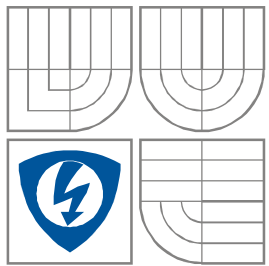




**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ**  
**ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

# **REDUKCE PAPR V OFDM A JEJÍ SIMULACE VE SCILABU**

PAPR REDUCTION IN OFDM AND SIMULATION IN SCILAB

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**  
MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**Bc. David Maňák**

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

**Ing. Josef Urban**



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor  
**Elektronika a sdělovací technika**

**Student:** Bc. David Maňák

**ID:** 54258

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2008/2009

## NÁZEV TÉMATU:

**Redukce PAPR v OFDM a její simulace ve Scilabu**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se podrobněji s modulací OFDM a se základními metodami pro redukci dynamiky signálu. V prostředí Scilab vytvořte jednoduchý OFDM modulátor a demodulátor a připravte si potřebné funkce pro zjednodušení simulace.

V prostředí Scilab implementujte jednoduchou metodu pro redukci PAPR v OFDM. Vytvořte GUI ovládací prostředí pro zadávání parametrů celé simulace.

Implementujte další metodu pro redukci PAPR v OFDM a vytvořte simulaci srovnávající obě metody. Opět použijte GUI pro nastavování jednotlivých parametrů.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] TELLADO, J. Multicarrier Modulation with Low PAPR Applications to DSL and Wireless. Norwell: Kluwer Academic Publishers, 2000.

[2] CAMPBELL, S.L., CHANCELIER, J.P., NIKOUKHAH, R. Modeling and Simulation in Scilab/Scicos. New York: Springer, 2006.

[3] ARMSTRONG J., Peak-to-average power reduction for OFDM by repeated clipping and frequency domain filtering. Electronics Letters, 28TH February 2002, vol. 38, no. 5, p. 246-247

**Termín zadání:** 9.2.2009

**Termín odevzdání:** 29.5.2009

**Vedoucí práce:** Ing. Josef Urban

**prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida**

*Předseda oborové rady*

**UPOZORNĚNÍ:**

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práve třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

## Anotace:

Cílem této práce je prostudování modulace OFDM její princip a vlastnosti. Dále se seznámíme s vybranými základními metodami pro redukci dynamiky PAPR v OFDM, jako např. ořezávání signálu (Clipping) nebo prokládání vstupní posloupnosti bitů (Interleaving). Simulace metod redukce bude probíhat v prostředí Scilab, kde jsou vytvořeny základní funkce pro modulátor a demodulátor modulace OFDM. Dále jsou vytvořeny funkce pro metody redukce PAPR. Všechny vytvořené funkce jsou implementovány do GUI.

## Klíčová slova

PAPR, OFDM, Clipping, Interleaving, Cyklický prefix

## Abstract:

Main goal of this dissertation is read over principal and properties of the OFDM modulation. Onward we become acquainted with basic methods for PAPR dynamics reduction in OFDM such as Clipping or Interleaving. Simulation of reduction methods will be realized in Scilab environment, in which are made basic functions for OFDM modulator and demodulator. Furthermore there are created functions for PAPR reduction methods. All established functions are implemented in the GUI.

## Keywords

PAPR, OFDM, Clipping, Interleaving, Cyclic prefix

## **Bibliografická citace projektu:**

MAŇÁK, D. *Redukce PAPR v OFDM a její simulace ve Scilabu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 43 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Josef Urban.

# Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Redukce PAPR v OFDM a její simulace ve Scilabu jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 29. května 2009

.....  
podpis autora

# Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Josefu Urbanovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne 29. května 2009

.....  
podpis autora

## Obsah:

1. ÚVOD .....	2
2. OFDM .....	3
2.1 Princip a vlastnosti .....	3
2.2 Modulátor OFDM .....	4
2.2.1 Cyklický prefix (CP) .....	5
2.3 Demodulátor OFDM .....	6
2.3 PAPR .....	6
2.3.1 Určení PAPR ze signálu OFDM .....	6
2.3.2 Proč redukovat PAPR? .....	7
3. Metody redukce PAPR v OFDM .....	8
3.1 Ořezávání signálu (Clipping) .....	8
3.2 Opakovaný Clipping a frekvenční filtrace signálu (OCFF) .....	8
3.3 Prokládání (Interleaving) .....	9
3.3.1 Modulátor OFDM s Interleavingem .....	9
3.3.2 Demodulátor OFDM s Interleavingem .....	11
4. Ovládací prostředí simulace .....	12
4.1 Scilab .....	12
4.2 Vzhled simulačního prostředí .....	13
4.3 Modulátor OFDM .....	14
4.4 Demodulátor OFDM .....	16
4.5 Metody redukce PAPR .....	17
4.5.1 Clipping .....	17
4.5.2 OCFF .....	18
4.5.3 Interleaving .....	18
5. Simulace metod redukce PAPR .....	19
5.1 Clipping .....	19
5.2 OCFF .....	24
5.3 Interleaving .....	29
6. Simulace srovnávací metody redukce PAPR .....	36
7. Závěr: .....	40
Použitá Literatura .....	41
Seznam obrázků a tabulek: .....	42

# 1. ÚVOD

Modulace OFDM se v dnešní době poměrně hojně využívá v moderních a rychlých komunikačních spojích jako třeba DVB-T nebo u bezdrátových sítí standartu: 802.11a a dalších. Tato modulace je typická tím, že se přiváděný signál rozloží na více subnosných kanálů, které jsou mezi sebou ortogonální. Mezi hlavní výhody této modulace patří zejména vysoká spektrální účinnost a velká odolnost proti rušení. Zásadní nevýhodou této metody je poměrně velká dynamika signálu (PAPR).

V této práci se dozvíme o základních principech a vlastnostech modulace OFDM. Seznámíme se s vybranými principy metod redukce dynamiky v OFDM (Clipping, Interleaving).

Během této práce jsou vytvořeny základní funkce v prostředí Scilab pro simulaci modulátoru a demodulátoru modulace OFDM. Dále jsou tyto funkce implementovány do grafického uživatelského rozhraní (GUI), které je doplněno o metody redukce PAPR.



## 2. OFDM

je zkratka z anglického Orthogonal Frequency Division Multiplexing, česky ortogonální multiplex s kmitočtovým dělením. Jedná se o přenosovou techniku pracující s tzv. rozprostřeným spektrem. [2]

### 2.1 Princip a vlastnosti

Základní princip spočívá v tom, že původní datový tok se rozdělí na  $M$  paralelních cest (nosných), kde každá paralelní větev je modulována na jiný nosný kmitočet. Přenosová rychlost je  $M$ -krát menší než původního signálu tzn., že se nám prodlouží doba trvání symbolových prvků. Díky této skutečnosti se neuplatňuje časový rozptyl signálů šířící se po různých dráhách.

Signál OFDM v základním pásmu je tvořen signálovými prvky modulace BPSK, QPSK, M-QAM. Signál je možné podle [3] vyjádřit pomocí komplexní funkce  $s(t)$

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \sum_{m=0}^{M-1} a_{m,n} x_{m,n}(t) \quad (2.1)$$

kde:  $a_{m,n}$  komplexní číslo přiřazené přenášené kombinaci bitů (např. pro QPSK odpovídají jednotlivým dibitům hodnoty z množiny  $\{1+j, -1+j, -1-j, 1-j\}$ )  
 $m$  celé číslo udávající pořadí nosné  
 $n$  celé číslo udávající pořadí signálového prvku  
 $x_{m,n}(t)$  funkce popsána rovnicí

$$x_{m,n}(t) = \text{Rect}_T(t - nT) \exp\left(j2\pi m \frac{t}{t_0}\right) \quad (2.2)$$

kde: doba  $T$  se skládá z intervalu  $t_0$  a tzv. ochranného intervalu  $\Delta$ :  $T = t_0 + \Delta$   
doba  $t_0$  doba po kterou jsou nosné signály ortogonální  
 $\Delta$  ochranný interval zamezuje mezisymbolovému rušení  
 $\text{Rect}(t)$  vymezuje dobu trvání symbolového prvku

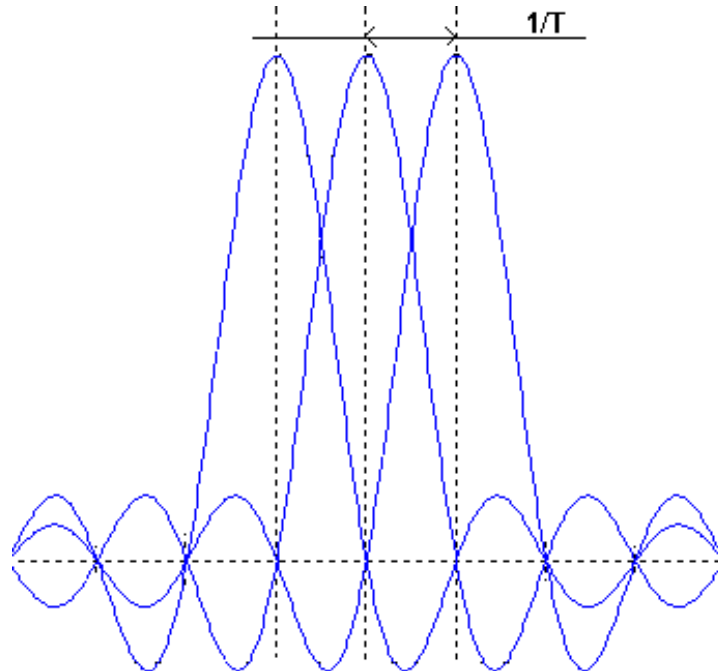
Úhlové kmitočty jsou dány vztahem:

$$\omega_m = \frac{2\pi m}{t_0} \quad (2.3)$$

Zásadním rozdílem prvků v OFDM oproti jiným signálům z rozprostřeným spektrem je to, že nosné jsou navzájem ortogonální, tzn., že skalární součin nosných  $s_1$  a  $s_2$  je roven nule viz následující vztah:

$$\int_0^T s_1(t) \cdot s_2(t) dt = 0 \quad (2.4)$$

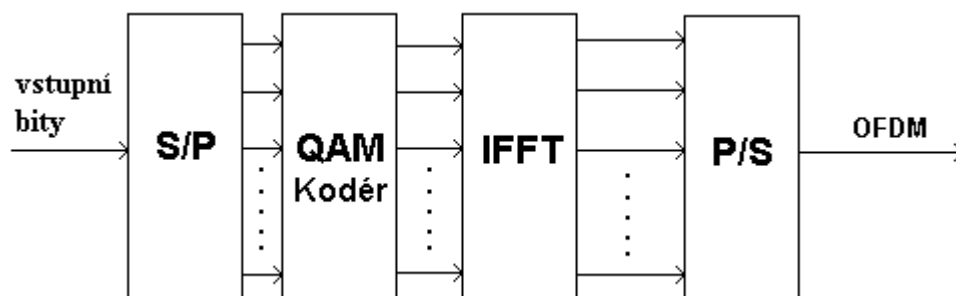
Díky této skutečnosti není potřeba vkládat mezi nosné ochranné pásmo, čímž se značně zvětšuje spektrální účinnost. Ortogonalita se zajišťuje vhodným typem modulace např.: M-QAM a rozestupem mezi nosnými  $f = 1/T$  viz.: obr. 2.1.



obr. 2.1: Frekvenční spektrum několika nosných vln systému OFDM

## 2.2 Modulátor OFDM

Blokové schéma jednoduchého základního modulátoru OFDM



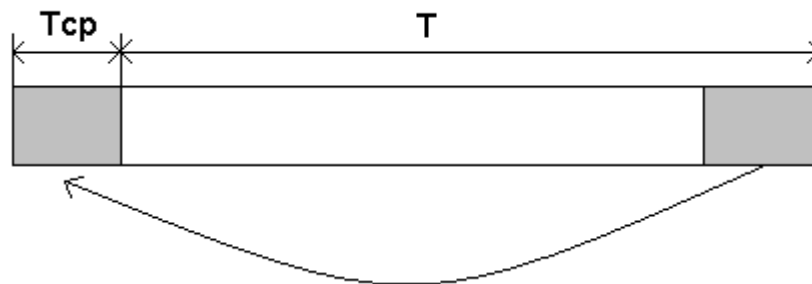
obr. 2.2: Blokové schéma jednoduchého modulátoru OFDM

Jako první jsou vstupní bity převedeny na ze sériového (S) toku na paralelní (P). Po převodu jsou bity v QAM kodéru mapovány podle zvolené modulace např. QPSK. Dále se provede převod signálu z frekvenční do časové oblasti pomocí výpočtu IFFT (inverzní rychlá Fourierova transformace) pro každý symbol M-QAM. Nakonec je

proveden P/S převod signálu z čehož vznikne komplexní OFDM symbol, který se musí dále ještě upravit, abychom ho mohly vyslat.

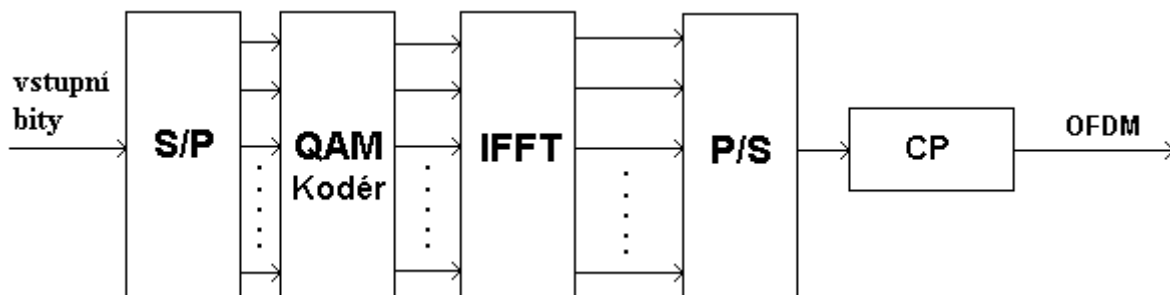
### 2.2.1 Cyklický prefix (CP)

Jedná se o cyklické prodloužení nebo cyklickou předponu, která se vkládá místo ochranného intervalu mezi symboly, tzn., že se cyklicky zopakuje koncová část signálu odpovídající aktuálnímu symbolu viz obr. 2.3. Díky této technice je systém ještě více odolný vůči vícecestnému šíření.



obr. 2.3: Vytvoření cyklického prefixu v symbolu

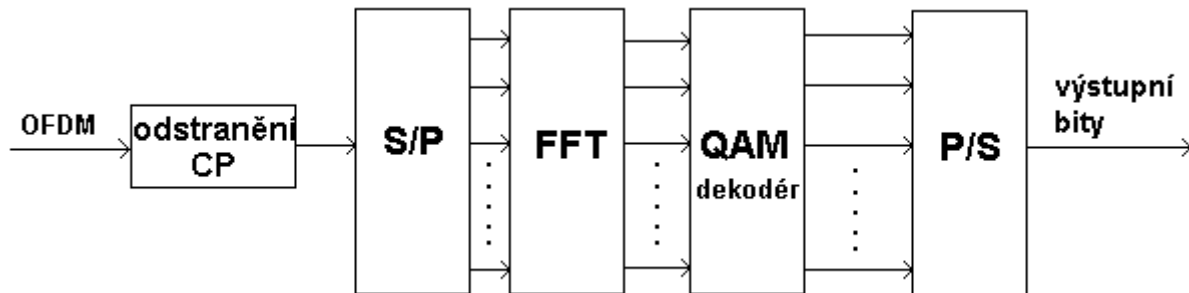
Bloková jednotka vytváření cyklického prefixu se vkládá za blokovou jednotku P/S viz obr. 2.4.



obr. 2.4: Blokové schéma jednoduchého modulátoru OFDM s CP

## 2.3 Demodulátor OFDM

Blokové schéma jednoduchého základního demodulátoru OFDM



obr. 2.5: Blokové schéma jednoduchého demodulátoru OFDM s CP

Je zřejmé, že jde o inverzi modulátoru, tudíž se jako první se odstraní CP, dále se provede sérioparalelní převod, po té se převede signál z časové oblasti do frekvenční pomocí rychlé Fourierovy transformace (FFT), dále prvky projdou dekodérem QAM a nakonec je proveden P/S převod viz obr. 2.5.

## 2.3 PAPR

Z anglického Peak to Average Power Ratio – poměr špičkového výkonu ke střednímu výkonu, neboli dynamika signálu. Matematické vyjádření podle [2] :

$$\text{PAPR}(s) = 10 \log_{10} \frac{\max |s(t)|^2}{E\{|s(t)|^2\}} \quad (2.4)$$

kde:  $\max |s(t)|^2$  maximální okamžitý výkon signálu  
 $E\{|s(t)|^2\}$  střední hodnota výkonu signálu

Pro OFDM je maximální teoretická hodnota PAPR:

$$\text{PAPR}_{\text{MAX. Teor.}} = 10 \log(M) \quad (2.5)$$

kde M je počet nosných

Vysoká hodnota PAPR signálu je velká nevýhoda OFDM systémů, naštěstí hodnoty  $\text{PAPR}_{\text{MAX. Teor.}}$  nabývá jen s malou pravděpodobností. PAPR se obvykle uvádí na symbolové periodě OFDM signálu.

