálního terestriálního televizního vysílání v České republice [6] začala 12. května 2000, kdy České Radiokomunikace a.s. zahájily experimentální vysílání DVB-T v Praze na 25. kanále (Multiplex A). Tím se Česká republika zařadila mezi vyspělé evropské země, které experimentálně vysílají od konce devadesátých let minulého století. Dne 31.8.2000 zahájila experimentální vysílání DVB-T v Praze i společnost Czech Digital Group (multiplex B).

Jako ve všech evropských zemích (s výjimkou Velké Británie) se vysílá v módu OFDM 8k, tedy se 6817 dílčími nosnými vlnami rovnoměrně vyplňujícími celý kanál o šíři 8 MHz. Zvolená šířka ochranného intervalu $1/8$ umožňuje maximální rozdíl drah signálů v jednofrekvenční síti 33,6 km, zvolený kódový poměr konvolučního kódování je $2/3$.

V první etapě se testoval vysílací mód s modulací 16QAM s užitečným bitovým tokem 14,75 Mbit/s, později se přešlo na modulaci 64QAM s bitovým tokem 22,12 Mbit/s. Případné zmenšení ochranného

intervalu na 1/16 by zmenšilo maximální rozdíl drah signálů na 16,8 km a zvětšilo bitové toky na 15,61 Mbit/s (16QAM) resp. 23,42 Mbit/s (64QAM). Vysílaly se televizní programy ČT 2, Nova , ČT 1 a rozhlasové programy Čro 1 a Čro 2. Počet vysílaných programů se postupně rozšířil o televizní programy Prima a Tv 3 (do ukončení jejího vysílání) a rozhlasový program Čro 3 Vltava.

K dalšímu rozšíření experimentálního vysílání došlo 11. listopadu 2002, kdy byl do multiplexu zařazen televizní program stanice Óčko, která svůj převážně hudební program vysílá také v kabelových sítích a v digitálním družicovém paketu. Česká televize spustila 2. května 2005 vysílání nového zpravodajského kanálu ČT24. Dne 21. října 2005 bylo zahájeno řádné digitální vysílání v ČR, kdy Česká televize, ve spolupráci se společností České Radiokomunikace, a.s., zahájila řádné digitální pozemní vysílání programů ČT1, ČT2 a ČT24 v rámci multiplexu A. Tento multiplex byl 10. února 2006 rozšířen o vysílání nového sportovního kanálu České televize ČT4 sport.

Český Telecom spustil krátkodobě zkušební digitální vysílání přechodné digitální sítě C v Praze a Brně. Multiplex tvořily tři televizní programy: hudební kanál Óčko, teleshoppingová stanice Top tv a brněnská kabelová televize Tvb1.

7.2 Digitální multiplexy v ČR

Pozemní digitální vysílání (DVB-T) není zatím dostupné na celém území České republiky. V současné době je možné v některých lokalitách přijímat řádné digitální vysílání dočasného Multiplexu A a tři experimentální vysílání.

Řádné digitální vysílání - Multiplex A

Vysílání v oblastech: Praha, Brno, Ostrava, Domažlicko

Vysílané televizní programy: ČT 1, ČT 2, ČT 24, ČT 4 sport, Nova

Vysílané radiové programy: Čro 1-Radiožurnál, Čro 2-Praha, Čro 3-Vltava, Čro 4-Radio Wave, Čro D-Dur, Čro1-Radio Česko, Čro-Leonardo

Pilotní projekt Czech Digital Group - Multiplex B

Vysílání v oblasti: Praha

Vysílané televizní programy: Prima, Top tv, Óčko, 24cz, Tv noe

Vysílané radiové programy: Rádio Proglas

Pilotní projekt Telefónica O2 - Multiplex C

Vysílání v oblastech: Praha a Brno; vysílání televizních programů bylo pozastaveno. Nadále se vysílají pouze testovací datové toky.

Pilotní projekt B PLUS TV a.s.

Vysílání v oblasti: Ostrava

Vysílané programy: Local tv Klimkovice - vlastní program Local TV Klimkovice 3 hodiny/denně, převzaté televizní vysílání, program slovenské zpravodajské televize Ta3, 21 hodin/denně ,technické vysílání

7.3 Zavádění celoplošného digitálního vysílání v ČR

Technickým plánem přechodu byla republika rozdělena do jedenácti oblastí (Obr. 14) [1], v nichž se bude postupně zapínat digitální vysílání a vypínat analogové. Navrženy jsou 4 vysílací sítě. Veřejnoprávní multiplex (Multiplex 1) má být celorepublikově spuštěn do 10. října 2010. Multiplexy 2 a 3 budou navazovat na současné kmitočty sítí A a B. Multiplex 4 bude spouštěn podle krajů mezi červnem 2008 a zářím 2010. Postup při spouštění digitálního vysílání v jednotlivých oblastech by se měl odehrávat podle technického plánu,

příklady uvádění digitálního vysílání do provozu ve vybraných oblastech udává Tab.2.

Tab.2 Termíny pro spuštění digitálních a vypínání analogových vysílačů (1)

Oblast	Start digitálního vysílání	Vypnutí hlavních analogových vysílačů	Kompletní vypnutí analogového vysílání
Trutnov	září 2007	březen 2008	prosinec 2008
Brno	říjen 2007	květen 2008	únor 2009
Praha	prosinec 2007	květen 2008	únor 2009
Sušice	únor 2008	květen 2008	únor 2009
Plzeň	březen 2008	srpen 2008	květen 2009
Ostrava	červen 2008	září 2008	červen 2009
Jihlava	listopad 2008	duben 2009	leden 2010
České Budějovice	červen 2009	listopad 2009	srpen 2010
Jeseník	září 2009	květen 2010	říjen 2010
Zlín	říjen 2009	leden 2010	říjen 2010



Obr.14 Rozdělení ČR pro přechod na digitální televizní vysílání (1)

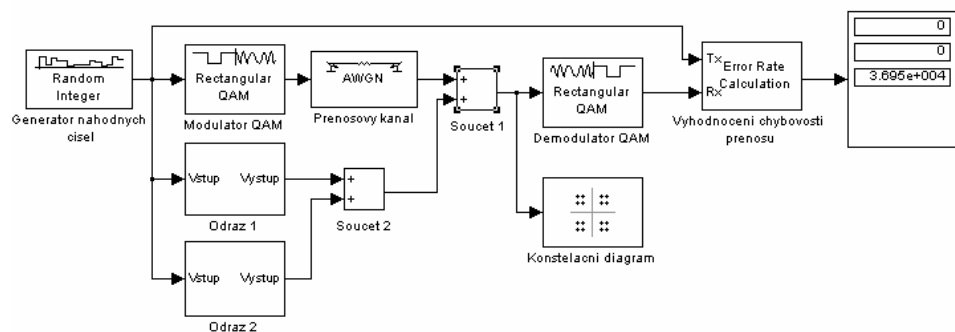
8 Simulační model

Pro analýzu přenosových vlastností systému pozemního digitálního televizního vysílání jsem vytvořil model komunikačního kanálu DVB-T v softwarovém prostředí programu Matlab, konkrétně v jeho nadstavbě Simulinku. Prostředí Simulink slouží pro simulaci a modelování dynamických systémů, využívá algoritmy Matlabu pro numerické řešení nelineárních diferenciálních rovnic, poskytuje možnost vytvářet modely dynamických soustav ve formě blokových schémat.

Model simuluje situaci v systému využívajícím technologii OFDM, která pracuje s pomocí modulačních technik QPSK, 16QAM, nebo 64QAM. Je zde uvažován pouze jediný přenosový kanál, namísto několika tisíc kanálů skutečného systému DVB-T. Simulace jediného přenosového kanálu dostačuje z toho důvodu, že se sousední kanály podle výsledků simulací ztelně neovlivňují. Z tohoto důvodu se všechny SW simulace v této práci omezují pouze na analýzu vlastností jednoho přenosového kanálu.

Pro každou modulační techniku je vždy uvažován nejprve přenos přímého signálu bez odrazů signálu a jsou analyzovány šumové vlastnosti přenosového kanálu a vliv šumu na kvalitu (chybovost) demodulovaného signálu. Dále je pro konkrétní typ modulace popsán přenosový kanál s vícecestným šířením (s jedním nebo dvěma odrazy signálu) a zde je analyzován pouze vliv těchto odrazů na chybovost systému.

Sledované chybovosti systému jsem zvolil na hodnoty 0 %, 2 % a 5%. Právě chybovost o mezní velikosti 5 % lze podle výsledků simulací odstranit kombinací blokového a konvolučního kódování, které je pro zabezpečení přenosu v těchto systémech používáno.



