

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

*Edice PhD Thesis, sv. 410*

*ISSN 1213-4198*

*thesis* IS

*Ing. Tomáš Kratochvíl*

**Analýza přenosových zkreslení  
číslicových obrazových signálů**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY  
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

**Ing. Tomáš Kratochvíl**

**ANALÝZA PŘENOSOVÝCH ZKRESLENÍ  
ČÍSLICOVÝCH OBRAZOVÝCH SIGNÁLŮ**

TRANSMISSION DISTORTION ANALYSIS  
OF DIGITAL VIDEO SIGNALS

Zkrácená verze Ph.D. Thesis

Obor: Elektronika a sdělovací technika  
Školitel: Prof. Ing. Václav Říčný, CSc.  
Oponenti: Prof. Ing. Miloš Klíma, CSc.  
Prof. Ing. Dušan Levický, CSc.  
Datum obhajoby: 27. června 2006

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

digitální televize, číslicový obrazový signál, zdrojové kódování, kanálové kódování, linkové kódování, zabezpečení proti přenosovým chybám, dopředná chybová korekce, model přenosového kanálu, modelování přenosu, chybovost přenosu, kvalita obrazu, přenosové zkreslení, základní pásmo, DTV, DVB, FEC, PQE

## **KEY WORDS**

digital television, digital video signal, source coding, channel coding, link coding, error-protection coding, forward error correction, transmission channel model, transmission simulation, transmission error rate, picture quality, transmission distortion, baseband, DTV, DVB, FEC, PQE

## **MÍSTO ULOŽENÍ PRÁCE**

Vědecké oddělení děkanátu FEKT VUT v Brně, Údolní 53, Brno, 602 00

© Tomáš Kratochvíl, 2007

ISBN 978-80-214-3412-7

ISSN 1213-4198

# OBSAH

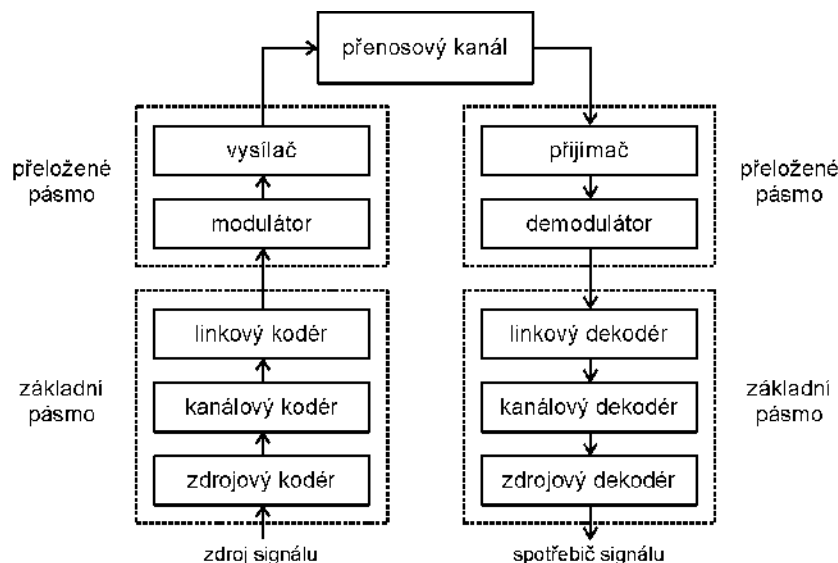
Klíčová slova .....	2
Obsah .....	3
1 ÚVOD .....	5
1.1 Současný stav řešené problematiky .....	5
1.2 Zjednodušený model přenosu statických obrazů .....	6
1.3 Cíle disertační práce .....	7
2 ZÁKLADNÍ FUNKČNÍ BLOKY MODELU PŘENOSU .....	8
2.1 Zdrojový kodér a dekodér .....	8
2.2 Kanálový kodér a dekodér .....	8
2.3 Linkový kodér a dekodér .....	9
2.4 Model přenosového kanálu v základním pásmu .....	9
3 HODNOCENÍ KVALITY PŘENOSU A OBRAZU .....	10
3.1 Objektivní a subjektivní hodnocení kvality .....	10
3.2 Kritéria výběru obrazů pro hodnocení .....	12
4 PROGRAMOVÉ APLIKACE PRO ANALÝZU PŘENOSU .....	14
4.1 Modelování přenosu obrazového signálu .....	14
4.2 Hodnocení kvality přeneseného obrazu .....	17
5 VÝSLEDKY ANALÝZY MODELOVANÉHO PŘENOSU .....	19
5.1 Analýza vlivu komponentů modelovaného přenosu na chybovost přenosu a kvalitu obrazu .....	19
5.2 Analýza vlivu rušení v přenosovém kanále na chybovost přenosu a kvalitu obrazu .....	22
5.3 Analýza vlivu parametrů přenosového kanálu na chybovost přenosu a kvalitu obrazu .....	23
6 ZÁVĚR .....	27
Použitá literatura .....	29
Curriculum Vitae .....	31
Abstract .....	32



# 1 ÚVOD

## 1.1 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Evropský projekt digitální televize a jeho standard pro digitální televizní vysílání DVB (Digital Video Broadcasting) [1] patří mezi jednu z nejrychleji se vyvíjejících technologií pro přenos obrazové a zvukové informace ke spotřebiteli, resp. divákovi. S přenosem signálu digitální televize (DTV) je na vysílací straně obecného přenosového řetězce (obr. 1.1) [4] spojeno *zdrojové kódování* obrazu k odstranění redundance, irelevance a efektivní komprimace objemu i rychlosti toku přenášených dat [5].



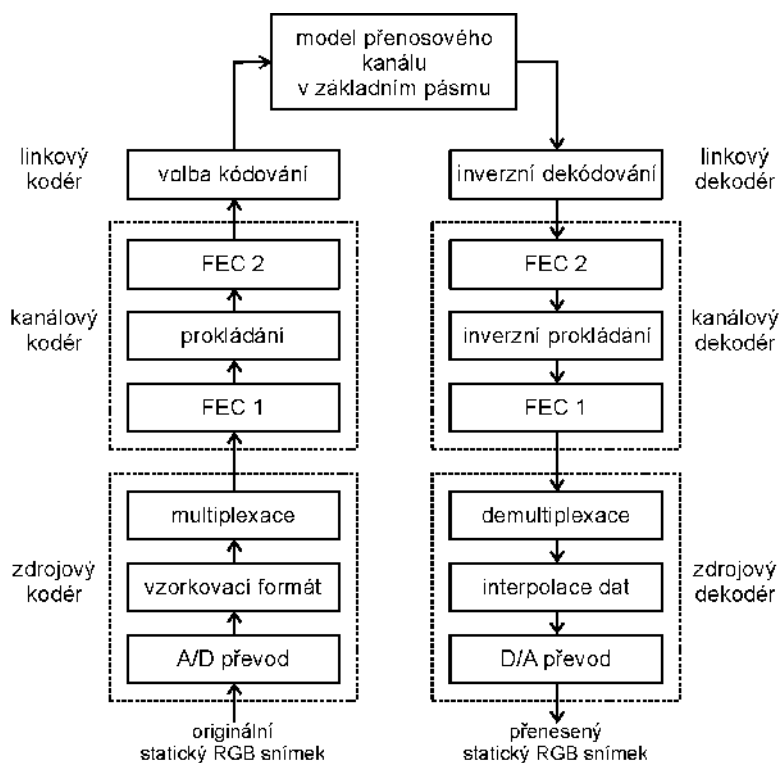
Obr. 1.1 Obecný model přenosu číslicové informace (např. DTV).

*Kanálové kódování* přenosových signálů představuje zabezpečení dat dopřednou chybovou korekcí FEC (Forward Error Correction) k odstranění nebo omezení vlivu přenosových zkreslení a přenosových chyb na přenášenou informaci [2]. *Linkové kódování* zajišťuje zrovnoměnění spektra a omezení možnosti ztráty synchronizace v přijímači [3]. *Digitální modulace* je závislá na druhu přenosového prostředí a vlastnostech přenosového kanálu (satelitní, kabelový, pozemní přenos). Umožňuje efektivní využití kmitočtového pásma a přidělené přenosové rychlosti [5]. Na přijímací straně jsou na uvedené principy kódování aplikovány odpovídající demodulace a dekodéry.

Důležitou součástí zdrojového dekodéru přenášených dat obrazu je způsob potlačení nebo odstranění chyb způsobených poškozením přenášeného kódovaného a modulovaného signálu *přenosovým prostředím*, resp. *přenosovým kanálem* [5]. Kanálový kodér FEC [11] zajišťuje zabezpečení proti symbolovým, bitovým a shlukovým chybám, které mohou nastat v průběhu přenosu. Samotný přenosový kanál pak lze chápat jako prostředí s proměnnými parametry ovlivňujícími přenos, jehož kvalitu lze hodnotit pomocí metod popisujících a kvantifikujících vliv *přenosových chyb* na přenášené signály a odpovídající obrazy [33].

## 1.2 ZJEDNODUŠENÝ MODEL PŘENOSU STATICKÝCH OBRAZŮ

Pro analýzu a modelování přenosových zkreslení číslicových obrazových signálů byl vytvořen *zjednodušený model*, který modeluje vybrané oblasti přenosu DTV a jeho přenosového standardu DVB v *základním kmitočtovém pásmu* [26]. Navržený model (obr. 1.2) pracuje se vstupním originálním nekomprimovaným RGB obrazem, který je postupně rozložen a zpracován do formy přenosových signálů. Ty jsou dále kódovány, přenášeny a zpětně dekódovány a na výstupu je sestaven z přenesených signálů opět RGB obraz.



Obr. 1.2 Model pro analýzu přenosových zkreslení číslicových obrazových signálů.

Model pokrývá vliv:

- *zdrojového kódování a dekódování* obrazu (A/D a D/A převod, volby vzorkovacího formátu, kvality a formátu přenosového datového multiplexu) [6],
- *kanálového kódování a dekódování* (formou dopředné chybové korekce FEC s nastavitelnými parametry, volba stupně zabezpečení proti chybám) [4] [14] [15],
- *linkového kódování a dekódování* (volba reprezentace přenášených symbolů) [3].

Samostatným funkčním blokem je *model přenosového kanálu* v základním kmitočtovém pásmu s nastavitelnými přenosovými parametry (charakter kanálu, účinnost přenosu v jednotlivých pásmech, zkreslení přenášené informace) [15]. Navržený model je koncipován tak, aby volbou jednotlivých parametrů každého bloku bylo možno vytvořit takové přenosové podmínky, které by umožňovaly vyhodnotit vliv jednotlivých bloků na přenášené číslicové signály a zejména přenášený obraz v prostorové oblasti [27] [28].

Kritéria hodnocení pak lze rozdělit na oblast hodnocení signálů, kdy je v modelu k dispozici vstupní a výstupní číslicový signál modelu přenosového kanálu a dále oblast hodnocení obrazů [16], ve které je obdobně k dispozici vstupní (originální) a výstupní (přenesený) RGB obraz. V prvním případě hodnocení je jedním z hlavních kritérií *chybovost přenosu*, v druhém případě jednotlivé *objektivní metriky* [7] [13] a parametry vypočítané z matic obou obrazů a *subjektivní hodnocení* pozorovatelem nebo skupinou pozorovatelů [18].

