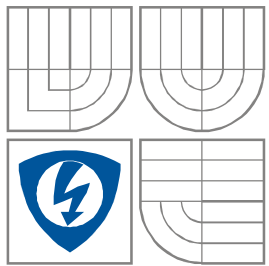




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

MODELOVÁNÍ KOMUNIKAČNÍHO ŘETĚZCE

COMMUNICATION LINK MODELING

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Michal Škára

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Roman Maršálek, Ph.D.

BRNO, 2008

LICENČNÍ SMLOUVA POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Bc. Michal Škára
Bytem: Topolná 84, 687 11
Narozen/a (datum a místo): 19. října 1983 v Uherském Hradišti

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
se sídlem Údolní 53, Brno, 602 00
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:
prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida, předseda rady oboru Elektronika a sdělovací technika
(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- disertační práce
 - diplomová práce
 - bakalářská práce
 - jiná práce, jejíž druh je specifikován jako
- (dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Modelování komunikačního řetězce

Vedoucí/ školitel VŠKP: Ing. Roman Maršálek, Ph.D.

Ústav: Ústav radioelektroniky

Datum obhajoby VŠKP: _____

VŠKP odevzdal autor nabyvateli*:

- v tištěné formě – počet exemplářů: 2
- v elektronické formě – počet exemplářů: 2

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.

3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.

4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

* hodíci se zaškrtněte

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ihned po uzavření této smlouvy
 - 1 rok po uzavření této smlouvy
 - 3 roky po uzavření této smlouvy
 - 5 let po uzavření této smlouvy
 - 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 30. května 2008

.....
Nabyvatel

.....
Autor

Abstrakt

Tématem této diplomové práce je modelování komunikačního řetězce, což znamená prozkoumání a následné spojení bloků QPSK modulátoru – raised cosine filtru – kvadraturního modulátoru – nelineárního zesilovače – kvadraturního demodulátoru – raised cosine filtru – QPSK detektoru. Veškerá práce probíhala v simulačním prostředí VisSim 6.0, návod k tomuto software je v práci uveden. Jednotlivé bloky jsou v práci analyzovány včetně popisu i možností nastavení. Hlavním tématem práce bylo zkoumat chybovost přenosu při nesymetriích modulátoru, použití nelineárního zesilovače TWTA či při výpočtech v pevné a plovoucí řádové čárce. Teoreticky je také probrána a prakticky implantována metoda kompenzace nesymetrií modulátoru. Analyzována byla zapojení s modulátorem QPSK i 16QAM. Zapojení jsou doplněna přehlednými tabulkami a grafy.

V závěru práce je věnována pozornost generování zdrojových kódů v jazyce C pomocí nadstavby C-Code, což může být užitečné při praktické realizaci na DSP.

Klíčová slova: komunikační řetězec, nesymetrie modulátoru, kompenzace modulátoru, kompenzace nesymetrií

Abstract

This Master's thesis subject is communication link modeling, what means exploring and subsequent connect of blocks QPSK modulator – raised cosine filter – quadrature modulator – nonlinear amplifier – quadrature demodulator – raised cosine filter – QPSK detector. All work proceeded in simulation world VisSim 6.0, manual of this software is opened in this thesis. Individual blocks are analyzed in this scheme including description and configuration. Main theme was exploring error rate of transmission in modulator imbalance, using nonlinear amplifier TWTA or in calculations in fixed and floating point. Theoretically is examined and practically implanted method of modulator imbalance compensation. Circuits with QPSK and 16QAM modulator were analyzed. Circuits are filled in with transparent tables and graphs.

In the end of this thesis is applied to generating of source codes in C language by the help of upgrade C-Code, which can be useful in practical realization on DSP.

Key words: communication link, IQ imbalance, compensation of modulator, compensation of imbalance

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Modelování komunikačního řetězce 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 30. května 2008

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Romanu Maršálkovi, Ph.D. za účinnou metodu, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne 30. května 2008