Obr.15 Model jedné nosné vlny v systému OFDM

Model (Obr. 15) se skládá z generátoru náhodných čísel simulujícího datový tok digitální televize, který tvoří vstupní signál m-stavového modulátoru QAM. Na výstupu tohoto modulátoru je již signál modulovaný modulací QPSK, 16QAM nebo 64QAM, které se používají pro modulaci jednotlivých nosných v systému DVB-T. Volba mezi jednotlivými modulacemi probíhá pomocí parametru N , který je nadefinován ve všech modulátorech i demodulátorech v modelu. Parametr N vyjadřuje počet stavů dané modulace a jeho hodnota je 4 pro modulaci QPSK, 16 pro modulaci 16QAM a 64 pro 64QAM. Dále je nadefinován také parametr min_d , který určuje vzdálenost mezi jednotlivými stavy modulací v konstelačním diagramu a volí se 4 pro QPSK, 2 pro 16QAM a 1 pro 64QAM. Tímto parametrem se dosahuje stejného maximálního vysílacího výkonu pro všechny druhy modulací. Díky tomu lze sledovat i vliv šumu o stejné úrovni na každou z modulačních technik. Posledním parametrem je parametr T_s , který určuje přenosovou rychlost jednotlivých nosných v systému DVB-T. Tato rychlost se pohybuje v řádu jednotek kilobitů za sekundu podle druhu použité modulace. Signál modulovaný vybranou modulací prochází přenosovým kanálem, ve kterém můžeme měnit odstup užitečného signálu od šumu a možnosti vícecestného šíření a sledovat tak odolnost modulace vůči rušení. Doporučený odstup signálu od šumu se vypočítá podle vztahu:

$$S/N = 6 \cdot b + 10,8 \quad [dB] \quad (1)$$

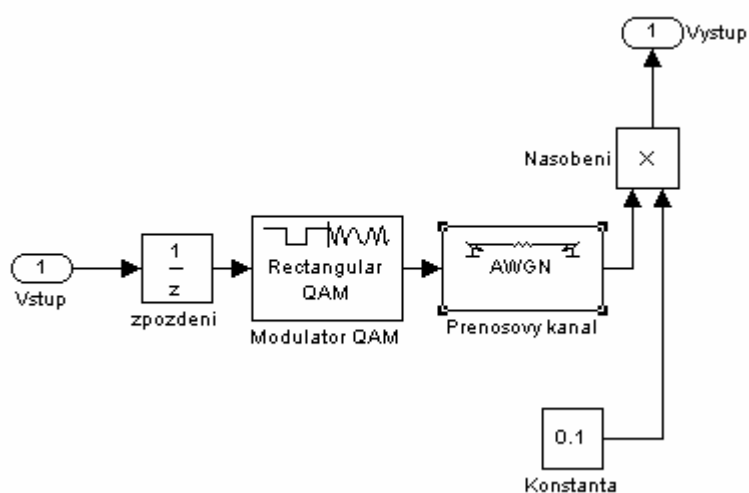
kde: $b \dots$ je počet současně přenášených bitů.

Celkový počet stavů M je pak dán vztahem:

$$M = 2^b \quad [-] \quad (2)$$

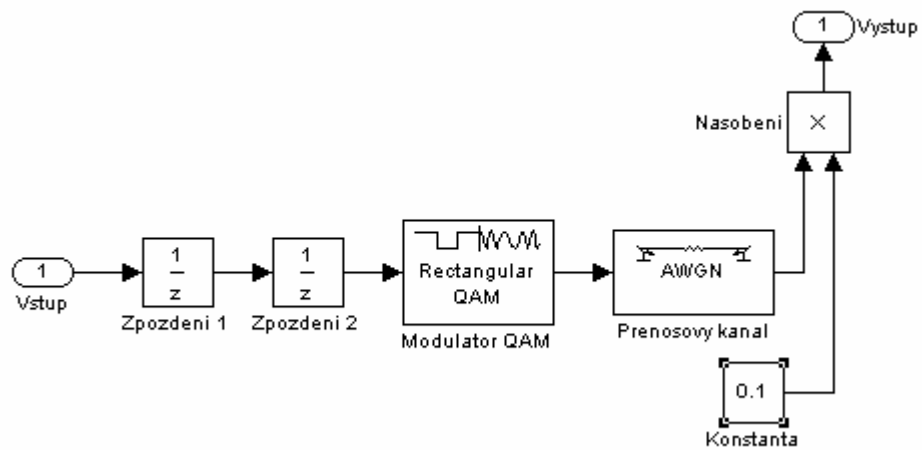
Poté je signál demodulován a přichází do bloku vyhodnocení chybovosti přenosu, který porovnává původní signál před průchodem přenosovým kanálem (a před přidáním případných odrazů) s přijatým signálem a vyhodnocuje celkový počet přijatých bitů, počet chybně přenesených bitů a vypočítává chybovost přenosu.

Model obsahuje také podobvody pro maximálně dva odrazy (bloky Odraz 1 a Odraz 2), pomocí kterých lze simulovat odražené signály. Tyto bloky můžeme odpojit a vyhodnocovat příjem signálu bez odrazu. Schéma podobvodu Odraz 1 (Obr.16) obsahuje zpořďovací člen, který zpozdí vstupní signál v řádu jednotek period vstupního signálu. Zpožděný signál je stejně jako přímý signál modulován modulátorem M-QAM, prochází přenosovým kanálem a je vynásoben konstantou, jejímž nastavením můžeme regulovat amplitudu odraženého signálu. Potom je tento signál sečten s případným druhým odrazem v bloku Soucet 2 a dále přičten k přímému signálu v bloku Soucet 1.



Obr.16 Podobvod simulující první odražený signál

Schéma podobvodu Odras 2 (Obr.17) je téměř totožné s podobvodem Odras 1, obsahuje pouze jeden zpožďovací člen navíc, aby bylo posunutí odražených signálů větší. Pomocí těchto podobvodů lze simulovat jeden nebo dva odražené signály s různou velikostí a lze tak vyhodnocovat příjem signálu s vícecestným šířením.



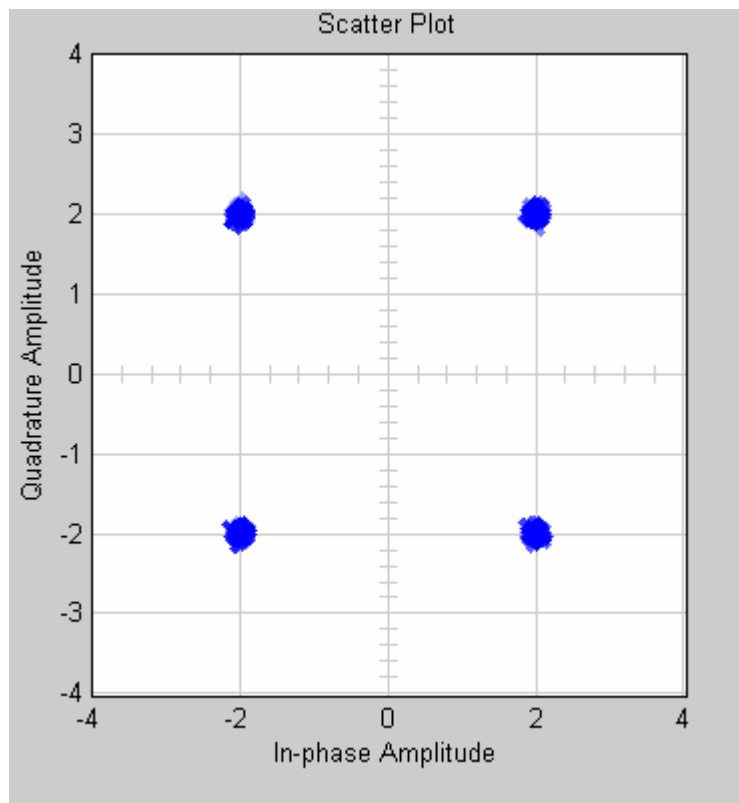
Obr.17 Podobvod simulující druhý odražený signál