### 1.3 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Disertační práce je zaměřena do oblasti *analýzy a modelování zpracování a přenosu obrazových signálů* DTV a jejího přenosového standardu DVB pro digitální televizní vysílání. Jednotlivé cíle lze specifikovat takto:

- *Analýza číslicových obrazových signálů a jejich přenosových parametrů* - cílem analýzy je tvorba a vyjádření vlastností jednotlivých typů vzorkovacích formátů vhodných pro přenos DTV. Výsledkem analýzy by měl být popis a srovnání jednotlivých vzorkovacích formátů a způsobů přenosu včetně charakteristiky jejich použití avšak *bez zaměření na komprimaci obrazu* ve zdrojovém kodéru.
- *Model přenosového kanálu v základním pásmu s proměnnými parametry* - cílem modelování vlivu přenosového kanálu je matematický popis *modelu přenosového kanálu v základním pásmu*, který by postihoval lineární a případná nelineární zkreslení aplikované na obrazové přenosové signály a odpovídající obrazy. Model přenosového kanálu by měl mít nastavitelné přenosové parametry a to zejména možnost definice modulu přenosu v propustném a nepropustném pásmu, volbu mezních frekvencí, strmost přechodu modulu z propustného a nepropustného pásma a další. Výsledkem by mělo být vyjádření vlivu parametrů modelu přenosového kanálu na přenos číslicových signálů (objektivní hodnocení symbolové a bitové chybovosti) a na přenášenou obrazovou informaci (objektivní hodnocení kvality obrazu).
- *Interaktivní programové prostředky pro komplexní analýzu přenosu* - cílem tvorby programových prostředků je vytvořit výkonné a komplexní nástroje pro počítačové *modelování přenosu obrazové informace* modelem přenosového kanálu, které umožní interaktivní ovlivňování přenosových parametrů a nastavení jednotlivých funkčních bloků přenosu. Programové prostředky by měly umožňovat výběr zkušebních obrazů, tvorbu vzorkovacích formátů a přenosových multiplexů číslicových dat, vytvoření modelu přenosového kanálu v základním pásmu s proměnnými parametry, výpočet objektivních kritérií přenosu, vizualizaci vlivu parametrů na přenos a interaktivní uživatelské prostředí.
- *Komplexní analýza modelovaného přenosu a její vyhodnocení* - cílem komplexní analýzy modelovaného přenosu je *analýza vlivu jednotlivých komponentů modelovaného přenosu na chybovost přenosu*. Měl by být kvantifikován vliv parametrů zdrojového, kanálového a linkového kodéru a vlastností přenosového kanálu na kritéria objektivního hodnocení kvality přenosu a kvality obrazu.



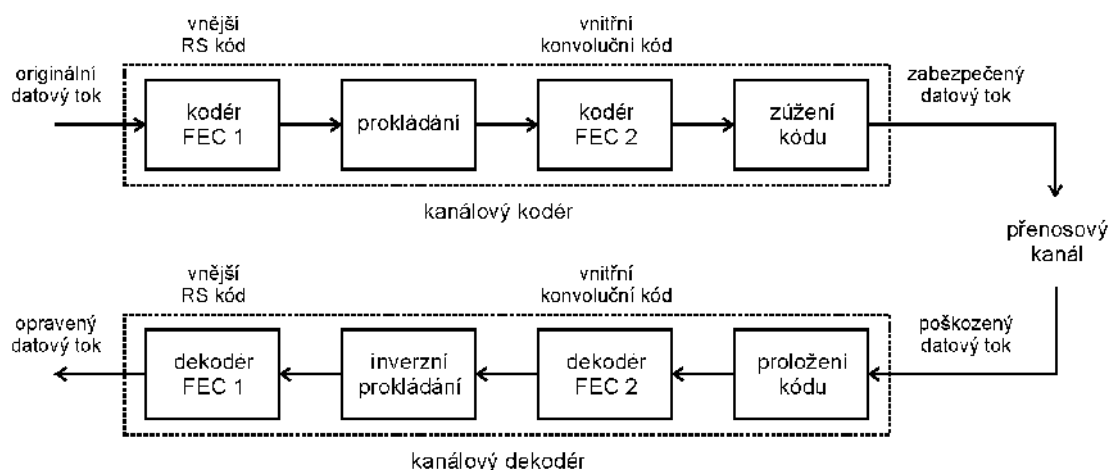
## 2 ZÁKLADNÍ FUNKČNÍ BLOKY MODELU PŘENOSU

### 2.1 ZDROJOVÝ KODÉR A DEKODÉR

Nekomprimovaným obrazem pro zpracování a přenos je neprokládaný obraz tvořený aditivním mísením signálů barev  $R$ ,  $G$ ,  $B$  obrazových matic v základním televizním rozlišení 576 řádků a 720 obrazových bodů na řádku a přenosovými signály jsou tvořené jasovými vzorky  $Y$  spolu s chrominančními vzorky  $C_R$  a  $C_B$  [6].

*Vzorkovací formáty* jsou charakterizovány vzorkovacími frekvencemi pro jasové a chrominanční vzorky a tomu odpovídajícím obrazovému rozlišení. Vycházejí z doporučení ITU-R 601 [11], uvažují PCM kódování a decimaci (snížení) standardního rozlišení. Příklady využití jednotlivých formátů složkových digitálních soustav jsou pro formát 4:4:4 špičkové a speciální studiové  $RGB$  aplikace, 4:2:2 špičkové studiové aplikace a magnetický záznam obrazu, 4:2:0 a 4:2:0 (SIF) přenosové aplikace a zpravodajské pořady, videokonference apod. [12]

Dekódování a rekonstrukce obrazu představuje zpětný převod obrazových dat z paralelního nebo sériového datového multiplexu na oddělené obrazové matice  $Y$ ,  $C_R$ ,  $C_B$ , které jsou dále *interpolovány* na své původní základní obrazové rozlišení [8] (pokud byly v obrazovém kodéru podvzorkovány) a převedeny na matice barev  $R$ ,  $G$ ,  $B$ , které jsou opět sestaveny v  $RGB$  nekomprimovaný obraz.



Obr. 2.1 Blokové schéma kanálového kodéru a dekodéru zabezpečení dat.

### 2.2 KANÁLOVÝ KODÉR A DEKODÉR

Přenos DTV ve své základní podobě je distribuční službou a použita *dopředná chybová korekce* FEC (Forward Error Correction) [1] je korekčním typem zabezpečení, kdy při detekci chyby při příjmu je provedena *oprava chybného slova* na základě *známého zabezpečovacího algoritmu a opravného mechanismu*. Způsob ochrany je přizpůsoben přenosovému prostředí a možnosti druhu rušení a přenosových chyb. Ty mohou být *ojedinělé* (bitové) měnící hodnotu bitů z 0 na 1 a naopak, nebo *shlukové* (burstové) při poruchách skupiny bitů a nejrozsáhlejší chyby *symbolové* (byteové) měnící zcela celé symboly, i když nemusí být všechny bity uvažovaného symbolu nesprávně přijaté [5].

Podle druhu chyby se ve vysílači a přijímači zařazují do kaskády kodéry a dekodéry (obr. 2.1) [4], kdy hlavní ochranu tvoří zabezpečení FEC 1 (vnější ochranný RS kód) a FEC 2 (vnitřní ochranný konvoluční kód) s případným zúžením, doplněný prokládáním a jeho inverzí v přijímači pro rozptýlení shlukových chyb [19]. Bloky dekodéru musí být řazeny v obráceném pořadí než na straně kodéru. Přenosové chyby jsou dekodérem buď ignorovány (případ překročení kapacity kódu při velké chybovosti přenosu a výskytu chyb) nebo jsou nalezeny jejich pozice v datovém toku a automaticky opraveny jednotlivé symboly a bity [2].

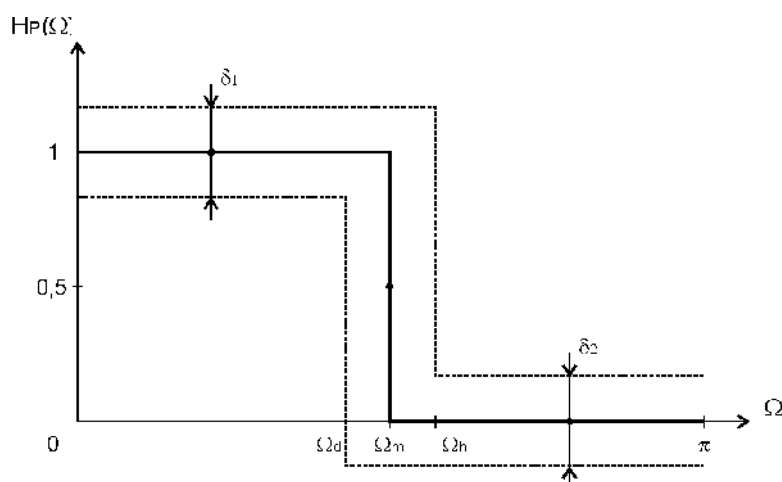
### 2.3 LINKOVÝ KODÉR A DEKODÉR

Nejpoužívanější linkové kódy v oblasti DTV představuje NRZ a RZ ve svých bipolárních (dvoustavových) a unipolárních variantách [3]. Protichybové působení kódu spočívá v jeho konečném počtu stavů a pravidlech výskytu po sobě následujících stavů. Počet používaných stavů je nepřímo úměrný intenzitě rušivých signálů. Největší odolnost proti rušení má dvoustavový signál NRZ bipolární, kdy maximální odolnost je dosažena nastavením rozhodovací úrovně ve středu obou krajních stavů  $[-A, A]$ . Tento kód také bývá označován jako NRZ-L. Pokud je v kódu NRZ využit pro změnu polarity bit 1 a pro její setrvání bit 0 v binární sekvenci, je tento kód označován jako NRZ-M. Konečně NRZ-S kód má stejné vlastnosti jako NRZ-M, jen značí změnu polarity opačně, tedy symbolem 0. Společnou vlastností kódu RZ je, že zachovávají časování (synchronizaci) binárního signálu díky změně polarity v polovině periody při každém binárním symbolu. Dekódování linkového kódu lze při modelování realizovat pro každý kód *vyhledávací tabulkou* možných symbolů [2].

### 2.4 MODEL PŘENOSOVÉHO KANÁLU V ZÁKLADNÍM PÁSMU

Pro modelování vlastností přenosového kanálu v základním pásmu byly porovnány vlastnosti *spojitého* a *diskrétního* (impulsního) *lineárního obrazového kanálu* [15]. Komplexní model kanálu [21] obsahuje vliv lineárního a nelineárního modulu přenosu, vliv konečné a nekonečné impulsní odezvy a přechodové charakteristiky, vliv konstantního modulu a minimální fáze k dosažení stability a další [25]. Z uvedeného výčtu je zřejmé, že komplexní model vyžaduje zjednodušení a idealizaci vlastností pro účely modelování [26].

*Přenosový kanál v základním kmitočtovém pásmu* může být zjednodušeně modelován jako nerekurzivní číslicový filtr s konečnou impulsní odezvou FIR (Finite Impulse Response) [14]. Pro modelování přenosových vlastností v základním pásmu se jako nejvhodnější jeví filtr typu číslicová dolní propust DP s nastavitelnými parametry (průběh modulu přenosu v propustném a nepropustném pásmu, mezní frekvence, řád filtru, zvlnění modulu přenosu a další) [21] [27]. Uvažovaný model přenosového kanálu v základním pásmu je modelován ideální diskrétní dolní propustí s lineární fází. Návrh spočívá v aproximaci odpovídající požadované aproximační funkce  $H_p(\Omega)$  v rozmezí  $0 \leq \Omega \leq \pi$  (obr. 2.2) [28].



Obr. 2.2 Toleranční pole modelu přenosového kanálu v základním pásmu.

Cílem návrhu je stanovení koeficientů  $h(n)$  aproximačního polynomu požadované funkce  $H_p(\Omega)$  nejnižším aproximačním stupněm  $N$  tak, aby požadované toleranční pole nebylo porušeno. Toleranční pole vymezují požadovaná maximální dovolená zvlnění  $\delta_1$  a  $\delta_2$  v propustném a nepropustném pásmu a horní a dolní mezní kmitočty  $\Omega_d$  a  $\Omega_h$  dolní propusti, resp. horní mezní kmitočty  $\Omega_m$  [27]. Při modelování vlastností přenosového kanálu v základním pásmu se postupuje jako při návrhu číslicové DP a jednotlivé vhodné metody pro návrh představují - *metoda váhování impulsní charakteristiky okénkovou funkcí (okénkem)*, *metoda vzorkování frekvenční charakteristiky*, *metoda aproximace frekvenční charakteristiky metodou nejmenších čtverců* (LS algoritmus) [14] [21].