### 2.3.1 Určení PAPR ze signálu OFDM

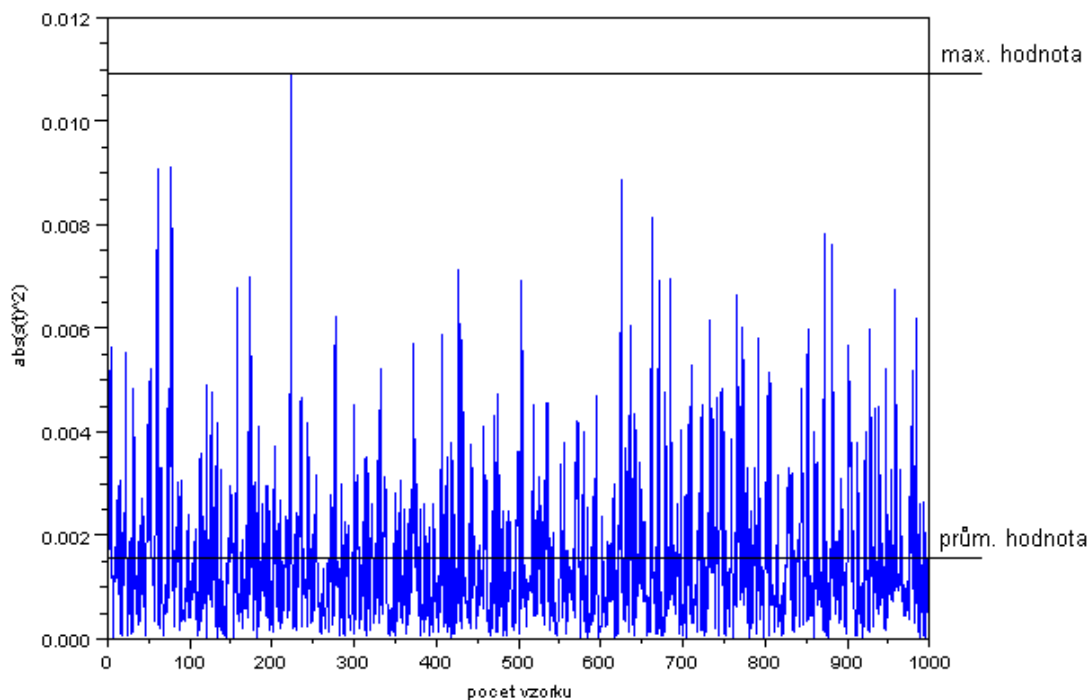
Jak bylo popsáno výše, velikost PAPR je udána poměrem hodnot maximálního okamžitého výkonu ke střednímu (průměrnému) výkonu signálu.

Např. pro OFDM signál s parametry: počet symbolů = 10, počet nosných = 100, počet nul v symbolu = 20, modulace QPSK.

Je teoretická maximální hodnota PAPR:

$$\text{PAPR}_{\text{MAX}} = 10 \log (\text{počet nosných}) = 10 \log (100) = 20 \text{ dB} \quad (2.6)$$

Při simulaci je hodnota PAPR mnohem menší, než je maximální teoretická hodnota.



obr. 2.6: Absolutní hodnota výkonu signálu OFDM

Vypočet hodnoty PAPR:

$$\begin{aligned} \text{PAPR} &= 10 \log (\text{max. hodnota} / \text{průměrná hodnota}) = 10 \log (0,0109/0,0016) \\ &= 10 \log (6,8) = 8,33 \text{ dB} \end{aligned}$$

Uvedené výpočty potvrzují, že maximální teoretické hodnoty PAPR je dosaženo jen velmi zřídka.

### 2.3.2 Proč redukovat PAPR?

Jelikož výkonový zesilovač kvůli vysoké účinnosti pracuje v nelineární oblasti, jsme nuceni pracovat v úzkém pásmu pracovní charakteristiky, musíme proto zajistit dostatečně malé PAPR. U signálů s konstantní obálkou není nelinearita žádný problém, ale dnes běžně používané signály mají obálku nekonstantní. Nelinearita způsobuje zvýšení chybovosti a emisí do sousedních kanálů, proto musíme PAPR udržovat co možná nejnižší.

### 3. Metody redukce PAPR v OFDM

Metod pro redukci PAPR je několik, v této práci jsou vybrány tyto:

- ořezávání signálu (Clipping) [4]
- opakovaný Clipping a frekvenční filtrace signálu (OCFF) [6]
- prokládání (Interleaving) [5], [9]

#### 3.1 Ořezávání signálu (Clipping)

Ořezávání signálu je jedna ze základních metod redukce PAPR. Princip dle [4] spočívá ve sledování absolutní hodnoty amplitudy v čase a porovnávání s nastavenou maximální úrovní. Pokud je hodnota vyšší než požadovaná dojde k limitaci amplitudy na požadovanou úroveň. Matematické vyjádření:

$$\bar{s}(t) = \begin{cases} |s(t)| & \text{jestliže } |s(t)| \leq A \\ A & \text{jestliže } |s(t)| > A \end{cases} \quad (3.1)$$

kde:  $|s(t)|$  velikost amplitudy signálu v čase  
 $A$  požadovaná maximální úroveň

Požadovaná maximální úroveň je podle [7] označována jako CR (Clipping Ratio) a je definována:

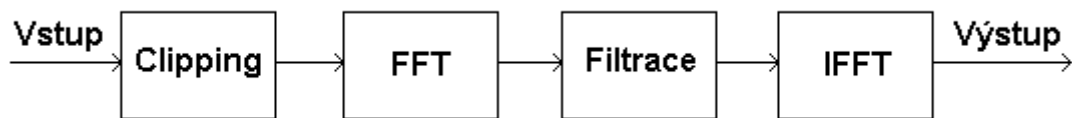
$$CR = 10 \log_{10} \left( \frac{A^2}{E[|s(t)|^2]} \right) \text{ dB} \quad (3.2)$$

kde je  $E[|s(t)|^2]$  střední hodnota kvadrátu signálu

Nevýhodou této metody je, že ořezáváním dochází k poměrně velkému zkreslení, a proto musíme volit kompromis mezi velikostí limitace a zkreslením. Kromě zkreslení také dochází ke zvyšování výkonu v postraních pásmech spektra, což představuje největší nevýhodu Clippingu.

#### 3.2 Opakovaný Clipping a frekvenční filtrace signálu (OCFF)

Repeated clipping and frequency domain filtering podle [6] metoda využívá clipping, po kterém je signál dále převeden z časové do frekvenční oblasti, kde je provedena filtrace viz. obr. 3.1. Filtrací signálu sice docílíme nezvyšování výkonu postraních pasem ve spektru, ale částečně se navýší místa v signálu, která byla při Clippingu „ořezána“. Opakováním Clippingu a filtrace je navyšování „ořezaných“ míst minimalizováno.

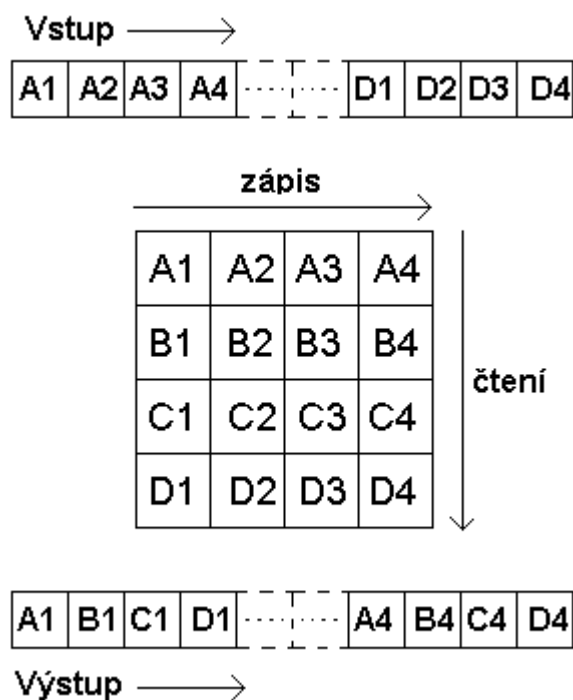


obr. 3.1: Blokové schéma metody OCFF bez opakování

Tato modifikace předchozí metody sice odstraňuje její hlavní nevýhodu, ale za cenu větší výpočetní náročnosti, která je způsobena potřebou výpočtu FFT a IFFT pro každé opakování.

### 3.3 Prokládání (Interleaving)

Tato metoda je dle [5] založena na zakódování vstupní posloupnosti. K zakódování se většinou používá maticový interleaver. Samotný princip této metody je poměrně jednoduchý. Základem kódování je řazení prvků do matice. Řazení se provádí tak, že vstupní data se zapisují po řádcích a výstupní čtou po sloupcích viz obr. 3.2.

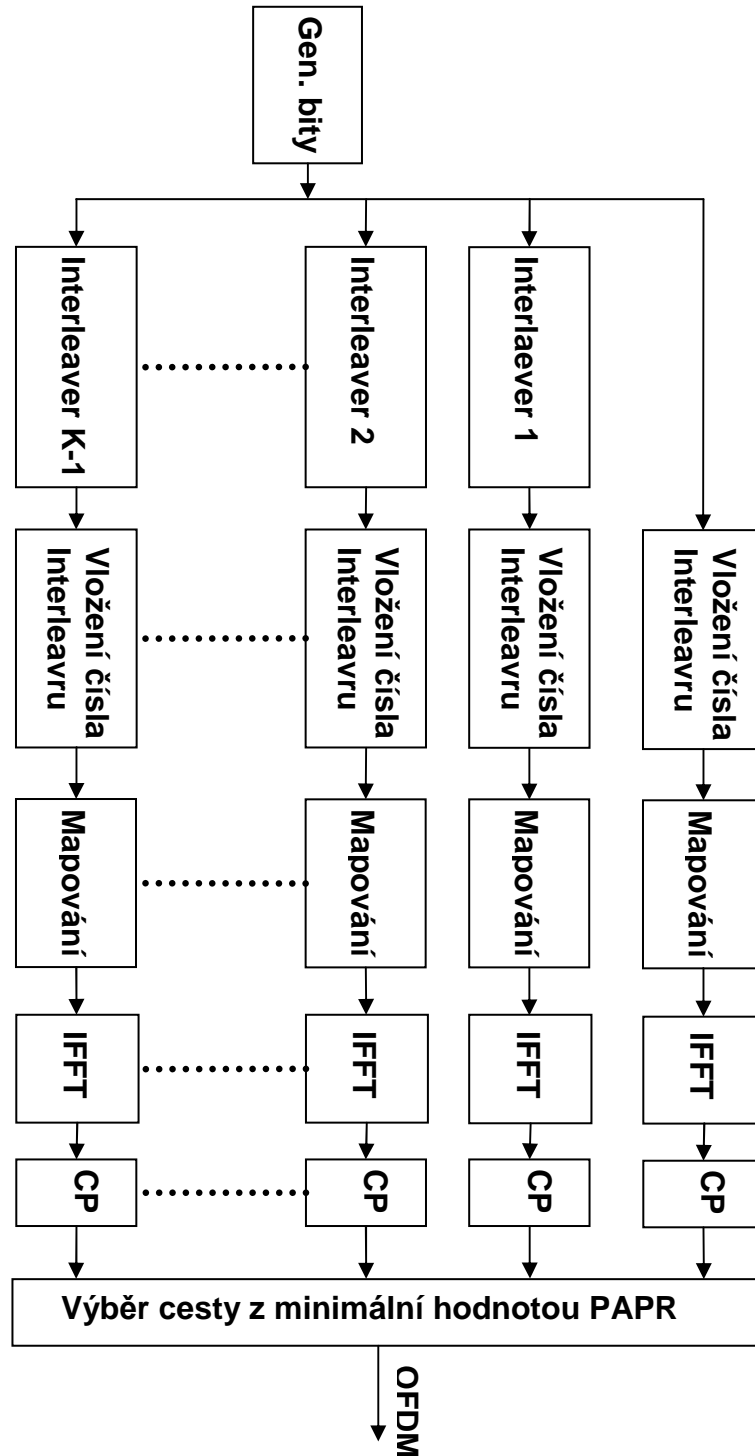


obr. 3.2: Princip řazení prvku do matice při prokládání

Mezi hlavní výhody této metody patří zejména to, že nevznáší žádné zkreslení jako Clipping, ale velkou nevýhodou je ne příliš velká míra redukce PAPR.

#### 3.3.1 Modulátor OFDM s Interleavingem

Jelikož po zakódování vstupních dat do matice není jasně určeno jaká hodnota PAPR vyjde, může být menší ale i větší než původní PAPR, proto se modulátor dle [9] většinou řeší vícecestným zakódováním vstupních dat viz následující blokové schéma možné realizace modulátoru OFDM s Interleavingem obr. 3.3.



obr. 3.3: Modulátor OFDM s K cestním interleavrem

Generované bity jsou přivedeny na všechny cesty modulátoru, který obsahuje K-1 interleaverů. První cestou projdou bity beze změny a je pouze doplněna informace o použité cestě. U zbylých cest se provede proklad o definované matici pro každou cestu jiný. Poté je doplněna informace o použité cestě. Dále následuje průběh jednoduché OFDM modulace viz kapitola 2.2. Po vytvoření OFDM signálu vstupují všechny cesty do jednotky, která vybere cestu s nejnižší hodnotou PAPR a ta je dále použita pro další zpracování.

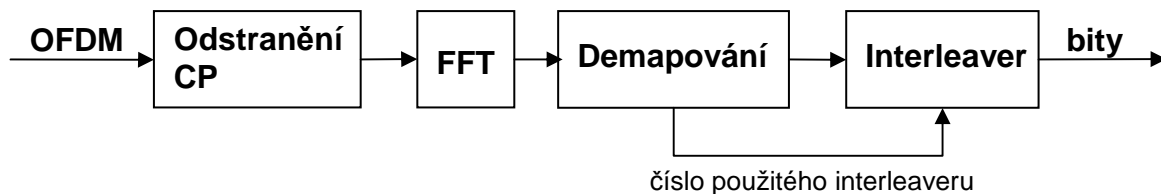


## Vkládání informace o použité cestě

Vkládání informace o použité cestě je velmi důležité, protože jinak není možné správně demodulovat původní data. Samotná informace může být jen číslo od 0 až po počet cest modulátoru, číslo je v binární podobě. Pro vložení informace je nutné vyčlenit 1 nebo i více nosných. Počet nosných použitých pro informaci je závislý na typu použité M-QAM modulace a na počtu cest modulátoru, např. při modulaci QPSK a 5-cestného modulátoru, je nutné vyčlenit 2 nosné, ale při modulaci 16-QAM by stačila jen jedna. Díky této potřebě vkládat informace o použité cestě se zmenší počet nosných pro samotná data.

### 3.3.2 Demodulátor OFDM s Interleavingem

Blokové schéma demodulace OFDM s následným prokladem:



obr. 3.4: Demodulátor OFDM s interleaverem

Z počátku je průběh demodulace OFDM shodný s jednoduchým demodulátorem viz kap. 2.3. Po provedení demodulace jsou výstupní data přeskládána v interleaveru a to tak, že použijeme stejnou matici jako u modulátoru, ale zápis se provádí do sloupců a čtení po řádcích, nebo zaměníme rozměry prokládací matice a zapisujeme a čteme stejně jako v modulátoru.

## 4. Ovládací prostředí simulace

Ovládací prostředí simulace je vytvořeno pomocí prvků GUI (Graphical User Interface) vývojového prostředí Scilab.

### 4.1 Scilab

Scilab je dle [10] vědecký software pro numerické výpočty, poskytuje výkonné výpočetní otevřené prostředí pro inženýrské a vědecké aplikace. Scilab je volně šiřitelný software ke stažení z [www.scilab.org](http://www.scilab.org).

Obsahuje stovky matematických funkcí s možností přidání interaktivních programů z různých jazyků (C, C + +, Fortran, atd.). Má sofistikované datové struktury (seznamy, polynomy, racionální funkce, lineární systémy, atd.). Programovací syntaxe je hodně podobná z programem Matlab.

Scilab funguje na většině Unixových systémů (včetně GNU / Linux) a Windows (9X/2000/XP/Vista).

K dispozici je také on-line nápověda a anglické uživatelské příručky.

Scilab podobně jako Matlab obsahuje velké množství Toolboxů např.:

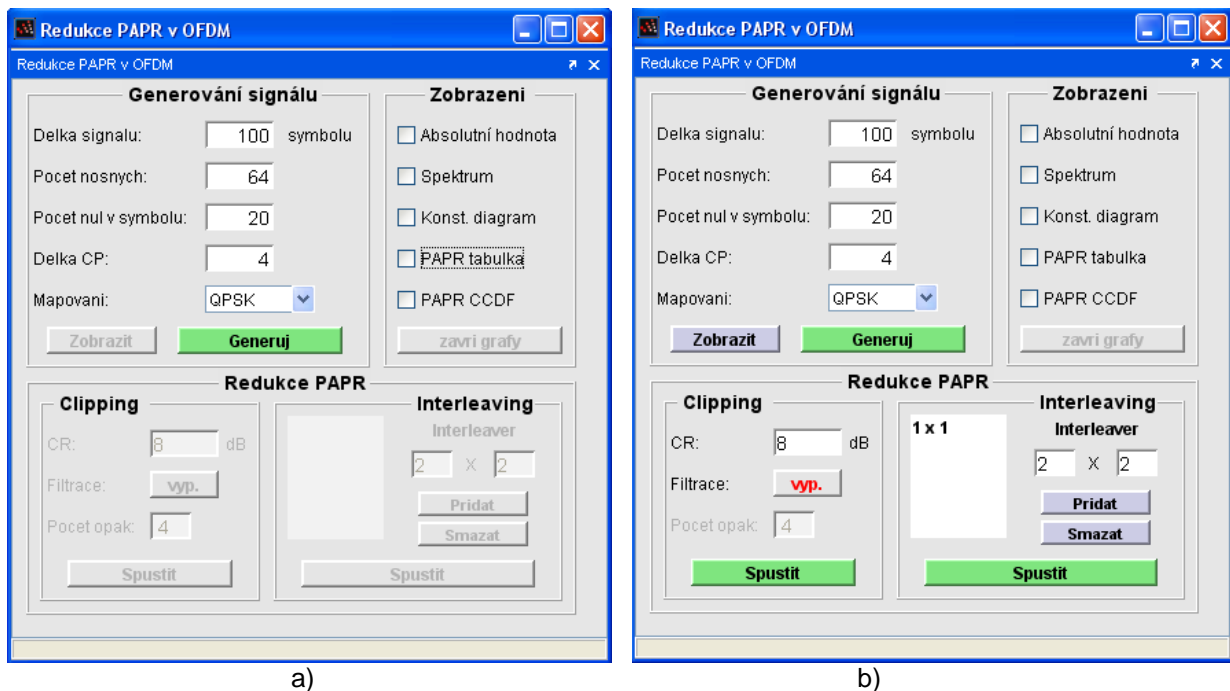
- 2-D a 3-D grafika, animace
- Lineární algebra, matice
- Polynomiální a logické funkce
- Interpolace, aproximace
- Scicos: hybridní dynamické systémy modelář a simulátor
- Klasické a robustní řízení, LMI optimalizace
- Diferencovatelná a nediferencovatelná optimalizace
- Zpracování signálu
- Metanet: grafy a sítě
- Statistika
- Prostředí výpočtové algebry: (Maple, ...)
- Prostředí s Fortran, Tcl/Tk, C, C++, Java, LabVIEW
- A velké množství příspěvků z různých oblastí

## 4.2 Vzhled simulačního prostředí

Po spuštění programu viz obr.: 4.1a) jsou implicitně nastaveny hodnoty generovaného signálu:

- Délka signálu 100 symbolů
- Počet nosných 64
- Počet nul v symb. 20
- Délka CP 4
- Mapování QPSK

Tyto hodnoty je možné měnit.



obr. 4.1: Vzhled simulačního programu

Po zadání parametrů generovaného signálu, se stiskne tlačítko *Generuj*, tím se aktivuje funkce pro výpočet generovaného signálu dle zadaných parametrů.