.....
podpis autora

Obsah

1. Úvod.....	3
2. Struktura obecného komunikačního řetězce.....	3
3. Popis simulačního programu VisSim.....	5
4. Simulace - parametry obvodu	11
4.1. Parametry obvodu – časová analýza	11
4.2. Parametry obvodu – frekvenční analýza.....	13
4.3. Parametry obvodu – nesymetrie modulátoru	13
5. Použití zesilovače TWTA	14
6. Metoda kompenzace amplitudové a fázové nesymetrie.....	19
6.1. Teoretický rozbor metody	19
6.2. Praktické použití metody kompenzace nesymetrií	21
6.2.1. Model nesymetrií	21
6.2.2. Kompenzace amplitudové nesymetrie	22
6.2.3. Kompenzace fázové nesymetrie	22
6.2.4. Kompenzace amplitudové a fázové nesymetrie	23
7. Simulace	23
7.1. Simulace obvodu s pevnou a plovoucí řádovou čárkou.....	24
7.2. Simulace komunikačního řetězce s QPSK modulátorem	26
7.3. Simulace komunikačního řetězce s 16QAM modulátorem	28
8. Výsledky simulací	31
8.1. Simulace řetězce s modulátorem QPSK	31
8.2. Simulace řetězce s modulátorem 16QAM	37
9. VisSim C-Code	42
10. Závěr.....	45
Seznam použité literatury	46
Příloha 1 – Zdrojový kód pokusného zapojení z kap. 9.....	47
Příloha 2 – Zdrojový kód odhadu a kompenzace nesymetrií z kap.9	48

Seznam tabulek

Tab.1.: Tabulka BER řetězce s modulátorem QPSK, bez TWTA, plovoucí řádová čárka	31
Tab.2.: Tabulka BER řetězce s modulátorem QPSK, bez TWTA, pevná řádová čárka.....	32
Tab.3.: Tabulka BER řetězce s modulátorem QPSK, s TWTA, plovoucí řádová čárka	33
Tab.4.: Srovnání BER komunikačního řetězce s lineárním a nelineárním TWTA, plovoucí řádová čárka	34
Tab.5.: Tabulka BER řetězce s modulátorem QPSK, s TWTA, pevná řádová čárka.....	35
Tab.6.: Srovnání BER komunikačního řetězce s lineárním a nelineárním TWTA, pevná řádová čárka.....	36
Tab.7.: Tabulka BER řetězce s modulátorem 16QAM, bez TWTA, plovoucí řádová čárka	37
Tab.8.: Tabulka BER řetězce s modulátorem 16QAM, bez TWTA, pevná řádová čárka.....	38
Tab.9.: Tabulka BER řetězce s modulátorem 16QAM, s TWTA, plovoucí řádová čárka	39
Tab.10.: Srovnání BER komunikačního řetězce s lineárním a nelineárním TWTA, plovoucí řádová čárka	40
Tab.11.: Tabulka BER řetězce s modulátorem 16QAM, s TWTA, pevná řádová čárka.....	41
Tab.12.: Srovnání BER komunikačního řetězce s lineárním a nelineárním TWTA, pevná řádová čárka.....	42

Seznam grafů

Graf 1.: Teoretická chybovost při modulaci QPSK.....	26
Graf 2.: Teoretická chybovost při modulaci 16QAM	29
Graf 3.: BER komunikačního řetězce s QPSK modulátorem, bez TWTA, plovoucí řádová čárka	31
Graf 4.: BER komunikačního řetězce s QPSK modulátorem, bez TWTA, pevná řádová čárka.....	32
Graf 5.: BER komunikačního řetězce s QPSK modulátorem, s TWTA, plovoucí řádová čárka	33
Graf 6.: Porovnání BER komunikačního řetězce s lineárním a nelineárním TWTA, plovoucí řádová čárka	34
Graf 7.: BER komunikačního řetězce s QPSK modulátorem, s TWTA, pevná řádová čárka.....	35
Graf 8.: Porovnání BER komunikačního řetězce s lineárním a nelineárním TWTA, pevná řádová čárka	36
Graf 9.: BER komunikačního řetězce s 16QAM modulátorem, bez TWTA, plovoucí řádová čárka	37

Graf 10.: BER komunikačního řetězce s 16QAM modulátorem, bez TWTA, pevná řádová čárka.....	38
Graf 11.: BER komunikačního řetězce s 16QAM modulátorem, s TWTA, plovoucí řádová čárka	39
Graf 12.: Porovnání BER komunikačního řetězce s lineárním a nelineárním TWTA, plovoucí řádová čárka	40
Graf 13.: BER komunikačního řetězce s 16QAM modulátorem, s TWTA, pevná řádová čárka.....	41
Graf 14.: Porovnání BER komunikačního řetězce s lineárním a nelineárním TWTA, pevná řádová čárka	42