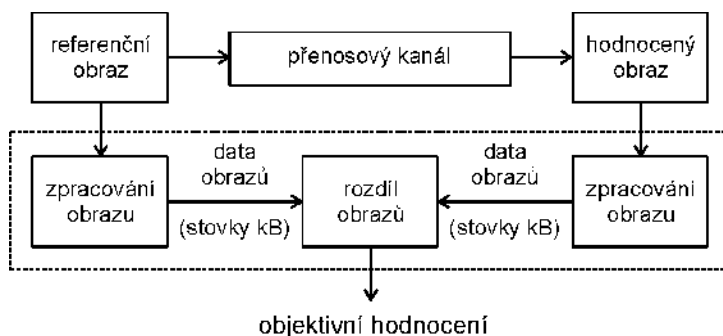
### 3 HODNOCENÍ KVALITY PŘENOSU A OBRAZU

#### 3.1 OBJEKTIVNÍ A SUBJEKTIVNÍ HODNOCENÍ KVALITY

Hlavním kritériem při *objektivním hodnocení* kvality při přenosu číslicových obrazových signálů modelem podle obr. 1.2 jsou symbolová *SER* (Symbol Error Rate) a bitová *BER* (Bit Error Rate) chybovost [5]. Uvedené chybovosti lze při modelování a při známém datovém toku s výhodou vyhodnotit ze vstupních a výstupních číslicových dat modelu přenosového kanálu v základním pásmu. Pokud by tato data nebyla k dispozici současně, je třeba do datového toku zařadit *pseudonáhodnou sekvenci* nebo sekvenci se *známou reprezentací* jednotlivých symbolů a bitů a vyhodnocení chybovosti provést srovnáním s přijatou sekvencí.

Vyhodnocení kvality přenosu statického obrazu předpokládá zpracování dvourozměrných obrazových dat v prostorové oblasti. Hodnocenými obrazy jsou *vstupní nekomprimovaný RGB snímek* před zdrojovým kóděrem a *výstupní rekonstruovaný RGB snímek* za zdrojovým dekodérem modelu z obr. 1.2 [7] [16]. Pro hodnocení kvality obrazu *PQE* (Picture Quality Evaluation) se používají dva základní přístupy - *objektivní* a *subjektivní* [34]. *Objektivní hodnocení* vychází ze statistického přístupu vyhodnocení výsledků a jednotlivých metrik přímo

z obrazových matic (např. střední kvadratické chyby, střední absolutní chyby, poměru signálu k šumu). *Subjektivní hodnocení* nelze kvantifikovat přímo. Je výsledkem průměrného hodnocení skupiny pozorovatelů, kteří posuzují kvalitu obrazu pomocí definované stupnice (např. 5-ti stupňové škály *MOS* podle doporučení ITU-R BT.500 [18]). Pro oba typy hodnocení se používají *testovací obrazy* nebo jejich *sekvence*, které zachycují proměnnou prostorovou a frekvenční distribuci, detaily, jednobarevné plochy, textury atd.



Obr. 3.1 Objektivní metoda hodnocení vzájemných rozdílů obrazů.

Při objektivním hodnocení se hodnotí *vzájemné rozdíly* mezi originálním a hodnoceným obrazem (picture differencing) (obr. 3.1) [16]. Tyto vzájemné rozdíly jsou vyhodnoceny pomocí matematického výpočtu založeného na maticovém porovnání originálního a hodnoceného obrazu nebo jejich sekvencí. Tento přístup přináší větší korelaci výsledků objektivních testů s testy subjektivními. Pro objektivní hodnocení kvality obrazu jsou ze známých metrik i podle doporučení ITU-R používány nejčastěji střední kvadratická chyba *MSE* a její normalizovaná hodnota *NMSE*, poměr signálu k šumu *SNR* a špičkový *PSNR*.

Subjektivní hodnocení vycházejí z doporučení ITU-R BT.500 [18]. Základem subjektivního hodnocení je výběr skupiny pozorovatelů testovaných podle zrakových schopností, kteří jsou současně dotazováni na kvalitu obrazu na základě srovnání hodnoceného (degradovaného) obrazu s originálním obrazem nebo i bez něj. Vyhodnocení využívá definovanou stupnici podle vybraného typu testu a výsledkem je pak průměrná hodnota hodnocení. Nejpoužívanější metody pro subjektivní hodnocení kvality obrazu v DTV představují: DSCQS (Double Stimulus Continuous Quality Scale), DSIS (Double Stimulus Impairment Scale), SS (Single Stimulus), SSMR (Single Stimulus Multiple Repetition), SC (Stimulus Comparison), SSCQE (Single Stimulus Continuous Quality Evaluation) [18].

Subjektivní hodnocení pomocí kritéria *MOS* (Mean Opinion Score) je založené na pravděpodobnosti stejného výsledku všech pozorovatelů. Příklad stupnice pro hodnocení pomocí *MOS* (metoda DSCQS) uvádí tab. 3.1, včetně zjednodušeného hodnocení z poměru signálu a šumu obrazu *SNR* [dB] [12]. Hodnocení kvality obrazu je funkcí několika vlivů (pozorovací podmínky, výběr pozorovatelů, reprezentace stupnice hodnocení, porovnávací podmínky, obsah testovacích scén, analýza výsledků a další).

Tab. 3.1 Bodové hodnocení *MOS* a odpovídající subjektivní hodnocení.

Hodnocení	Kvalita obrazu	Poškození obrazu	SNR [dB]
5	výborná	nevnímatelné	45,5
4	dobrá	vnímatelné, neruší	36,6
3	uspokojivá	vnímatelné, mírně ruší	29,9
2	nízká	rušivé	25,4
1	špatná	velmi rušivé	23,1

### 3.2 KRITÉRIA VÝBĚRU OBRAZŮ PRO HODNOCENÍ

Výsledky subjektivních a objektivních testů jsou závislé nejen na kvalitě, ale především na obsahu testovacích obrazů. Pro dosažení dobré korelace výsledků je třeba znát informaci o vlastnostech obrazu v prostorové a frekvenční oblasti. Obecné požadavky na obsah testovacích obrazů jsou uvedeny v doporučení ITU-R BT.500 [18]. V doporučení uvedené obecné požadavky lze zjednodušit zavedením objektivních kritérií pro výběr, které nejsou závislé na technických parametrech obrazového systému. Obsah obrazu může být matematicky vyhodnocen pomocí charakteristik *prostorové frekvence SFM* (Spatial Frequency Measure) indikující celkovou prostorovou aktivitu obrazu a *spektrální aktivity SAM* (Spectral Activity Measure) indikující jeho frekvenční obsah [35]. Spektrální aktivita *SAM* má dynamický rozsah  $<1, \infty$ ) a vyšší hodnoty naznačují nižší frekvenční dynamiku obrazu. Naopak obrazy s vyšší frekvenční dynamikou mají hodnotou *SAM* blízkou 1 a jsou náročnější na kódování a následný přenos. Je také zřejmé, že testovací obrazy obsahující reálné scény s nižší hodnotou *SAM* mají vyšší hodnotu *SFM* a naopak [34].

Pro hodnocení kvality přenosu a obrazu je třeba použít zkušební obrazy s rozdílnými vlastnostmi a to například: strukturované reálné obrazy s detaily a texturami, obrazy s většími jednobarevnými plochami a syntetické obrazy, obrazy s detailní scénou popředí nebo pozadí, obrazy proměnnou prostorovou a frekvenční aktivitou, kombinované obrazy.

Testovací obrazy uvedené v obr. 3.2 a) až e) byly vytvořeny na Katedře radioelektroniky ČVUT v Praze, kde jsou využívány k subjektivním testům při posouzení vlivu komprimace obrazu na obrazovou informaci. Lze je také použít k vyhodnocení kvality přenosu obrazu pomocí přenosového modelu z obr. 1.2. Syntetický testovací snímek z obr. 3.2 f) byl vytvořen na Ústavu radioelektroniky FEKT VUT v Brně. Přehledné vlastnosti prostorové frekvence *SAM* a spektrální aktivity *SFM* všech zkušebních obrazů z obr. 3.2 uvádí tab. 3.2. Obrazy s většími barevnými plochami (obr. 3.6 a) a b)) mají více než dvakrát vyšší hodnoty *SAM* než ostatní obrazy a naopak hodnoty *SFM* jsou u nich nižší než u zbývajících obrazů. Nejvyšší hodnotu *SAM* má syntetický obraz na obr. 3.6 f), obsahující i část obrazu se zvyšujícími se prostorovými frekvencemi.



a)



b)



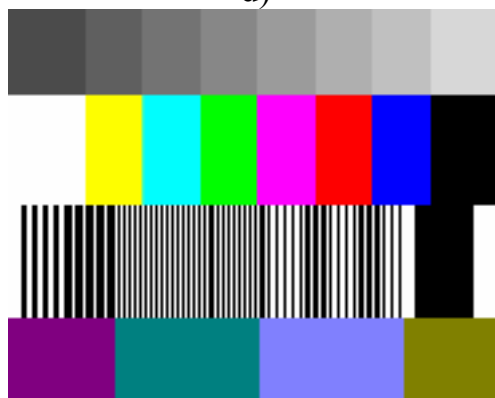
c)



d)



e)



f)

Obr. 3.2 Zkušební obrazy použité k vyhodnocení kvality přenosu obrazu a) „kristýny“, b) „ovoce“, c) „staromák“, d) „plakáty“, e) „zahrada“, f) „generátor“.

Tab. 3.2 Hodnoty *SAM* a *SFM* zkušebních obrazů.

Testovací obraz	Prostorová frekvence	Spektrální aktivita
kristýny	330,28	15,92
ovoce	289,97	29,05
staromák	139,31	32,13
plakáty	134,09	46,05
zahrada	72,75	37,95
generátor	3820,90	66,03

## 4 PROGRAMOVÉ APLIKACE PRO ANALÝZU PŘENOSU

### 4.1 MODELOVÁNÍ PŘENOSU OBRAZOVÉHO SIGNÁLU

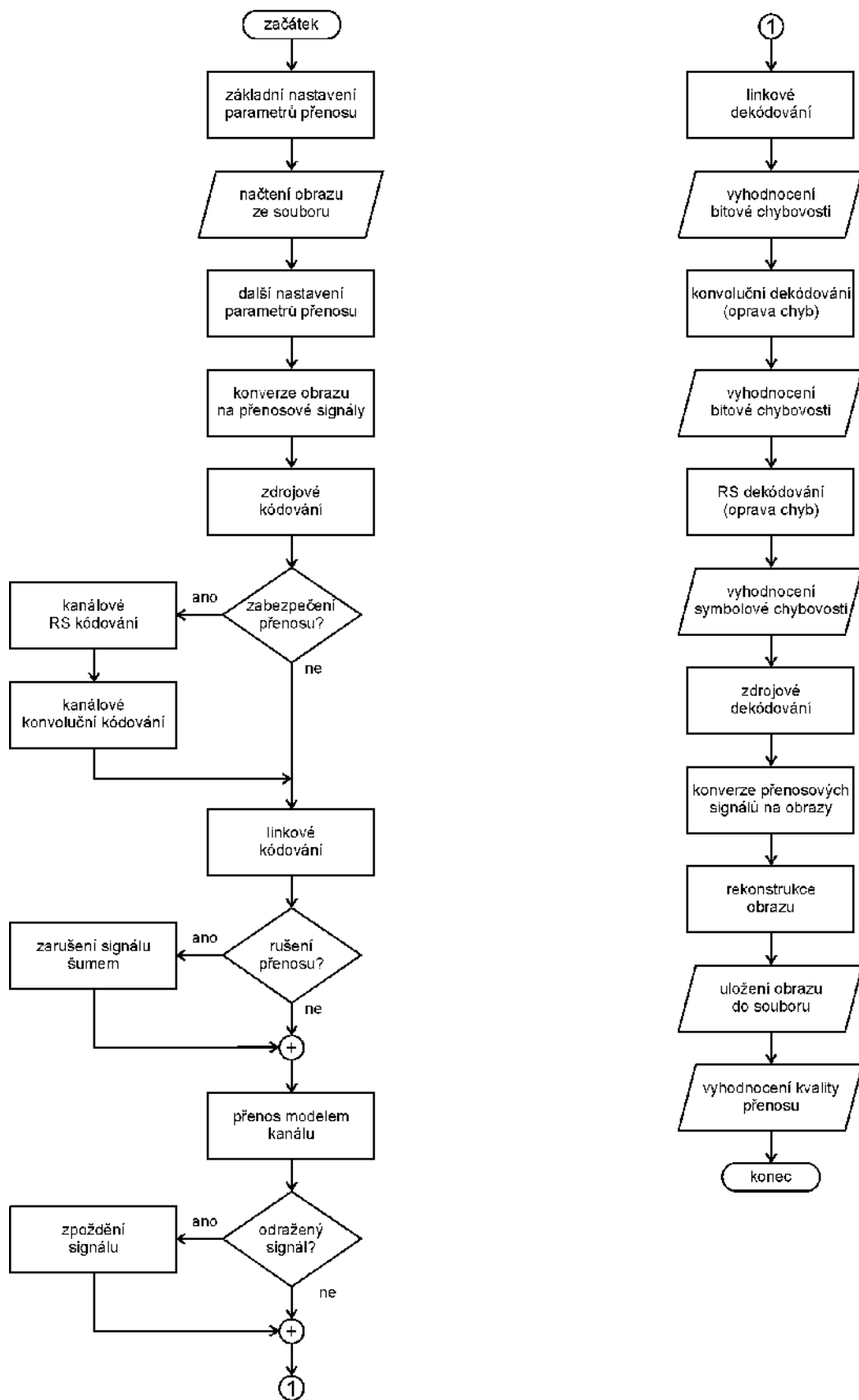
Vývojový diagram programu pro *přenos obrazového signálu* modelem přenosového kanálu v základním kmitočtovém pásmu je uveden na obr. 4.1 [29] až [31] a pokrývá všechny funkční bloky analýzy uvažované v kap. 2.

