

**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH**  
**TECHNOLOGIÍ**

**ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY**

**Ing. Josef Urban**

**REDUKCE DYNAMIKY SIGNÁLU V SYSTÉMECH**  
**S ORTOGONÁLNÍM FREKVENČNÍM MULTIPLEXEM**

**THE REDUCTION OF DYNAMIC IN ORTHOGONAL**  
**FREQUENCY DIVISION MULTIPLEX SYSTEMS**

**ZKRÁCENÁ VERZE PHD THESIS**

studijní obor: Elektronika a sdělovací technika  
školitel: doc. Ing. Roman Maršálek, Ph.D.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Ortogonalní frekvenční multiplex, poměr špičkové a střední hodnoty výkonu signálu, clipping, omezení zkreslení, selective mapping, interleaving, partial transmit sequences.

## **KEYWORDS**

Orthogonal Frequency Division Multiplexing, Peak to Average Power Ratio, Clipping, Distortion Bound, Slective Mapping, Partial Transmit Sequences.

## **DIZERTAČNÍ PRÁCE JE ULOŽENA:**

Ústav Radioelektroniky  
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií  
Vysoké Učení Technické v Brně  
Purkyňova 118  
612 00 Brno

# OBSAH

1 ÚVOD.....	5
2 SYSTÉMY S ORTOGONÁLNÍM FREKVENČNÍM MULTIPLEXEM.....	6
2.1 DYNAMIKA OFDM SIGNÁLU .....	6
2.1.1 PAPR.....	6
2.1.2 Distribuční funkce CCDF .....	7
3 METODY PRO REDUKCI PAPR .....	7
3.1 Ořezání signálu (clipping).....	7
3.2 Opakované ořezání s frekvenční filtrací .....	7
3.3 Zjednodušené ořezání s filtrací – SCAF .....	7
3.4 Zjednodušené ořezání s filtrací a s omezením zkreslení – SCAFBD .....	8
3.5 Více reprezentací jednoho signálu .....	11
3.5.1 SLM.....	11
3.5.2 PTS.....	11
4 VZÁJEMNÁ KOMBINACE METOD.....	11
4.1 Redukce výpočetní náročnosti kombinací metod .....	15
5 ZÁVĚR.....	17
PROFESNÍ ŽIVOTOPIS.....	19
ABSTRAKT .....	20
ABSTRACT .....	20



# 1 ÚVOD

Bezdrátové komunikační technologie patří v dnešní době k nejrychleji se rozvíjejícím odvětvím. Výrazně narůstá potřeba neustálého navyšování přenosových rychlostí i kvality přenosu. Požadovaná přenosová rychlost je již velmi obtížně dosažitelná pomocí systémů využívajících jedinou nosnou. Navíc jsou tyto systémy kvůli krátké době trvání jednotlivých signálových prvků velmi náchylné na rušení způsobené mnohacestným šířením, které je především v zastavěných oblastech velmi častým jevem doprovázejícím bezdrátovou komunikaci.

Vhodnější alternativou je tedy použití systémů o více nosných. Hlavní charakteristickou vlastností modulací o více nosných frekvencí je rozklad širokopásmového kanálu v sadu ideálně nezávislých úzkopásmových subkanálů. Původní datový tok se tedy rozdělí do několika cest, čímž se výrazně prodlouží doba trvání jednotlivých signálových prvků a celý přenosový systém se stává odolnějším vůči mnohacestnému šíření.

Nejběžněji používanými systémy jsou OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex), DMT (Discrete MultiTone), MC-CDMA (MultiCarrier Code Division Multiple Access).

Jednou z nejvýznamnějších nevýhod systémů více nosných je vysoká dynamika přenášených signálů, respektive velký poměr mezi špičkovou a střední hodnotou výkonu signálu. Tento poměr udává veličina PAPR (Peak to Average Power Ratio). Výkonové zesilovače jsou provozovány s ohledem na vysokou účinnost v pásmu nelineární přenosové charakteristiky. Zde však dochází k velkému zkreslení signálu s vysokým poměrem maximální a střední hodnoty výkonu. Dalším důvodem ke snižování vysokého PAPR signálu může být snížení zkreslení způsobené D/A převodem (dynamický rozsah D/A převodníku je omezený). V neposlední řadě, signál s redukovanými špičkovými výkonovými hodnotami bude vysílán s vyšší střední hodnotou výkonu při zachování maximální možné přípustné vysílací úrovně výkonu signálu.

Cíle předložené dizertační práce lze shrnout do následujících bodů:

- Návrh a analýza různých postupů pro omezení zkreslení v metodách založených na ořezání signálu.
- Návrh vhodných kombinací metod za účelem výraznější redukce PAPR spolu se snížením chybovosti v reálném přenosovém kanálu.
- Analýza přímo navržených metod pro různé parametry použité modulace OFDM (počet nosných, typy modulace nosných).
- Rozbor výpočetní náročnosti jednotlivých metod a analýza možností jejího snížení navrženou kombinací.

## 2 SYSTÉMY S ORTOGONÁLNÍM FREKVENČNÍM MULTIPLEXEM

V systémech s ortogonálním frekvenčním multiplexem (OFDM) je datový tok modulován na velký počet nosných. Frekvenční pásmo je rozděleno na velké množství úzkých kanálů, čímž se doba trvání jednotlivých signálových prvků výrazně prodlouží. Výsledná rychlost přenosu je součtem rychlostí všech subkanálů. Časový rozptyl signálů přicházejících po různých drahách je vůči době trvání jednotlivých symbolových prvků výrazně menší, než při použití modulace o jediné nosné. Signál je proto významně odolnější vůči rušení způsobeným mnohacestným šířením. OFDM se oproti jiným technikám s více nosnými kmitočty v zásadě liší ortogonalitou jednotlivých subkanálů, díky které je dosaženo vyšší spektrální účinnosti. Ta je ve srovnání s klasickým frekvenčním multiplexem (FDM) téměř dvojnásobná.

OFDM signál  $x(t)$ , v němž jsou vstupní data mapována pomocí QPSK, je možné dle [6] zapsat následovně:

$$x(t) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \sum_{n=1}^N X_n^m \cdot \text{rect}_T(t - mT) \cdot e^{j2\pi n \frac{t}{T}} \quad (2.1)$$

Kde  $X_n^m$  odpovídá symbolovému prvku na  $n$ -té nosné  $m$ -tého OFDM symbolu,  $T$  je doba trvání OFDM symbolu,  $\text{rect}_T(\cdot)$  značí funkci pravoúhlého okna s dobou trvání  $T$  a  $N$  je počet nosných.

### 2.1 DYNAMIKA OFDM SIGNÁLU

Výkonové koncové zesilovače (PA) se z důvodu dosažení vysoké účinnosti používají v pásmu nelineární přenosové charakteristiky. Proto je zapotřebí, aby těmito zesilovači procházel signál s co nejmenší dynamikou. OFDM signály však vykazují vysoký poměr špičkového ke střednímu výkonu. Tento poměr bývá definován pomocí PAPR (Peak to Average Power Ratio), někdy označováno jako PAR. Vysoký poměr špičkového a středního výkonu signálu je také nežádoucí například při D/A převodu. Dalším důvodem ke snižování PAPR signálu je možnost vysílání signálu s vyšším středním výkonem při zachování maximálních povolených vysílacích hodnot.