Seznam obrázků

Obr.1.: Blokové schéma komunikačního řetězce	3
Obr.2.: Konstelační diagram 16 QAM.....	4
Obr.3.: Konstelační diagram QPSK.....	4
Obr.4.: Nesymetrie kvadraturního modulátoru	5
Obr.5.: Nastavení kmitočtu simulačního software VisSim	6
Obr.6.: Nastavení generátoru symbolů.....	6
Obr.7.: Nastavení modulátoru QAM.....	7
Obr.8.: Nastavení filtru RRC	8
Obr.9.: Impulsní odezva použitého RRC filtru	9
Obr.10.: Komunikační řetězec v programu VisSim	9
Obr.11.: Komunikační řetězec v programu VisSim s využitím složených bloků.....	10
Obr.12.: Ideální a zašuměný přenosový kanál	11
Obr.13.: Vyslaná a přijatá symbolová posloupnost při zašuměném kanálu	12
Obr.14.: Konstelační diagram vyslaných a přijatých dat.....	12
Obr.15.: Frekvenční analýza řetězce	13
Obr.16.: Modifikované zapojení komunikačního řetězce pro modelování nesymetrií.....	13
Obr.17.: Konstelační diagram modulátoru, zesílení ve větvi $I = 0,5$	14
Obr.18.: Konstelační diagram modulátoru, fázová nesymetrie = 45°	14
Obr.19.: Demonstrační zapojení TWTA	14
Obr.20.: Kompletní převodní charakteristika TWTA	15
Obr.21.: Nastavení parametrů TWTA.....	15
Obr.22.: Převodní charakteristika nelineárního TWTA	16
Obr.23.: Časové průběhy vstupu a výstupu TWTA demonstračního zapojení	16
Obr.24.: Spektra vstupního a výstupního signálu TWTA demonstračního zapojení	17
Obr.25.: Spektrum výstupního signálu TWTA demonstračního zapojení pro $OP = -20dB$	17
Obr.26.: Převodní charakteristika lineárního TWTA.....	17
Obr.27.: Časový průběh signálu vstupujícího a vystupujícího z TWTA kom. kanálu.....	18
Obr.28.: Spektrum signálu vstupujícího a vystupujícího z TWTA kom. kanálu.....	18
Obr.29.: Model nesymetrií	21
Obr.30.: Odhad amplitudové nesymetrie K_{est}	22
Obr.31.: Schéma kompenzace amplitudové nesymetrie.....	22
Obr.32.: Odhad fázové nesymetrie P_{est}	22
Obr.33.: Schéma kompenzace fázové nesymetrie	23
Obr.34.: Zapojení kompenzace amplitudy a fáze.....	23
Obr.35.: Blok odhadu amplitudové nesymetrie K_{est} s plovoucí řádovou čárkou.....	24
Obr.36.: Blok odhadu amplitudové nesymetrie K_{est} s pevnou řádovou čárkou.....	24
Obr.37.: Schéma bloku Model nesymetrií s pevnou řádovou čárkou	25
Obr.38.: Schéma bloku Kompenzace amplitudy s pevnou řádovou čárkou	25
Obr.39.: Schéma bloku Odhad fázové nesymetrie P_{est} s pevnou řádovou čárkou	25
Obr.40.: Schéma bloku Kompenzace fáze s pevnou řádovou čárkou	26
Obr.41.: Schéma komunikačního řetězce s QPSK modulátorem bez kompenzací, bez TWTA	27
Obr.42.: Schéma komunikačního řetězce s QPSK modulátorem s kompenzací, bez TWTA	27
Obr.43.: Schéma komunikačního řetězce s QPSK modulátorem bez kompenzací, bez TWTA	28
Obr.44.: Schéma komunikačního řetězce s QPSK modulátorem s kompenzací, s TWTA	28
Obr.45.: Schéma řetězce s modulátorem 16QAM, bez nesymetrií, s TWTA	29
Obr.46.: Modifikovaná metoda kompenzace nesymetrií	43
Obr.47.: Modifikovaný blok Kompenzace amplitudy	43
Obr.48.: Modifikovaný blok Kompenzace fáze	43
Obr.49.: Modifikovaný blok odhadu amplitudové nesymetrie K_{est}	44
Obr.50.: Modifikovaný blok odhadu fázové nesymetrie P_{est}	44
Obr.51.: Modifikovaný blok Accumulate & Dump	44
Obr.52.: Obvod resetu čítače.....	44
Obr.53.: Řídící puls pro blok Sample & Hold.....	44