Po spuštění programu je provedeno jeho základní nastavení parametrů přenosu (viz tab 4.1) [32]. Základní nastavení vychází ze zdrojového a kanálového kódování standardu DVB a podle něj lze vždy nastavit změnu vybraného parametru a provést simulaci podle požadovaného typu analýzy na vybraný přenosový vliv.

Tab. 4.1 Základní nastavení programu pro přenos obrazového signálu.

Parametr	Nastavení
Obrazové rozlišení	720 x 576 obrazových bodů
Vzorkovací formát	4:2:0
Způsob přenosu	sériový / 8 bitů na slovo
Symbolové zabezpečení	RS (255, 239)
Hloubka prokládání	12 symbolů
Bitové zabezpečení	konvoluční kód s poměrem 1/2
Model přenosového kanálu	DP, $N = 20$ , Hammingovo okénko, pokles modulu přenosu – 3 dB, horní mezní kmitočet normovaný k Nyquistovu kmitočtu $f_m / f_n = 0,925$
Rušivý signál	širokopásmový šum s 30 % úrovní mezivrcholové hodnoty obrazového signálu
Odražený signál	zpoždění 0 vzorků s 0 % úrovní amplitudy vůči užitečnému signálu
Typ linkového kódu	NRZ unipolární
Rozhodovací úroveň při příjmu	50 % mezivrcholové hodnoty obrazového signálu

Načtení obrazu ze souboru umožňuje volbu libovolného zkušebního obrazu pro vyhodnocení kvality přenosu. Podporovány jsou statické obrazy grafických formátů BMP, JPG, PCX, PNG, TIF a FIG. Program umožňuje obecné obrazové rozlišení statických obrazů, avšak pro analýzu přenosu odpovídající televizi se standardním rozlišením SDTV je jako výchozí obrazové rozlišení použit neprokládaný formát 720 x 576 obrazových bodů. Pro tento formát jsou rovněž optimalizovány další programové funkční bloky. Programový blok dalšího nastavení parametrů přenosu přímo umožňuje nastavení a volbu parametrů pro požadovaný typ analýzy a experiment přenosu. Lze tak nastavit vzorkovací formát (4 druhy), parametry kanálového zabezpečení FEC (nastavení parametrů RS kódu, volitelné prokládání, nastavení poměru konvolučního kódu), typ linkového kódu (bipolární, unipolární), charakter přenosového kanálu (DP, HP, PP, PZ) a jeho parametry návrhu, model rušení v přenosovém kanále, model odraženého signálu a další.

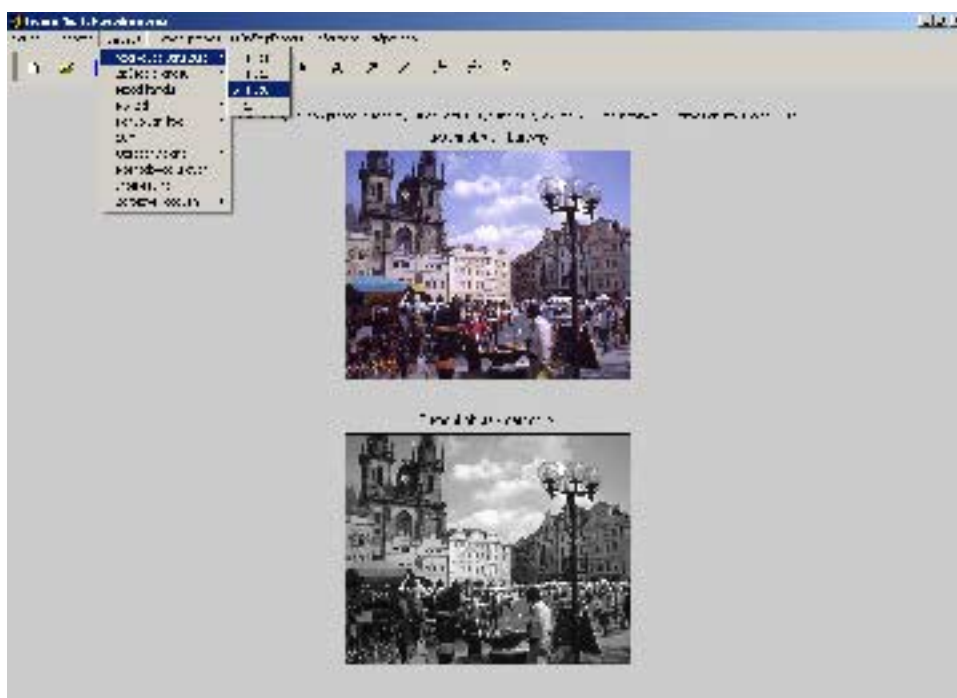


Obr. 4.1 Vývojový diagram programu pro přenos obrazového signálu.



Následující programové bloky jsou již výkonnými členy přenosu, kdy dochází nejdříve ke *konverzi dvojrozměrného obrazu* z prostorové oblasti na *jednorozměrné přenosové signály* a odpovídající číslcová data. Dále jsou přenosové signály podle zvoleného typu zabezpečení podrobeny kanálovému a linkovému kódování a v *modelu přenosového kanálu* je generován případný *aditivní rušivý signál*. Vlastní model přenosového kanálu představuje číslcový filtr přenášených dat. Na jeho výstupu je generována výstupní sekvence, ke které je podle potřeby možno přičíst *vliv odraženého signálu*. Ten je modelován jako aditivní součet přenášených dat s jejich shodnou, avšak časově zpožděnou a definovaně lineárně utlumenou sekvencí. Jak časové zpoždění, tak uvedený útlum, lze v programu individuálně nastavit.

Obrazovka uživatelského rozhraní programu pro přenos obrazu a jeho analýzu je zobrazena na obr. 4.2.

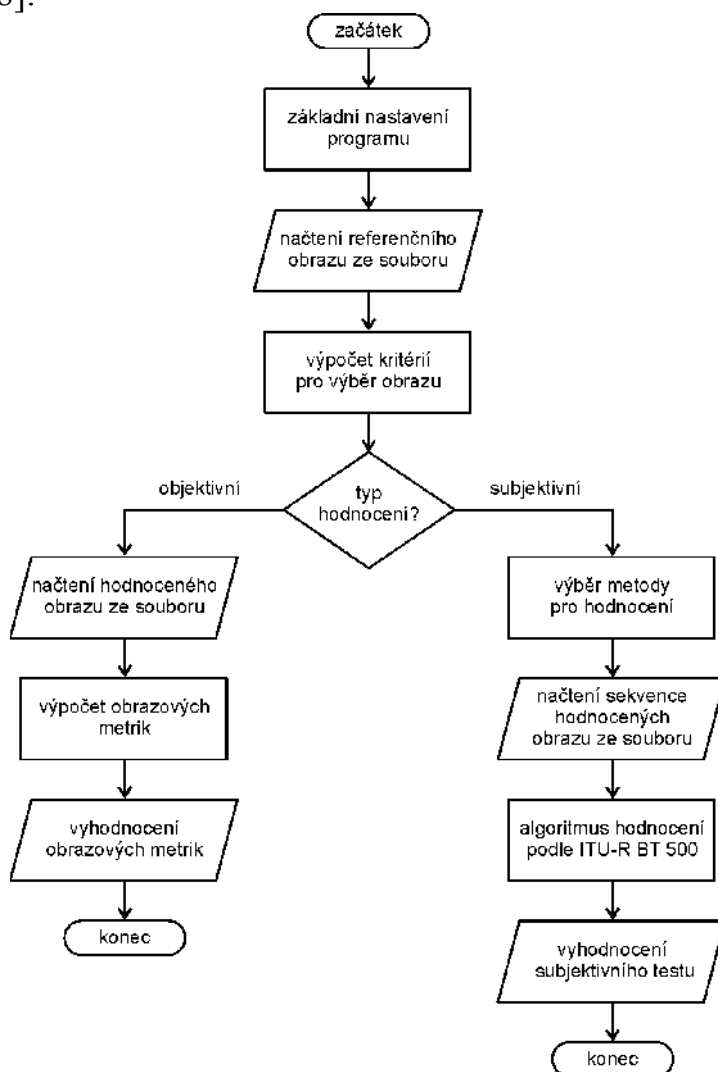


Obr. 4.2 Úvodní obrazovka uživatelského prostředí GUI programu pro přenos obrazového signálu a jeho analýzu.

V předchozím odstavci popsany algoritmus byl programově ověřen a aplikován. Program je určen pro platformu PC s operačním systémem MS Windows a prostředí Matlab (v. R13). Aplikace programu obsahuje *uživatelské prostředí* GUI (Graphical User Interface), ze kterého jsou volány a obsluhovány jednotlivé funkce a skripty (m-fily) a dále externí funkce v dynamicky linkovaných knihovnách dll, jejichž zdrojové kódy jsou vytvořené v jazyce C++. Aplikace také používá obousměrný přístup na pevný disk pro načítání a uložení originálních a přenesených obrazů, přenášených číslcových dat a posloupností pro realizaci číslcových filtrů simulujících model přenosového kanálu [23] [31].

## 4.2 HODNOCENÍ KVALITY PŘENESENÉHO OBRAZU

Pomocí programu pro *hodnocení kvality obrazu* je z referenčního a hodnocených dvourozměrných barevných obrazů možné vyhodnotit jednotlivé objektivní metriky nebo vyhodnotit výsledek subjektivního testu vybraných metod podle doporučení ITU-R BT.500 [18].

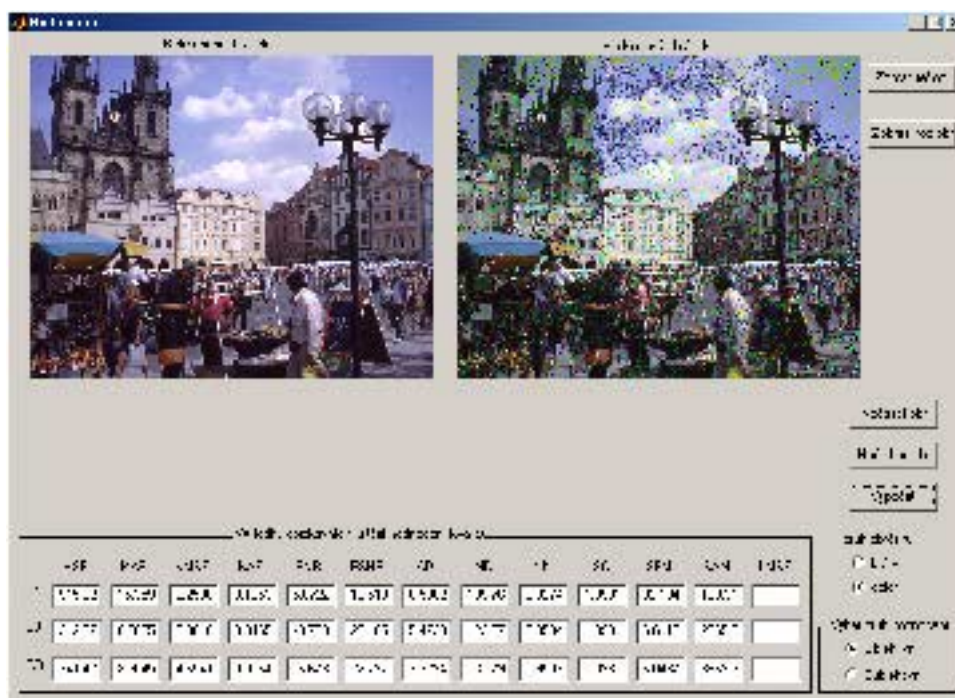


Obr. 4.3 Vývojový diagram programu pro hodnocení kvality obrazu.