Pokud je výpočet generovaného signálu dokončen, jsou aktivovány zbylé panely programu (metody redukce PAPR, tlačítko *Zobrazit*) viz obr.: 4.1b).

Tlačítko *Zobrazit* slouží k zobrazení generovaného signálu dle zvolených možností v panelu *Zobrazení*.

Implicitní nastavení hodnot pro jednotlivé metody redukce PAPR jsou:

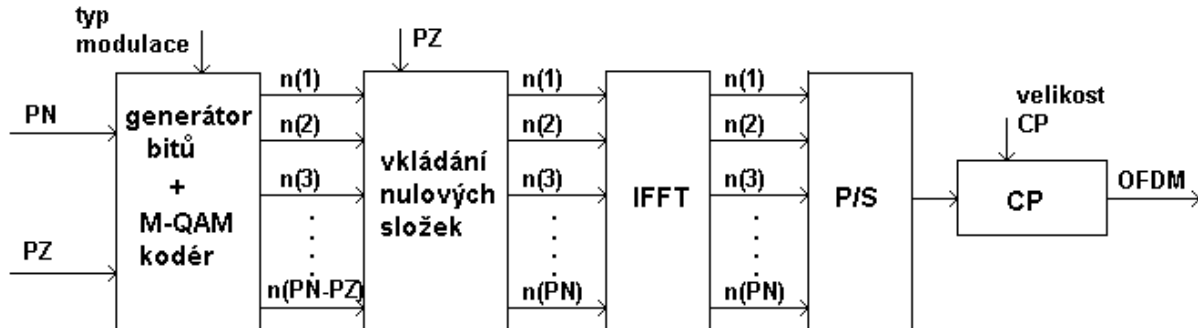
- Clipping CR = 8 dB
- OCFF CR = 8 dB, počet opak. = 4
- Interleaving počet cest 1 (cesta bez prokladu), přidání další cesty o rozměru matice interleaveru 2 x 2.

Aktivace metody je provedena stiskem tlačítka *Spustit* u příslušné metody.

Po zobrazení průběhů dojde k aktivaci tlačítka *zavři grafy*, které slouží k ukončení všech aktuálních vizualizací.

### 4.3 Modulátor OFDM

Na obr. 4.2 je znázorněno blokové schéma výpočtového modelu modulátoru OFDM v prostředí Scilab.



obr. 4.2: Blokové schéma modulátoru OFDM pro Scilab

kde: PN – počet nosných v symbolu  
 PZ – počet nulových složek v symbolu

Po zadání hodnot PN, PZ a typu modulace je vygenerována matice bitů velikosti [1x(PN-PZ)]. Velikost prvku matice je dána typem modulace (pro QPSK 2 bity). Dále jsou bity matice mapovány zvolenou modulací a doplněny nulovými složkami (vkládají se doprostřed mezi generované nosné). Následuje IFFT a převod na sériový tok dat. Na konec je přidána k symbolu cyklická kopie (CP) čímž vzniká výstupní komplexní OFDM signál.

#### Možné výstupy zobrazení z modulátoru OFDM

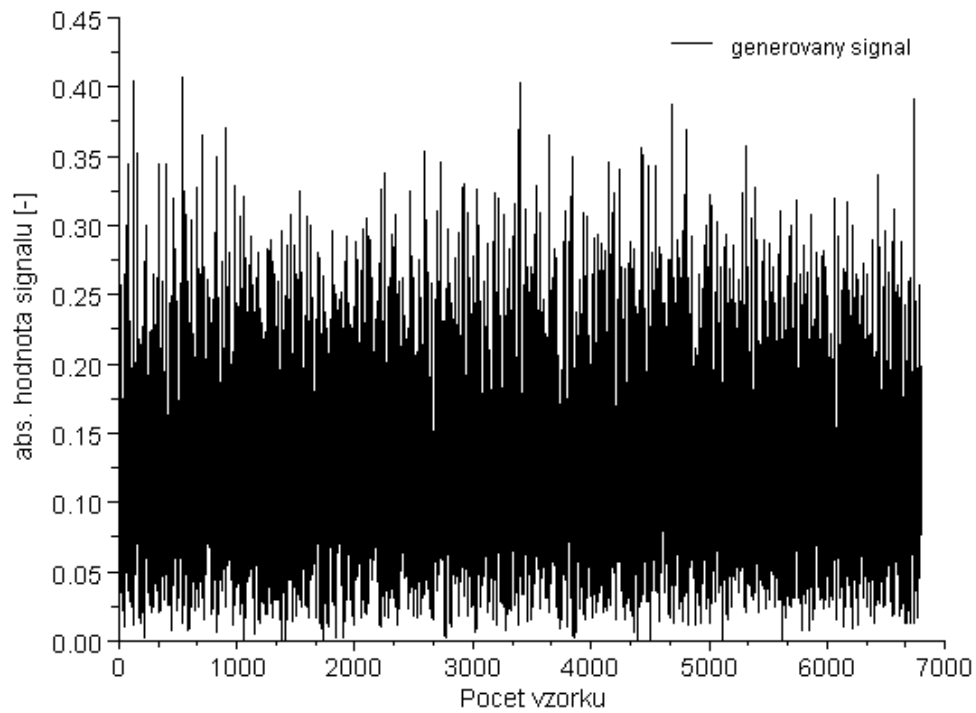
Pro zobrazení možných výstupů z modulátoru je použito nastavení implicitních hodnot generovaného signálu. Počet symbolů = 100, PN = 64, PZ = 20, CP = 4.

- Velikost hodnot PAPR (zobrazení tabulkou)

PAPR [dB]	Gen. signal	Clipping	OCFF	Interleaving
Maximum:	9.697			
Minimum:	4.773			
Prumer :	6.604			

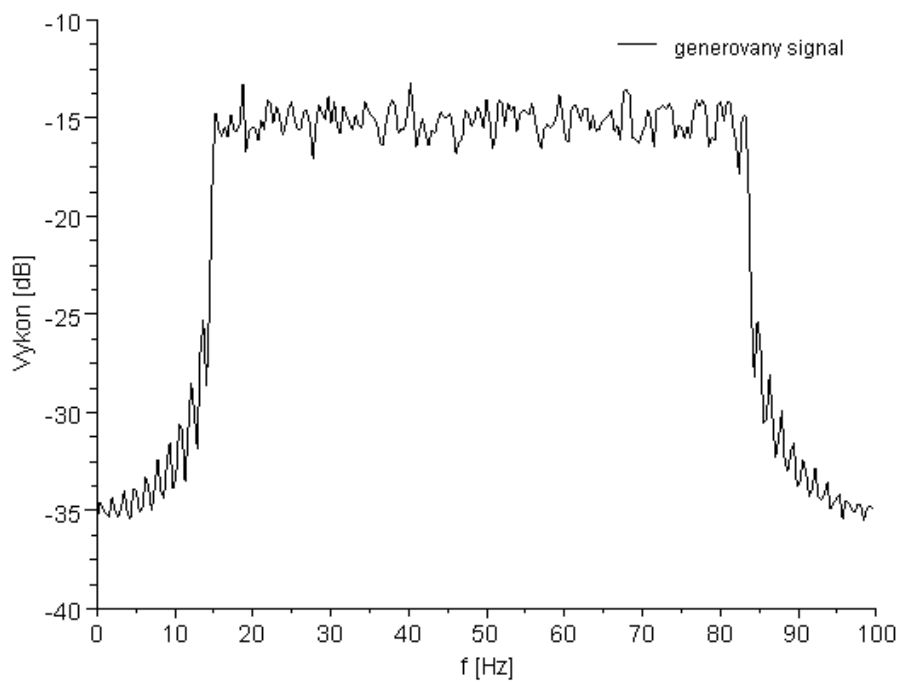
obr. 4.3: Zobrazení hodnot PAPR signálu OFDM v programu

- Absolutní hodnota signálu OFDM na výstupu z modulátoru



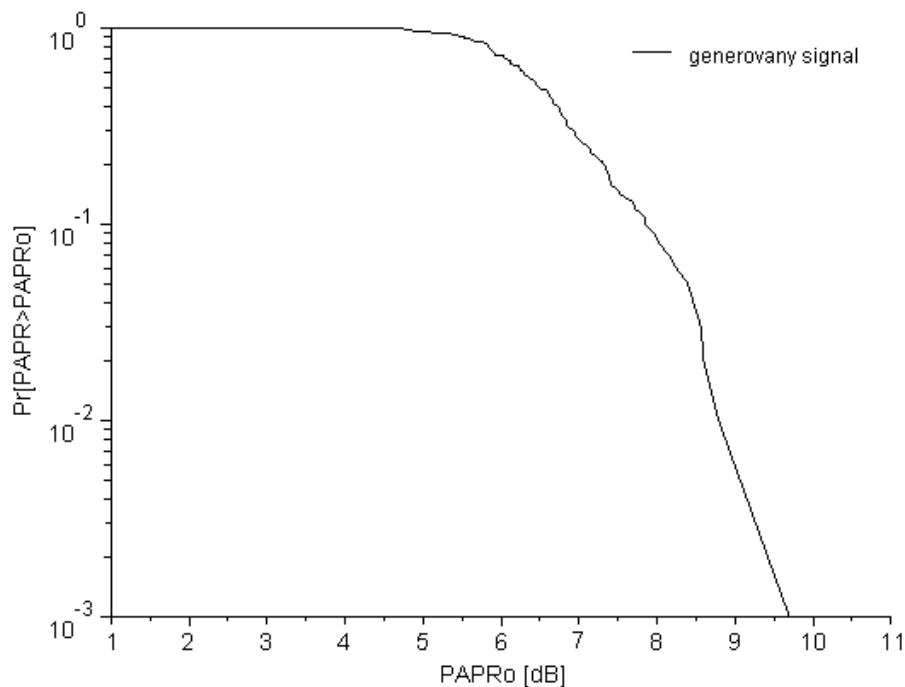
obr. 4.4: Absolutní hodnota signálu OFDM

- Výkonové spektrum signálu OFDM na výstupu z modulátoru



obr. 4.5: Výkonové spektrum signálu OFDM

- Velikost hodnot PAPR při použití funkce CCDF

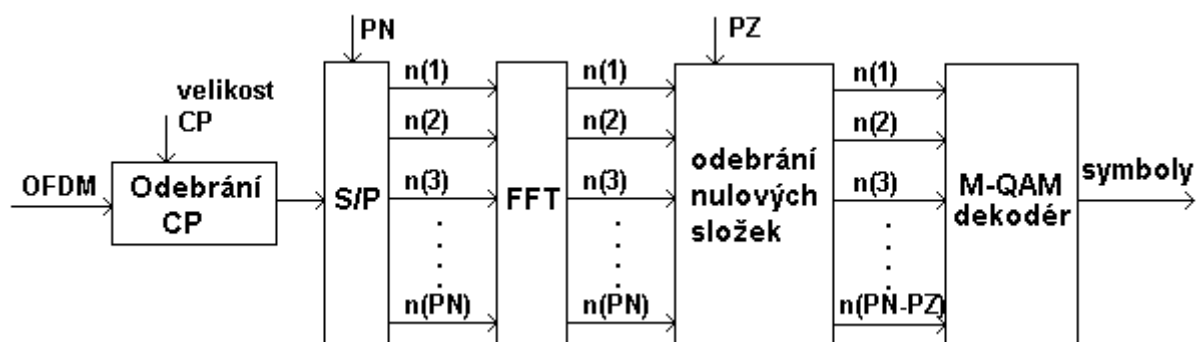


obr. 4.6: Velikost hodnot PAPR při použití funkce CCDF

Pomocí funkce CCDF (Complementary Cumulative Distribution Function) je spočítána pravděpodobnost s jakou je velikost PAPR symbolu signálu větší než  $PAPR_0$ .

#### 4.4 Demodulátor OFDM

Na obr. 4.7 je znázorněno blokové schéma výpočtového modelu demodulátoru OFDM v prostředí Scilab.

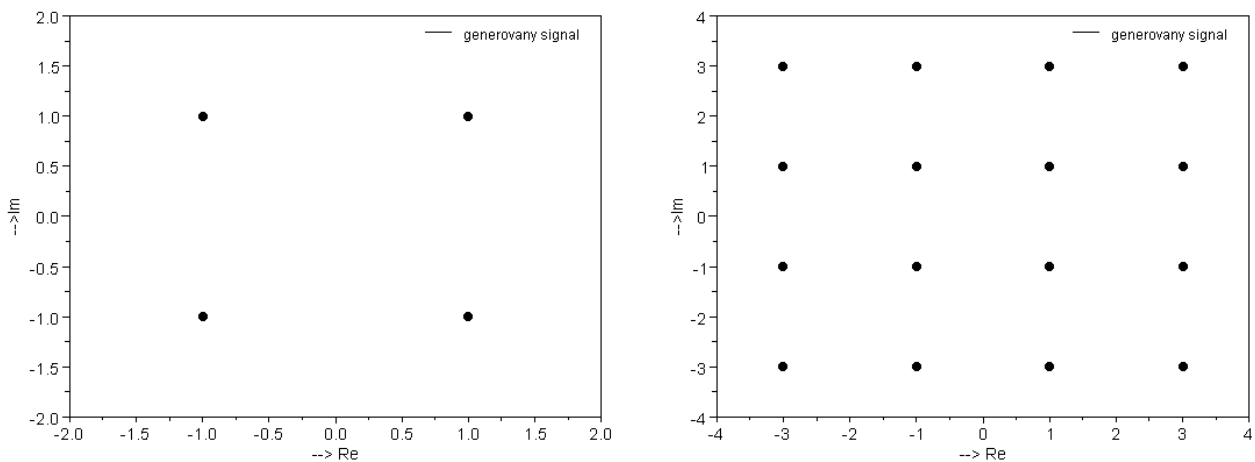


obr. 4.7: Blokové schéma demodulátoru OFDM pro prostředí Scilab

Realizace demodulátoru OFDM je provedena inverzí modulátoru, kde se jako první odstraní cyklická kopie (CP), poté S/P převod a následuje výpočet FFT. Dále jsou odebrány nulové složky ze středu signálu. Nakonec je provedeno dekódování M-QAM a na výstupu získáme M-QAM symboly.

## Možné výstupy z demodulátoru OFDM

- Konstelační diagramy s QPSK a 16-QAM modulací



obr. 4.7: Konstelační diagramy QPSK a 16-QAM

## 4.5 Metody redukce PAPR

V programu byly vytvořeny 3 vybrané metody redukce PAPR: Clipping, OCFF, Interleaving.

### 4.5.1 Clipping

Na obr. 4.9 je znázorněno blokové schéma výpočtového modelu metody redukce PAPR Clipping v prostředí Scilab.

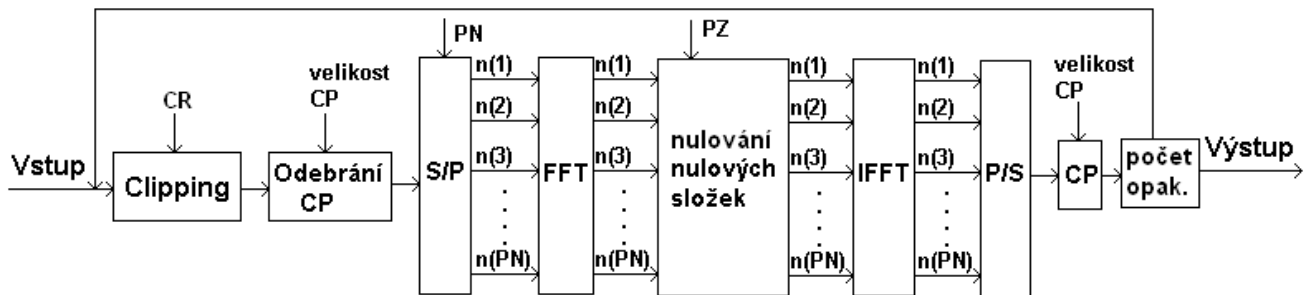


obr. 4.9: Blokové schéma metody clipping v prostředí Scilab

Vstupní parametr CR je přepočten na maximální absolutní hodnotu signálu (A). V bloku ořezání je sledována absolutní hodnota signálu a dochází k limitaci signálu na velikost A viz vztah (3.1).

## 4.5.2 OCFF

Na obr. 4.10 je znázorněno blokové schéma výpočtového modelu metody redukce PAPR OCFF v prostředí Scilab.

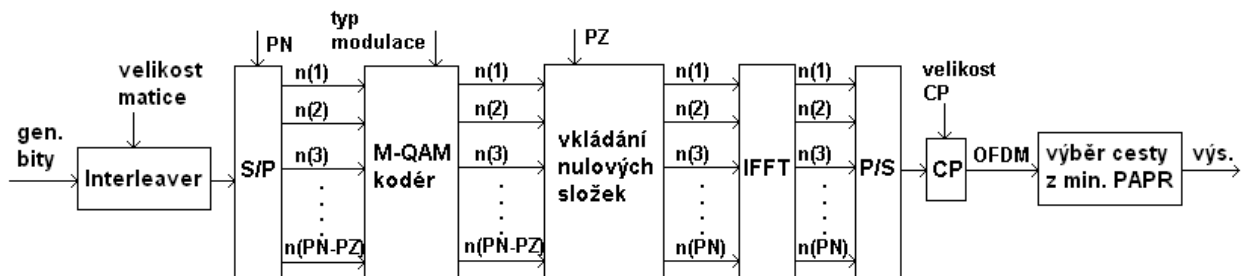


obr. 4.10: Blokové schéma metody OCFF v prostředí Scilab

Na vstup je přiváděn komplexní OFDM signál, na který je aplikována metoda Clipping. Dále je ze signálu odstraněna cyklická kopie a následuje FFT. Po té probíhá filtrace (nulování vložených nulových složek). Po filtraci je provedena IFFT a přidání cyklické kopie. Je proveden požadovaný počet opakování cyklu a nakonec je signál přiveden na výstup.