#### 2.1.1 PAPR

Poměr špičkové a střední hodnoty výkonu signálu  $x(t)$  na časovém intervalu  $\tau$  je dle [13] definován vztahem:

$$PAPR\{s(t), \tau\} = 10 \cdot \log_{10} \frac{\max_{t \in \tau} |x(t)|^2}{E\{|x(t)|^2\}} \quad (2.2)$$

Kde čítec výrazu odpovídá maximální a jmenovatel střední hodnotě výkonu signálu. Časový interval  $\tau$ , na kterém se určuje PAPR signálu, bývá zpravidla roven době trvání OFDM symbolu  $T$ .

### 2.1.2 Distribuční funkce CCDF

K vyjádření PAPR signálu je většinou používána doplňková kumulativní distribuční funkce CCDF (Complementary Cumulative Distribution Function). Jedná se o funkci vyjadřující pravděpodobnost, že PAPR nabývá hodnoty větší nebo rovné než  $PAPR_0$  [3]:

$$P(PAPR \geq PAPR_0) = f(PAPR_0) \quad (2.3)$$

## 3 METODY PRO REDUKCI PAPR

### 3.1 OŘEZÁNÍ SIGNÁLU (CLIPPING)

Jedná se o jednoduchou limitaci absolutní hodnoty signálu v časové oblasti. Tuto operaci lze dle [8] zapsat následovně:

$$x_{CLIP}(t) = \begin{cases} A \cdot e^{j\phi(t)} & , |x(t)| > A \\ x(t) & , |x(t)| \leq A \end{cases} \quad (2.4)$$

Kde  $A$  je maximální absolutní hodnota signálu  $x_{CLIP}(t)$  po ořezání,  $\phi(t)$  je fáze původního signálu  $x(t)$ .

Pro nastavení míry limitace signálu je výhodnější použít relativní hodnoty, ze které je poté vypočtena absolutní hodnota  $A$ . V následující práci bude pro nastavení ořezání signálu používána konstanta  $PC$  (PAPR after Clipping) definována dle následujícího vztahu:

$$PC = 10 \cdot \log_{10} \frac{A^2}{E\{|x(t)|^2\}} \quad (2.5)$$

Kde  $E\{|x(t)|^2\}$  odpovídá střední hodnotě výkonu původního signálu před ořezáním.

Ořezání je nejméně výpočetně náročná metoda pro redukcí dynamiky signálu. Pro praktické použití je méně vhodná z důvodu zvýšení výkonu signálu emitovaného do sousedních kmitočtových pásem.

### 3.2 OPAKOVANÉ OŘEZÁNÍ S FREKVENČNÍ FILTRACÍ

Zvýšení výkonu emitujícího se do sousedních frekvenčních pásem je možné eliminovat frekvenční filtrací signálu. Tím však dochází k opětovnému zvýšení PAPR. Proto je celý proces ořezání a filtrace  $k$ -krát opakován.

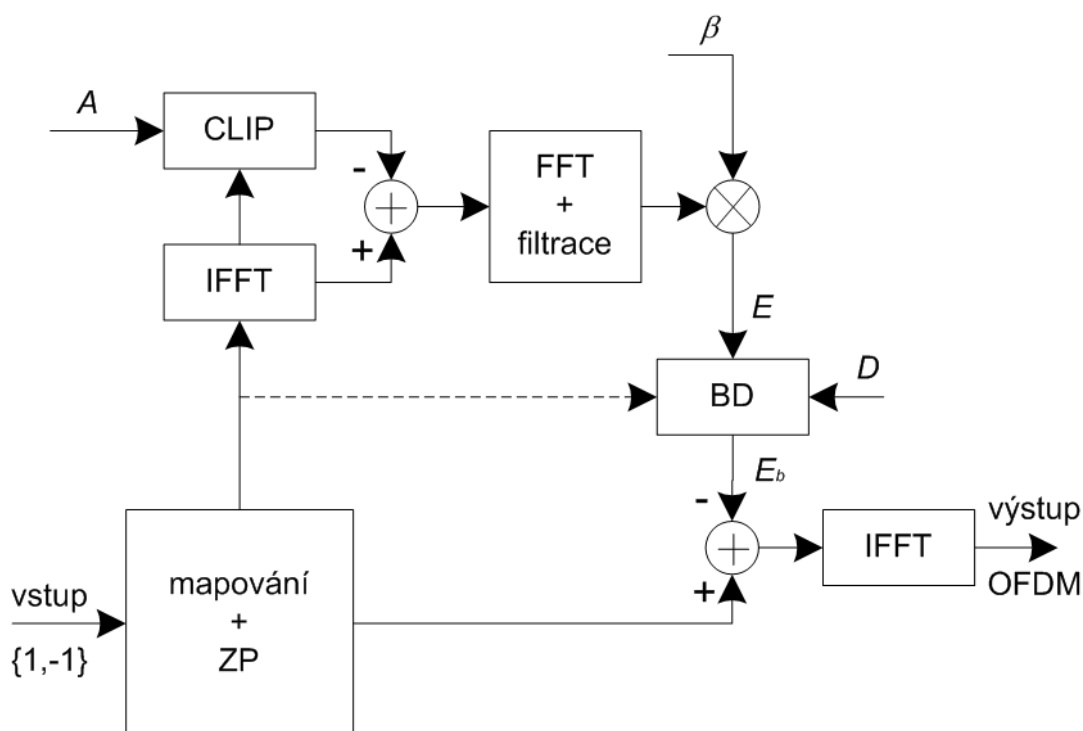
### 3.3 ZJEDNODUŠENÉ OŘEZÁNÍ S FILTRACÍ – SCAF

Opakováním procesu ořezání s filtrací dochází k zvýšení výpočetní náročnosti celé realizace. Pro každé opakování tohoto procesu je nutné provést 2 FFT výpočty.

Metoda zjednodušeného ořezání s filtrací dosahuje přibližně stejných výsledků a k její realizaci je zapotřebí pouze 3 výpočtů FFT.

### 3.4 ZJEDNODUŠENÉ OŘEZÁNÍ S FILTRACÍ A S OMEZENÍM ZKRESLENÍ – SCAFBD

V předložené dizertační práci byla metoda zjednodušeného ořezání s filtrací modifikována doplněním o blok omezující zkreslení signálu [17]. To je provedeno limitací chybového signálu, který odpovídá rozdílu původního signálu a signálu po ořezání.