9 Výsledky simulací

9.1 Modulace QPSK

9.1.1 Modulace QPSK bez odrazů signálu

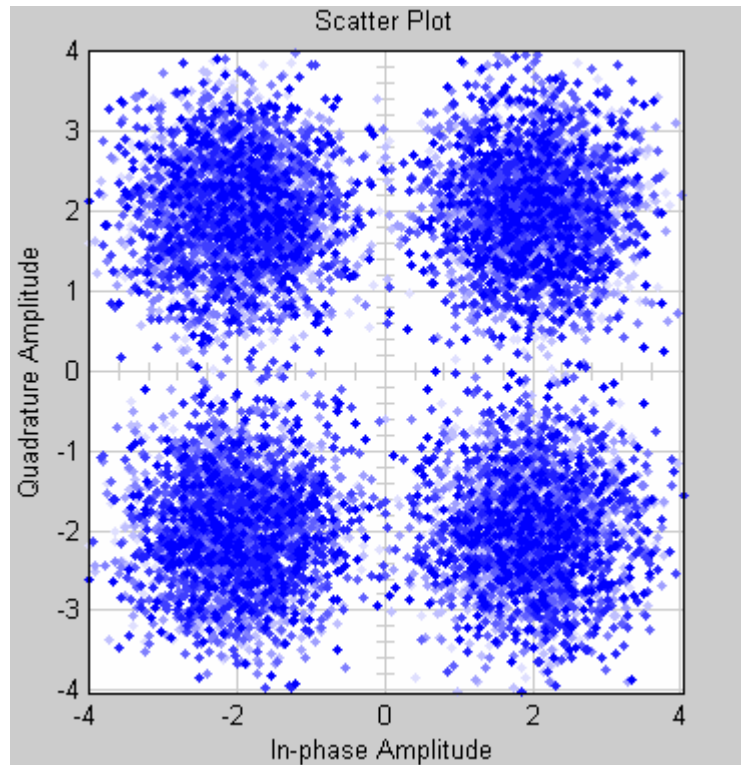
Na Obr.18 je znázorněn konstelační diagram modulace QPSK při odstupu signálu od šumu 22,8 dB (SNR), což odpovídá vztahu (1) při dosažení počtu bitů $b = 2$. Uvažován je zde průchod přenosovým prostředím pouze přímým směrem bez odrazů. Při tomto odstupu signálu od šumu probíhá přenos bezchybně, tedy chybovost BER = 0.



Obr.18 Konstelační diagram modulace QPSK, SNR=22,8dB, BER=0

Při modulaci QPSK se bez přičtení odražených signálů chybovost neprojevuje vůbec. Až při snižování odstupu signálu od šumu se začnou jednotlivé stavy rozptylovat do větších shluků bodů (Obr.1 příloha A), stále jsou však od sebe dostatečně vzdáleny, aby mohl být signál bezchybně demodulován. Minimální chybovost, v řádu setin procenta, se

začne objevovat až při snížení odstupů signálu od šumu na nulovou hodnotu (Obr.19). což po přepočtu do lineárních jednotek odpovídá hodnotám signálu a šumu o stejných amplitudách.



Obr.19 Konstelační diagram modulace QPSK, SNR=0dB, BER=0,0044

9.1.2 Modulace QPSK s jedním odrazem signálu

Při modelování šíření signálu s odrazem je ve větvi přímého šíření uvažován poměr S/N vždy na úrovni 15 dB, což je hodnota nižší než doporučovaná. Při uvažování jednoho odrazu signálu nízké úrovně, například při poměru, kdy amplituda odraženého signálu odpovídá 10 % úrovně přímého signálu, je odstup signálu od šumu:

$$20 \log \frac{U_1}{U_2} = 20 \log 0,1 = -20dB$$

kde U_1 ... je amplituda přímého signálu,

U_2 ... amplituda signálu odraženého,

Chybovost přenosu v tomto případě zůstává nulová (Obr.2 příloha A). Přičtení odražených signálů se projevuje rozprostřením konstelačního diagramu do více bodů, případně do více shluků. Malá chybovost v řádu setin procenta se začne objevovat při poměru přímého a odraženého signálu:

$$20 \log \frac{U_1}{U_2} = 20 \log 0,7 = -3,1dB$$

Chybovost 2% se při jednom odrazu objeví při poměru -2,3 dB. Chybovost 5% způsobí odražený signál, který má úroveň vzhledem k přímému signálu -1,8 dB. Konstelační diagram je na Obr.3 v příloze A. Z toho vyplývá, že při zesilování odraženého signálu, který se přičítá k signálu přímému, chybovost signálu plynule narůstá a zatímco chybovost do 5% lze teoreticky bez problémů pomocí ochranného kódování opravit, při zvětšení odraženého signálu nad 81% velikosti přímého signálu vzniká již v přenosu neopravitelná chyba.

9.1.3 Modulace QPSK se dvěma odrazy signálu

Při uvažování dvou odražených signálů probíhá přenos signálu nejprve bezchybně, jako například při poměru:

$$20 \log \frac{U_1}{U_2} = 20 \log 0,2 = -14dB$$

(Obr.4 příloha A). Pro zjednodušení jsou uvažovány dva různě zpožděné odrazy o stejné amplitudě signálu. Chybovost v řádu setin procenta se začne objevovat při poměru:

$$20 \log \frac{U_1}{U_2} = 20 \log 0,34 = -9,4dB$$

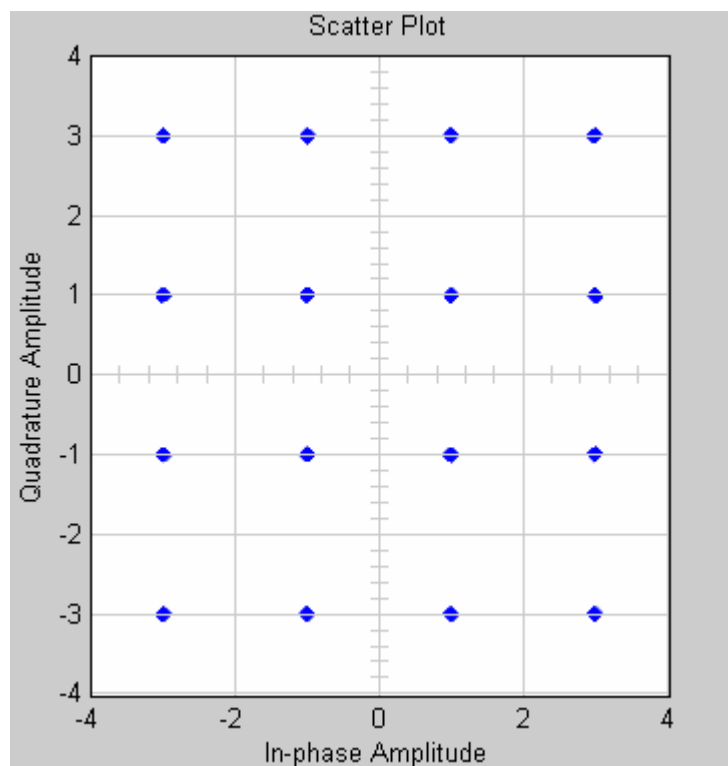
Chybovost 2% zaznamenáme při poměru -8 dB. Hranici opravitelnosti přijímaného signálu pomocí kódování při chybovosti na hodnotě 5% dosáhneme při poměru -7,3 dB.

Z toho je patrné, že pro kvalitní příjem signálu při uvažování dvou odražených signálů můžou mít amplitudy těchto signálů velikost maximálně 43 % velikosti amplitudy přímého signálu.

9.2 Modulace 16QAM

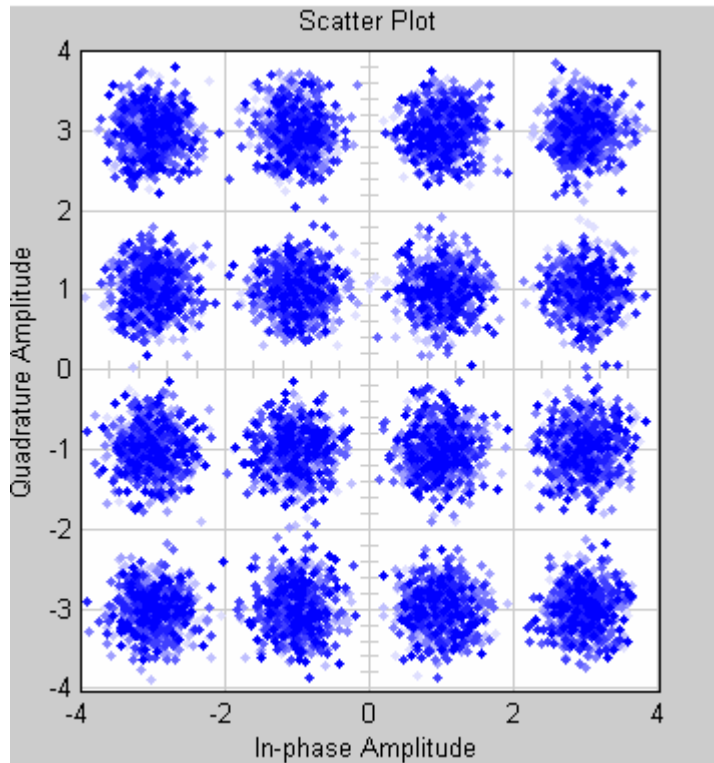
9.2.1 Modulace 16QAM bez odrazů signálu

Na Obr.20 je znázorněn konstelační diagram modulace 16QAM při odstupu signálu od šumu 34,8dB (podle vztahu 1). Situace odpovídá průchodu přenosovým prostředím pouze přímým směrem bez odrazů. Při tomto odstupu signálu od šumu pozorujeme bezchybný přenos signálu stejně jako u předchozí modulace QPSK.