## 4.5.3 Interleaving

Na obr. 4.11 je znázorněno blokové schéma výpočtového modelu metody redukce PAPR interleaving realizace jedné cesty v prostředí Scilab.



obr. 4.11: Blokové schéma jedné cesty modulátoru OFDM s Interleaving

Blokové schéma zobrazuje pouze jednu cestu modulátoru OFDM s interleavingem. Na vstup jsou přivedeny generované bity, poté je provedeno samotné přeskládání viz. obr. 3.2. Nyní by měl následovat blok vkládání čísla použitého interleaveru, ale tento blok je vynechán, protože tato metoda nemění výsledné spektrum, nedochází ke zkreslení, a proto není potřebné signál demodulovat. Dále následuje klasický OFDM modulátor s tím rozdílem že negeneruje vstupní bity. Po vytvoření OFDM signálu se v bloku *výběr cesty z min. PAPR* (v případě více cest) vybere cesta z nejmenší hodnotou PAPR.



## 5. Simulace metod redukce PAPR

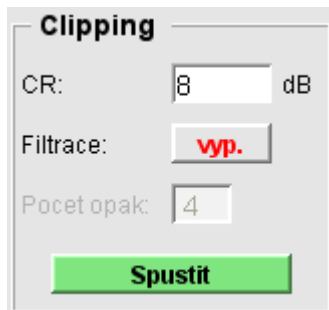
### Parametry generovaného signálu OFDM:

Počet generovaných symbolů 500, modulace QPSK, počet nosných 64, počet nulových složek 20, velikost CP 4. Tyto parametry jsou použity pro všechny simulace metod redukce PAPR.

### 5.1 Clipping

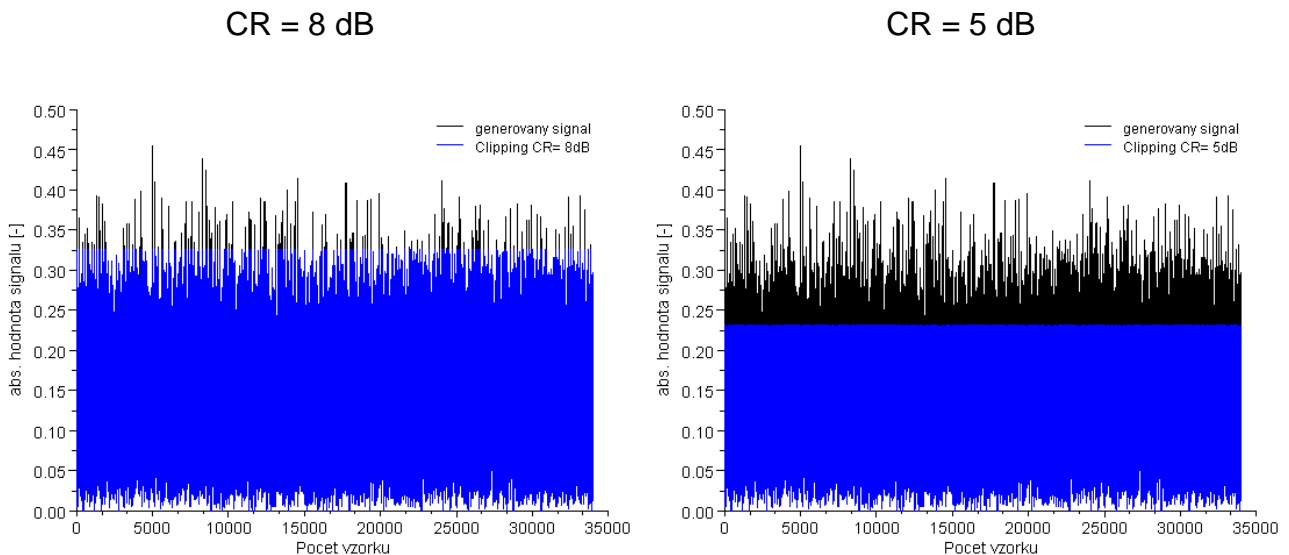
#### Nastavení simulačního prostředí

Pro aktivaci jednoduché metody Clipping musí být funkce filtrace vypnuta viz obr.: 5.1, dále je možné měnit jen hodnotu CR. Stiskem tlačítka *Spustit* se dle vybraného typu zobrazení vykreslí generovaný signál upravený metodou Clipping.



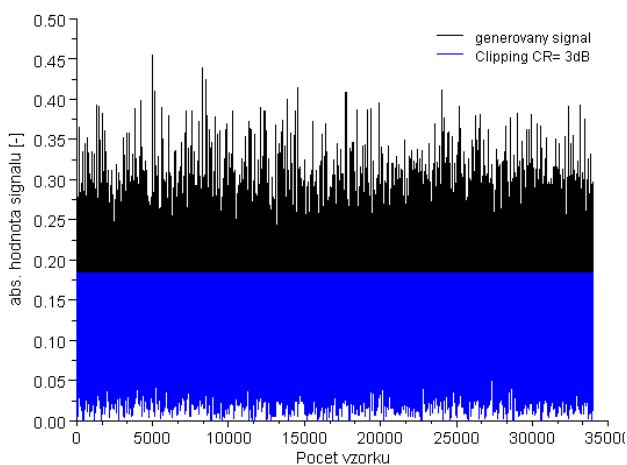
obr. 5.1: Aktivace jednoduché metody Clipping

#### Velikost absolutní hodnoty výsledného signálu při změně parametru CR

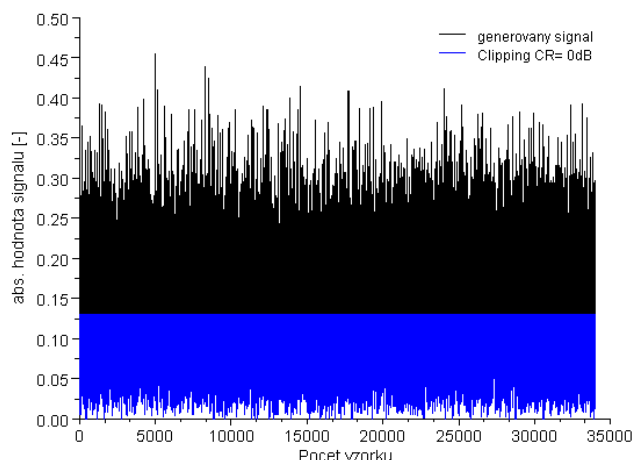


obr. 5.2 a): Absolutní hodnota signálu po Clippingu při změně CR

CR = 3 dB



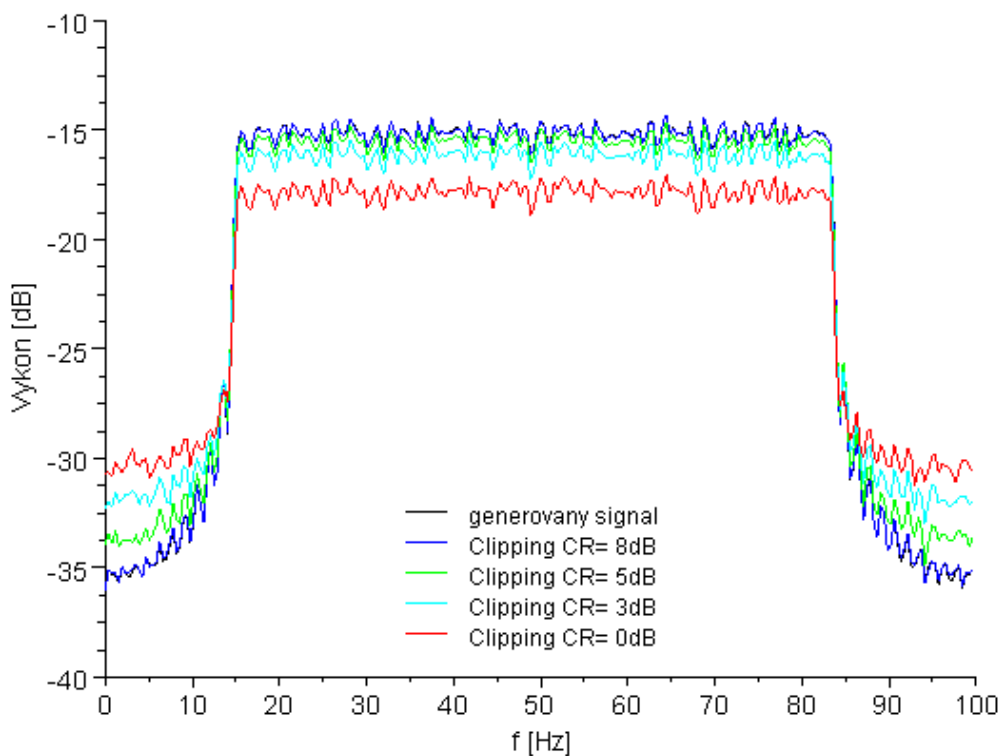
CR = 0 dB



obr. 5.2 b): absolutní hodnota signálu po Clippingu při změně CR

Z průběhů absolutních hodnot na obr. 5.2 a,b), je vidět vliv změny parametru CR na jejich průběh. S klesající hodnotu CR dochází k větší limitaci signálu. Pro CR = 5 dB je limitace téměř 50% maximální absolutní hodnoty generovaného signálu.

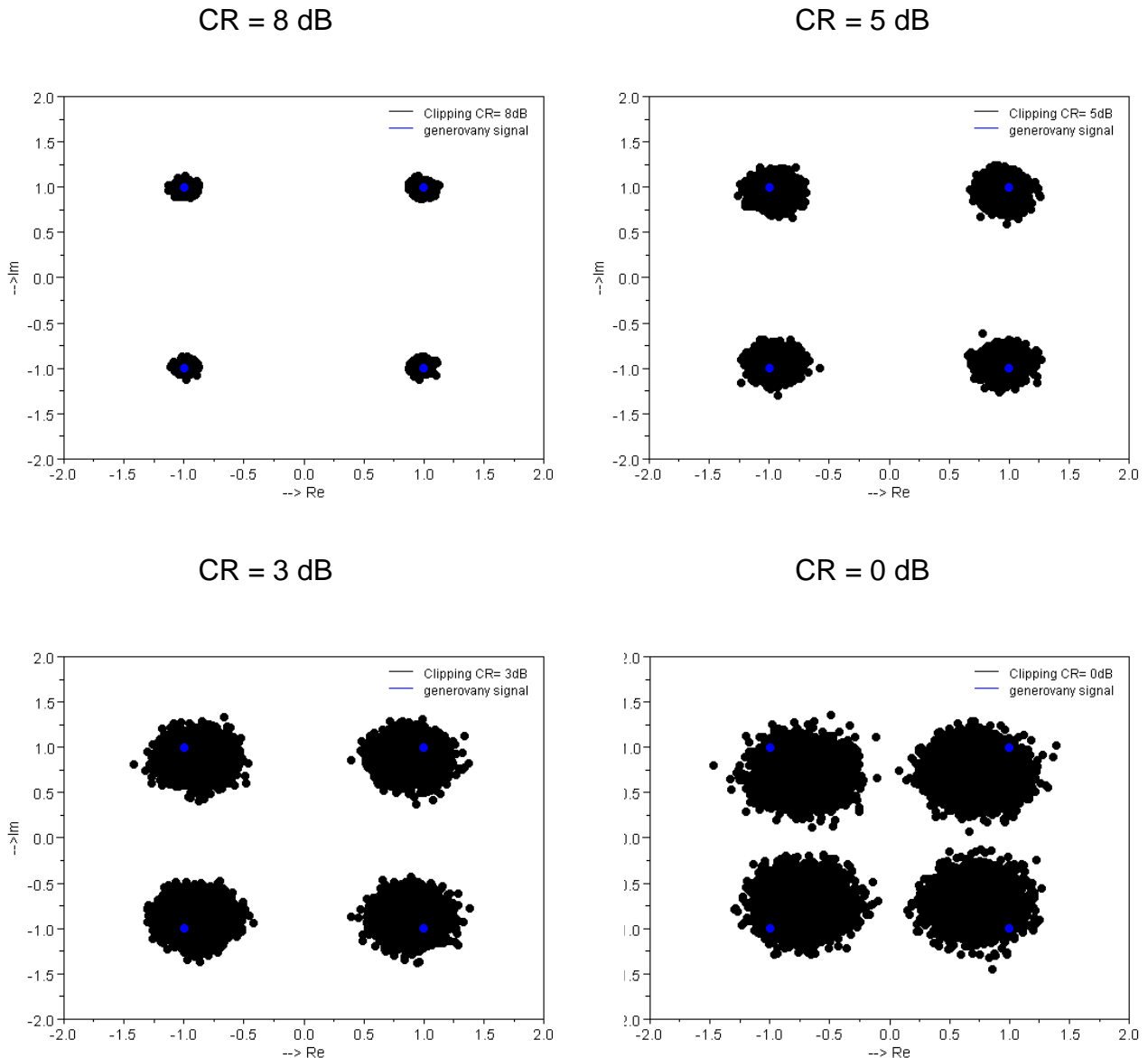
### Výkonové spektrum po Clippingu při změně hodnoty CR



obr. 5.3: Výkonové spektrum signálu po Clippingu při změně hodnoty CR

Z grafu na obr. 5.3 je vidět, že se s poklesem hodnoty parametru CR dochází ke zvýšení výkonu v postraních částech spektra. Od hodnoty CR = 5 dB dochází také ke snížení výkonu hlavní části spektra.

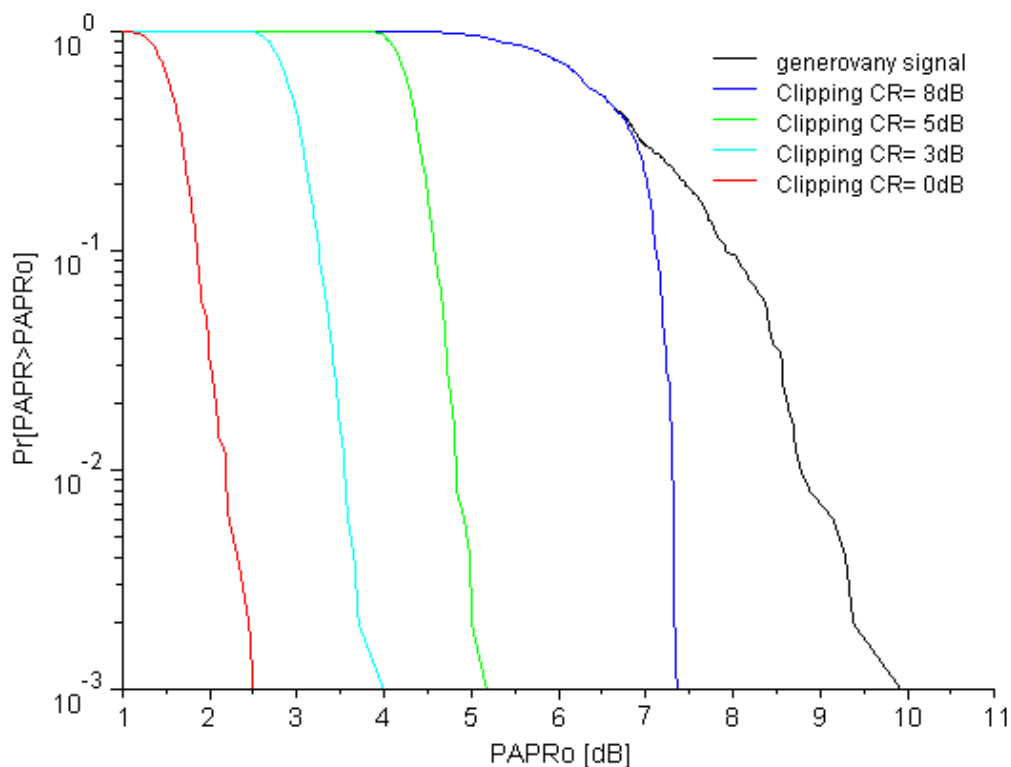
### Konstelační diagramy po Clippingu při změně hodnoty CR



obr. 5.4: Konstelační diagramy signálu po Clippingu při změně hodnoty CR

Z uvedených konstelačních diagramů je vidět velikost rozptylu demodulovaných symbolů při změně velikosti CR. S klesající hodnotou parametru CR se zvětšuje i velikost rozptylu, který způsobuje zkreslení signálu.

## Zobrazení průběhu hodnot PAPR pomocí funkce CCDF



obr. 5.5: Hodnoty PAPR pomocí funkce CCDF

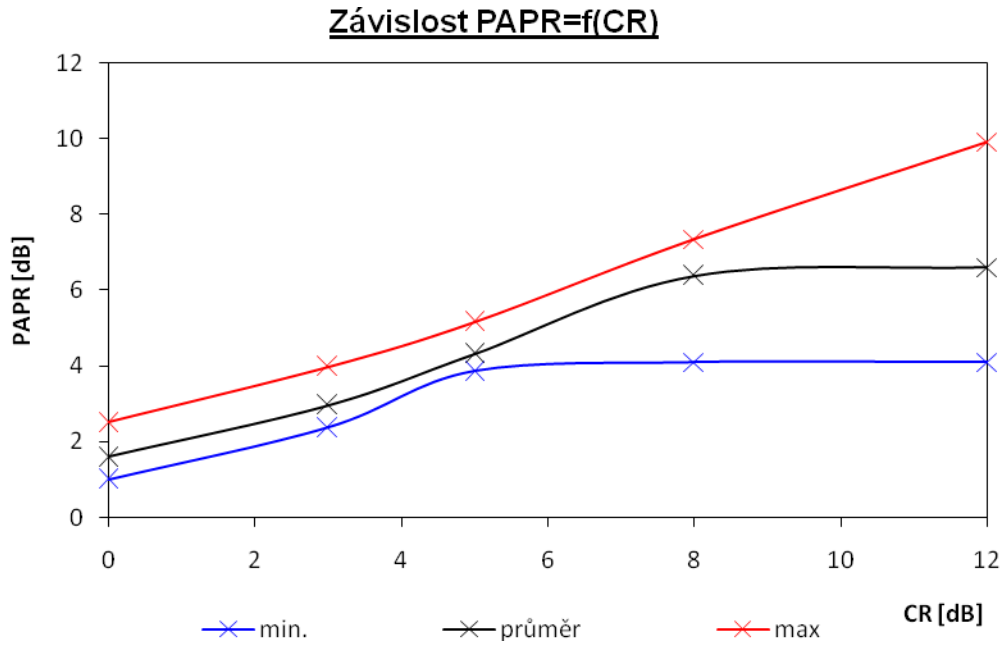
Z grafu na obr. 5.5 je vidět, že s klesající hodnotou parametru CR dochází k poměrně velké redukci PAPR.