**Obr. 3.1** Blokové schéma metody zjednodušeného ořezání s filtrací a s omezením zkreslení

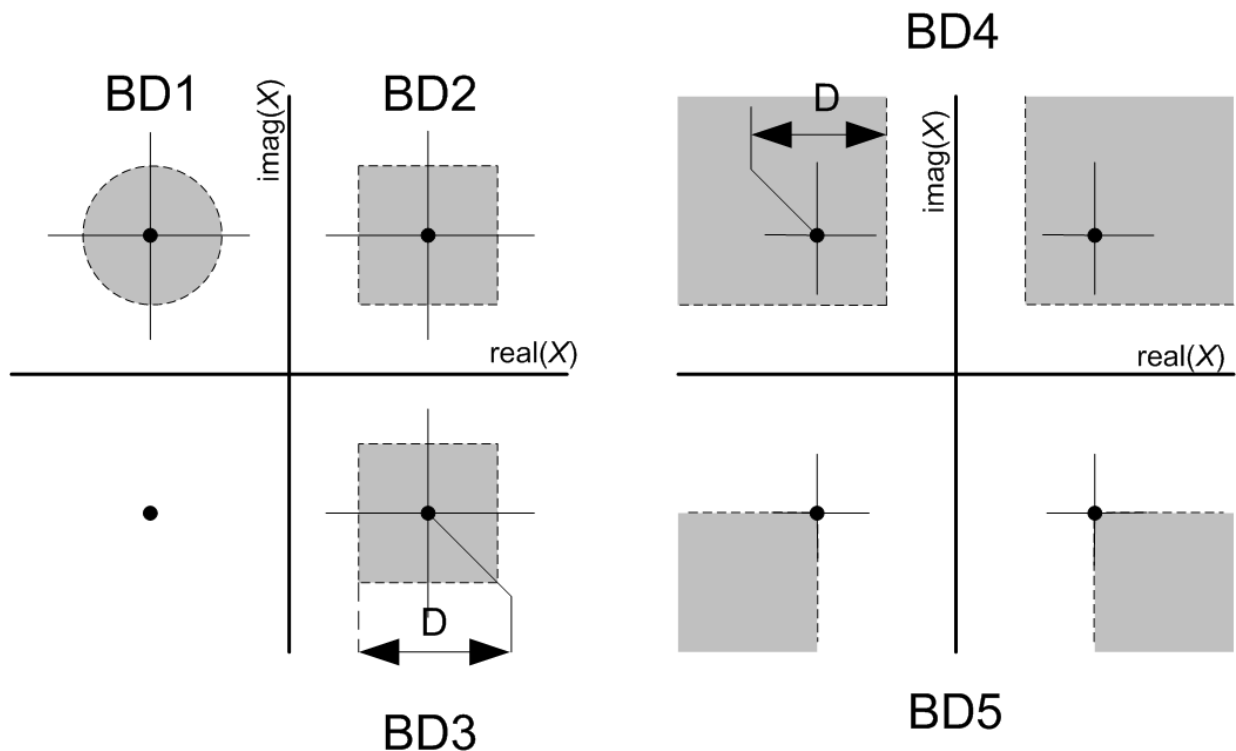
Blokové schéma metody zjednodušeného ořezání doplněné o omezení zkreslení je uvedeno na obrázku 3.1. Do vstupních signálových prvků každého OFDM symbolu mapovaných vhodnou modulací (například QPSK, 16QAM apod.) je vloženo  $Z$  nulových složek z důvodu vytvoření postranních ochranných pásem. Takto vytvořený signál ve frekvenční oblasti je pomocí IFFT převeden do časové oblasti, kde je ořezán a vypočten tzv. chybový signál  $E$ . Ten je následně převeden do frekvenční oblasti, frekvenčně filtrován a násoben konstantou  $\beta$ . Ta je dle [14] vypočtena jako ekvivalent  $k$  počtu opakování procesu ořezání a filtrace. Poté je chybový signál limitován pomocí konstanty  $D$  a odečten od signálu původního. Pomocí IFFT je nakonec signál převeden do časové oblasti.

Obecné omezení vnášeného zkreslení není vždy zcela jednoduché. Uvážíme-li jednoduché či opakované ořezání signálu, pak je třeba u každého mapovaného symbolu po ořezání nejprve zjistit, do jakého původního stavu v konstelačním diagramu daný bod patřil a podle toho vrátit odchýlený bod do oblasti vztahující se k původnímu bodu, vymezené nastavením přípustného zkreslení.



V tomto případě však dochází k úpravě chybového signálu zvlášť. Je tedy možné omezit zkreslení všech bodů konstelačního diagramu přímo limitací chybového signálu ve frekvenční oblasti. Tím odpadá nutnost porovnávání původní a zkreslené posloupnosti signálových prvků, protože chybový signál se rozprostírá ve frekvenční oblasti kolem bodu  $[0,0]$  komplexní roviny, zatímco v původním signálu kolem jednotlivých stavů. Limitací chybového signálu je proto výrazně snížena výpočetní náročnost a složitost modulátoru.

Bylo analyzováno pět postupů pro omezení zkreslení. Označeny byly BD1, BD2, BD3, BD4 a BD5. Jejich princip je znázorněn na obrázku 3.2. Lze je rozdělit na postupy, které omezují chybový signál nezávisle na tom, v jakém konkrétním stavu v konstelačním diagramu se nachází původní signál, do této skupiny patří postupy BD1, BD2 a BD3. Zbylé dva postupy BD4 a BD5 omezují chybový každého signálového prvku v závislosti na daném stavu původního signálu.



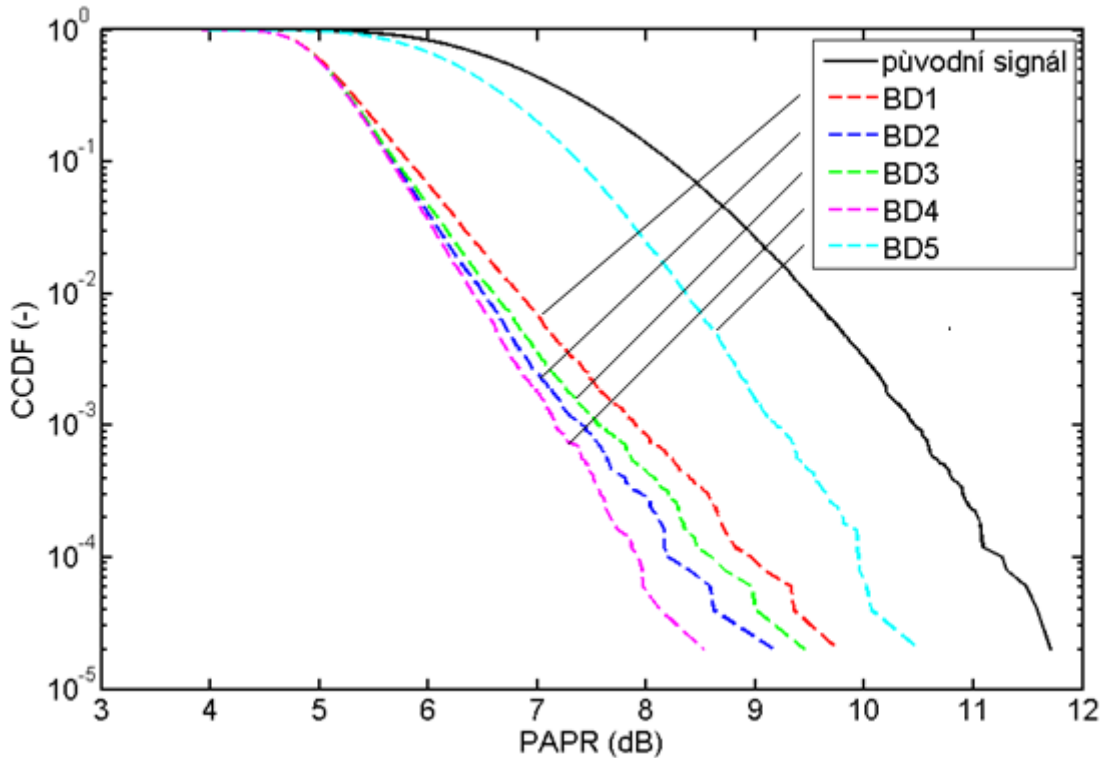
**Obr. 3.2** Postupy omezení zkreslení BD1, BD2, BD3, BD4 a BD5

Je-li použito omezení zkreslení BD1, je chybový signál limitován na absolutní hodnotu  $D$ . Omezení zkreslení BD2 limituje reálnou a imaginární část chybového signálu nezávisle na hodnotu  $D$ , čímž může docházet ke změně fáze. Omezení zkreslení BD3 vymezuje stejnou oblast, do které je povolen rozptyl bodů jako omezení zkreslení BD2, je zde však použit algoritmus zachovávající fázi. Realizace těchto prvních tří postupů pro omezení zkreslení je oproti zbylým dvěma podstatně jednodušší a může být realizováno stejným algoritmem bez ohledu na modulaci, která je použita pro mapování dat na jednotlivé nosné. Zbylé dva postupy BD4 a BD5 omezují zkreslení do oblastí závislých na poloze aktuálního stavu v konstelačním diagramu, jejich realizace je proto složitější.