Obr.20 Modulace 16 QAM, SNR=34,8dB, BER=0

Při modulaci 16QAM se minimální chybovost, v řádu setin procenta začne objevovat až při snížení odstupu signálu od šumu na 8dB, jak ukazuje Obr.21.



Obr.21 Modulace 16 QAM, SNR=8dB, BER=0,0005

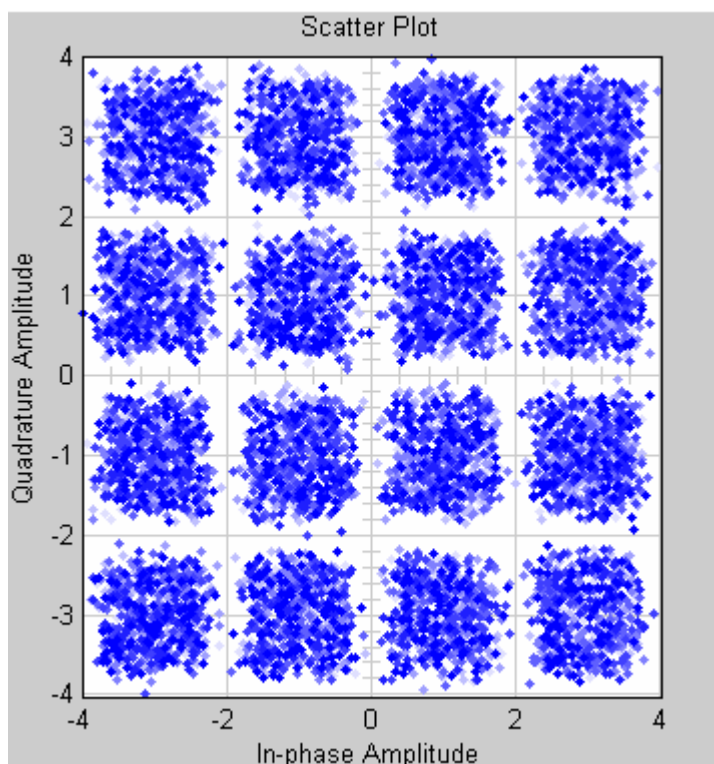
Při dalším snižování odstupů signálu od šumu chybovost roste a chybovosti 2% dosáhneme při odstupě signálu od šumu 4,8 dB. Odstup signálu od šumu dále snižujeme a chybovosti 5% dosáhneme při odstupě signálu od šumu 3,5 dB (Obr.5 příloha A).

9.2.2 Modulace 16QAM s jedním odrazem signálu

Při připojení jednoho podobvodu pro simulaci odraženého signálu a nastavení poměru přímého a odraženého signálu na:

$$20 \log \frac{U_1}{U_2} = 20 \log 0,1 = -20dB$$

je chybovost přenosu nulová (Obr.6 příloha A). Malá chybovost v řádu setin procenta se začne u modulace 16QAM s jedním odrazem objevovat při poměru přímého a odraženého signálu -15,4 dB. To je vidět na Obr. 22.



Obr.22 Modulace 16 QAM, odraz 0,17, SNR=15dB, BER=0,0003

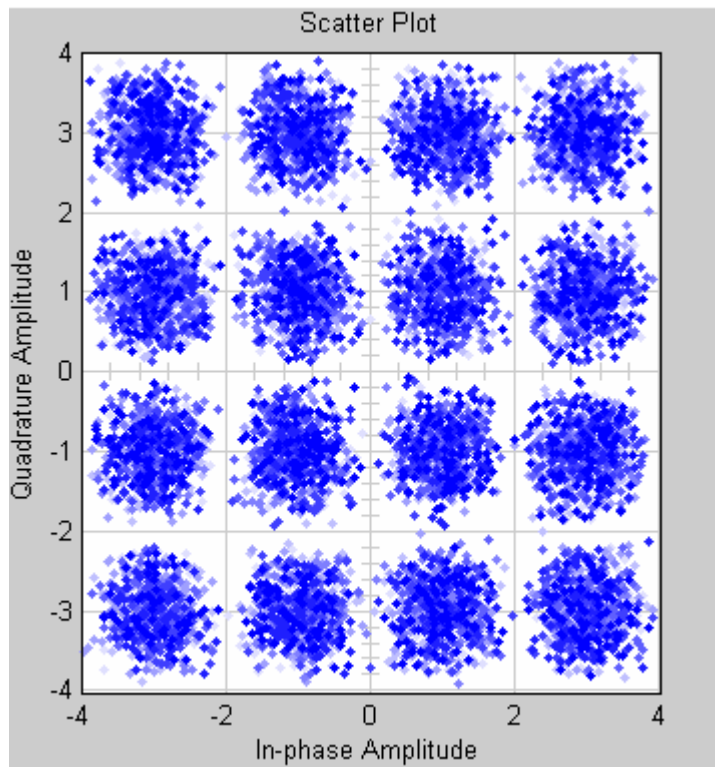
Chybovost 2% se při jednom odrazu projeví při poměru S/N = -2,3 dB. Chybovost 5% způsobí odražený signál, který je ku přímému v poměru -0,6 dB (Obr.7 v příloze A). Z toho vyplývá, že při zesilování odraženého signálu, který se přičítá k signálu přímému, chybovost signálu opět podle očekávání plynule narůstá a při zvětšení amplitudy odraženého signálu nad 25% velikosti přímého signálu vzniká již v přenosu neopravitelná chyba.

9.2.3 Modulace 16QAM se dvěma odrazy signálu

Při uvažování dvou odražených signálů probíhá přenos signálu nejprve bezchybně, jako například při poměru:

$$20 \log \frac{U_1}{U_2} = 20 \log 0,05 = -26dB$$

Chybovost v řádu setin procenta se začne objevovat při poměru -20dB. To vidíme na Obr. 23.



Obr.23 Modulace 16 QAM, 2 odrazy (jejich amplitudy jsou 10x menší než amplituda přímého signálu), SNR=15 dB, BER=0,0006

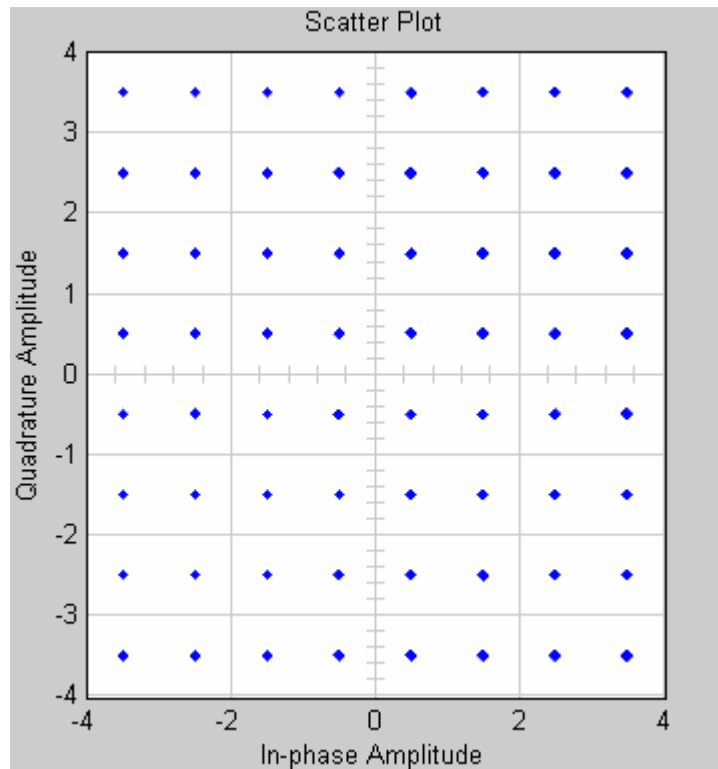
Chybovost 2% zaznamenáme při poměru -17,7 dB (Obr. 8 Příloha A). Hranice možné opravitelnosti přijímaného signálu při chybovosti na hodnotě 5% dosáhneme při poměru -16,5 dB. Z toho je patrné, že při příjmu dvou odražených signálů můžou mít jejich amplitudy velikost maximálně 15% velikosti přímého signálu, abychom signál ještě dokázali správně demodulovat. Modulace 16QAM sice poskytuje možnosti vyšší přenosové rychlosti, je ale na druhou stranu méně odolná proti šumu než modulace QPSK.