## Tabulka výsledných hodnot PAPR po Clippingu při změně CR

CR [dB]	PAPR [dB]		
	max.	min.	průměr
12	9,926	4,106	6,612
8	7,360	4,106	6,390
5	5,176	3,858	4,321
3	3,992	2,367	2,961
0	2,503	1,002	1,591

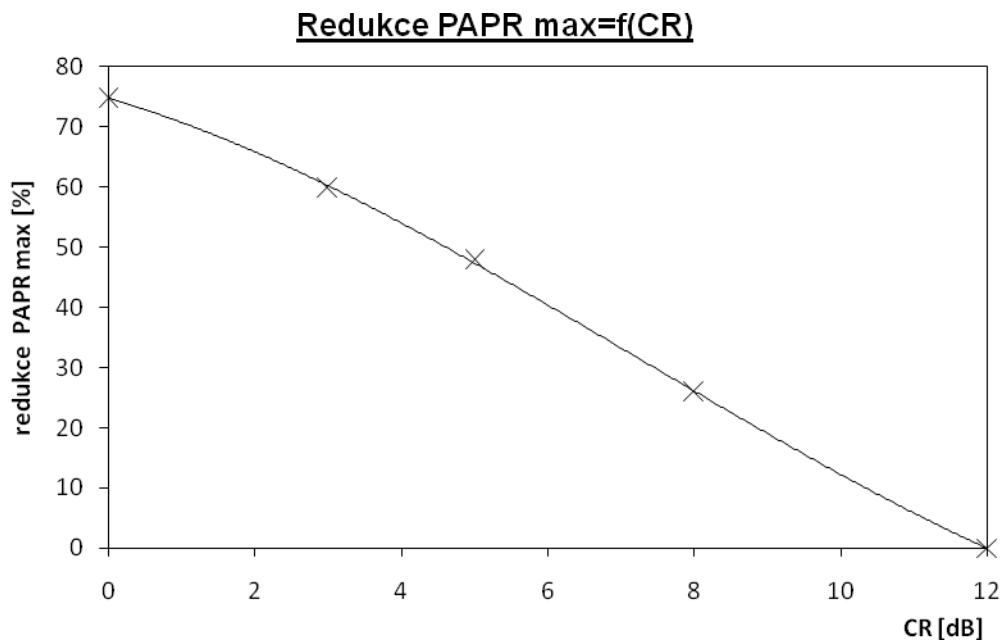
tab. 5.1: Hodnoty PAPR po Clippingu

Pro hodnotu CR = 12 dB je signál shodný s generovaným signálem před Clippingem, tudíž nedochází k ořezání signálu.



obr. 5.6: Graf závislost PAPR=f(CR) pro clipping

Graf uvedený na obr. 5.6 je grafickým znázorněním průběhů hodnot PAPR při změně velikosti CR. Graf vychází z hodnot uvedených v tabulce 5.1.



obr. 5.7: Graf závislosti redukce PAPR<sub>MAX</sub>=f(CR) pro clipping

## Vyhodnocení simulace metody clipping

Z výše uvedených průběhů je vidět jaký vliv má hodnota CR na výsledný průběh signálu. Snižováním hodnoty parametru CR sice dochází k redukci PAPR, ale také k nárůstu zkreslení viz obr. 5.3. Snižování parametru CR se také projevuje zvyšováním výkonu v postraních pásmech a snižováním výkonu užitečných dat viz obr. 5.2. Velikost redukce PAPR je zobrazena na obr. 5.7, kde pro generovaný signál určuje hodnota CR = 0 dB ořezání signálu na úrovni kdy lze ještě signál demodulovat bez ztráty informace a pro hodnotu CR = 12 dB je signál po průchodu nezměněn. Pokud ještě uvážíme zkreslení signálu průchodem kanálem a dalšími prvky, musíme hodnotu parametru CR volit tak, abychom snížili hodnotu PAPR při malé úrovni zkreslení. Z výše uvedených průběhů vychází jako optimální hodnota parametru CR v rozmezí od 8 dB do 5 dB. Při CR = 5dB je max. míra redukce PAPR cca 48%.

Tato metoda je sice výpočetně (a tudíž i časově) nenáročná a dochází k velké redukci PAPR, ale za cenu zvýšení postraních hodnot spektra a zkreslení výsledného signálu.

## 5.2 OCFF

### Nastavení simulačního prostředí

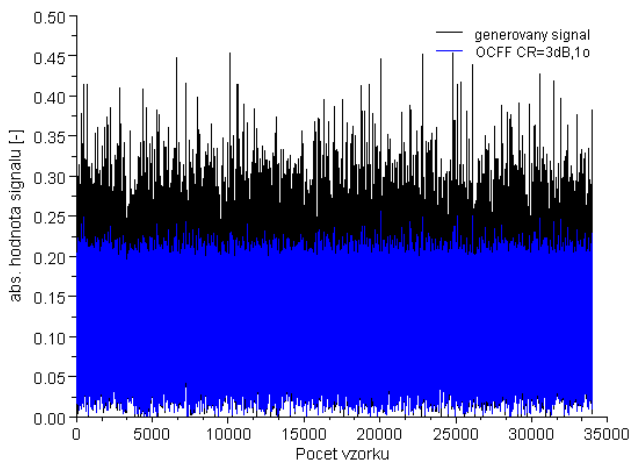
Pro aktivaci metody OCFF musí být funkce filtrace zapnutá viz obr.: 5.8, dále je možné měnit hodnotu CR a počet opakování filtrace. Stiskem tlačítka *Spustit* se dle vybraného typu zobrazí vykreslí generovaný signál upravený metodou OCFF.



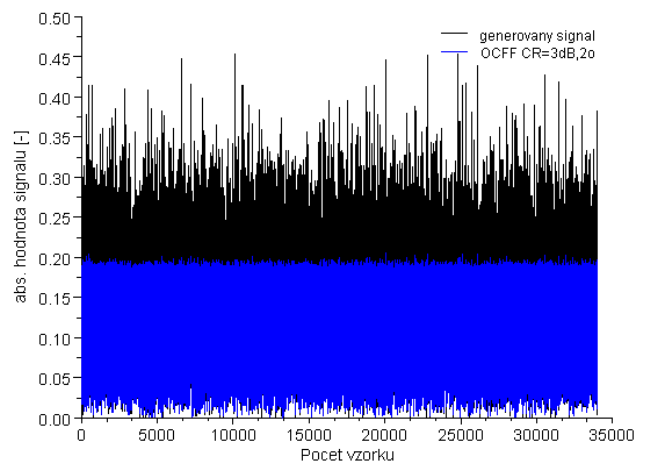
obr. 5.8: Aktivace metody OCFF

## Absolutní hodnota signálu po OCFF, CR = 3 dB při změnách počtu opakování

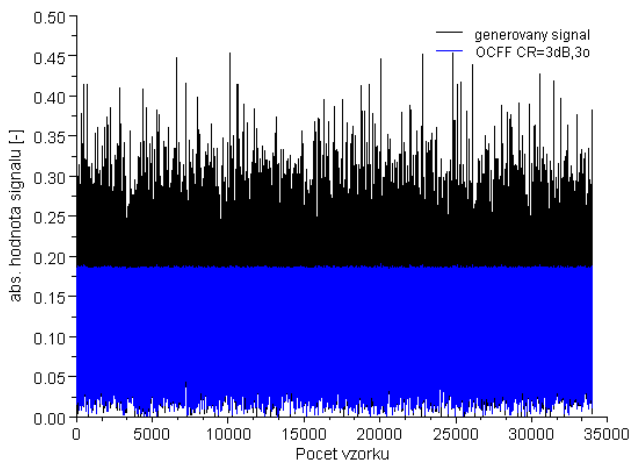
1. opakování



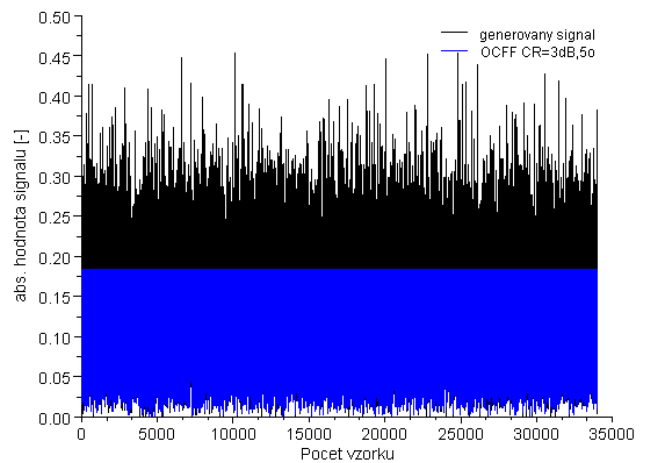
2. opakování



3. opakování



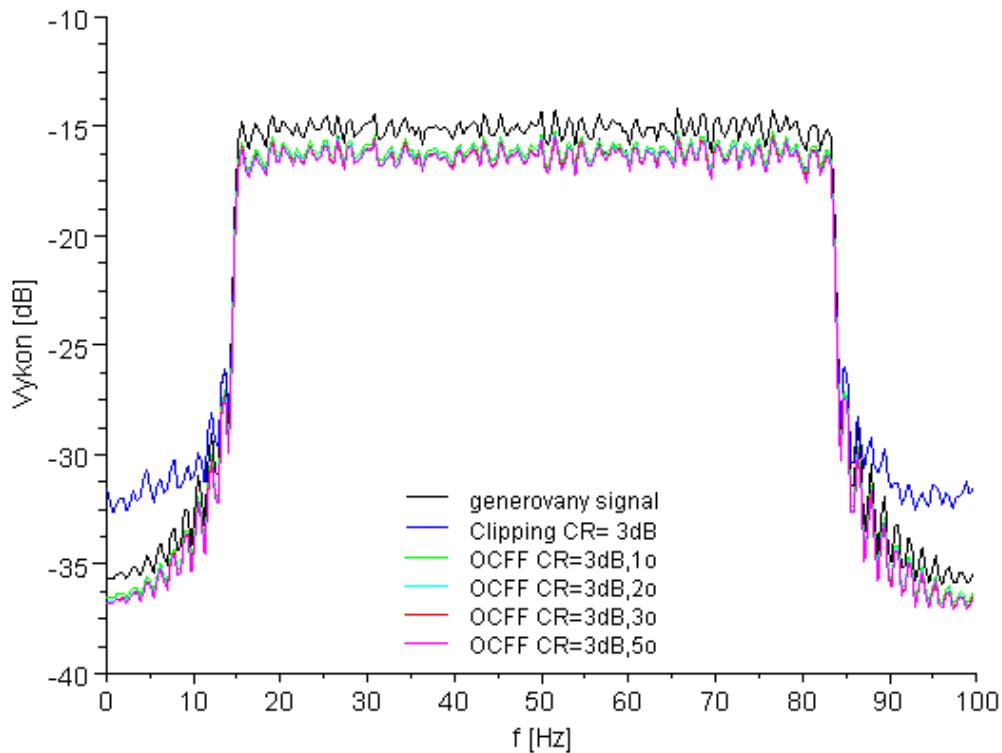
5. opakování



obr. 5.9: Absolutní hodnota signálu po OCFF pro CR = 3 dB a různý počet opak.

Z uvedených průběhů absolutní hodnoty signálu je vidět, že zvyšováním počtu opakování metody OCFF dochází k redukci navýšení absolutní hodnoty, které vzniká filtrací v OCFF.

## Výkonové spektrum signálu po OCFF, CR = 3 dB při změnách počtu opakování



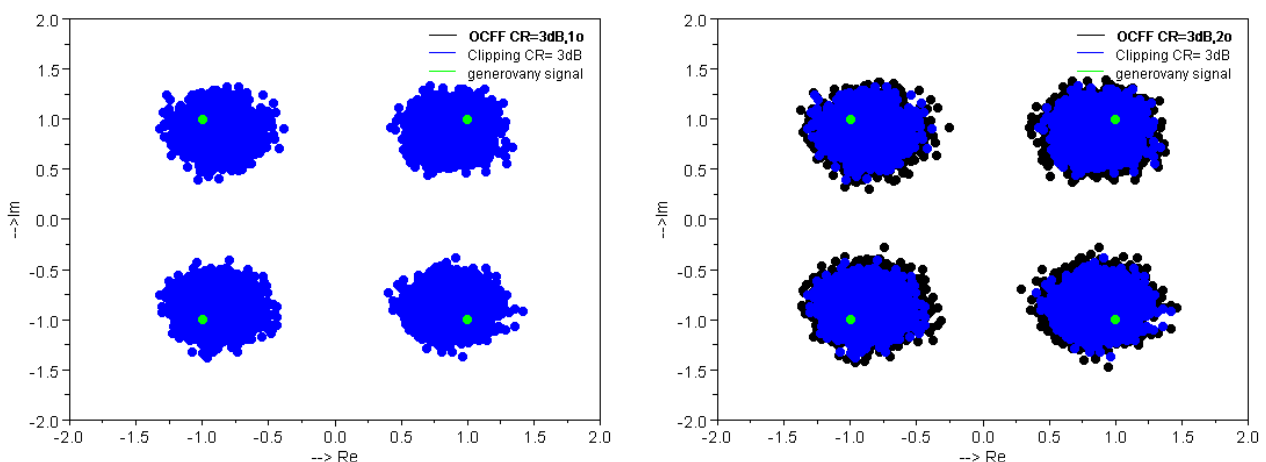
obr. 5.10: Výkonové spektrum signálu po OCFF pro CR = 3 dB

Z výkonového spektra pro metodu OCFF je vidět, že počet opakování nemá žádný výrazný vliv na spektrum. Spektrum je téměř totožné pro různé počty opakování. Dochází zde pouze k celkovému útlumu signálu, ale dynamika zůstává zachována.

## Konstelační diagramy signálu po OCFF, CR = 3 dB a změně počtu opakování

1. opakování

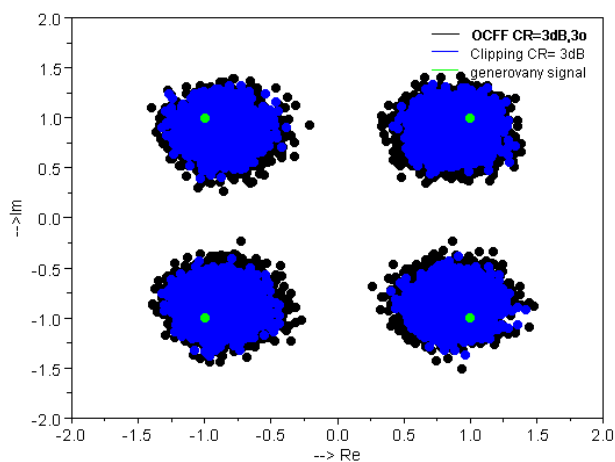
2. opakování



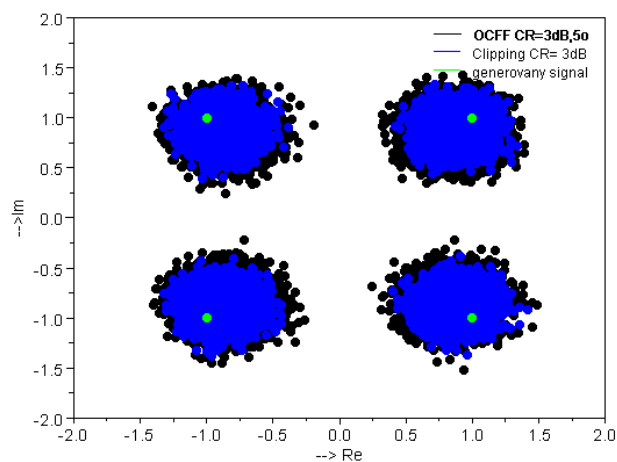
obr. 5.11 a): Konstelační diagramy signálu po OCFF pro CR = 3 dB



### 3. opakování



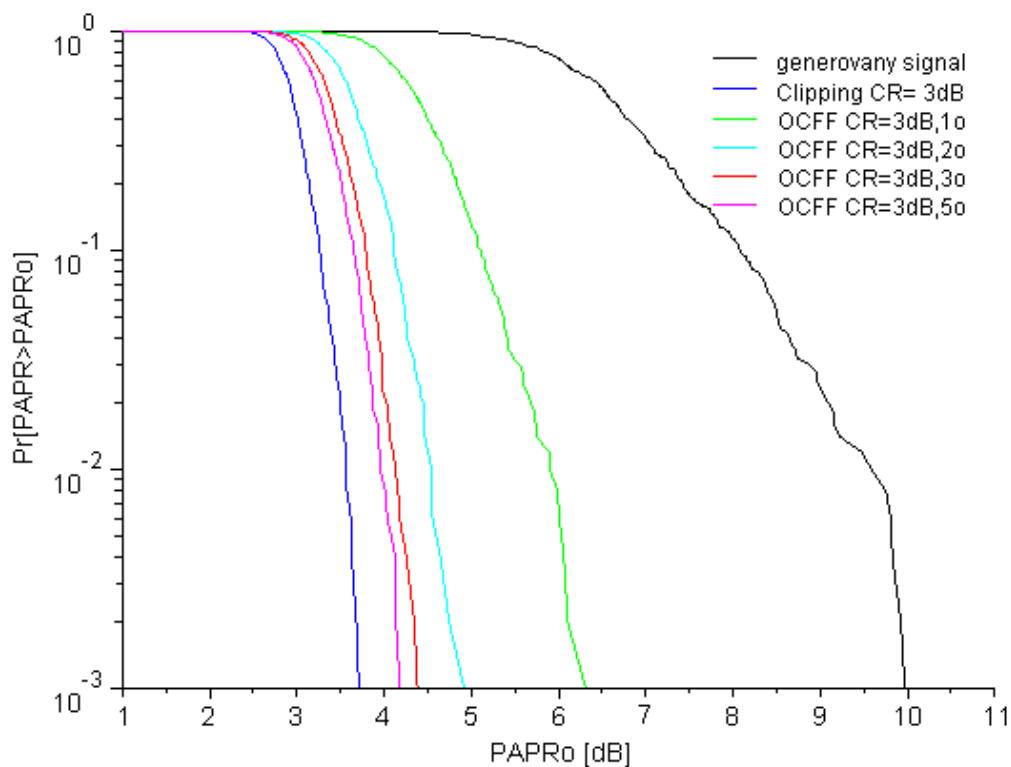
### 5. opakování



obr. 5.11 b): Konstelační diagramy signálu po OCFF pro CR = 3 dB

Z konstelačních diagramů na obr. 5.11 a,b) je vidět, že se zvyšujícím se počtem opakování metody OCFF roste i zvětšení rozptylu oproti samotné metodě Clipping.