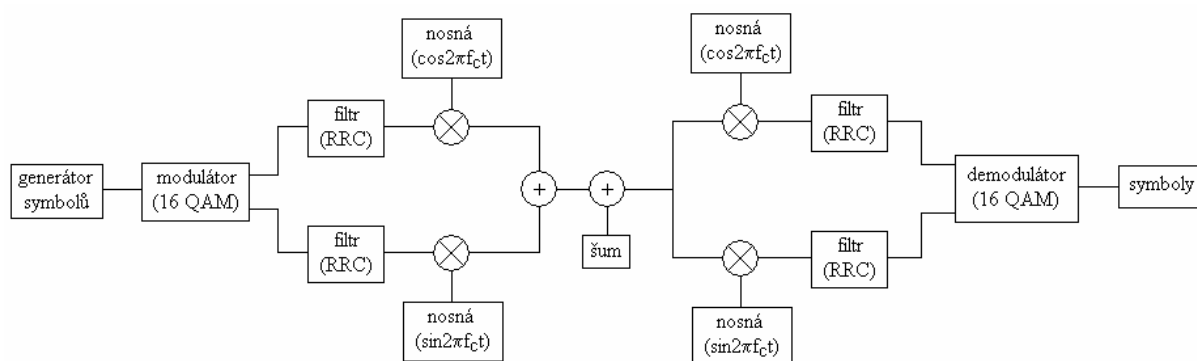
1. Úvod

V práci je analyzováno zapojení komunikačního řetězce včetně vysvětlení jednotlivých jeho částí. Dále je provedeno seznámení se simulačním prostředím VisSim 6.0, pomocí jehož jsou jednotlivé části zkoumány nejprve na jednoduchých, později na složitějších příkladech. Po odzkoušení software VisSim je analyzována hlavně bitová chybovost BER jak zapojení s QPSK, tak i 16QAM modulátorem. Chybovost je určena také v souvislosti se zapojeným nelineárním zesilovačem TWTA a je prověřen vliv práce v plovoucí a pevné řádové čárce. Dále je teoreticky probrána a prakticky implantována metoda kompenzace nesymetrií modulátoru.

Na závěr je nastíněna možnost vygenerovat simulované zapojení do zdrojového kódu jazyka C, což je možno použít např. při praktické realizaci odhadů a kompenzací nesymetrií.

2. Struktura obecného komunikačního řetězce

Pro přenos informace od zdroje k cíli se využívá tzv. komunikačního řetězce. Jeho blokové schéma pro modulaci 16 QAM je následující:

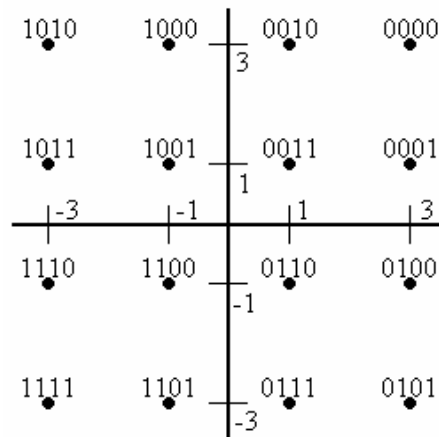


Obr.1.: Blokové schéma komunikačního řetězce

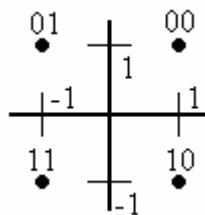
V blokovém schématu je obsaženy následující prvky:

generátor symbolů – jedná se o zdroj dat, která chceme přenášet. Pokud je použit generátor binárních dat, je nutné posloupnost rozdělit na bloky po čtyřech bitech (pokud je jako modulátor použit 16 QAM) nebo na bloky po 2 bitech (modulátor QPSK). Je-li jako generátor použit přímo generátor symbolů o 16 úrovních, není třeba signál nijak upravovat.

modulátor – spolu s demodulátorem se jedná o dva nejdůležitější prvky v obvodu. Modulátor podle vstupního symbolu přiřadí pomocí konstelačního diagramu příslušný modul a fázi signálu modulovaného. Konstelační diagramy QPSK a 16 QAM:



Obr.2.: Konstelační diagram 16 QAM



Obr.3.: Konstelační diagram QPSK

filtr – protože signál má velkou šířku spektra, je nutno jej omezit (z důvodu kapacity kanálu).