Jelikož poloha stavů v konstelačních diagramech závisí na výkonu signálu v čase, je vhodné pro stanovení míry omezení zkreslení použít relativní konstantu  $D_s$ , která odpovídá:

$$D_s = \frac{D_m}{D_o} \quad (3.1)$$

Kde  $D_m$  je minimální požadovaná vzdálenost mezi rozptýlenými body sousedních stavů v konstelačních diagramech a  $D_o$  je vzdálenost těchto stavů nezkresleného signálu.



**Obr. 3.3** CCDF funkce PAPR pro jednotlivé metody omezení zkreslení v SCAFBD

Na obrázku 3.3 jsou CCDF pro PAPR u OFDM signálu s  $N=40$  použitými a  $Z=24$  nulovými nosnými, ořezání zkreslení je zde nastaveno na  $PC=4\text{dB}$  a omezení zkreslení na  $D_s=0,75$ . Nejvýraznější redukce PAPR je dosaženo s použitím postupu BD4. Překvapivě metoda BD2 dosahuje lepších výsledků než BD3, u které je signál omezen do naprosto stejného bloku, avšak je u něj přesně zachována fáze. U metody BD2 fáze zachována není, je limitována reálná a imaginární složka zvlášť, dochází tedy k mírné náhodné změně fáze. Omezení zkreslení BD5 dosahuje nejnižší redukce PAPR, je to dáno jeho podstatou, viz obrázek 3.2. Minimální vzdálenost mezi rozptýlenými body sousedních stavů v konstelačním diagramu zde totiž není snížena konstantou  $D_s$ , ale odpovídá vzdálenosti stavů původních nezkreslených bodů. Jako nejvýhodnější variantou s ohledem na redukci PAPR a na složitost implementace metody se tedy jeví metoda BD2.

Signály upravené metodou SCAFBFD s uvedenými postupy pro omezení zkreslení vykazují přibližně stejnou bitovou chybovost v přenosovém kanálu s aditivním šumem Gaussova rozložení pro postupy omezení BD1 až BD4. Pouze postup omezení zkreslení BD5 sníží bitovou chybovost na úroveň signálu bez zkreslení. To je však vykoupeno již zmíněnou výrazně horší redukcí PAPR.

### **3.5 VÍCE REPREZENTACÍ JEDNOHO SIGNÁLU**

Více reprezentací jednoho signálu MSR (Multiple Signal Representation) je skupina metod založených na vytváření více v ideálním případě statisticky nezávislých reprezentací jednoho signálu, ze kterých je pro vlastní přenos vybrána vždy ta s nejnižší hodnotou PAPR. Do skupiny metod MSR patří především metody SLM (Selective Mapping) [10, 16] a PTS (Partial Transmit Sequences) [10, 18].

#### **3.5.1 SLM**

Metoda SLM (Selective Mapping) [3] využívající prokládání, dále jen SLM, je metoda pro redukcí dynamiky založená na přeuspořádání vstupní bitové posloupnosti dat. Tímto přeuspořádáním je vytvořena jiná reprezentace téhož signálu. Je-li tímto způsobem vytvořeno více reprezentací, je možné pro vlastní přenos použít vždy tu s nejnižší hodnotou PAPR. Mezi výhody této metody patří to, že nezkresluje výsledný signál, což je vlastnost celé skupiny metod MSR. Nevýhodou je naproti tomu vyšší výpočetní náročnost, která je způsobena použitím vícenásobného výpočtu FFT (pro vytváření každé další reprezentace je nutný výpočet FFT a další operace) a nutností přenášet postranní informaci o použitém aktuálním prokladači.

#### **3.5.2 PTS**

Další metodou ze skupiny nezkreslujících metod pro redukcí PAPR v systémech OFDM je PTS (Partial Transmit Sequences) [10, 18]. Jejím základem je využití linearitu Fourierovy transformace. Více reprezentací jednoho signálu je zde vytvořeno následovně: Vstupní mapovaná data pro každý OFDM symbol jsou rozdělena do  $M$  subbloků. Každý z těchto subbloků je doplněn nulami na velikost původního symbolu, převeden do časové oblasti pomocí IFFT a násoben vhodnými konstantami. Výsledný OFDM signál je poté získán sečtením těchto dílčích subbloků. Je-li pro násobení jednotlivých subbloků použito hodnot  $+1$  a  $-1$ , lze vytvořit celkem  $2^M$  reprezentací každého symbolu. Pro přenos je vybrána ta s nejnižším PAPR.

## **4 VZÁJEMNÁ KOMBINACE METOD**

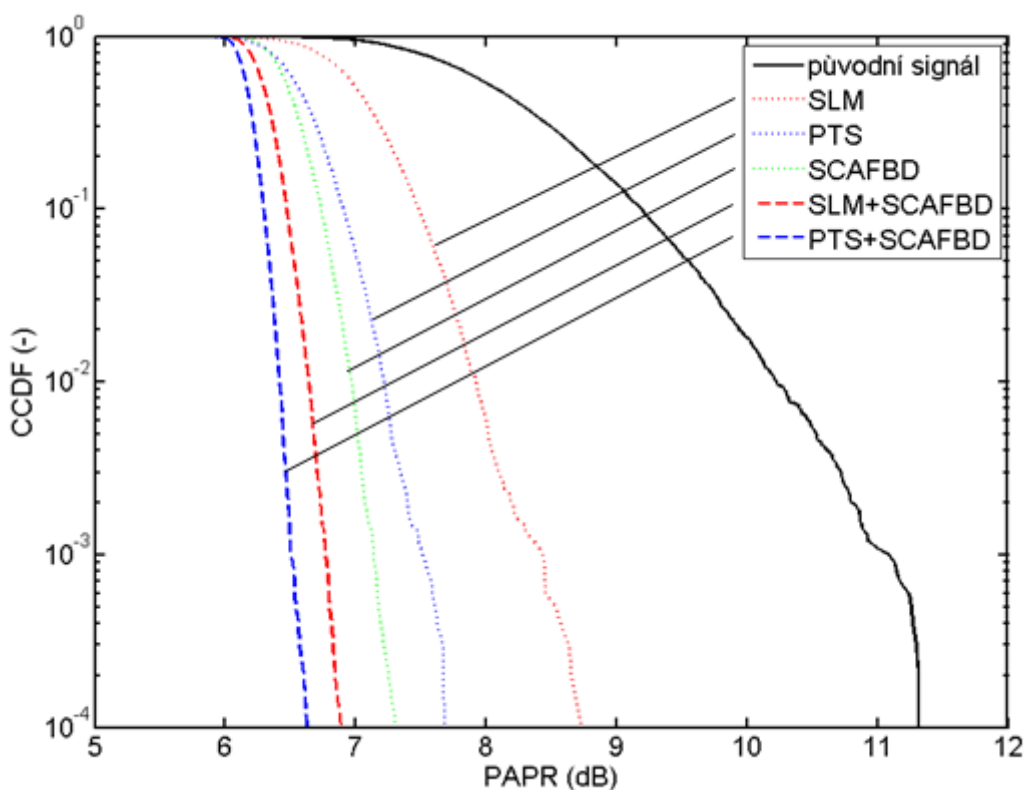
Výše uvedené metody pro redukcí PAPR vykazují určité klady a zápory, které souvisí především s jejich dělením do dvou již zmíněných skupin metod. První skupinou jsou metody, které způsobují zkreslení signálu, tedy ořezání a jeho modifikace. Zde je výhodou poměrně jednoduchá realizace a nízká výpočetní náročnost. Nevýhoda spočívá ve zkreslení, díky kterému narůstá chybovost přenosu.