9.3 Modulace 64QAM

9.3.1 Modulace 64QAM bez odrazů signálu

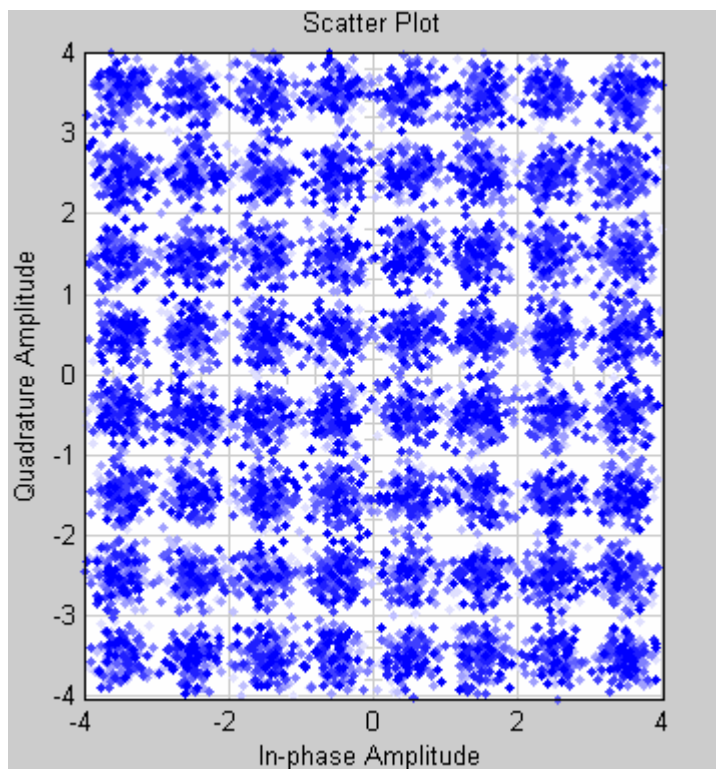
Na Obr.24 je znázorněn konstelační diagram modulace 64QAM při odstupě signálu od šumu 46,8dB, což odpovídá výpočtu podle vztahu 1. Jedná se o průchod signálu přenosovým prostředím pouze přímým

směrem bez odrazů. Při tomto odstupu signálu od šumu pozorujeme bezchybný přenos signálu stejně jako u předchozích modulací.



Obr.24 Modulace 64 QAM, bez odrazu , SNR=46,8dB, BER=0

Chybovost v řádu setin procenta se objeví při odstupu signálu od šumu 13 dB. Chybovosti 2% při použití této modulační techniky dosáhneme již při poměru signálu k šumu 11dB, jak je vidět na Obr.25.



Obr.25 Modulace 64 QAM, bez odrazu , SNR=11dB, BER=0,02

Při dalším snižování poměru signálu ku šumu obdržíme chybovost 5%, a to při SNR=9,8 dB(Obr.9 Příloha A).

9.3.2 Modulace 64QAM s jedním odrazem signálu

Při modulaci 64QAM se nízká chybovost v řádu tisícín procenta objeví již při poměru:

$$20 \log \frac{U_1}{U_2} = 20 \log 0,01 = -40dB$$

Chybovosti 2% se dosáhne již při poměru -23 dB (Obr.10 Příloha A). Chybovost 5% způsobí odražený signál, který je k přímému signálu v poměru -20,1 dB. Z toho vyplývá, že při zesilování odraženého signálu, který se přičítá k signálu přímému, chybovost signálu opět plynule narůstá, ale neopravitelná chyba vzniká v tomto případě již při zvětšení úrovně odraženého signálu nad 9% úrovně přímého signálu

9.3.3 Modulace 64QAM se dvěma odrazy signálu

I při uvažování dvou odražených signálů se chybovost v řádu tisícín procenta objeví již při poměru -40 dB mezi přímým a odraženým signálem. Chybovost 2% dostaneme v tomto případě při poměru -26 dB (Obr.11 Příloha A). Hranice opravitelnosti přijímaného signálu při chybovosti na hodnotě 5% dosáhneme při poměru -24,4 dB. Z toho je patrné, že při příjmu dvou odražených signálů můžou mít jejich amplitudy velikost maximálně 6% velikosti přímého signálu, abychom signál ještě dokázali správně demodulovat. Modulace 64QAM nabízí největší přenosovou kapacitu, protože přenáší 6 bitů současně, na druhou stranu má ale také nejmenší odolnost proti šumu a chybám v důsledku příjmu odražených signálů. Druh použité modulace musíme tedy volit s ohledem na konkrétní požadavky a charakter přenosového prostředí, ve kterém se bude vysílaný signál šířit.

9.4 Porovnání modulačních technik

Tab.3 porovnává parametry zmíněných modulačních technik z pohledu šumových vlastností a množství a velikosti odražených signálů. Pro různé typy modulací ukazuje odstupy signálu od šumu S/N (případně poměrné velikosti amplitud odražených signálů vzhledem k signálu přímého šíření) pro různé chybovosti (BER), které se získají z porovnání vstupního a výstupního datového toku systému. Pokud dodržíme konstantní maximální výkon pro vysílání s jakoukoliv modulací, můžeme pozorovat snižující se odolnost vyspělejších technik proti šumu. Pokud hledáme chybovost v demodulovaném signálu, tak při modulaci QPSK ani při poměru $S/N=0$ neobdržíme výraznější zhoršení kvality přijímaného signálu. Naproti tomu musíme při použití modulace 64QAM dodržet pro bezchybný přenos odstup S/N alespoň 13 dB.

Pro simulace šíření signálu s uvažováním vícecestného šíření je v modelech uvažován ve všech kanálech odstup signálu od šumu 15 dB. Ten zaručuje bezchybný přenos v každém z kanálů (v přímém

i zpožděných kanálech) při všech typech modulací. Při vícecestném šíření je tedy analyzován pouze vliv odrazů signálu a příjem signálu se již nezhoršuje snižováním odstupů od šumu. Opět se zde ukazuje, že při použití složitějších modulačních technik významně klesá odolnost vůči odrazům.

Tab.3 Srovnání modulačních technik

		Typ modulace					
		QPSK		16QAM		64QAM	
Typ šíření signálu	BER	S/N [dB]	Amplituda odrazu	S/N [dB]	Amplituda odrazu	S/N [dB]	Amplituda odrazu
Šíření bez odrazu	norma	22,8	-	34,8	-	46,8	-
	nízká	0	-	8	-	13	-
	2%	-	-	4,8	-	11	-
	5%	-	-	3,5	-	9,8	-
Šíření s jedním odrazem	0%	15	0,2	15	0,1	15	-
	nízká	15	0,7	15	0,17	15	0,01
	2%	15	0,77	15	0,23	15	0,07
	5%	15	0,81	15	0,25	15	0,09
Šíření se dvěma odrazy	0%	15	0,2	15	0,05	15	-
	nízká	15	0,34	15	0,1	15	0,01
	2%	15	0,4	15	0,13	15	0,05
	5%	15	0,43	15	0,15	15	0,06