K tomu se využívá filtr typu dolní propust. Podle tvaru impulsní charakteristiky může být například RC (raised cosine), RRC (root raised cosine) apod. V modelovaném zapojení je využit filtr RRC.

nosná – signál je rozdělen do větví I a Q a je v jednotlivých větvích filtrován. Aby bylo možno přenášet více signálů stejným kanálem, je třeba jednotlivé signály modulovat na nosné. Větev I bývá modulována na nosnou $\cos(2\pi f_c t)$, zatímco větev Q bývá modulována na nosnou $\sin(2\pi f_c t)$. Signály jednotlivých větví se pak sečtou a výsledek je vyslán do komunikačního kanálu.

šum – při průchodu komunikačním kanálem je signál vystaven působení jiných signálů a rušení, což se projeví jako šum. Nejvíce náchylný na rušení je signál při průchodu vzduchem, nejmenší rušení se vyskytuje u koaxiálního vedení.

Po přijetí signálu přijímačem je signál opět modulován na nosné o stejných kmitočtech f_c , což způsobí posun signálu ve spektru jak na nosný kmitočet 0 Hz, tak na nosné kmitočty $2 \cdot f_c$ apod. Omezení těchto produktů je provedeno opět pomocí filtru typu dolní propust, který musí být vhodně nastaven tak aby nedocházelo k mezisymbolovým interferencím.

Po odfiltrování je signál přiveden na demodulátor, který pomocí konstelačního diagramu z něj vytvoří opět symbolovou (bitovou) posloupnost.

Při modulaci a demodulaci může dojít k potížím způsobeným nesymetrií modulátoru / demodulátoru. Tyto nesymetrie jsou děleny na:

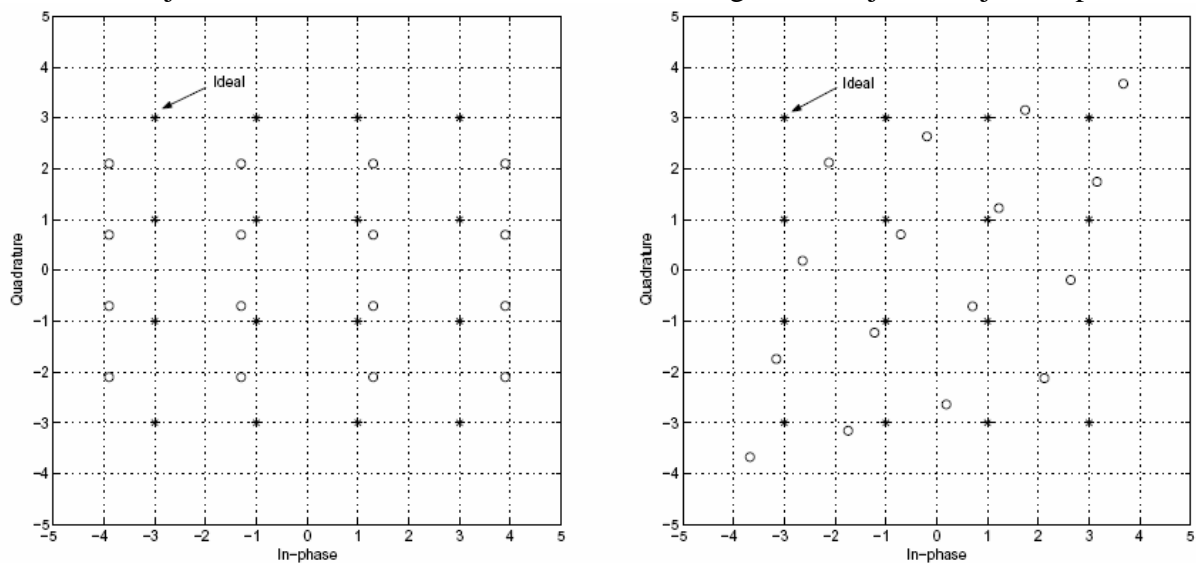
- amplitudovou
- fázovou

Amplitudová nesymetrie způsobuje nepřesnou polohu bodu vzhledem k ideálnímu konstelačnímu diagramu ve smyslu rozestupování a seskupování bodů v osách I a Q – viz obr.4.