Naopak metody, které zkraslení signálu nezpůsobují, jsou výpočetně náročnější. Vybízí se tak možnost zkombinovat metody z těchto skupin a docílit tak výrazné redukce PAPR, přijatelné výpočetní náročnosti i chybovosti celého systému.

V práci byly navrženy 2 kombinace metod. První z nich je SLM kombinovaná s metodou SCAFBD, druhá kombinace obsahuje metodu PTS s taktéž metodou SCAFBD. V práci jsou tyto metody analyzovány z pohledů vlivu na redukci PAPR, chybovost přenosu i složitost.

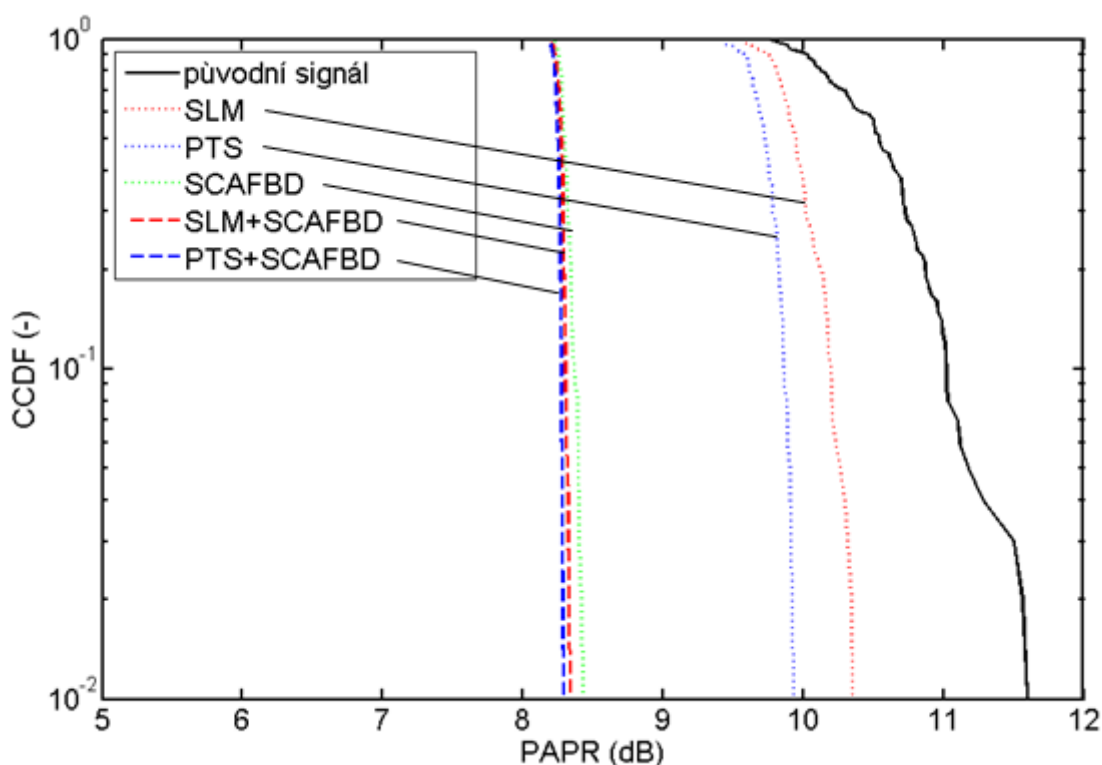
**Tab. 4.1** Parametry standardu WiMAX a DVB-T2

Standard	mód	$N_{data}$	$N_{zp}$	$N_{FFT}$	modulace nosných
<b>WiMAX</b>	128	96	22	128	<b>QPSK, 16QAM, 64QAM</b>
	<b>256</b>	<b>192</b>	<b>56</b>	<b>256</b>	
	512	384	86	512	
	1024	768	172	1024	
	2048	1536	146	2048	
<b>DVB-T2</b>	1k	852	172	1024	<b>QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM</b>
	2k	1704	344	2048	
	4k	3408	688	4096	
	8k	6912	1280	8192	
	16k	13920	2464	16384	
	<b>32k</b>	<b>27840</b>	<b>4928</b>	<b>32768</b>	



**Obr. 4.1** CCDF PAPR pro OFDM signál počtem nosných odpovídající standardu WiMAX

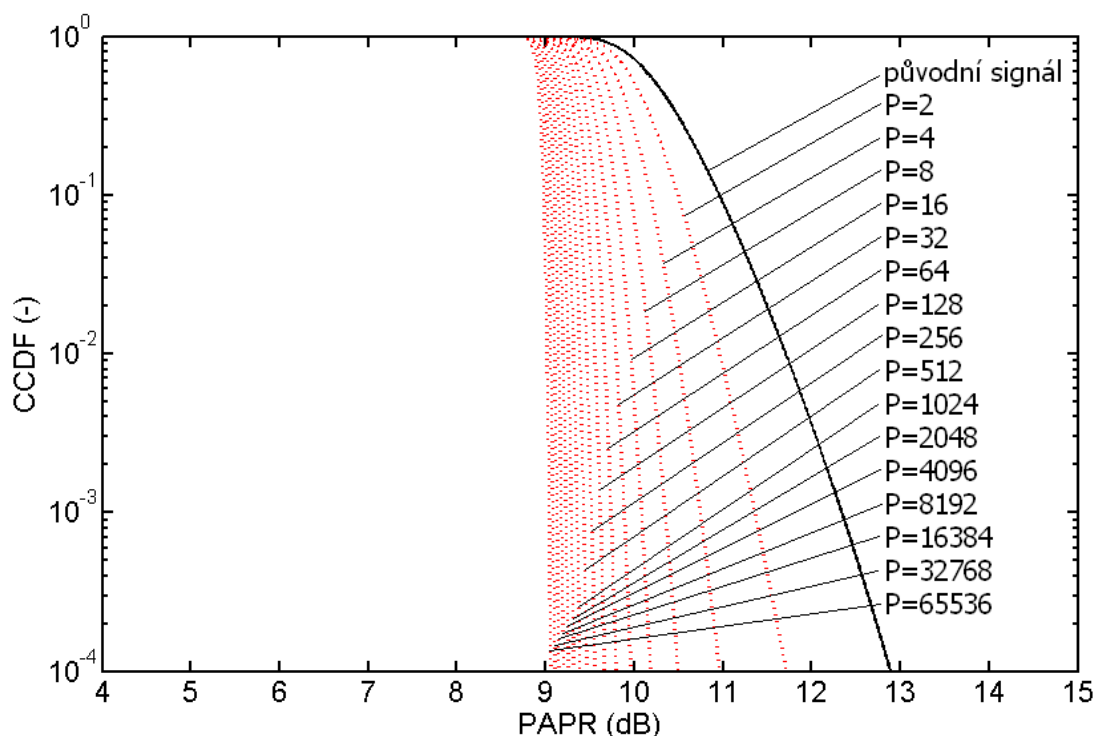
Dále byla provedena studie vlivu těchto kombinací metod v systémech s OFDM výrazně lišícím se počtem nosných. Z perspektivních standardů využívajících OFDM byly pro tuto studii vybrány standardy WiMAX a DVB-T2, viz tabulka 4.1. Z jednotlivých módů byly pro simulaci zvoleny tučně zvýrazněné, tedy WiMAX v módu 256 a DVB-T2 v módu 32k. Signály těchto parametrů byly upraveny kombinacemi metod SLM+SCAFBD a PTS+SCAFBD s následujícími parametry:  $W=16$ ,  $M=8$ ,  $PC=6\text{dB}$  pro WiMAX a  $PC=8\text{dB}$  pro DVB-T2,  $k=3$ ,  $D_S=0,75$ . Na obrázku 4.1 a 4.2 jsou výsledky v podobě PAPR jednotlivých signálů pro OFDM počtem nosných odpovídajícím WiMAX, respektive DVB-T2. V případě WiMAX lze pozorovat výrazný vliv na snížení PAPR kombinováním uvedených metod, zatímco u DVB-T2 dosahuje podstatně výraznějšího vlivu na redukci PAPR metoda SCAFBD, než metody PTS či SLM, proto zde již celá kombinace nezpůsobí další výrazný pokles PAPR oproti samotně použitému SCAFBD. Význam použití metod SLM či PTS však i v tomto případě zůstává, protože bez vloženého zkreslení odstraní velmi vysoké PAPR, v těch OFDM symbolech, jejichž výskyt je v těchto systémech kvůli vysokému počtu nosných méně pravděpodobný a tudíž se plně neprojeví v uvedených simulacích.