10 Závěr

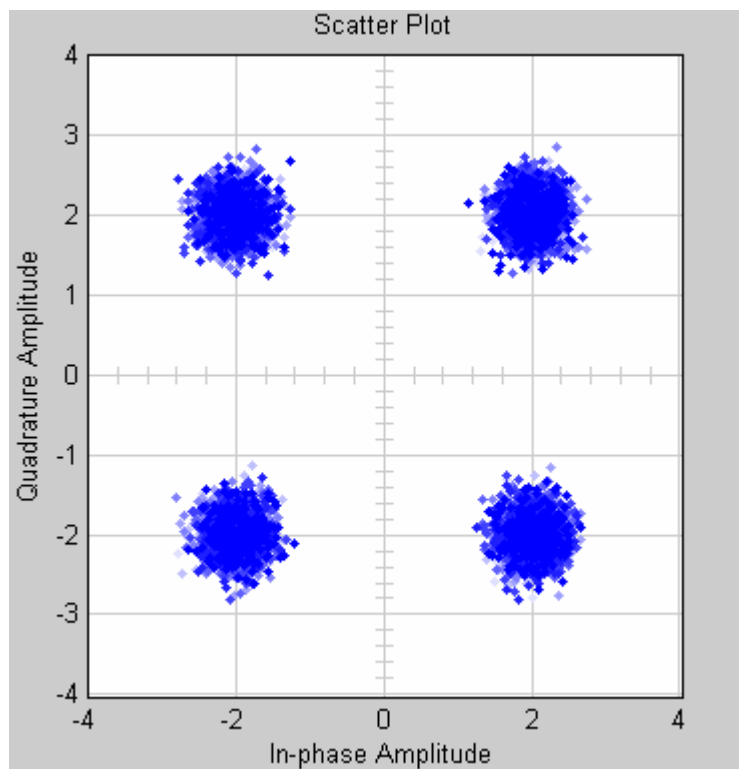
Z uvedených vlastností a parametrů digitálního televizního vysílání ve standardu DVB-T vyplývá mnoho výhod proti vysílání analogovému a lze tak zdůvodnit, že na tento druh vysílání přechází a bude přecházet stále více zemí. Tento předpoklad vyplývá i z toho, že pro další rozšiřování klasického analogového způsobu vysílání není ve frekvenčním spektru místo.

Na základě výsledků provedených simulací můžeme porovnat odolnost modulačních technik QPSK, 16QAM a 64QAM proti šumu a proti příjmu odražených signálů. Ze srovnání vyplývá, že modulace přenášející méně bitů současně jsou odolnější proti šumu a odrazům. Naproti tomu u vyspělejších modulačních technik, které přinášejí zvýšení přenosové rychlosti a umožňují tak rozšířit možnosti používaných multiplexů, pozorujeme klesající odolnost proti rušení a odrazům. Nejvhodnější modulaci musíme tedy volit až na základě konkrétních požadavků na přenosovou rychlost a podle vlastností přenosového kanálu, ve kterém se bude vysílat.

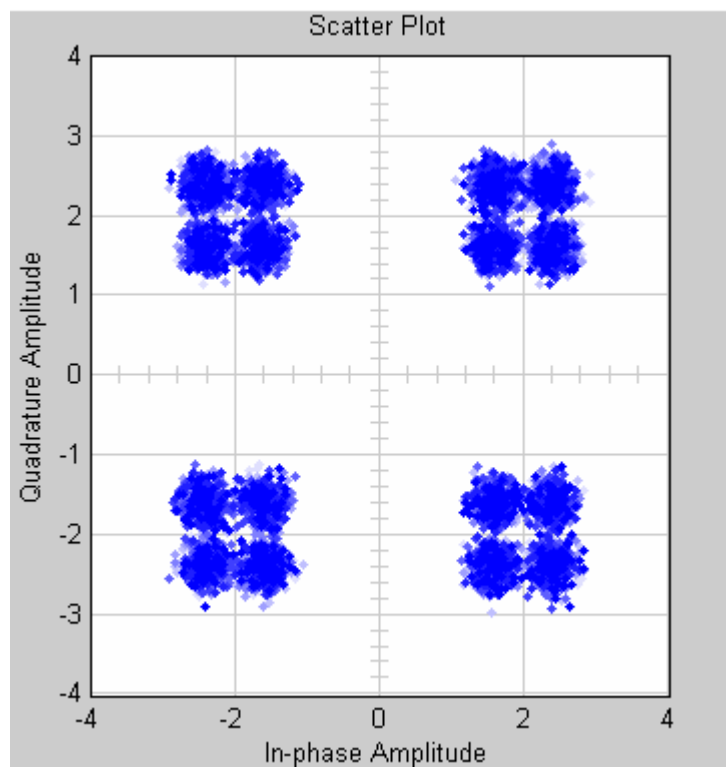
Použitá literatura

- [1] ČESKÝ TELEKOMUNIKAČNÍ ÚŘAD. *Technický plán přechodu zemského analogového televizního vysílání na zemské digitální televizní vysílání* [online]. 2006 [cit. 2007-03-27]. Dostupný z WWW:
www.ctu.cz/1/download/Navrhy/navrhy_2006/OOP_15_XX_2006_Y_III-vyr_31_10_2006.doc
- [2] LÉR, M. *Co přinese digitální kabelové vysílání DVB-C* [online]. 2005 [cit. 2007-03-20]. Dostupný z WWW:
<http://www.digizone.cz/clanky/digitalni-kabelove-vysilani-dvb-c/>
- [3] LIŠKA, D. *Digitální televize DVB* [online]. 2004 [cit. 2007-03-26]. Dostupný z WWW: www.mediaresearch.cz/download-TZ.php?adres=doc/download/DVBT.pdf&nazev=DVBT.pdf
- [4] LIŠKA, D. *Digitální terestriální televize DVB-T: Technické minimum - COFDM* [online]. 2002 [cit. 2007-03-18]. Dostupný z WWW: http://www.digitalnitemvize.cz/magazin/dvb-t/dvb-t-technologie/technicke_minimum_cofdm.html
- [5] LIŠKA, D. *Digitální terestriální televize DVB-T: Technické minimum - MPEG-2* [online]. 2002 [cit. 2007-02-23]. Dostupný z WWW: http://www.digitalnitemvize.cz/magazin/dvb-t/dvb-t-technologie/technicke_minimum_mpeg-2.html
- [6] LIŠKA, D. *DVB-T ve světě a v České republice* [online]. 2003 [cit. 2007-03-18]. Dostupný z WWW:
http://www.digitalnitemvize.cz/magazin/dvb-t/prechod-na-dvb-t/dvbt_ve_sveteacr.html
- [7] MIKULÁŠTÍK, K. *Pozemní digitální vysílání - princip OFDM* [online]. 2004 [cit. 2007-03-23]. Dostupný z WWW:
<http://www.radiotv.cz/clanky/2831/pozemni-digitalni-vysilani--princip-ofdm.html>
- [8] NOBILIS, J. *Teorie obvodů X (Digitalizace obrazového signálu)*. 1. vyd. Pardubice: SPŠE Pardubice, 2002. 68 s.

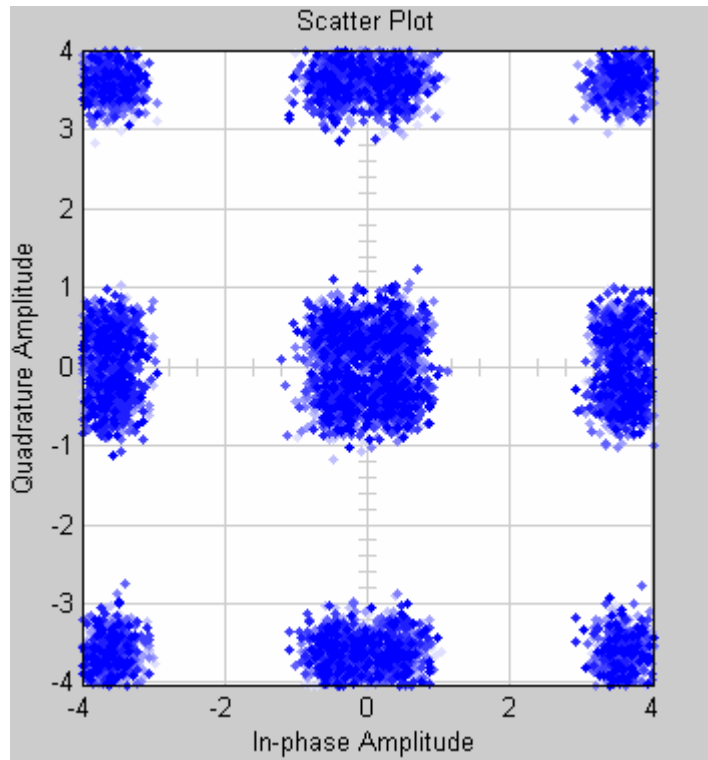
- [9] NOBILIS, J. *Teorie obvodů VII (Základní modulační principy, vysílače, přijmače)*. 1. vyd. Pardubice: SPŠE Pardubice, 2003. 99 s.
- [10] POISL, Z. *Jak funguje analogové a digitální vysílání* [online]. 2006 [cit. 2007-03-13]. Dostupný z WWW: <http://www.digizone.cz/clanky/jak-funguje-analogove-a-digitalni-vysilani/>
- [11] ŠEDIVÝ, J. *Základy digitální televize. Amatérské rádio*. Praha:2006, roč. XI., č. 4., s. 2-8. ISSN 1211-3557
- [12] *Wikipedie:DVB-T* [online]. 2006 [cit. 2007-05-05]. Dostupný z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/DVB-T>