### Zobrazení průběhu hodnot PAPR pomocí funkce CCDF



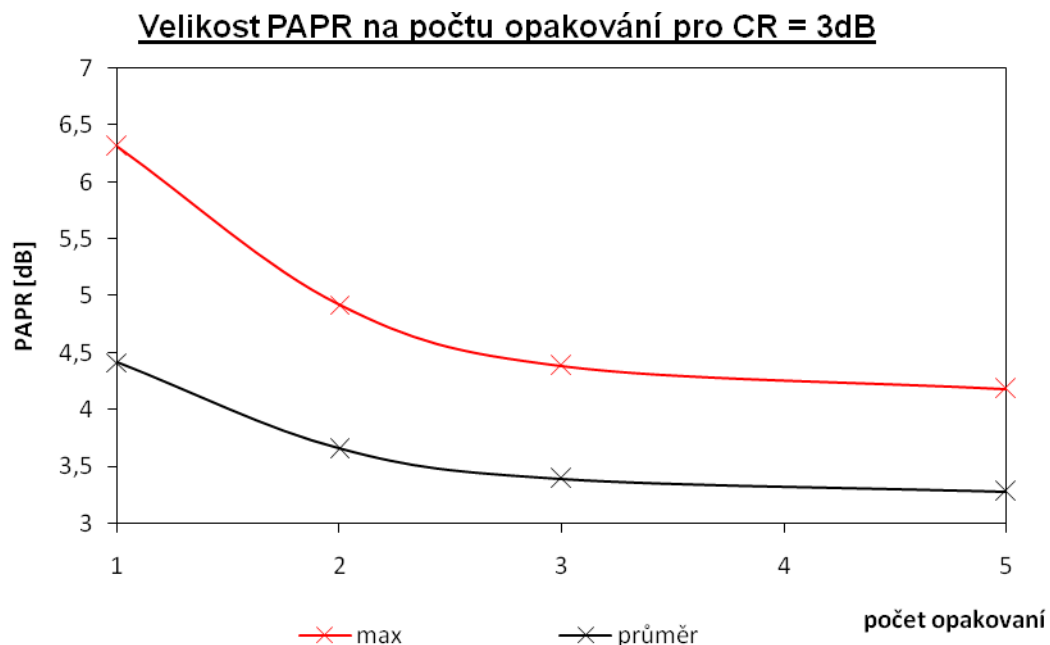
obr. 5.12: Průběh hodnot PAPR pomocí CCDF

Z grafu uvedeného na obr. 5.12 je vidět průběh hodnot PAPR kde nejmenší hodnoty PAPR dosahuje metoda Clipping. Dále je z grafu vidět, že metoda OCFF zvětšuje hodnotu PAPR a zvyšováním počtu jejího opakování se velikost hodnot PAPR blíží průběhu hodnot PAPR metody Clipping.

Tabulka naměřených hodnot PAPR pro metodu redukce OCFF pro CR = 3dB, při změně počtu opakování OCFF.

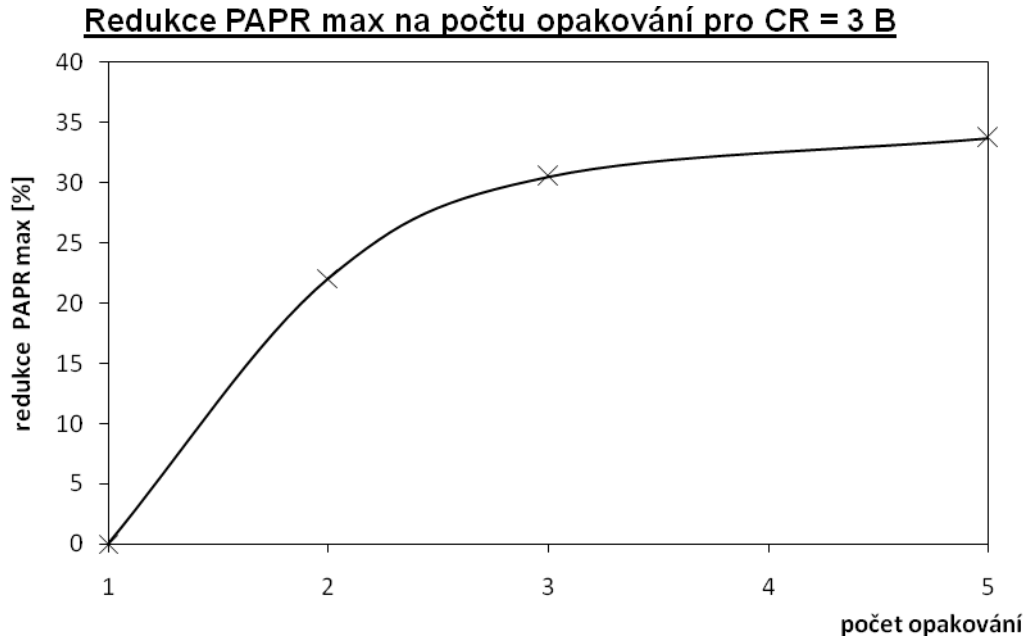
počet opakování	PAPR [dB]	
	max.	průměr
1	6,313	4,413
2	4,920	3,654
3	4,384	3,393
5	4,183	3,278

tab. 5.2: Hodnoty PAPR po OCFF



obr. 5.13: Graf velikosti PAPR na počtu opakování OCFF

Graf uvedený na obr. 5.13 je grafickým znázorněním průběhů hodnot PAPR při CR = 3 dB a různém počtu opakování OCFF. Graf vychází z hodnot uvedených v tabulce 5.2.



obr. 5.14: Graf redukce  $PAPR_{MAX}$  na počtu opakování OCFF

### **Vyhodnocení simulace metody OCFF**

Z výše uvedených průběhů je vidět, že modifikace předchozí metody sice odstraňuje jednu z hlavních nevýhod (tvar spektra), ale dochází ke snížení redukce PAPR. Opakování OCFF toto snížení PAPR omezuje. S rostoucím počtem opakování se zvyšuje výpočetní náročnost, která je dána potřebou výpočtu FFT a IFFT pro každé opakování. Zkreslení signálu viz obr. 5.11 a,b) se zvětšuje s počtem opakování. S ohledem na výpočetní náročnost metody OCFF je vhodné použít 2 až 3 opakování. Při tomto počtu opakování je redukce PAPR (viz obr. 5.14) proti jednomu průchodu o 20 až 30% větší a zkreslení signálu je přijatelné.

## **5.3 Interleaving**

### **Nastavení simulačního prostředí**

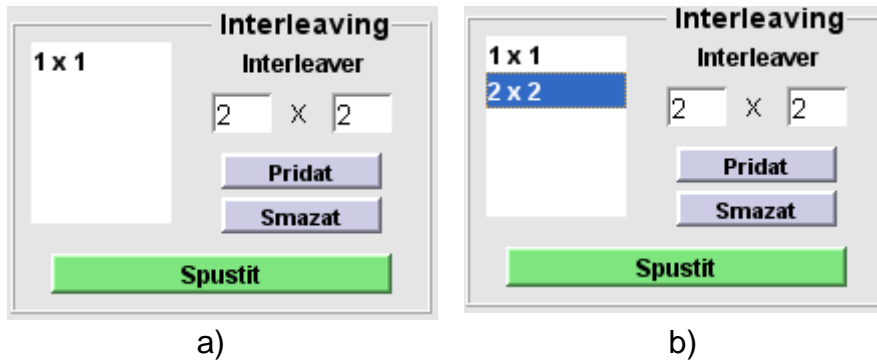
Jako první je potřeba vložit velikost matic pro každou cestu. Matice 1x1 značí cestu bez prokladu a nelze ji smazat. Počet matic určuje počet cest modulátoru. Velikost matice musí být volena tak, aby odpovídala vztahu (5.1).

$$[(PN-PZ) \cdot \text{počet bitů symbolu}] / (X \cdot Y) = \text{celé číslo} \quad (5.1)$$

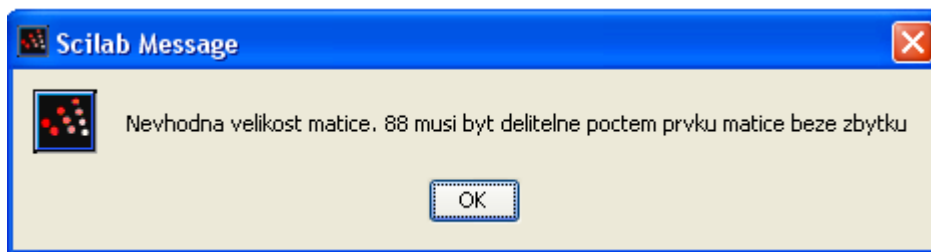
kde: PN – počet nosných  
 PZ – počet nul v symbolu  
 X – počet sloupců matice Interleaveru  
 Y – počet řádku matice Interleaveru

Pro přidání matice slouží tlačítko *Přidat* viz obr.: 5.15 a). Pokud nebude zadáný rozměr matice vyhovovat vztahu (5.1), program chybně zadanou matici nepřidá a vyhlásí chybu viz obr.: 5.16. Pokud je matice zadána správně, přidá se rozměr matice do seznamu viz obr.: 5.15 b). Dále je možné zadané matice mazat. Nejprve

musíme na matici, kterou chceme ze seznamu smazat kliknout myší. Výběr signalizuje změna pozadí u vybrané matice na modrou barvu. Po stisku tlačítka *Smazat* se vybraná matice vymaže. Stiskem tlačítka *Spustit* se dle vybraného typu zobrazení vykreslí generovaný signál upravený metodou Interleaving.



obr. 5.15: Panel pro ovládání metody Interleaving

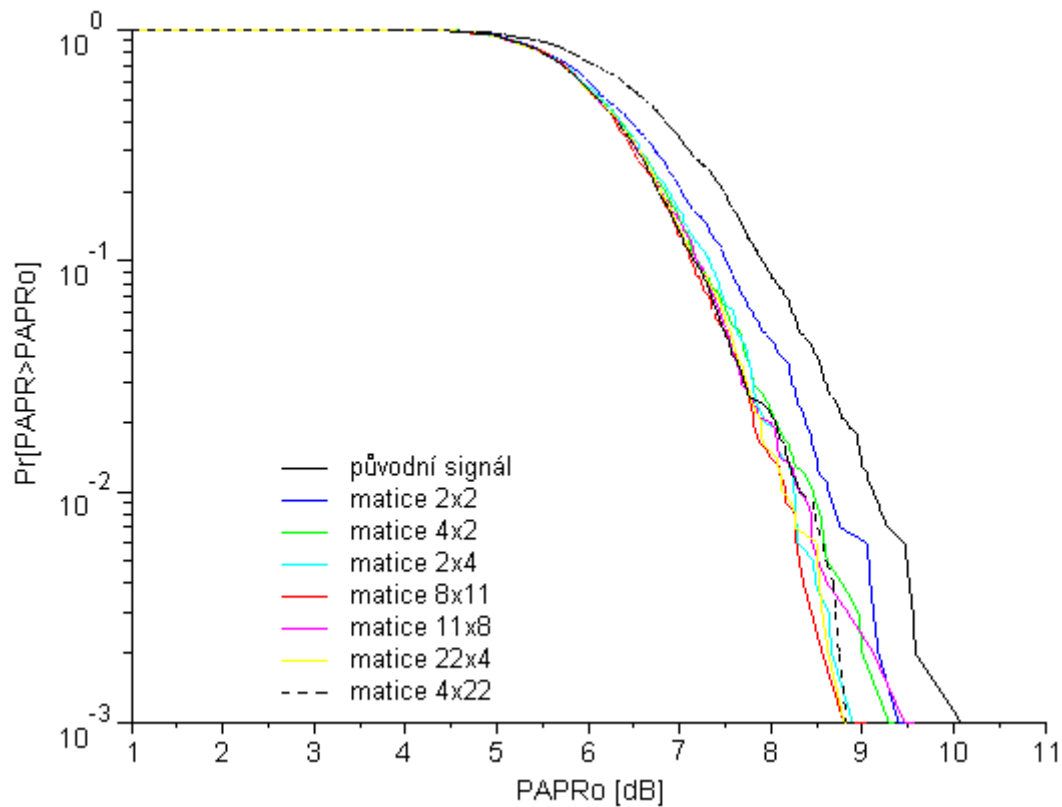


obr. 5.16: Zpráva o chybně zadané matici interleaveru

### Vliv velikosti matice na redukci PAPR

Pro ověření zda má velikost matice vliv na míru redukce PAPR jsou postupně zkoušeny matice o rozměru 2x2, 4x2, 2x4, 8x11, 11x8, 22x4, 4x22 na náhodně generovaném signálu, kde počet jeho symbolů je zvětšen na 1000. Ostatní parametry signálu jsou shodné s parametry signálu pro simulace jednotlivých metod. Počet cest modulátoru je 2, z toho 1 cesta je bez prokladu.

Zobrazení průběhu hodnot PAPR pomocí funkce CCDF se změnou velikosti matice v druhé cestě interleaveru.



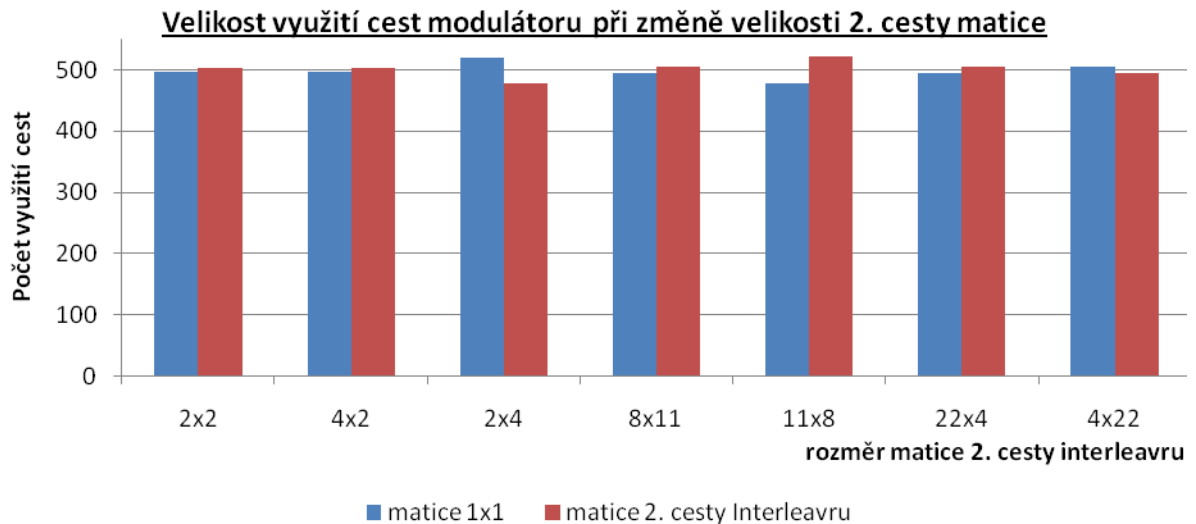
obr. 5.17: Vliv rozměru matice na redukci PAPR 2. cestným modulátorem OFDM

Z grafu je vidět, že velikost matice interleaveru druhé cesty modulátoru nemá na výsledný průběh hodnot PAPR nijak zásadní vliv.

Tabulka počtu průchodů při změně velikosti matice interleaveru druhé cesty modulátoru

Velikost matice	2x2	4x2	2x4	8x11	11x8	22x4	4x22
Počet průchodů 1. cesty	504	504	479	505	522	505	495
Počet průchodů 2. cesty	496	496	521	495	478	495	505

tab. 5.3: Počet průchodů každé z cest dvoucestného modulátoru OFDM



obr. 5.18: Počet využití cest při změně rozměru matice druhé cesty

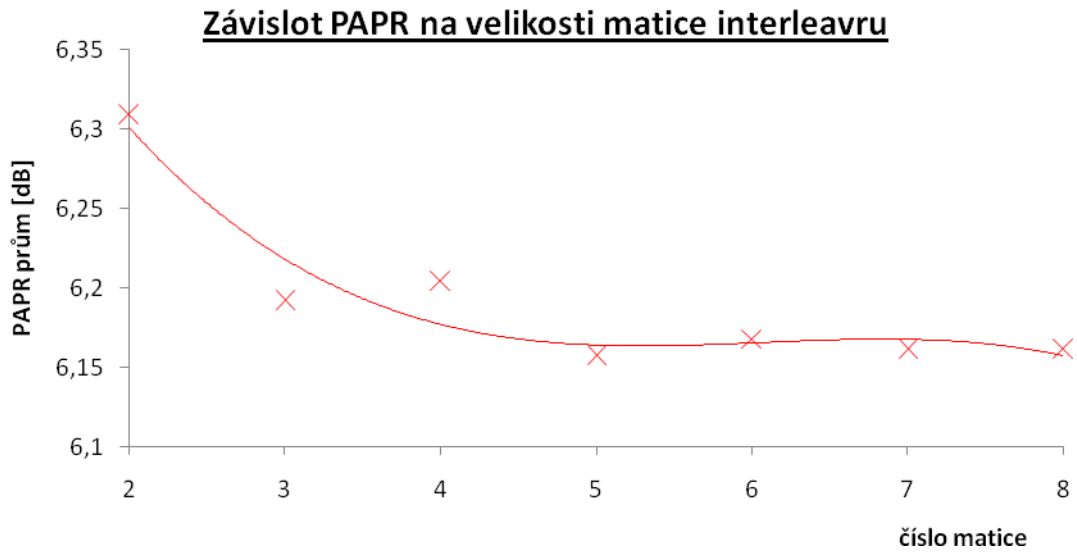
Graf na obr. 5.18 znázorňuje počet využití každé z cest dvoucestného modulátoru OFDM s interleavingem. První cesta je beze změny (cesta bez prokladu). V druhé cestě modulátoru je prováděna změna velikosti rozměru matice interleaveru. Z průběhů hodnot je vidět, že velikost matice nemá zásadní vliv na počet využití jednotlivých cest modulátoru OFDM s interleavingem.