**Obr. 4.2** CCDF PAPR pro OFDM signál počtem nosných odpovídající standardu DVB-T2 32k

Při pohledu na obrázek 4.2 může vzniknout otázka, proč nedocílit výraznější redukce metodami PTS či SLM zvýšením počtu vytvářených realizací. Zvyšováním počtu realizací sice klesá PAPR, avšak nelineárně. Proto například při zvýšení počtu realizací v OFDM signálu počtem nosných odpovídajícím standardu DVB-T2 módu 32k na velmi vysokých 65536 realizací každého OFDM symbolu je dosaženo

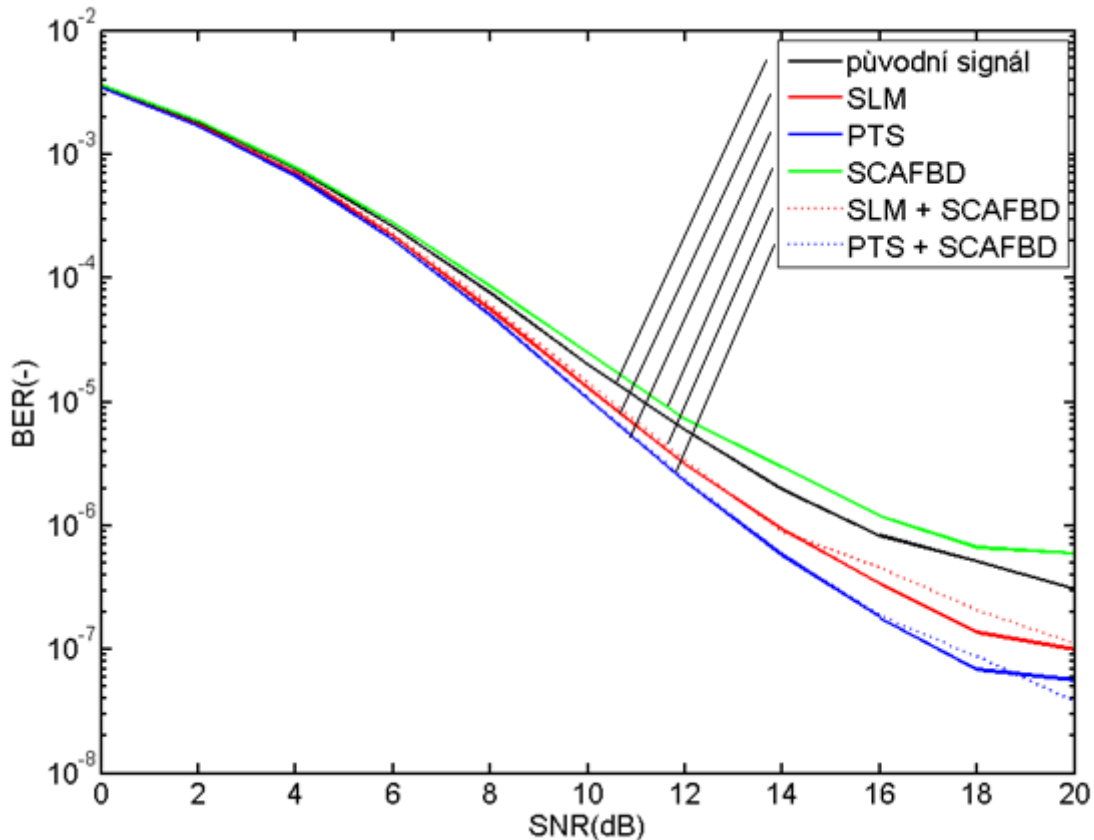
v ideálním případě, jsou-li veškeré realizace statisticky nezávislé, poklesu PAPR na přibližně 9dB, jak je patrné z obrázku 4.3.



**Obr. 4.3** Teoretické průběhy CCDF pro PAPR dle u OFDM signálu počtem nosných odpovídající standardu DVB-T2 32k s redukcí PAPR vytvářením  $P$  statisticky nezávislých realizací [8]

V tomto teoretickém případě je výpočetní náročnost, kterou způsobuje především 65536 FFT výpočty pro každý OFDM symbol v případě použití metody SLM, obrovská. V uvedeném případě je kombinací metod dosaženo redukce PAPR na cca 8,3dB (viz obrázek 4.2) spolu s výpočetní náročností odpovídající pouhým 16+3 FFT výpočtům (kombinace SLM+SCAFBD).

Na obrázku 4.4 je znázorněna bitová chybovost za přítomnosti nelineárního prvku v podobě Salehova modelu nelineárního TWT PA (Traveling Wave Tube Power Amplifier) [5] s pracovním bodem nastaveným pomocí IBO=5dB (Input Back Off) v přenosovém kanálu s aditivním šumem Gaussova rozložení. Situace odpovídá OFDM signálu počtem nosných odpovídajícím standardu WiMAX. Zde lze pozorovat snížení bitové chybovosti oproti původnímu signálu téměř ve všech případech. Výjimkou je pouze signál po samostatně použité metodě SCAFBD, který vykazuje chybovost nepatrně vyšší než původní signál. V tomto případě je snížení PAPR vykoupeno mírným zvýšením chybovosti, protože je signál výrazněji zkreslen. Tato závislost pro DVB-T2 není v tomto případě uvedena, všechny signály pro tento velmi vysoký počet nosných vykazují přibližně shodné chybovosti s průběhem podobným jednomu z průběhů z obrázku 4.2.