Vývojový diagram programu pro hodnocení kvality obrazu je uveden na obr. 4.3. Program umožňuje hodnocení objektivní a subjektivní kvality obrazu pomocí výpočtů obrazových metrik a vybraných subjektivních testů [34]. Po spuštění programu je provedeno jeho *základní nastavení* a zobrazení *uživatelského prostředí*, které umožňuje přehledné zobrazení referenčního a hodnoceného obrazu i snadnější organizaci subjektivních testů a hodnocení obrazů na jednotlivých stupnicích kvality. Referenční a hodnocené obrazy musí být uloženy v souborech grafických formátů BMP, JPG, PCX, PNG, TIF nebo FIG. Po *načtení referenčního obrazu* ze vstupního souboru probíhá *výpočet kritérií pro výběr obrazu*. Uvažovanými kritérii jsou zejména údaje o prostorové frekvenci *SFM* a spektrální aktivitě *SAM*. Dále je uživatel dotázán na *výběr typu hodnocení* – zda objektivní nebo subjektivní.

Tab. 4.2 Možnosti programu pro hodnocení kvality obrazu.

Objektivní hodnocení		Subjektivní hodnocení	
Obraz	Metrika	Metoda	Výsledek
SFM	MSE, MAE, NMSE, NAE, SNR, PSNR, AD, MD, NC, SC, LMSE	DSCQS	MOS (průběžné)
SAM		DSIS	MOS (5 stupňů)
		SS	MOS (11 stupňů)
		SC	MOS (7 stupňů)



Obr. 4.4 Objektivní hodnocení kvality barevného obrazu.

Objektivní hodnocení pracuje s metodou *hodnocení vzájemných rozdílů* obrazů, při kterém jsou ze souboru načteny referenční a hodnocený obraz se shodným obrazovým rozlišením [16]. Program vypočítá jednotlivé *obrazové metriky* jak pro černobílý tak i pro barevný RGB obraz. Tyto metriky jsou pak vyhodnoceny odděleně v jasové (luminanční) složce obrazu  $Y$  a v obou barevných (chrominančních) složkách  $C_R$  a  $C_B$ . Subjektivní hodnocení pracuje s metodami a jejich algoritmy, které jsou součástí doporučení ITU-R BT.500. Omezením programu je možnost hodnocení *pouze jednoho pozorovatele*, který má k dispozici vždy náhled referenčního a hodnocených obrazů podle vybraného algoritmu.

Popsané algoritmy byly programově ověřeny a aplikovány [24] [36]. Program je určen pro platformu PC s operačním systémem MS Windows a prostředí Matlab (v. R13). Aplikace programu obsahuje *uživatelské prostředí* GUI, ze kterého jsou volány a obsluhovány jednotlivé funkce a skripty (m-fily). Možnosti programu pro hodnocení kvality obrazu jsou přehledně shrnuty v tab. 4.2. Ukázka grafického prostředí pro objektivní hodnocení kvality obrazu je zachycena na obr. 4.4.

## 5 VÝSLEDKY ANALÝZY MODELOVANÉHO PŘENOSU

V této kapitole jsou popsány výsledky analýzy vlivu parametrů jednotlivých komponentů modelu pro analýzu přenosových zkreslení číslicových obrazových signálů (viz obr. 1.2) na výslednou *chybovost přenosu* [22] a odpovídající *kvalitu obrazu* [24]. Chybovost byla pro zjednodušení programem vyhodnocována v [%] (chybovost 0 % představuje zcela bezchybný přenos a naopak chybovost 100 % úplnou ztrátu informace o jednotlivých přijatých bitech a symbolech). Úkolem analýzy bylo vyhodnocení chybovostí přenosu  $BER_1$  - bitová chybovost před konvolučním dekodérem,  $BER_2$  - bitová chybovost za konvolučním dekodérem,  $SER_1$  - symbolová chybovost před Viterbiho dekodérem,  $SER_2$  - symbolová chybovost za Viterbiho dekodérem. Pro každý experiment analýzy chybovosti přenosu byl uložen na disk počítače odpovídající přenesený dvourozměrný RGB obraz, ke kterému byla vždy vyhodnocena jeho objektivní kvalita srovnáním s originálním RGB zkušebním snímkem v prostorové oblasti (analýza jednotlivých obrazů bod po bodu). Pro objektivní hodnocení kvality byly vyhodnocovány vybrané metriky střední kvadratické chyby  $MSE$ , normalizované střední kvadratické chyby  $NMSE$ , střední absolutní chyby  $MAE$ , normalizované absolutní chyby  $NAE$ , poměru signál šum  $SNR$  a špičkového poměru signál šum  $PSNR$  (oba šumové poměry v [dB]). Podle výsledků  $SNR$  lze dále zjednodušeně vyhodnotit kvalitu obraz podle kritéria  $MOS$  (viz tab. 3.1) [12].

### 5.1 ANALÝZA VLIVU KOMPONENTŮ MODELOVANÉHO PŘENOSU NA CHYBOVOST PŘENOSU A KVALITU OBRAZU

Nejdříve byly postupně nastavovány *vzorkovací formáty* (4:4:4, 4:2:2, 4:2:0 a 4:2:0 SIF) a vyhodnocována bitová ( $BER_1$ ,  $BER_2$ ) a symbolová ( $SER_1$ ,  $SER_2$ ) chybovost přenosu při jinak standardním kanálovém zabezpečení a linkovém kódování. Z výsledků hodnocení nelze jednoznačně stanovit, který ze vzorkovacích formátů je pro nejnižší chybovost přenosu nejvhodnější. Volba vzorkovacího formátu především ovlivňuje objem dat přenášeného číslicového obrazového signálu a jeho datového toku a zejména dosažitelnou rozlišovací schopnost obrazu. Nejmenší chybu  $MSE$  vykazuje logicky vzorkovací formát 4:4:4. Chyba roste se snižujícím se obrazovým rozlišením až k formátu 4:2:0 SIF, kde nabývá nejvyšších hodnot. Podobný charakter průběhu mají i ostatní metriky chyb  $NMSE$ ,  $MAE$  a  $NAE$ . Největší velikosti všech chyb vykazují zkušební obrazy „generátor“ a „zahradá“ pro vzorkovací formát 4:2:0 SIF. Nejmenší výskyt obrazových artefaktů způsobených přenosovými chybami při modelovaném přenosu obsahuje přenesený zkušební obraz „ovoce“ a naopak nejvyšší obraz „generátor“, a to zejména v barevných složkách obrazu formátu 4:2:0. Při podrobném zkoumání obrazů je zřejmá ztráta rozlišovací schopnosti obou obrazů vlivem použitého vzorkovacího formátu a také vznik obrazového zkreslení v barevných oblastech obrazu „generátor“, a to díky charakteru průběhu barevného obrazového signálu obrazových vzorků v přenosovém multiplexu.

Dále byl postupně měněn *způsob přenosu* (sériový kanál s 8 nebo 10 bity na symbol, paralelní kanály s 8 nebo 10 bity na slovo) a stejným postupem vyhodnocována bitová a symbolová chybovost. Z analýzy výsledků lze jednoznačně stanovit, že pro minimální chybovost přenosu je nejvhodnější sériový způsob přenosu kódovaný 8 nebo 10 bity na symbol. Použití paralelního způsobu přenosu není pro modelování vhodné a nepřináší dobré výsledky. Nejmenší metricky všech chyb vykazuje sériový přenos s 10 bity na obrazový vzorek, což odpovídá i výsledkům analýzy chybovosti přenosu. V odpovídajících obrazech obsahuje paralelní 8 bitový přenos více shlukových chyb (a tím i obrazových artefaktů) než 10 bitový přenos, který obsahuje spíše chyby ojedinělé, avšak rovnoměrněji rozmístěné v obraze. Při hodnocení šumových poměrů *SNR* a *PSNR* bylo zjištěno, že nejlepší průměrné výsledky vykazuje sériový 10 bitový přenos, podle ITU-R tomu odpovídá „dobrá“ kvalita obrazu (*MOS* = 4) a naopak nejhorší paralelní 10 bitový přenos s hodnocením „špatná“ kvalita (*MOS* = 1).

Cílem druhé analýzy bylo vyšetřit závislost chybovosti přenosu na nastavení parametrů kanálového kodéru při zachovaném základním nastavení programu pro přenos obrazového signálu. Nejdříve byly postupně měněny parametry *symbolového zabezpečení* pomocí Reed-Solomonova kódu - RS (255, 239), RS (255, 235), RS (255, 223), RS (255, 205), RS (204, 188) a analýza bez symbolového zabezpečení. Z výsledků analýzy je zřejmé, že použití symbolového zabezpečení pomocí RS kódu je nezbytné pro přenos a opravu přenosových chyb. Parametry použitého kódu nemají příliš velký vliv, avšak nejlepších výsledků bylo dosaženo při použití kódu RS (255, 205). Chyba *MSE* a její normalizovaná hodnota *NMSE* dosahuje nejvyšších hodnot pro přenos bez zabezpečení a pro přenos syntetického obrazu „generátor“. Tento obraz vykazuje přenosová zkreslení zejména v barevné stupnici svislých barevných pruhů a barevných plochách. Vliv zabezpečení nemá na opravu těchto chyb příliš velký vliv. Pro ostatní reálné obrazy je pozitivní vliv libovolného RS zabezpečení zřejmý. Při hodnocení šumových poměrů *SNR* a *PSNR* bylo zjištěno, že nejlepší výsledky vykazuje kód RS (255, 205) a naopak nejhorší jsou logicky při přenosu bez zabezpečení. Nejhorším hodnocením zabezpečení pro tento typ přenosu je kód RS (204, 188) s „nízkou“ kvalitou obrazu podle ITU-R (*MOS* = 2). Při podrobném zkoumání obrazů je zřejmý výskyt obrazového zkreslení a chyb v obrazech bez symbolového zabezpečení, které jsou pomocí zabezpečení RS kódem v přenesených obrazech téměř odstraněny. Výjimku tvoří syntetický obraz „generátor“, kde pouze došlo k přesunu chyb a nárůstu jejich rozložení do části obrazu stupnice šedé barvy. Zajímavé je také zjištění, že na toto rušení jsou více náchylné části obrazu obsahující barvy pestré, než část obrazu obsahující barvy nepestré.

Dále byla analyzována účinnost zabezpečení proti shlukovým chybám pomocí změny *hloubky prokládání* (pro 4, 8, 12, 16, 20 symbolů). Jako nejvhodnější hloubka prokládání se z hlediska nejnižší průměrné chybovosti přenosu jeví hloubka prokládání rovna  $I = 16$  nebo  $I = 20$ . Chyba *MSE* a její normalizovaná hodnota *NMSE* dosahuje vyšších hodnot pro nižší hloubku prokládání  $I = 4$  až 8.

Hodnocení chyb  $MAE$  a  $NAE$  je poměrně vyrovnané pro všechny zvolené hloubky prokládání. Výjimku tvoří přenos syntetického zkušebního snímku „generátor“, který vykazuje ve všech hodnocených metrikách chyb vysoké hodnoty. V prostorové oblasti tento obraz opět obsahuje charakteristické rušení soustředěné pravidelně v barevných složkách obrazu (stupnice svislých barevných pruhů). Závěr této analýzy přináší vyhodnocení, že z hlediska nejvyššího odstupů šumu  $SNR$  a  $PSNR$  se jako nejvhodnější jeví hloubka prokládání rovna  $I = 16$  nebo  $20$ .