Tabulka zjištěných průměrných hodnot PAPR při změně velikosti matice interleavru druhé cesty modulátoru.

matice	velikost	PAPR [dB] průměr
1	1x1	6,66
2	2x2	6,309
3	4x2	6,192
4	2x4	6,204
5	8x11	6,157
6	11x8	6,168
7	22x4	6,161
8	4x22	6,161

tab. 5.4: Hodnoty PAPR pro různé velikosti matice

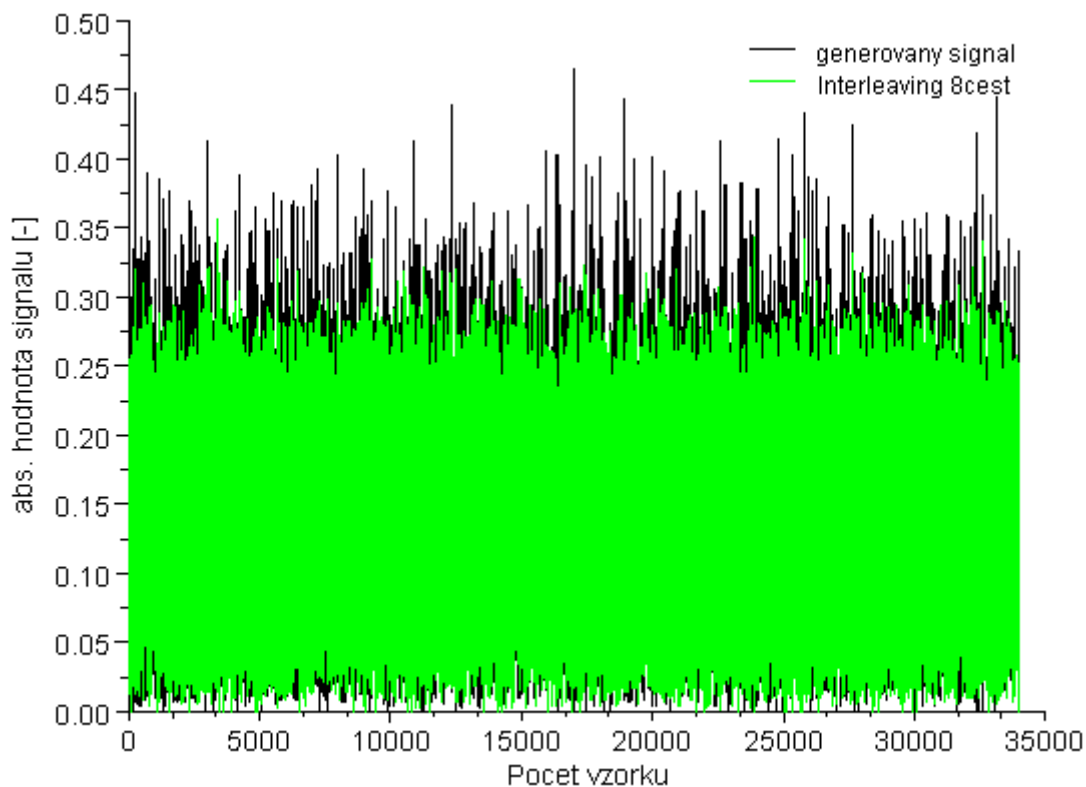
Matice číslo 1 v tabulce představuje první cestu modulátoru OFDM. Ostatní matice jsou postupně aplikovány na druhou cestu.



obr. 5.19: Velikost  $PAPR_{Prům}$  při změně velikosti matice v druhé cestě

Z uvedených průběhů je vidět, že velikost prokládací matice nemá velký vliv na velikost hodnoty  $PAPR_{Prům}$ . Průměrná hodnota PAPR je téměř stejná pro různé velikosti prokládací matice viz obr.: 5.19.

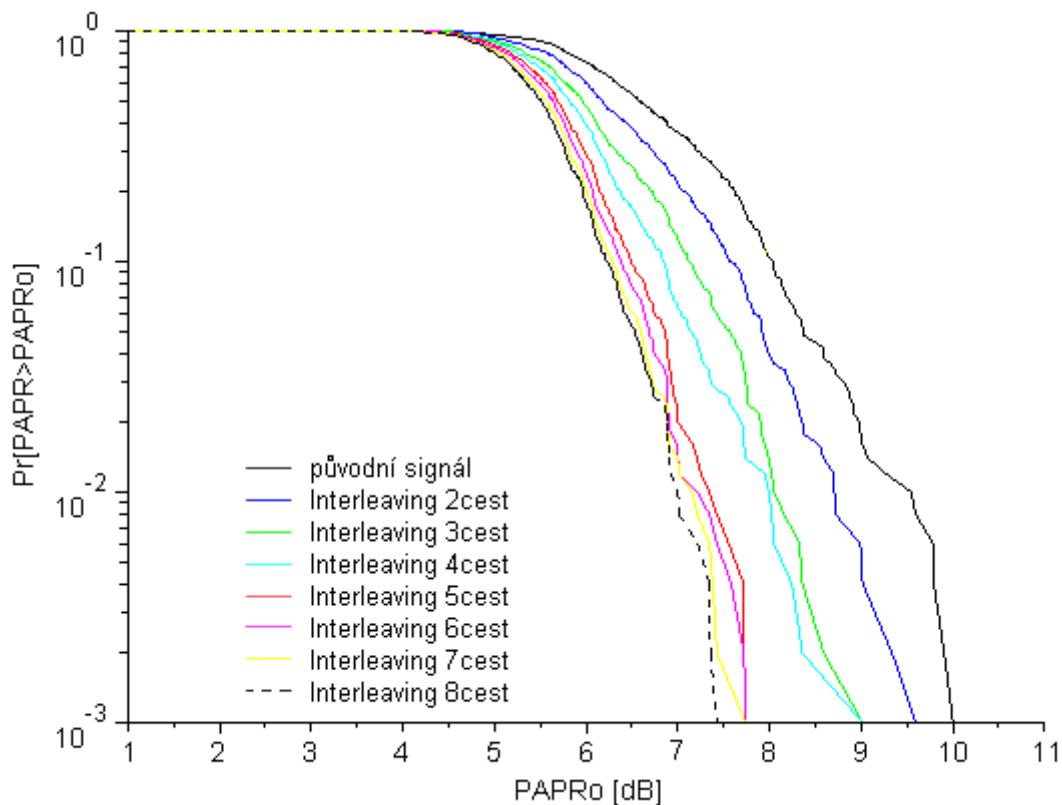
### Absolutní hodnota signálu po průchodu 8-cestným modulátorem



obr. 5.20: Velikost absolutní hodnoty signálu po průchodu 8-cestným modulátorem

Z průběhu absolutní hodnoty na obr. 5.20 je vidět, že průchodem signálu 8-cestným modulátorem OFDM s Interleavingem, dochází ke snížení maximální absolutní hodnoty výsledného signálu.

### Velikost PAPR při změně počtu cest modulátoru



obr. 5.21: Velikost  $PAPR_{Prům}$  při počtu cest modulátoru

Z grafu na obr. 5.21 je vidět, že zvyšováním počtu cest modulátoru OFDM s interleavingem dochází k zvýšení redukce hodnoty PAPR.

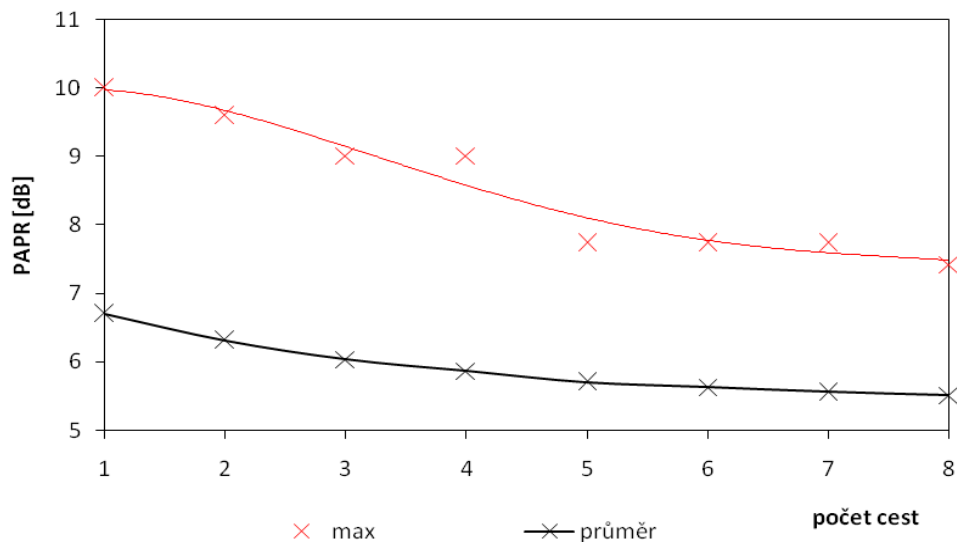
Tabulka naměřených hodnot PAPR pro zvyšování počtu cest modulátoru OFDM

počet cest	přidaná matice	PAPR [dB]	
		max.	průměr
1	1x1	10,004	6,705
2	2x2	9,599	6,316
3	4x2	9,018	6,034
4	2x4	9,018	5,867
5	8x11	7,741	5,704
6	11x8	7,741	5,629
7	22x4	7,741	5,558
8	4x22	7,427	5,508

tab. 5.5: Hodnoty PAPR pro změnu počtu cest modulátoru



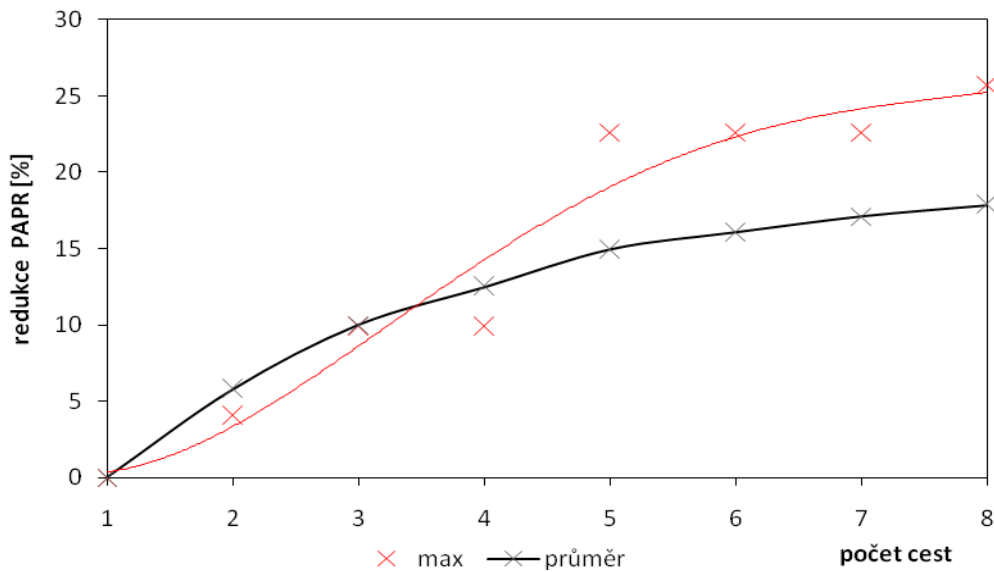
### Závislost velikost PAPR na počtu cest modulátoru



obr. 5.22: Velikost PAPR při změně počtu cest modulátoru

Z grafu je vidět, že při zvyšování počtu cest modulátoru dochází k poklesu maximální a průměrné hodnoty PAPR.

### Redukce PAPR na počtu cest modulátoru



obr. 5.23: Redukce PAPR při změně počtu cest modulátoru

Z grafu je vidět, že při zvyšování počtu cest modulátoru dochází k nárůstu redukce maximální a průměrné hodnoty PAPR.

## Vyhodnocení simulace metody Interleaving

Z výše uvedených průběhů je vidět, že tato metoda nedosahuje tak velké redukce PAPR jako předcházející metody. Jak již bylo uvedeno v předchozím textu, velikost redukce PAPR je nezávislá na velikosti prokládací matice. Snížení hodnoty PAPR je možné pouze zvyšováním počtu cest modulátoru viz obr. 5.21. Výhoda této metody je v tom, že nevnáší žádné zkreslení a nijak zásadně nemění průběh výkonového spektra. První nevýhodou je menší míra redukce PAPR viz obr.: 5.23, kde max. redukce  $PAPR_{MAX}$  je 26 % při 8-cestném modulátoru. Další nevýhodou je vysoká výpočetní náročnost, která je dána výpočtem IFFT v každé cestě modulátoru OFDM. Dalším problémem je potřeba vkládat informace o použité cestě interleaveru. Díky tomu je nutné snížit počet nosných použitých pro přenášená data. Jako optimální volba se jeví OFDM modulátor s pěti cestným interleaverem, protože míra redukce  $PAPR_{MAX}$  dosahuje cca 20% a výpočetní náročnost je přijatelná.

## **6. Simulace srovnávací metody redukce PAPR**

Nastavení kritérií pro srovnání uvedených metod je poněkud obtížné, jelikož jsou metody z principu funkce rozdílné. Jako srovnávací kritérium je zvoleno optimální nastavení pro jednotlivé metody zjištěné simulací jednotlivých metod.

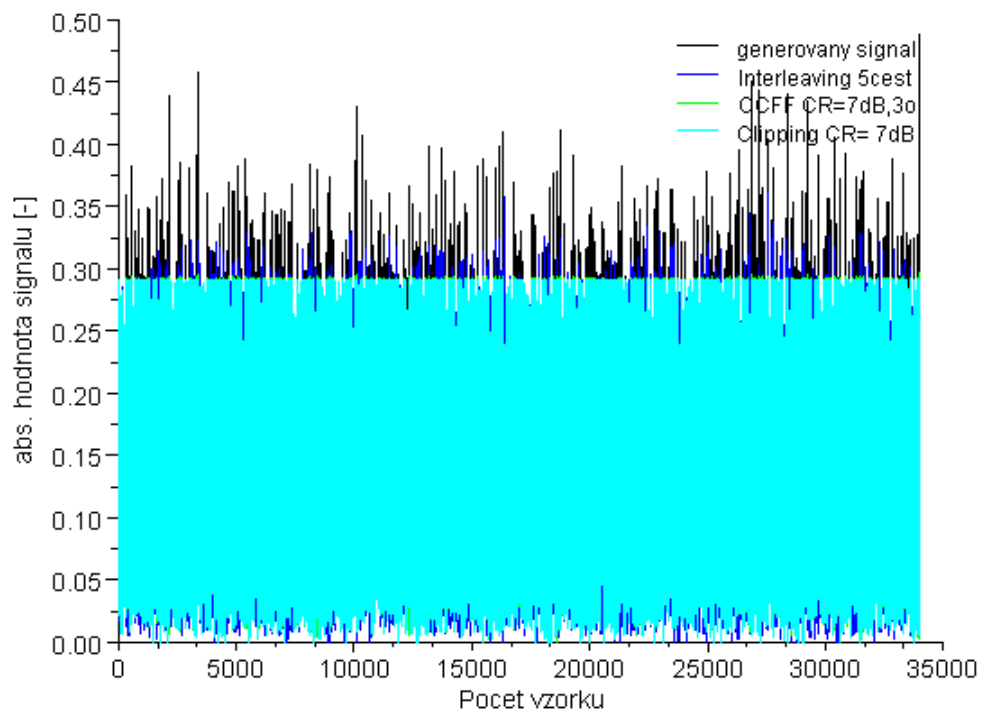
### **Nastavení parametrů jednotlivých metod**

- Clipping: CR = 7 dB
- OCFF: CR = 7 dB, počet opakování = 3
- Interleaving: 5-cest (matice interleaveru: 1x1, 2x2, 4x2, 2x4, 8x11)

### **Parametry generovaného náhodného signálu**

Počet symbolů = 500, počet nosných = 64, z toho 20 nosných nulových, velikost CP = 4, modulace symbolů QPSK.

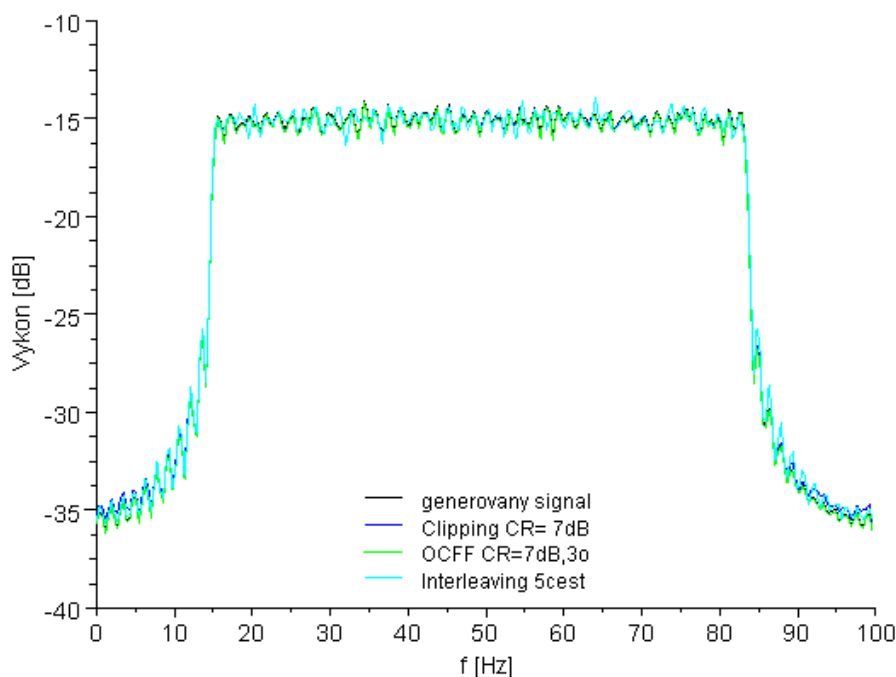
## Absolutní hodnota signálu pro jednotlivé metody



obr. 6.1: Absolutní hodnota signálu pro jednotlivé metody

Z průběhu absolutní hodnoty výstupního signálu je vidět, že u metody interleaving dochází pro každý vzorek k jinému omezení velikosti. U zbylých metod dochází k limitaci na stejnou úroveň. Rozdíl mezi metodou Clipping a Interleaving je jen nepatrně pozorovatelným zvlněním na hladině limitace signálu.