**Obr. 4.4** BER závislost na SNR pro OFDM signál počtem nosných odpovídající standardu WiMAX

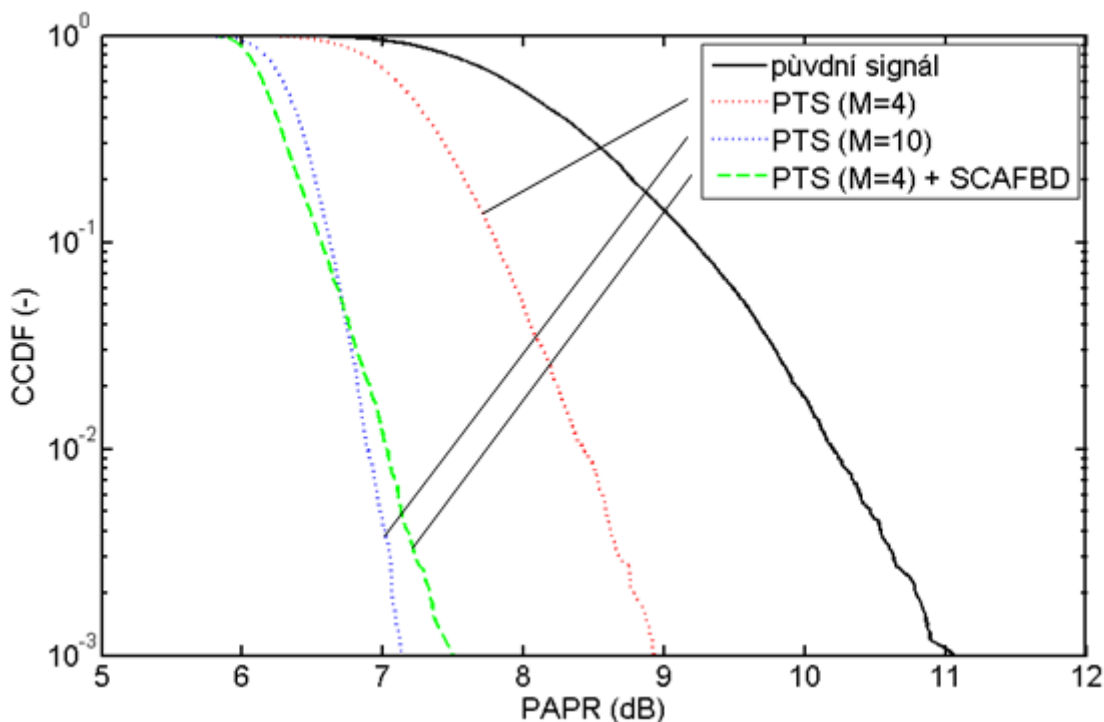
#### 4.1 REDUKCE VÝPOČETNÍ NÁROČNOSTI KOMBINACÍ METOD

U metod založených na vytváření více reprezentací jednoho signálu nedochází k lineárnímu poklesu PAPR s lineárně se zvyšující výpočetní náročností. Proto je zbytečné neúměrně zvyšovat složitost těchto metod, pokud tím v daném případě není docíleno podstatného snížení PAPR. Na uvedeném příkladě pro systém s OFDM o  $N=200$  použitých a  $Z=56$  nulových nosných je demonstrováno, jak lze kombinací metod PTS a SCAFBD s vhodným nastavením dosáhnout přibližně shodných výsledků jako u samostatně použité metody PTS o výrazně vyšší složitosti. V tabulce 4.2 je uvedena orientační výpočetní náročnost metody PTS s  $M=4$  a  $M=10$  subbloky a kombinace metod PTS s  $M=4$  subbloky s metodou SCAFBD. Srovnáváme metodu PTS( $M=10$ ) s kombinací metod PTS( $M=4$ ) a SCAFBD.

Na obrázku 4.4 jsou CCDF pro PAPR odpovídající výše uvedeným případům. Metoda SCAFBD je záměrně nastavena tak, aby bylo kombinací metod PTS( $M=4$ ) a SCAFBD dosaženo přibližně stejných výsledků jako u samostatně použité metody PTS( $M=10$ ). Konkrétně se jedná o nastavení  $PC=5,7$  dB a  $D_S=0,92$ .

**Tab. 4.2** Výpočetní náročnost navržené kombinace metod PTS a SCAFB

	subbloků M	FFT	realizací symbolu	násobení a sčítání	výpočet PAPR	min. délka SI (bitů)
PTS	4	4	16	41 032	16	4
	10	10	1 024	112 660	1 024	10
PTS + SCAFB	4	7	16	71 752	16	4



**Obr. 4.5** CCDF pro PAPR kombinace metod PTS a SCAFB redukující výpočetní náročnost

Uvedenou kombinací je dosaženo přibližně shodných výsledků jako u samostatně použité metody PTS( $M=10$ ). Výpočetní náročnost je však redukována dle tabulky 4.2, a to přibližně na  $2/3$  nutných násobení a sčítání,  $1/60$  výpočtů PAPR. Výhodou je také snížení délky postranní informace SI na méně než polovinu.



## 5 ZÁVĚR

Předložená dizertační práce se zabývá problematikou redukce dynamiky signálů v systémech s ortogonálním frekvenčním multiplexem (OFDM). Redukcí dynamiky OFDM signálů vyjádřené pomocí PAPR dojde k následujícím pozitivním jevům: Snížení zkreslení na nelineárních výkonových zesilovačích, snížení požadavků na vlastnosti D/A převodu a zvýšení středního vysílacího výkonu při zachování maximálních vysílacích hodnot.

V první části práce byly srovnány vybrané používané metody s účelem stanovení užitečného rozsahu nastavení jednotlivých parametrů a to s ohledem nejen na redukci PAPR, ale i na výslednou chybovost a výpočetní náročnost celého systému.

V metodě založené na zjednodušeném ořezání s frekvenční filtrací byly aplikovány různé postupy omezení zkreslení. Tyto postupy byly vzájemně porovnány s ohledem na výslednou redukci PAPR, chybovost i složitost. Je-li kladen důraz na jednoduchou realizaci, je výhodné použít postup označený BD2. Složitější postup označený jako BD4 vede k nejvýraznějšímu poklesu PAPR. Při aplikaci postupu BD5 nedochází k žádnému zvýšení chybovosti, na druhou stranu redukce PAPR je výrazně horší než u ostatních postupů. Výsledky metody zjednodušeného ořezání s filtrací doplněné o omezení zkreslení, včetně jednotlivých postupů pro omezení zkreslení byly publikovány na mezinárodní zahraniční konferenci ve Slovinsku v roce 2007.

Metoda ořezání s omezením zkreslení SCAFBD byla v další části práce použita pro vytvoření kombinací s nezkreslujícími metodami SLM a PTS. Cílem bylo dosáhnout výraznější redukce PAPR než v případě jednotlivých metod, zároveň byl brán ohled na chybovost a výpočetní náročnost celého systému. Kombinace metod SLM a opakovaného ořezání s filtrací byla publikována na mezinárodní zahraniční konferenci IWSSIP & ECSIPMCS ve slovinském Mariboru v roce 2007. Kombinace metod PTS a SCAFBD byla publikována na mezinárodní konferenci Radioelektronika 2008 v Praze. Dále byla provedena analýza možností použití těchto kombinací metod v perspektivních systémech využívající OFDM (WiMAX a DVB-T2). Výsledky analýzy byly sumarizovány v příspěvku, který je nyní v recenzním řízení časopisu *Acta Electrotechnica et Informatica*.

V závěru práce byla zhodnocena výpočetní náročnost jednotlivých metod. Na konkrétním případu byla demonstrována možnost, jak kombinací metod výrazně snížit výpočetní náročnost systému s řádově stovkami nosných při zachování přibližně stejných výsledků v podobě dosažené redukce PAPR a chybovosti přenosu. V případě systémů s OFDM o velmi vysokém počtu nosných (řádově desetitisíce), je možné za cenu mírného zvýšení chybovosti dosáhnout výrazné redukce PAPR, která by jinak byla prakticky nerealizovatelná ani za cenu neúměrně vysoké výpočetní náročnosti.