V rámci sledování vlastností kanálového kodéru byla analyzována účinnost *bitového zabezpečení* pomocí konvolučního kódu s poměrem ( $1/2$ ,  $2/3$ ,  $3/4$ ,  $5/6$ ,  $7/8$ ) a analýza bez zabezpečení. Z výsledků analýzy vyplývá, že nejmenší chybovosti při přenosu bylo dosaženo pouze s použitím konvolučního kódu s parametrem  $R = 1/2$ . Jiný zabezpečovací konvoluční kód při takto modelovaném přenosu nelze k zabezpečení použít. Chyba  $MSE$  a její normalizovaná hodnota  $NMSE$  se postupně zvětšuje se zvyšujícím se poměrem konvolučního kódu. Nejvyšší hodnoty  $MSE$  vykazují přenosy zkušebních obrazů „plakáty“ a „ovoce“ (v uvedeném pořadí) a nejvyšší hodnoty  $NMSE$  přenos obrazů „ovoce“ a „plakáty“ (opačné pořadí). Velikost chyb  $MAE$  a  $NAE$  má opět stoupající tendenci se zvyšujícím se poměrem konvolučního kódu. V prostorové oblasti jednotlivých obrazů (při vizuálním subjektivním hodnocení obrazů) tomu odpovídá vzrůstající četnost výskytu obrazových artefaktů a poškození obrazu od „vnímatelného“, „rušivého“ až „velmi rušivého“ poškození vedoucím k úplné ztrátě obrazové informace. Při hodnocení šumových poměrů  $SNR$  a  $PSNR$  bylo zjištěno, že pro konvoluční kód s jiným poměrem než je  $R = 1/2$  nabývá poměr  $SNR < 1$  ( $< 0$  dB) a průměrný šumový poměr  $PSNR$  je velmi nízký. V souhlasu s analýzou chybovosti lze tedy znovu vyhodnotit konvoluční kód s poměrem  $R = 1/2$  jako nejúčinnější pro takto modelovaný přenos, což podle hodnocení ITU-R představuje hodnocení „uspokojivá“ kvalita obrazu ( $MOS = 3$ ).

Cílem třetí analýzy bylo zkoumání závislosti chybovosti přenosu na nastavení parametrů *linkového kodéru* při zachování základního nastavení programu pro přenos obrazového signálu. Z výsledků analýzy vyplývá, že jako nejvhodnější se pro přenos jeví NRZ a RZ bipolární kódy. Linkový kód RZ unipolární se ukázal jako zcela nevhodný pro přenos. Chyba  $MSE$  a její normalizovaná hodnota  $NMSE$  je pro NRZ unipolární a oba bipolární linkové kódy velmi malá a téměř shodná. Výjimku tvoří pouze přenos zkušebního obrazu „generátor“ při bipolárním kódování. Současně i vyhodnocení dalších metrik chyb  $MAE$  a  $NAE$  vykazuje velmi nízké hodnoty chyb. Hodnocení RZ unipolárního kódování přináší výsledky poměrně velké chyby všech hodnocených metrik ( $MSE$ ,  $NMSE$ ,  $MAE$  i  $NAE$ ), což ve svém důsledku vede k malým šumovým poměrům  $SNR$  a  $PSNR$ . V prostorové oblasti jednotlivých obrazů je zřejmé velké zkreslení a poškození přeneseného obrazu, kde jsou již obtížně rozeznatelné i původní kontury obrazu. Při hodnocení šumových poměrů  $SNR$  a  $PSNR$  bylo zjištěno, že průměrné hodnoty pro bipolární kódy jsou shodné a dosahují maximálních možných hodnot (přenesené obrazy bez viditelných zkreslení).

## 5.2 ANALÝZA VLIVU RUŠENÍ V PŘENOSOVÉM KANÁLE NA CHYBOVOST PŘENOSU A KVALITU OBRAZU

V tomto odstavci je popsána analýza vlivu *rušení v přenosovém kanále* na bitovou a symbolovou chybovost modelovaného přenosu. Při této analýze byla zkoumána závislost chybovosti přenosu na úrovni aditivního rušivého signálu působícího v modelu přenosového kanálu a dále závislost chybovosti přenosu na úrovni a zpoždění odraženého signálu při zachovaném základním nastavení programu pro přenos obrazového signálu.

Postupně byla měněna *relativní úroveň rušivého signálu* (0, 20, 40, 60, 80 a 100 %), který byl modelován jako náhodný signál s charakterem širokopásmového aditivního šumu. Relativní úroveň udávaná v [%] byla vztažena k mezivrcholové hodnotě kódovaného a zabezpečeného přenášeného číslicového obrazového signálu, který byl v rozsahu  $< 0, 1 >$ . Z výsledků analýzy vyplývá, že aditivní rušení nad 40 % relativní amplitudy způsobí velký nárůst chybovosti a úplnou ztrátu obrazové informace. Chyba *MSE* a její normalizovaná hodnota *NMSE* vykazuje se zvyšující se relativní úrovni rušivého signálu strmý nárůst od hodnoty větší než 60 % relativní úrovně aditivního rušení. Stejný trend průběhu mají i metriky chyb *MAE* a *NAE*. V prostorové oblasti jednotlivých obrazů (při vizuálním subjektivním hodnocení) tomu odpovídá vzrůstající stupeň poškození obrazu a nárůst četnosti přenosových chyb a viditelných artefaktů v obraze. Zajímavý je z hlediska hodnocení kvality obrazu vznik viditelných artefaktů přenosových zkreslení u obrazu „generátor“, kdy poškození obrazu nejdříve vzniká v již dříve zmiňovaných barevných oblastech tohoto obrazu a postupně se rozšiřuje přes celou plochu obrazu i do nebarevných monotónních oblastí.

Dále byl zkoumán vliv nastavení *zpoždění odraženého signálu*, který vytvářel další model aditivního rušení v modelu přenosového kanálu, na chybovost přenosu. Postupně bylo nastavováno zpoždění (pro 8, 16, 24, 32 a 40 bitů) odraženého signálu, který měl relativní úroveň 30 % vůči mezivrcholové hodnotě užitečného přenášeného signálu. Z výsledků analýzy vyplývá zajímavé zjištění, že zpoždění signálu a jeho aditivní součet se signálem užitečným má příznivý vliv na celkové snížení všech vyhodnocovaných chybovostí. Nejnižších výsledků chybovosti přenosu bylo dosaženo při zpoždění odraženého signálu 32 a 40 bitů. Chyba *MSE*, její normalizovaná hodnota *NMSE* i chyby *MAE* a *NAE* vykazují konstantní hodnoty pro všechny hodnocené obrazy a délky zpoždění. V odpovídajících obrazech nejsou vidět téměř žádná zkreslení a přenosové chyby. Výjimku tvoří pouze přenos syntetického zkušebního obrazu „generátor“, kde jsou pro zpoždění 16, 24 a 32 bitů (což odpovídá 2, 3 a 4 symbolům) opět viditelná poškození a obrazové artefakty v barevných složkách obrazu (oblast svislých barevných pruhů). Vyhodnocení šumových poměrů *SNR* a *PSNR* téměř představuje maximální dosažitelné šumové poměry. Podle hodnocení ITU-R představuje toto hodnocení kategorii „výborná“ až „dobrá“ kvalita obrazu (*MOS* = 4 až 5). Obrazová zkreslení a přenosové chyby v obraze jsou téměř nepozorovatelné.



### 5.3 ANALÝZA VLIVU PARAMETRŮ PŘENOSOVÉHO KANÁLU NA CHYBOVOST PŘENOSU A KVALITU OBRAZU

Při této analýze byla zkoumána závislost chybovosti přenosu na *parametrech přenosového kanálu* [21] modelovaného podle parametrů uvedených v kap. 2. Analýza chybovosti se zaměřila pouze na výsledky bitové chybovosti  $BER_1$ , která byla vyhodnocována porovnáním úplné vstupní a výstupní sekvence přenášených dat číslicového obrazového signálu vytvořeného ze zkušebního obrazu „staromák“. Při této analýze byl uvažován přenášený signál bez zabezpečení. Chybovost byla opět jako v předchozí analýze vyhodnocována v [%].

V prvních třech analýzách vlastností přenosového kanálu byla zkoumána závislost bitové chybovosti přenosu  $BER_1$  na zvoleném typu váhového okénka a délce impulsní charakteristiky při návrhu metodou *váhování impulsní charakteristiky*, *vzorkování frekvenční charakteristiky* a *aproximace frekvenční charakteristiky pomocí LS algoritmu* při jinak konstantním normovaném horním mezním kmitočtu  $f_m / f_n = 0,925$  (normování ke standardně definovanému Nyquistovu kmitočtu  $f_n$ ) přenosového kanálu s charakterem DP. Vyhodnocení výsledků těchto analýz představuje srovnání chybovosti  $BER_1$  pro různou délku impulsní charakteristiky  $N$  (pro 10, 20, 30, 40, 50, 60 a 70 vzorků) filtru FIR modelujícího vlastnosti přenosového kanálu a současně zvolené váhové okénko (obdélníkové, Bartlettovo, Hannovo, Hammingovo, Blackmanovo). Nejnižší chybovost vykazuje v celém průběhu kanál modelovaný pomocí Bartlettova váhového okénka, naopak nejvyšší chybovost vykazuje podle očekávání základní typ váhového okénka - obdélníkové. Nižší chybovosti dosahují přenosové kanály s kratší impulsní charakteristikou (nižším řádem filtru). Při nízkém řádu filtru však aproximace požadovaného průběhu přenosové charakteristiky přesně neodpovídá interaktivně zadanému tolerančnímu poli modelu přenosového kanálu.

Ve čtvrté analýze vlivu vlastností přenosového kanálu s charakterem DP s proměnným normovaným horním mezním kmitočtem na chybovost přenosu byla zkoumána závislost chybovosti pro standardně definovaný přenos a přenosový kanál podle tab. 4.1. Vzhledem k rozsáhlým možnostem nastavení parametrů přenosového kanálu byl pro analýzu zvolen jeden typ přenosového kanálu, jehož jediným proměnným parametrem byl *normovaný horní mezní kmitočet*  $f_m / f_n$  v intervalu diskrétních hodnot (1 – 0,95 – 0,9 – 0,85 – 0,8 – 0,75 – 0,7). Vyhodnocována byla bitová a symbolová chybovost přenosu při jinak standardním zdrojovém, kanálovém a linkovém kódování. Z výsledků je zřejmý téměř lineární nárůst bitové chybovosti při snižujícím se normovaným mezním kmitočtu. Pro  $f_m / f_n < 0,9$  však chybovost  $BER_2$  nabývá vyšších hodnot než  $BER_1$ , což indikuje další nefunkčnost bitového zabezpečení proti chybám. Sledovat další nárůst chybovosti pro  $f_m / f_n < 0,7$  nemá žádný význam, vzhledem k celkové symbolové chybovosti  $SER_1 = 100 \%$  již při  $f_m / f_n < 0,85$  a odpovídající chybovosti  $SER_2 \approx 100 \%$ .

Z výsledků simulačních experimentů a analýzy parametrů a vlastností modelu přenosového kanálu lze stanovit některé obecné závěry k modelování [21] [22]:

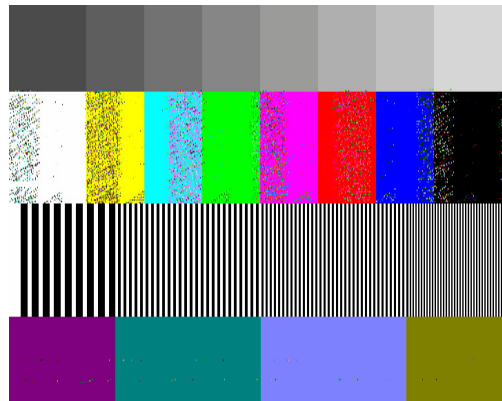


- Přenosový kanál modelovaný metodou návrhu FIR filtrů se ukázal jako velmi vhodný prostředek k experimentálnímu modelování a analýze výsledků chybovosti. Modelovat číslicový přenosový kanál v základním pásmu má význam pouze jako *diskrétní DP*.
- Jako vhodné metody pro modelování byly ověřeny metody *váhování impulsní charakteristiky*, *vzorkování frekvenční charakteristiky* a *aproximace frekvenční charakteristiky pomocí algoritmu LS*. Dosažené výsledky chybovosti přenosu jsou si velmi podobné.
- Parametrem přenosového kanálu je definovaný *normovaný horní mezní kmitočet*, *řád filtru* modelujícího přenosový kanál a *toleranční pole* průběhu modulu přenosové frekvenční charakteristiky.
- Nižší chybovosti dosahují kanály s nižším řádem filtru avšak s omezením přesnosti aproximace požadovaného tolerančního pole průběhu modulu přenosové frekvenční charakteristiky. Bylo zjištěno, že prakticky využitelná hodnota řádu filtru modelujícího přenosový kanál pro přenos číslicového obrazového signálu se pohybuje v intervalu  $N = (20 - 40)$ . Zvyšování řádu filtru modelu kanálu již nemá na výslednou chybovost přenosu významný vliv.
- Charakter přenášeného číslicového obrazového signálu (a tím i obsah obrazu) nemá na výslednou chybovost bez vlivu zabezpečení přenosu téměř žádný vliv.