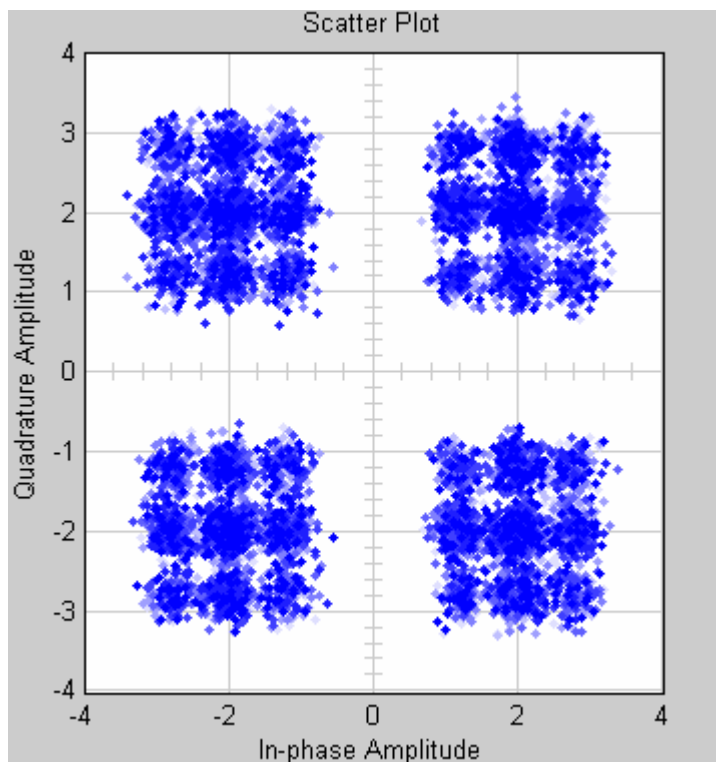
Obr.1 Modulace QPSK, SNR=10dB, BER=0



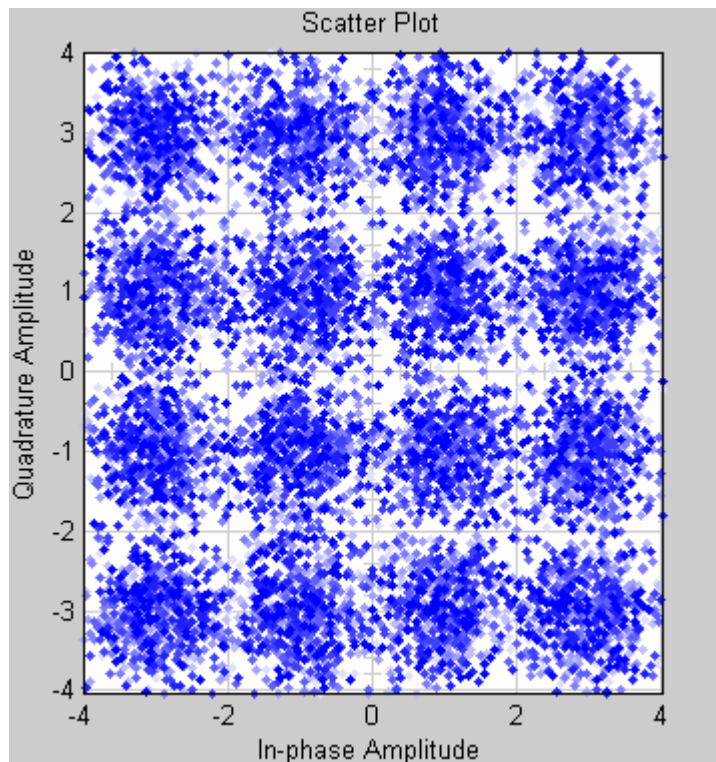
Obr.2 Modulace QPSK, 1 odraz (amplituda = 0,2x amplituda přímého signálu), SNR=15dB, BER=0



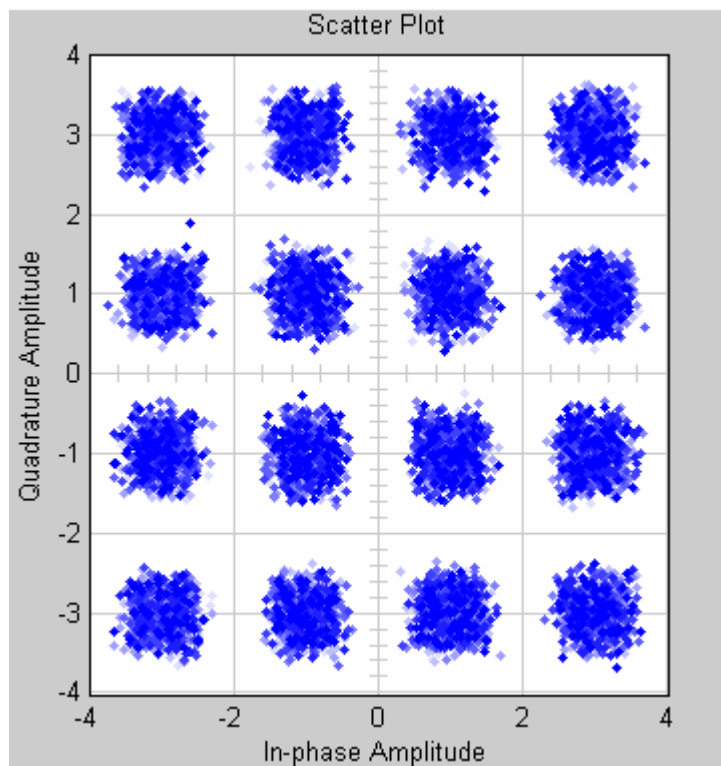
Obr.3 Modulace QPSK, 1 odraz (amplituda = 0,81x amplituda přímého signálu), SNR=15dB, BER=0,05



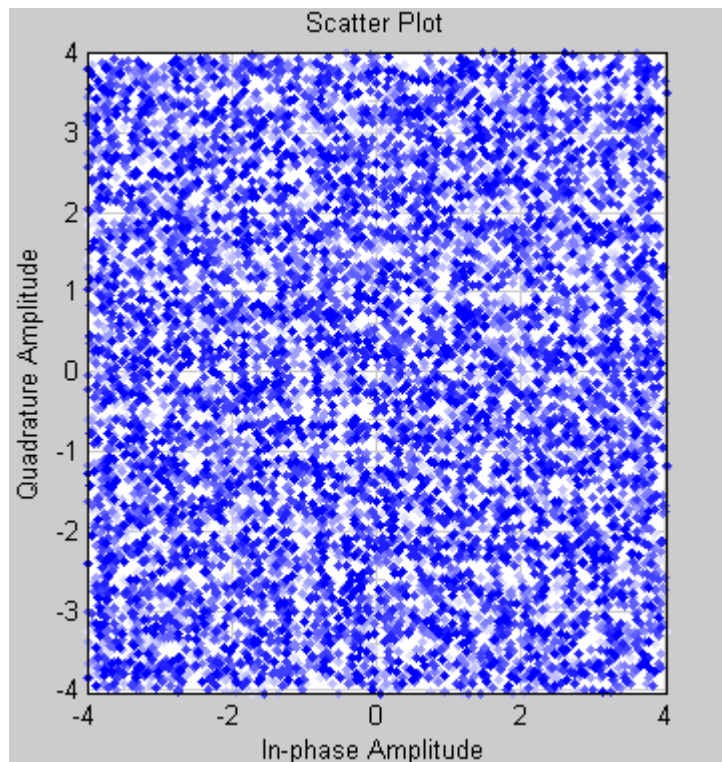
Obr.4 Modulace QPSK, 2 odrazy (velikost amplitud je 0,2x amplituda přímého signálu), SNR=15dB, BER=0