## VYBRANÁ LITERATURA

- [1] ARMSTRONG, J. Peak-to-average power reduction for OFDM by related clipping and frequency domain filtering. *Electronics Letters*. 2002, Vol. 38, No. 5, pp. 246-247.
- [2] DENG, S.-K., LIN, M.-CH. Recursive Clipping and Filtering With Bounded Distortion for PAPR Reduction. *IEEE Transactions on communications*. 2007, Vol. 55, No. 1.
- [3] HAN, S. H., LEE, J. H. PAPR reduction of OFDM Signals Using a Reduced Complexity PTS Technique. *IEEE Signal Processing Letters*. 2004, Vol. 11, No. 11.
- [4] CHU, E., GEORGE, A. *Inside the FFT Black Box: Serial and Parallel Fast Fourier Transform Algorithms*. CRC Press LLC. 2000. ISBN: 0-8493-0270-6.
- [5] KENNINGTON, P. B. *High Linearity RF Amplifier Design*. Artech House Publisher, 2000.
- [6] KRONGOLD, B.S., JONES, D.L. PAR Reduction in OFDM via Active Constellation Extension. *IEEE Transactions on Broadcasting*. 2003, Vol. 49, No.3, pp. 258-268.
- [7] MENDOZA, O. *Measurement of EVM (Error Vector Magnitude) for 3G Receivers*. Master's Thesis, International Master Program of Digital Communications Systems & Technology. Gothenburg (Sweden): Chalmers University of Technology, 2002.
- [8] OCHIAI, H., IMAI, H. Performance of the Deliberate Clipping with Adaptive Symbol Selection for Strictly Band-Limited OFDM Systems, *IEEE Journal on Selected Areas in Comminivations*. 2000, Vol. 18, No. 11, pp. 2270-2277.
- [9] SALEH, A. Frequency-Independent and Frequency-Dependent Nonlinear Models of TWT Amplifiers. *IEEE Transactions on Communications*. 1981, Vol. 29, Issue. 11, pp. 1715-1720. ISSN: 0090-6778.
- [10] SATHANANTHAN, K., TELLAMBURA, C. Partial Transmit Sequence and Selected Mapping Schemes to Reduce ICI in OFDM Systems. *IEEE Communications Letters*. 2002, Vol. 6, No. 8., pp. 313-315.
- [11] SAUL, A. Comparison Between Recursive Clipping and Active Constellation Extension for Peak Reduction in OFDM Systems. In proceedings of *Int. Symp. Wireless Personal Multimedia Communications*. Japan, 2003, Vol. 1, pp. 19-22.
- [12] SAUL, A. Generalized Active Constellation Extension for Peak Reduction in OFDM Systems. 2005, pp. 1974-1979.
- [13] TELLADO, J. *Multicarrier Modulation with Low PAR Applications to DSL and Wireless*. Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [14] WANG, L., TELLAMBURA, CH. A Simplified Clipping and Filtering Technique for PAR Reduction in OFDM Systems, *IEEE Signal Processing Letters*. 2005, Vol. 12, No. 5., pp. 453-456.
- [15] ZHOU, G.T., PENG, L. Optimality Condition for Selected Mapping in OFDM. *IEEE Transactions on Signal Processing*. 2006, Vol. 54, No. 8.

## VYBRANÉ PUBLIKACE

- [16] URBAN, J., MARSALEK, R. OFDM PAPR reduction by combination of Interleaving with Repeated clipping and filtering. In *Proceedings of 2007 IWSSIP & ECSIPMCS*. Maribor (Slovenia): University of Maribor, Faculty of Electrical Engineering and Computer Science. 2007, pp. 261-264. ISBN 978-961-248-029-5.
- [17] URBAN, J., MARSALEK, R. OFDM PAPR reduction by simplified clipping and filtering with bounded distortion. In *16<sup>th</sup> International Electrotechnical and Computer Science Conference ERK 2007*. Portorož (Slovenia): Slovenian Section IEEE. 2007, pp. 128-131. ISSN 1581-4572.
- [18] URBAN, J.; MARSALEK, R. OFDM PAPR reduction by partial transmit sequences and simplified clipping with bounded distortion. In *Proceedings of the 18th International Conference Radioelektronika 2008*. Praha: Czechoslovakia Section IEEE. 2008, pp. 27-30. ISBN: 978-1-4244-2087-2.

## PROFESNÍ ŽIVOTOPIS

**Ing. Josef Urban**

Hlavní 45, 664 12 Oslavany

**Email:** [josefurban@phd.feec.vutbr.cz](mailto:josefurban@phd.feec.vutbr.cz)  
**Telefon:** +420 731 479 962  
**Narozený:** 16.8.1981 v Brně  
**Národnost:** česká  
**Rodinný stav:** svobodný

### Vzdělání

- 2006 – 2009** Doktorský studijní program Elektronika a sdělovací technika, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně, Dizertační práce – *Redukce dynamiky signálu v systémech s ortogonálním frekvenčním multiplexem*
- 2001 – 2006** Magisterský studijní program Elektronika a sdělovací technika, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně, Diplomová práce – *Optimální kombinace metod pro redukci dynamiky signálů OFDM*

### Odborná praxe

- 2005 – 2009** Star 21 Networks, a.s. - operátor v dohledovém centru. Brno  
**2004 – 2006** Sarria, s.r.o - technik. Ivančice

**Jazyky** Angličtina – středně pokročilý  
Němčina – základní znalost

### Oblasti vědeckého zájmu

Telekomunikační technika, zpracování signálů.

## **ABSTRAKT**

Předložená dizertační práce je zaměřená do oblasti radiových komunikačních systémů s více nosnými. Tyto systémy jsou perspektivní pro současné i budoucí systémy v mobilních komunikacích a bezdrátových sítích. Výhody použití více nosných jako například odolnost vůči mnohacestnému šíření jsou vykoupeny i některými nevýhodami. Mezi ty patří zejména velký poměr mezi špičkovým a středním výkonem přenášeného signálu, který je překážkou v provozu výkonových zesilovačů v pásmu vysoké účinnosti. Práce se zabývá metodami redukce poměru mezi špičkovým a středním výkonem pro systémy OFDM, které jsou jedněmi z nejvyužívanějších systémů s více nosnými. Jedním z hlavních cílů je modifikace stávajících metod vedoucí ke snížení výpočetní náročnosti. Předmětem zájmu je dále analýza možností vzájemných kombinací vhodných metod vedoucích k výraznějšímu snížení poměru mezi špičkovým a středním výkonem bez nežádoucího zvýšení chybovosti. Součástí je také studium vlivu těchto metod na OFDM signály s různými parametry.

## **ABSTRACT**

This doctoral thesis is focused into the area of multicarrier radio communications systems. These systems are perspective for current and incoming mobile communications and wireless networks. Advantages of multicarrier systems like better multipath propagation resistivity are redeemed by some disadvantages. The high peak to average power ratio of transmitted signal belongs to these disadvantages, for its inconvenience for high efficient power amplification. The thesis concerns with peak to average power ratio reduction methods for OFDM systems, that belongs to the most used multicarrier systems. One of the main objectives is the modification of the existing methods with the intention of complexity reduction. Following subject of interest is the analysis of suitable methods combinations possibilities for more significant peak to average power ratio reduction. One part of this thesis is research of influence of these methods on the OFDM signals with different parameters.