Poslední analýza popisuje vyhodnocení závislosti objektivní kvality přeneseného obrazu na *parametrech modelu přenosového kanálu*. Vzhledem k několika stupňům volnosti změny nastavení parametrů modelu přenosového kanálu byl k analýze využit model definovaný v tab. 4.1 (přenosový kanál charakteru DP, modelovaný metodou váhování impulsní charakteristiky, Hammingovo okénko s délkou  $N = 20$ ). Při této analýze byla zkoumána závislost jednotlivých metrik objektivní kvality obrazu na proměnném horním mezním kmitočtu přenosového kanálu. Chyby *MSE* a její normalizovaná hodnota *NMSE* mají s rostoucím normovaným horním mezním kmitočtem snižující se charakter a pro  $f_m / f_n > 0,9$  již dosahují velmi malých hodnot. Největší hodnoty chyby *MSE* vykazuje zkušební obraz „plakáty“. Velmi podobných průměrných výsledků *MSE* a *NMSE* bylo dosaženo pro obrazy „kristýny“, „ovoce“ a „staromák“. Největší hodnoty chyby *NMSE* vykazoval při přenosu zkušebního obrazu „ovoce“. Nejvyšší chybu *MAE* vykazuje obraze „plakáty“ a nejvyšší chybu *NAE* vykazuje překvapivě i jinak vždy průměrný obraz „kristýny“. Vyhodnocení šumových poměrů *SNR* a *PSNR* vykazuje vysoké hodnoty poměrů pouze pro normovaný horní mezní kmitočet  $f_m / f_n > 0,9$  a podle hodnocení ITU-R to představuje hodnocení mezi „výbornou“ až „dobrou“ kvalitou obrazu (*MOS* = 4 až 5). Z obrazů je zřejmé, že se snižujícím se poměrem normovaného dolního mezního kmitočtu modelu přenosového kanálu se snižují i šumové poměry *SNR* a *PSNR* a tím se i zvyšuje četnost obrazových zkreslení a přenosových chyb v obrazech. Dále lze konstatovat, že pro poměr  $f_m / f_n < 0,7$  je obrazová informace již zcela znehodnocena a nemá smysl provádět další analýzu a hodnocení kvality obrazu.



a)  $PSNR = 39,716$  dB



b)  $PSNR = 23,170$  dB

Obr. 5.1 Vybrané výsledky k analýze kvality přenosu a obrazu v závislosti na zvoleném vzorkovacím formátu a) „kristýny“, b) „generátor“ a vzorkovací formát 4:2:0.

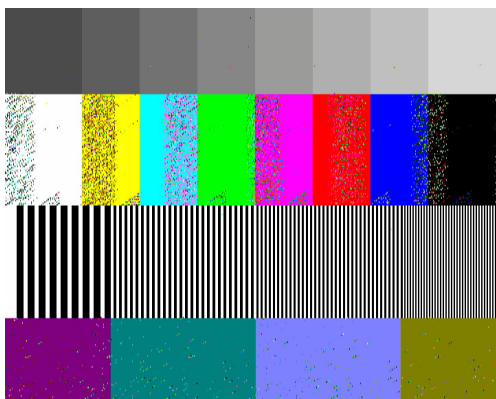


a)  $PSNR = 32,676$  dB



b)  $PSNR = 29,651$  dB

Obr. 5.2 Vybrané výsledky k analýze kvality přenosu a obrazu v závislosti na zvoleném způsobu přenosu a) „ovoce“, b) „staromák“ a způsob přenosu paralelní s 8 bity na vzorek.



a)  $PSNR = 22,607$  dB



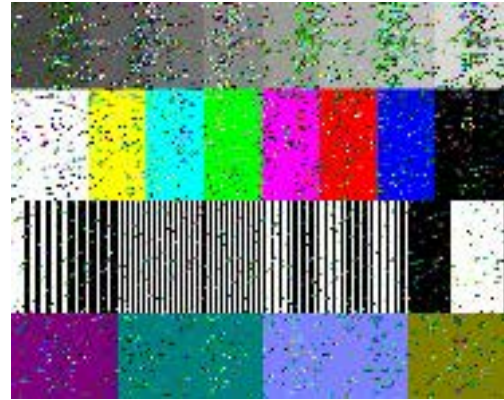
b)  $PSNR = 26,287$  dB

Obr. 5.3 Vybrané výsledky k analýze kvality přenosu a obrazu v závislosti na zvoleném symbolovém zabezpečení při přenosu obrazu „generátor“ a přenos a) bez symbolového zabezpečení, b) se zabezpečením RS (204, 188).



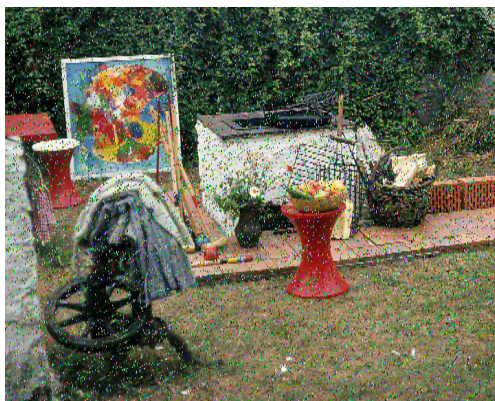


a)  $PSNR = 13,472$  dB

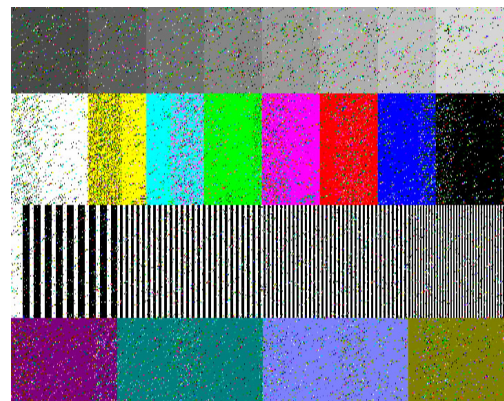


b)  $PSNR = 18,367$  dB

Obr. 5.4 Vybrané výsledky k analýze kvality přenosu a obrazu v závislosti na zvoleném bitovém zabezpečení a) „staromák“, b) „generátor“ a konvoluční kód s poměrem 2/3.



a)  $PSNR = 19,723$  dB



b)  $PSNR = 18,381$  dB

Obr. 5.5 Vybrané výsledky k analýze kvality přenosu a obrazu v závislosti na úrovni rušivého signálu pro obrazy a) „zahrada“, b) „generátor“ a relativní úroveň rušení 60 % vůči mezivrcholové hodnotě signálu.



c)  $PSNR = 24,628$  dB



d)  $PSNR = 17,866$  dB

Obr. 5.6 Vybrané výsledky k analýze kvality přenosu a obrazu v závislosti na normovaném mezním kmitočtu přenosového kanálu pro obrazy a) „ovoce“, b) „plakáty“ a normovaný mezní kmitočet  $f_m / f_n = 0,90$ .

## 6 ZÁVĚR

Předložená disertační práce spadá do problematiky modelování a analýzy přenosu obrazu a číslicových obrazových signálů v digitální televizi, který je zdrojovým signálem všech standardů DVB (satelitní, kabelový i terestrický).

V úvodu práce a její první kapitole je představen *obecný model přenosu číslicového signálu*, který je dále zjednodušen a jeho jednotlivé funkční bloky jsou specifikovány podle standardu DVB. *Zjednodušený model přenosu číslicového obrazového signálu* pokrývá zpracování nekomprimovaných RGB obrazů a číslicového obrazového signálu v základním kmitočtovém pásmu, tvorbu přenosového multiplexu z jasových a barevných obrazových vzorků ve zvoleném vzorkovacím formátu, bitové a symbolové zabezpečení číslicového obrazového signálu dopřednou chybovou korekcí FEC a volbu linkového kódu pro přenos obrazového signálu modelem přenosového kanálu. *Model přenosového kanálu* využívá postup modelování pomocí návrhu číslicových filtrů FIR s konečnou impulsní odezvou a obsahuje modely lineárních zkreslení přenosové charakteristiky.

Ve druhé kapitole jsou podrobně analyzovány a popsány všechny základní funkční bloky navrženého přenosového modelu. Je tak přesně specifikován *zdrojový, kanálový a linkový kodér a dekodér*. V další části práce je analyzován *model přenosového kanálu v základním kmitočtovém pásmu s proměnnými parametry* a možnosti *modelování přenosových zkreslení* (zdroje aditivních rušivých a odražených signálů). Uvedený model je programově aplikován v programových prostředcích popsáných ve čtvrté kapitole.

Ve třetí kapitole je podrobně stanoven způsob *objektivního a subjektivního hodnocení kvality přenosu obrazového signálu* (jednorozměrného číslicového signálu) a *obrazové informace* (dvourozměrného obrazu). Pro hodnocení kvality přenosu jsou specifikovány postupy ke stanovení bitové a symbolové chybovosti z vyslaného a přijatého číslicového datového toku. Pro hodnocení kvality přenesené obrazové informace (obrazu) byly specifikovány objektivní a subjektivní metody, vycházející z *hodnocení vzájemných rozdílů* mezi vstupním (originálním, referenčním) a výstupním (přeneseným, hodnoceným) obrazem. Pro objektivní hodnocení kvality obrazu byly specifikovány obrazové metriky vypočtené z referenčního a hodnoceného obrazu (kvadratické chyby a jejich normalizované hodnoty, šumové poměry v obraze, korelace a vzájemné odchyly obrazů).

Ve čtvrté, ryze realizační kapitole, jsou představeny vyvinuté programové aplikace pro analýzu přenosu a hodnocení kvality přeneseného obrazu. První aplikace pro *modelování přenosu obrazového signálu* a jeho analýzu je komplexním programovým prostředkem, který umožňuje pro libovolný testovací obraz zvolit vzorkovací formát, způsob přenosu a tvorbu přenosového multiplexu obrazového signálu, provést zabezpečení přenášených číslicových dat dopřednou chybovou korekcí FEC a volbu typu linkového kódu spolu s libovolně nastavitelnou rozhodovací úrovní při příjmu. Dále je aplikován model přenosového kanálu v základním kmitočtovém pásmu s volitelným charakterem a nastavitelnými mezními kmitočty. Pro modelování přenosového kanálu pomocí návrhu číslicových

filtrů byly ověřeny a aplikovány 3 metody návrhu. Hodnoceními parametry při přenosu jsou bitové a symbolové chybovosti číslicového obrazového signálu před aplikací opravných kódů a také po jejich aplikaci.

Druhá aplikace pro *hodnocení kvality obrazu* umožňuje objektivní a subjektivní hodnocení a byly v ní aplikovány metody hodnocení vzájemných rozdílů obrazů pomocí výpočtu obrazových metrik a základní subjektivní hodnocení pomocí metod uvedených v doporučení ITU-R BT.500. Hodnocení umožňuje načtení barevného referenčního a hodnoceného obrazu z disku, jejich vizualizaci včetně možnosti přiblížení detailů obrazů a následný rychlý výpočet vybraných metrik v jasovém kanálu i barevných kanálech hodnoceného obrazu.

V páté nejrozsáhlejší a stěžejní kapitole disertační práce jsou uvedeny praktické *výsledky analýzy modelovaného přenosu*, která byla realizována pomocí obou vyvinutých programových aplikací. Nejdříve byla provedena analýza vlivu parametrů jednotlivých komponentů modelu pro analýzu přenosových zkreslení číslicových obrazových signálů na výslednou *chybovost při přenosu*. Byl zkoumán vliv změny parametrů zdrojového, kanálového a linkového kodéru na bitovou a symbolovou chybovost přenosu při jinak zachovaném základním nastavení programu pro přenos obrazového signálu. Nastavení bylo vždy změněno pouze v jediném (analyzovaném) parametru. Přenesené obrazy pak byly po zpětné konverzi podrobeny analýze a vyhodnocení *objektivní kvality obrazu* metodou hodnocení vzájemných rozdílů se zkušebními testovacími obrazy. Bylo provedeno objektivní vyhodnocení kvality obrazu pomocí vybraných obrazových metrik (*MSE, NMSE, MAE, NAE, SNR* a *PSNR*) a jediným zjednodušeným subjektivním hodnocením bylo stanovení výsledků kritéria *MOS* podle výsledků šumového poměru *SNR* vybraných přenesených obrazů.