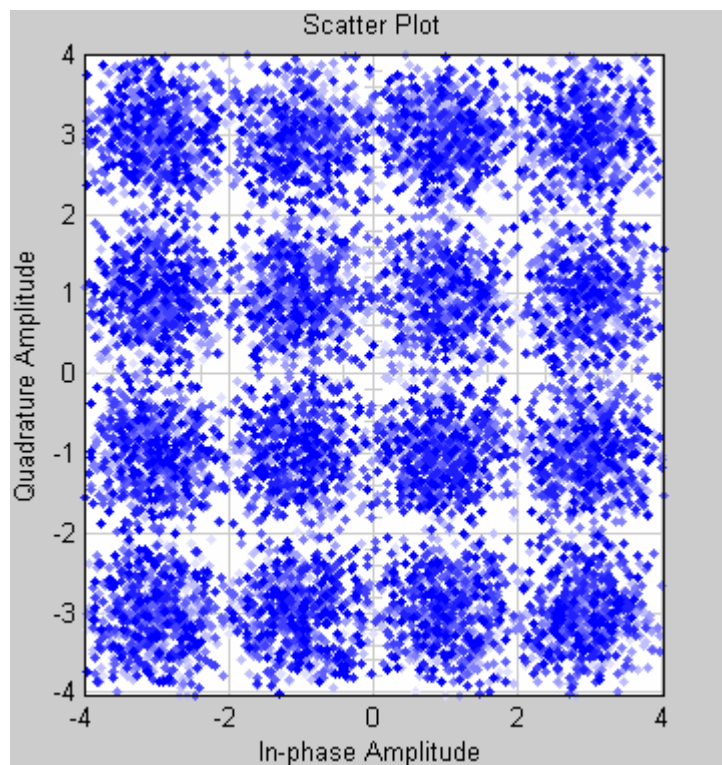
Obr.5 Modulace 16 QAM, SNR=3,5dB, BER=0,05



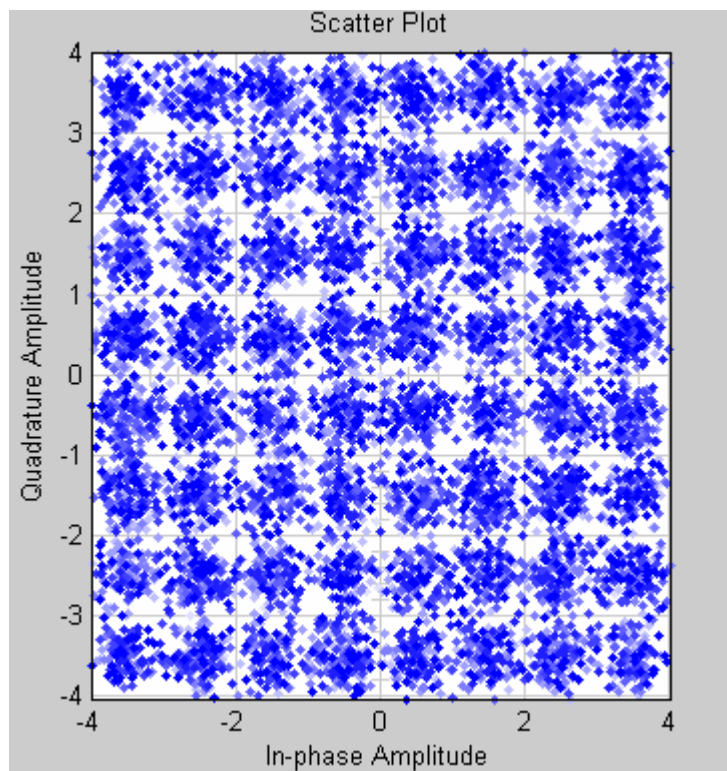
Obr.6 Modulace 16 QAM, 1 odraz (amplituda = 0,1x amplituda přímého signálu), SNR=15dB, BER=0



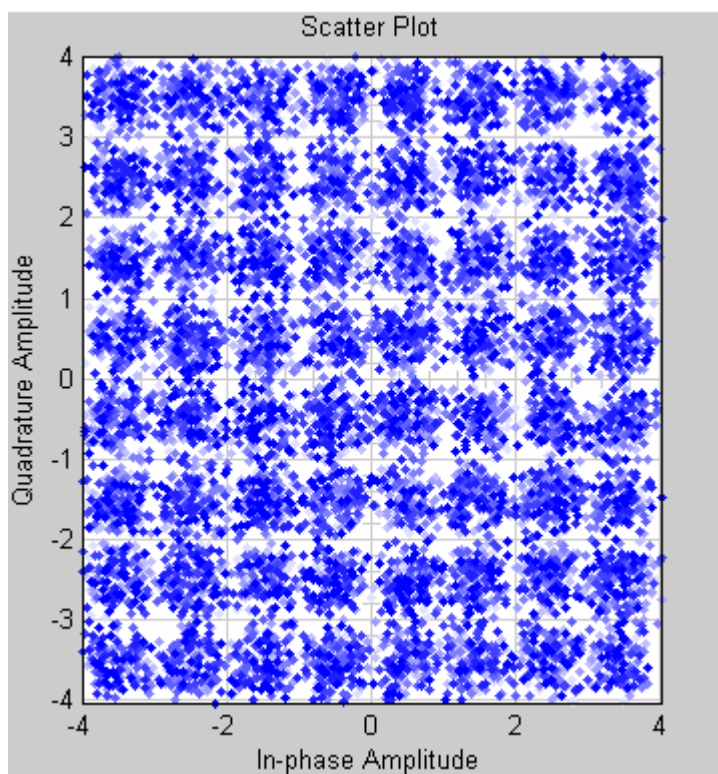
Obr.7 Modulace 16 QAM, 1 odraz (amplituda = 0,25x amplituda přímého signálu), SNR=15dB, BER=0,05



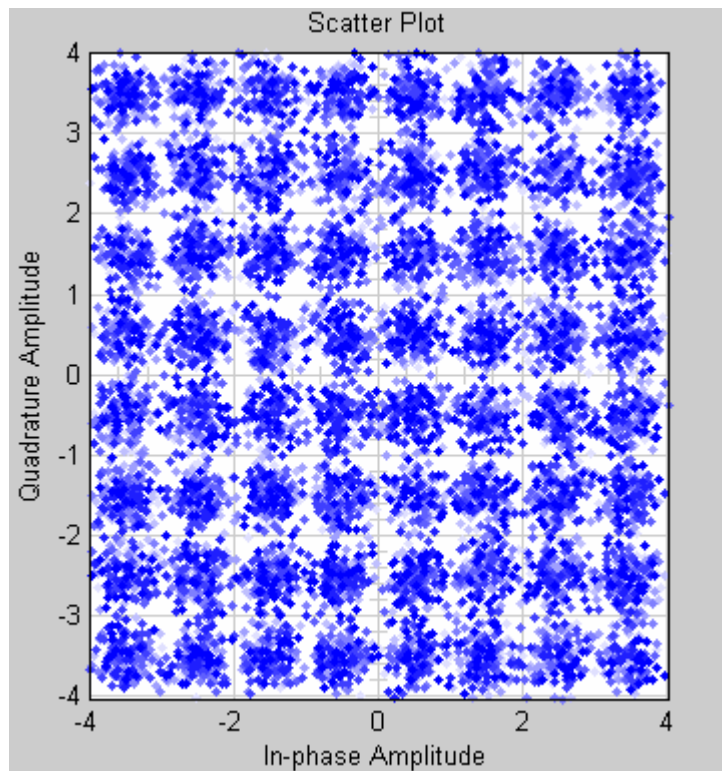
Obr.8 Modulace 16 QAM, 2 odrazy (velikost amplitud je 0,13x amplituda přímého signálu), SNR=15dB, BER=0,02



Obr.9 Modulace 64 QAM, bez odrazu , SNR=9,8dB, BER=0,05



Obr.10 Modulace 64 QAM, 1 odraz (amplituda = 0,07x amplituda přímého signálu) , SNR=15dB, BER=0,02



Obr.11 Modulace 64 QAM, 2 odrazy (velikost amplitud je 0,05x amplituda přímého signálu), SNR=15dB, BER=0,02

Údaje pro knihovnickou databázi

Název práce	Simulace a analýza digitálního televizního vysílání
Autor práce	Marek Jonáš
Obor	Komunikační a mikroprocesorová technika
Rok obhajoby	2007
Vedoucí práce	Ing. Zdeněk Němec
Anotace	Práce se zabývá popisem vlastností digitálního televizního vysílání a jeho porovnáním s vysíláním analogovým. Popisuje stav zavádění celoplošného digitálního vysílání v České republice. Dále se pak věnuje simulaci modulačních technik používaných v systému digitálního vysílání pomocí modelu vytvořeného v SW prostředí Matlab a Simulink.
Klíčová slova	digitální televizní vysílání, modulace, šíření signálu, DVB, DVB-T, MPEG, QPSK, 16QAM, 64QAM