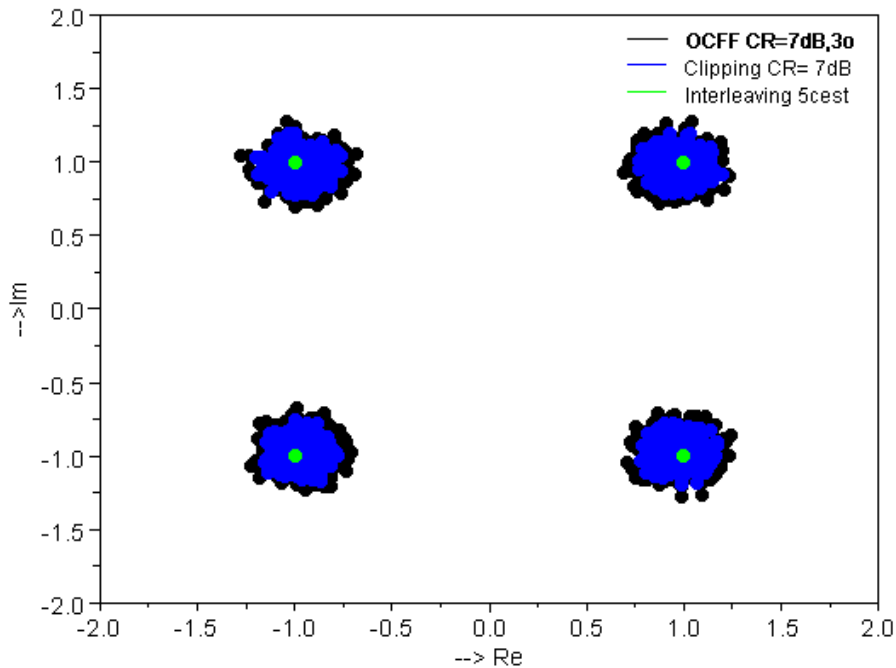
## Výkonové spektrum signálu pro jednotlivé metody



obr. 6.2: Výkonové spektrum signálu pro jednotlivé metody

Průběh výkonového spektra z obr. 6.2 je pro zadané parametry téměř shodný pro všechny metody, jen u Clippingu mírně vzrostl výkon v postraních složkách spektra.

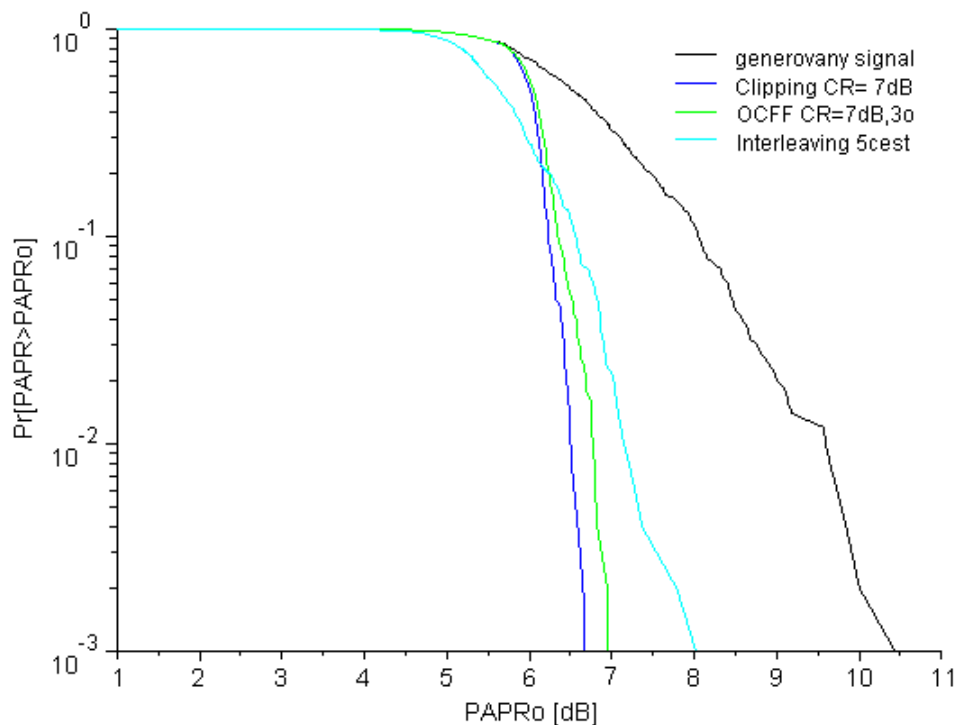
### Konstelační diagram výsledného signálu pro jednotlivé metody



obr. 6.3: Konstelační diagram výstupního signálu pro jednotlivé metody

Dle očekávání je velikost rozptylu symbolu v konstelačním diagramu z obr. 6.3 u metody OCFF větší než u metody Clipping. Dále je vidět, že metoda Interleaving žádné zkreslení nevnáší.

### Velikost PAPP pomocí metody CCDF pro jednotlivé metody



obr. 6.4: Velikost PAPP pomocí metody CCDF pro jednotlivé metody

Z grafu na obr. 6.4 je vidět průběh velikosti hodnot PAPR pro jednotlivé metody. Nejvyšší míra redukce je dosažena metodou Clipping. Metoda Interleaving sice dosahuje nejmenší redukce hodnot PAPR, ale redukuje značně celý průběh signálu. Tato skutečnost je pozorovatelná z průběhu, kdy metody Clipping a OCFF strmě limitují max. hodnoty PAPR od cca 6,5 dB. U metody Interleaving dochází k poklesu hodnoty PAPR již od hodnoty PAPRo cca 5 dB a průběh je pozvolný.

#### Hodnoty PAPR pro jednotlivé metody

PAPR [dB]	Gen. signal	Clipping	OCFF	Interleaving
Maximum:	10.439	6.670	6.961	8.022
Minimum:	4.255	4.255	4.255	3.771
Prumer :	6.655	5.921	5.977	5.698

tab. 6.1: Hodnoty PAPR pro jednotlivé metody

V uvedené tabulce je vidět, dosažené hodnoty PAPR signálu pro jednotlivé metody

#### Velikost redukce PAPR jednotlivých metod

Redukce PAPR [%]	Clipping	OCFF	Interleaving
Maximum	36,1	33,3	23,2
Minimum	0,0	0,0	11,4
Průměr	11,0	10,2	14,4

tab. 6.2: Velikost redukce PAPR jednotlivých metod

Z tabulky 6.2 je vidět, že metoda clipping dosahuje nejvyšší redukce  $PAPR_{MAX}$ . Metoda Interleaving má sice nejnížší redukce  $PAPR_{MAX}$ , ale redukuje značně i minimální a průměrnou hodnotu PAPR. Z hlediska výpočetní náročnosti při zadaných parametrech, je metoda OCFF o něco více náročná než interleaving, protože pro výpočet OCFF je použito výpočtu FFT a IFFT násobeno počtem opakování a dále je potřeba přičíst IFFT v samotném modulátoru původního signálu. Celkový počet náročných výpočtů (FFT, IFFT) je tedy 7. Pro metodu Interleaving je potřeba spočítat IFFT násobeno počtem cest modulátoru v našem případě 5. Metoda Clipping je výpočetně nejméně náročná, protože stačí pouze jeden výpočet IFFT.

## 7. Závěr:

V této práci je podrobněji rozebrána problematika modulace OFDM. Konkrétně se práce zabývá principem funkce OFDM modulace a jejími základními vlastnostmi. Dále jsou zde uvedeny základní principy funkce pro metody redukce PAPR (Clipping, opakovaný Clipping a frekvenční filtrace (OCFF) a Interleaving).

Důležitou částí práce bylo vytvoření programu ve vývojovém prostředí Scilab. Tento program umožňuje generování OFDM signálu. Signál je generován na základě uživatelem zadaných parametrů. Vygenerovaný signál je možné zobrazit různými způsoby (absolutní hodnota, spektrum, konstelační diagram, velikost PAPR). Dále program umožňuje simulovat redukci PAPR pomocí Clippingu, opakovaného Clippingu a frekvenční filtrace (OCFF) a Interleavingu. Po aplikaci zvolené metody redukce PAPR je možné výsledný signál různě zobrazit. Na základě uživatelem zvoleného zobrazení je možné srovnat původní signál OFDM se signálem po úpravě zvolenou metodou, a nebo je také možné srovnat různé metody redukce PAPR.

V další části práce byl vytvořený program využit pro simulaci jednotlivých metod.

Simulací metody Clipping byla zjištěna optimální velikost parametru CR v rozmezí hodnot 8 dB až 5 dB, kde byla při simulaci míra zkreslení ještě přijatelná. Při hodnotě CR = 5 dB je velikost redukce PAPR z původní hodnoty (vygenerovaného signálu)  $PAPR_{MAX} = 9,9$  dB na  $PAPR_{MAX} = 5,2$  dB.

Pro modifikovanou metodu Clippingu, opakovaný clipping a frekvenční filtrace (OCFF) vyšla jako optimální hodnota počtu opakování 2 až 3. Při těchto hodnotách je výpočetní náročnost přijatelná a stejně tak zkreslení. Při tomto počtu opakování je míra redukce PAPR trochu horší než u samotné metody Clipping.

Metoda interleaving je z principu odlišná od předchozích metod. Díky tomu nevnáší zkreslení a nijak zásadně nemění výkonové spektrum signálu. Simulací bylo zjištěno, že velikost prokládací matice nemá žádný zásadní vliv na náhodně generovanou posloupnost bitů. Velikost redukce  $PAPR_{MAX}$  je určena pouze počtem cest modulátoru. Jako optimální vyšlo vzhledem k výpočetní náročnosti a velikosti redukce použití 5 cest modulátoru, kde je míra redukce z původní hodnoty  $PAPR_{MAX} = 10,0$  dB na  $PAPR_{MAX} = 7,7$  dB.

Pro simulaci srovnávající jednotlivé metody, je zvoleno porovnávací kritérium optimální hodnoty pro jednotlivé metody zjištěné samotnou simulací každé z metod. Nejvyšší míra redukce  $PAPR_{MAX}$  je dosažena metodou Clipping, ale dochází k nežádoucímu zvyšování výkonu v postranních částech spektra.

OCFF oproti Clippingu eliminuje nežádoucí tvar spektra signálu, ale míra redukce  $PAPR_{MAX}$  je nižší než u Clippingu.

Metoda Interleaving dosahuje nejmenší míry redukce  $PAPR_{MAX}$  asi o 1/3 proti Clippingu, ale za to redukuje značně hodnotu PAPR v celém rozsahu signálu.

## Použitá Literatura

- [1] TELLADO Jose, *Multicarrier Modulation with Low PAR*, Kluwer Academic Publisher, 2000., 152s. ISBN 0-7923-7988-8
- [2] MARŠÁLEK Roman, *Teorie rádiové komunikace*, VUT Brno 2005
- [3] ČÍŽ Radim, *Teorie sdělování*, VUT Brno 2005
- [4] FEDRA Zbyněk, *Reduction of PAPR in OFDM by clipping*. UREL FEKT VUT Brno, 2005. ISBN: 80-214-2904-6
- [5] HANUS Stanislav, *Bezdrátové a mobilní komunikace*, VUT Brno 2003., 134s. ISBN 80-214-1833-8
- [6] ARMSTRONG J., *Peak-to-average power reduction for OFDM by repeated clipping and frequency domain filtering*. Electronics Letters, 28<sup>TH</sup> February 2002 vol. 38, no. 5, p. 246-247
- [7] JAYALATH A D. S. and TELLAMBURA C., *Peak-to-Average Power ratio of IEEE802.11a PHY layer Signals*, Proc. 6th Int. Symp. on DSP for Communication Systems, DSPCS'2002, Sydney-Manly, 28-31 January 2002, pp. 31-36  
Dostupné na WWW:  
<[www.elec.uow.edu.au/staff/wysocki/dspcs/papers/007.pdf](http://www.elec.uow.edu.au/staff/wysocki/dspcs/papers/007.pdf)>
- [8] CAMPBELL, S.L., CHANCELIER, J.P., NIKOUKHAH, R. *Modeling and Simulation in Scilab/Scicos*. New York: Springer, 2006
- [9] JAYALATH A D. S. and TELLAMBURA C., *Use of data permutation to reduce the peak-to-average power ratio of an OFDM signal*, Wirel. Commun. Mob. Comput. 2002, January 2002, p. 187-203. Dostupné na WWW:  
<<http://infoeng.rsise.anu.edu.au/files/publications/2002/pdf/jayalath2002b.pdf>>
- [10] INRIA, Scilab [online]. [cit 2009-5-01]. Dostupné na WWW: <[www.scilab.org](http://www.scilab.org)>

## Seznam obrázků a tabulek:

obr. 2.1: Frekvenční spektrum několika nosných vln systému OFDM .....	4
obr. 2.2: Blokové schéma jednoduchého modulátoru OFDM .....	4
obr. 2.3: Vytvoření cyklického prefixu v symbolu .....	5
obr. 2.4: Blokové schéma jednoduchého modulátoru OFDM s CP .....	5
obr. 2.5: Blokové schéma jednoduchého demodulátoru OFDM s CP .....	6
obr. 2.6: Absolutní hodnota výkonu signálu OFDM .....	7
obr. 3.1: Blokové schéma metody OCFF bez opakování .....	9
obr. 3.2: Princip řazení prvku do matice při prokládání .....	9
obr. 3.3: Modulátor OFDM s K cestním interleavrem .....	10
obr. 3.4: Demodulátor OFDM s interleaverem .....	11
obr. 4.1: Vzhled simulačního programu .....	13
obr. 4.2: Blokové schéma modulátoru OFDM pro Scilab .....	14
obr. 4.3: Zobrazení hodnot PAPR signálu OFDM v programu .....	14
obr. 4.4: Absolutní hodnota signálu OFDM .....	15
obr. 4.5: Výkonové spektrum signálu OFDM .....	15
obr. 4.6: Velikost hodnot PAPR při použití funkce CCDF .....	16
obr. 4.7: Blokové schéma demodulátoru OFDM pro prostředí Scilab .....	16
obr. 4.7: Konstelační diagramy QPSK a 16-QAM .....	17
obr. 4.9: Blokové schéma metody clipping v prostředí Scilab .....	17
obr. 4.10: Blokové schéma metody OCFF v prostředí Scilab .....	18
obr. 4.11: Blokové schéma jedné cesty modulátoru OFDM s Interleaving .....	18
obr. 5.1: Aktivace jednoduché metody Clipping .....	19
obr. 5.2 a): Absolutní hodnota signálu po Clippingu při změně CR .....	19
obr. 5.2 b): absolutní hodnota signálu po Clippingu při změně CR .....	20
obr. 5.3: Výkonové spektrum signálu po Clippingu při změně hodnoty CR .....	20
obr. 5.4: Konstelační diagramy signálu po Clippingu při změně hodnoty CR .....	21
obr. 5.5: Hodnoty PAPR pomocí funkce CCDF .....	22
tab. 5.1: Hodnoty PAPR po Clippingu .....	22
obr. 5.6: Graf závislost $PAPR=f(CR)$ pro clipping .....	23
obr. 5.7: Graf závislosti redukce $PAPR_{MAX}=f(CR)$ pro clipping .....	23
obr. 5.9: Absolutní hodnota signálu po OCFF pro $CR = 3$ dB a různý počet opak. ....	25
obr. 5.10: Výkonové spektrum signálu po OCFF pro $CR = 3$ dB .....	26
obr. 5.11 a): Konstelační diagramy signálu po OCFF pro $CR = 3$ dB .....	26
obr. 5.11 b): Konstelační diagramy signálu po OCFF pro $CR = 3$ dB .....	27
tab. 5.2: Hodnoty PAPR po OCFF .....	28
obr. 5.13: Graf velikosti PAPR na počtu opakování OCFF .....	28
obr. 5.14: Graf redukce $PAPR_{MAX}$ na počtu opakování OCFF .....	29
obr. 5.15: Panel pro ovládání metody Interleaving .....	30
obr. 5.16: Zpráva o chybně zadané matici interleaveru .....	30
obr. 5.17: Vliv rozměru matice na redukci PAPR 2. cestným modulátorem OFDM ..	31
tab. 5.3: Počet průchodů každé z cest dvoucestného modulátoru OFDM .....	31
obr. 5.18: Počet využití cest při změně rozměru matice druhé cesty .....	32
tab. 5.4: Hodnoty PAPR pro různé velikosti matice .....	32
obr. 5.19: Velikost $PAPR_{Prům}$ při změně velikosti matice v druhé cestě .....	33
obr. 5.20: Velikost absolutní hodnoty signálu po průchodu 8-cestným modulátorem	33
obr. 5.21: Velikost $PAPR_{Prům}$ při počtu cest modulátoru .....	34
tab. 5.5: Hodnoty PAPR pro změnu počtu cest modulátoru .....	34
obr. 5.22: Velikost PAPR při změně počtu cest modulátoru .....	35



obr. 5.23: Redukce PAPR při změně počtu cest modulátoru.....	35
obr. 6.1: Absolutní hodnota signálu pro jednotlivé metody .....	37
obr. 6.2: Výkonové spektrum signálu pro jednotlivé metody.....	37
obr. 6.3: Konstelační diagram výstupního signálu pro jednotlivé metody .....	38
obr. 6.4: Velikost PAPR pomocí metody CCDF pro jednotlivé metody .....	38
tab. 6.1: Hodnoty PAPR pro jednotlivé metody.....	39
tab. 6.2: Velikost redukce PAPR jednotlivých metod .....	39