Na závěr je vhodné zmínit omezení modelovaného přenosu obrazové informace a zvolených analýz přenosových zkreslení a navrhnout případná řešení nebo možnost zkoumání navazujícího na výsledky této práce:

- V práci nebyla zohledněna problematika *komprimace obrazu*. Zajímavé z hlediska zkoumání přenosových zkreslení by mohly být výsledky analýzy zkreslení obrazových bloků a následné subjektivní hodnocení kvality obrazu.
- Při aplikaci modelu *linkového skrambleru a deskrambleru* lze předpokládat snížení chybovosti přenosu a zvýšení kvality přeneseného obrazu díky rovnoměrnějšímu rozmístění přenosových chyb v číslicovém obrazovém signálu. Nelze však předpokládat větší vliv na chybovost než při použití korekce FEC.
- Uvedená analýza vlastností přenosového kanálu nezahrnuje modely *nelineárních zkreslení*. Podle dosavadních poznatků však přenos digitálních signálů je vůči těmto zkreslením v základním pásmu značně odolný a nelze tak předpokládat významný vliv na chybovost přenosu a kvalitu přeneseného obrazu.

## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] REIMERS, U. *Digital Video Broadcasting. The International Standard for Digital Television*. Springer, 2001. 295 stran. ISBN 3-540-60946-6.
- [2] ÖRBERG, T. *Modulation, Detection and Coding*. John Wiley & Sons, Inc., 2001. 466 stran. ISBN 0-471-49766-5.
- [3] XIONG, F. *Digital Modulation Techniques*. Artech House, Inc., 2000. 653 stran. ISBN 0-89006-970-0.
- [4] FISCHER, W. *Digital television. A Practical Guide for Engineers*. Springer, 2004. 384 stran. ISBN 3-540-01155-2.
- [5] COLLINS, G. W. *Fundamentals of Digital Television Transmission*. John Wiley & Sons, Inc., 2001. 267 stran. ISBN 0-471-39199-9.
- [6] LUTHER, A.C. *Principles of Digital Audio and Video*. Artech House, Inc., 1997. 405 stran. ISBN 0-89006-892-5.
- [7] WINKLER, S. *Digital Video Quality – Vision Models and Metrics*. John Wiley & Sons Ltd., 2005. 190 stran. ISBN 0-470-02404-6.
- [8] BOSE, T. *Digital Signal and Image Processing*. John Wiley & Sons, Inc., 2004. 706 stran. ISBN 0-471-45230-0.
- [9] WICKER, S. B., BHARGAVA, V.K. *Reed-Solomon Codes and Their Applications*. IEEE Press, 1994. 322 stran. ISBN 0-7803-5391-9.
- [10] JOHANNESSON, R., YIGANGIROV, K, SH. *Fundamentals of Convolutional Coding*. IEEE Press, 1999. 428 stran. ISBN 0-7803-3483-3.
- [11] VÍT, V. *Televizní technika - přenosové barevné soustavy*. Praha: BEN – technická literatura, 1997. 719 stran. ISBN 80-86056-04-X.
- [12] VÍT, V. *Televizní technika – anténní rozvody a signálové obvody televizoru*. Praha: AZ servis, 1993.
- [13] LEVICKÝ, D. *Multimediálne telekomunikácie. Multimédia, technológie a vodoznaky*. Košice: Elfa, s.r.o., 2002. 240 stran. ISBN 80-89066-58-5.
- [14] JÁN, J. *Číslicová filtrace, analýza a restaurace signálu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2002. 427 stran. ISBN 80-214-1558-4.
- [15] PTÁČEK, M. Digitální reprezentace kmitočtových vlastností televizního kanálu a nekonvenční řešení systému analogově digitálního převodu. *Slaboproudý obzor*. Praha: svazek 45, č. 3, s. 105-115, 1984.
- [16] Tektronix. *A Guide to Picture Quality Measurements for Modern Television Systems*. Tektronix, Inc., 1997. [www.tektronix.com]
- [17] Tektronix. *Comparing Objective and Subjective Picture Quality Measurements. Technical Brief*. Tektronix, Inc., 1998. [www.tektronix.com]
- [18] ITU. *Methodology for the subjective assesment of the quality of television pictures*. Doporučení ITU-R BT.500-11, 2002.
- [19] ETSI. *Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television*. Standard EN 300744 V 1.4.1, 2001.
- [20] SMĚKAL, Z., SYSEL, P. *Číslicové filtry*. Elektronický učební text a skriptum FEKT VUT v Brně, 2004. [www.feec.vutbr.cz].
- [21] KRATOCHVÍL, T. *Modelování vlastností reálného číslicového přenosového kanálu*. Závěrečná výzkumná zpráva o řešení rozvojového projektu FRVŠ č.156/2001, tématický okruh G1. Brno: Ústav radioelektroniky FEI VUT v Brně, 2001.
- [22] KRATOCHVÍL, T. *Modelování a analýza přenosu a přenosových zkreslení číslicového signálu v oblastech DTV a DVB*. Závěrečná zpráva o řešení Juniorského badatelského grantového projektu GA AV ČR č. KJB2813302. Brno: Ústav radioelektroniky FEKT VUT v Brně, 2004.



- [23] HRDINA, J. *Modelování přenosu číslicového obrazového signálu v televizní technice*. Diplomová práce FEKT VUT v Brně, 2003.
- [24] ŠIMÍČEK, P. *Hodnocení kvality obrazu v oblasti televizní techniky a videotechniky*. Bakalářská práce FEKT VUT v Brně, 2005.
- [25] KRATOCHVÍL, T., ŘÍČNÝ, V. Possibilities of the Digital Signal Transmission in TV Technique. *RADIOELEKTRONIKA 2001 - Conference Proceedings*. RADIOELEKTRONIKA 2001. Brno (Česká republika): Ústav radioelektroniky FEI VUT v Brně, 2001, s. 111 - 114, ISBN 80-214-1861-3.
- [26] KRATOCHVÍL, T., ŘÍČNÝ, V. Simplified Simulation Model of the Digital Television Transmission System. *Proceedings of International Scientific Conference DSP-MCOM 2001*. DSP-MCOM 2001. Košice (Slovensko): FEI Technická univerzita Košice, 2001, s. 71 - 74, ISBN 80-89061-49-4.
- [27] KRATOCHVÍL, T., ŘÍČNÝ, V. Characteristics of an Ideal Low-Pass Digital Filter for Transmission of the Video Signal in TV Technique. *Proceedings of the International Electrotechnical and Computer Science Conference ERK 2000*. ERK 2000. Portorož (Slovensko): Slovenská sekce IEEE, 2000, s. 25 - 28, ISBN 961-6062-19-0.
- [28] KRATOCHVÍL, T., ŘÍČNÝ, V. Utilization of Digital Filter Design for Digital Transmission Simulation. *Radioelektronika 2002 - Conference Proceedings*. RADIOELEKTRONIKA 2002. 12th International Czech-Slovak Scientific Conference. Bratislava (Slovensko): Department of Radio Electronics, FEI STU Bratislava, 2002, s. 81 - 84, ISBN 80-227-1700-2.
- [29] KRATOCHVÍL, T. The DVB Television Signal Transmission Simulation Using the Forward Error Correction Codes. *Conference proceedings ICECom 2003*. ICECom 2003. Dubrovnik (Chorvatsko): 2003, s. 113 - 116, ISBN 953-6037-39-4.
- [30] KRATOCHVÍL, T. Utilization of Matlab for Digital Image Transmission Simulation Using the DVB Error Correction Codes. *Radioengineering*, ISSN 1210-2512, 2003, roč. 12, č. 4, s. 31 - 37.
- [31] KRATOCHVÍL, T. Digital Image Transmission Simulation Using the DVB Forward Error Correction Codes. *Automatika*, ISSN 0005-1144, 2005, roč. 45, č. 1-2, s. 41 - 46.
- [32] KRATOCHVÍL, T., ŘÍČNÝ, V. The Digital Image Transmission Simulation by the Model of the Digital Transmission Channel. *Proceedings VIPromCom-2002*. VIPromCom-2002. Zadar (Chorvatsko): Croatian Society Electronics in Marine - ELMAR, Zadar, Croatia, 2002, s. 401 - 406, ISBN 953-7044-01-7.
- [33] KRATOCHVÍL, T. Simulation and Analysis of the Digital Television Signal Transmission. *Eurocon 2003 Computer as a Tool Proceedings Vol. 1*. Eurocon 2003. Ljubljana (Slovensko): , 2003, s. 459 - 463, ISBN 0-7803-7763-X.
- [34] KRATOCHVÍL, T. Simulation System used for Picture Quality and BER Evaluation in DVB Transmission Area. *Proceedings IWSSIP'04 Ambient Multimedia*. 11th International Workshop on Systems, Signals and Image Processing IWSSIP'04. Poznań (Polsko): Poznan University of Technology, 2004, s. 51 - 54, ISBN 83-906074-8-4.
- [35] KRATOCHVÍL, T. Picture and Video Quality Measurements in Modern Television Systems. *Radioelektronika 2004 Conference Proceedings*. RADIOELEKTRONIKA 2004. Bratislava (Slovensko): Slovak University of Technology Bratislava, 2004, s. 390 - 393, ISBN 80-227-2017-8.
- [36] KRATOCHVÍL, T., ŠIMÍČEK, P. Picture Quality Evaluation System. *Proceedings EC-SIP-M 2005*. 5th EURASIP Conference focused on Speech and Image Processing, Multimedia Communications and Services. Smolenice (Slovensko): Slovak Technical University in Bratislava, 2005, s. 216 - 221, ISBN 80-227-2257-X.

## CURRICULUM VITAE

*Jméno:* Ing. Tomáš Kratochvíl  
*Datum narození:* 16. dubna 1976  
*Státní občanství:* Česká republika  
*Národnost:* česká  
*Adresa:* Šeříková 44, 637 00 Brno  
*E-mail:* kratot@feec.vutbr.cz

### Vzdělání

- 1999 – dosud Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, doktorský studijní program Elektrotechnika, elektronika, komunikační a řídicí technika.
- 1994 – 1999 Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a informatiky, magisterský studijní program Elektronika a sdělovací technika.
- 1990 – 1994 Střední průmyslová škola elektrotechnická v Brně, studijní obor Elektronická a sdělovací zařízení, zaměření Sdělovací technika.

### Praxe

- 2001 – dosud asistent na ústavu radioelektroniky FEKT VUT v Brně,
- 2004 – dosud garant volitelného kurzu *Nízkofrekvenční elektronika* bakalářského studijního programu EERK, studijního oboru EST na FEKT VUT v Brně

### Grantové projekty FRVŠ a GA AV ČR (hlavní řešitel)

- 2005 Inovace laboratorní výuky předmětu *Nízkofrekvenční elektronika*
- 2004 Multimediální učební text kurzu *Současná tv technika a videotechnika*
- 2003 Inovace výuky moderních kompresních metod pro oblast DVB  
Modelování a analýza přenosu a přenosových zkreslení číslicového signálu v oblastech DTV a DVB
- 2002 Digitální zpracování obrazové informace
- 2001 Modelování vlastností reálného číslicového přenosového kanálu

### Odborné zaměření

televizní technika, videotechnika, digitální televizní systémy, nízkofrekvenční elektronika

### Jazykové schopnosti

angličtina - pokročilý, francouzština – středně pokročilý, ruština – pasivně



## **ABSTRACT**

This thesis deals with the analysis and simulation of the digital video signal transmission distortions in the area of digital television broadcasting in accordance with the DVB standard. Parts of the analysis are the full specification of source, channel and link encoders and decoders used for the digital video signal transmission by the model of the transmission channel in baseband and part of the simulation is a full software application. The transmission channel model deals with variable parameters and methods of design that allow linear distortion simulation including the models of additive perturbation. The core of the thesis is software application and component analysis of the functional block parameters dependence on transmission error rates in the presence of error-protection during the transmission of the video signal. The results of the thesis evaluate the influence of each functional block parameter on bit and symbol error rates, transmitted digital video signal and according picture quality in the spatial domain.