Fázová nesymetrie způsobuje deformaci konstelačního diagramu od pravoúhlé soustavy (osy I a Q na sebe nejsou kolmé) – viz obr.4.

Aby bylo možné signál jednoznačně dekodovat, je třeba jej nejprve upravit do formy umožňující použít obyčejný demodulátor – týká se především fázové nesymetrie. Jednou z možností jak zjistit velikost fázové nesymetrie je vyslat známou tréninkovou sekvenci, např. modulovat a vyslat symboly jdoucí po sobě (0000, 0001 atd.) a na výstupu přizpůsobit korekci tak, aby byl výsledek co nejvíce podobný ideálnímu konstelačnímu diagramu.

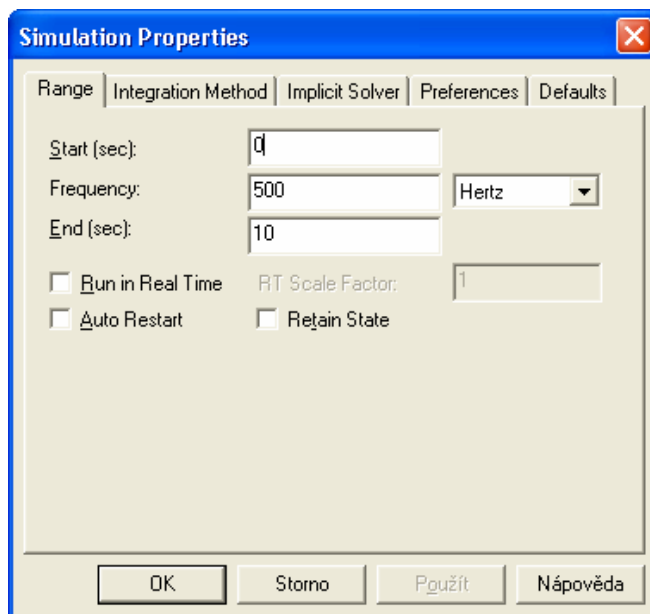
Druhou možností je vyslat tréninkovou sekvenci ne používaných symbolů, ale posloupnost středů jednotlivých kvadrantů, tedy symboly $[2;2]$, $[2;-2]$, $[-2;2]$, $[-2;-2]$. Tímto je také možné zjistit modifikaci ideálního konstelačního diagramu a zajistit tak jeho nápravu.



Obr.4.: Nesymetrie kvadraturního modulátoru
a) amplitudová, b) fázová

3. Popis simulačního programu VisSim

Simulační software VisSim má mnoho nastavení výpočtů (vzorkovací kmitočet programu, integrační metoda apod.). Během simulací je ovšem nejdůležitější mít správně nastaven právě vzorkovací kmitočet programu, bez něhož jsou výsledky simulací nesmyslné. Toto nastavení je umístěno v menu Simulate / Simulation Properties...

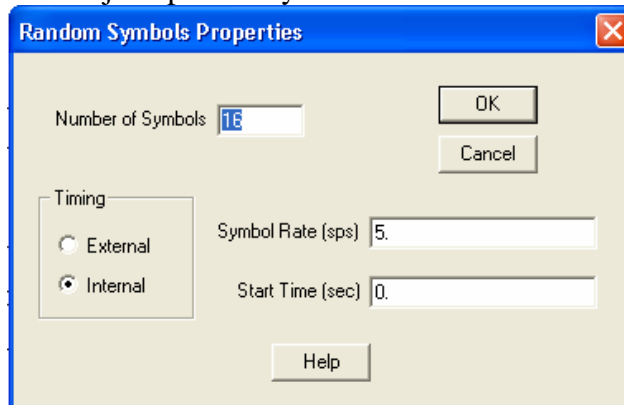


Obr.5.: Nastavení kmitočtu simulačního software VisSim

Vzhledem k použitým pracovním kmitočtům jednotlivých bloků bude kmitočet programu VisSim nastaven na hodnotu 500Hz.

Pro simulaci výše uvedeného blokového schématu je zapotřebí vložit v programu VisSim několik základních bloků:

generátor symbolů – umístěn v menu Comm / Signal Sources / Random Symbol. Po umístění bloku je třeba nastavit jeho parametry:



Obr.6.: Nastavení generátoru symbolů

number of symbols – počet stavů generátoru. Modulátor 16 QAM kóduje symboly o délce 4 bity, z čehož plyne počet stavů 16

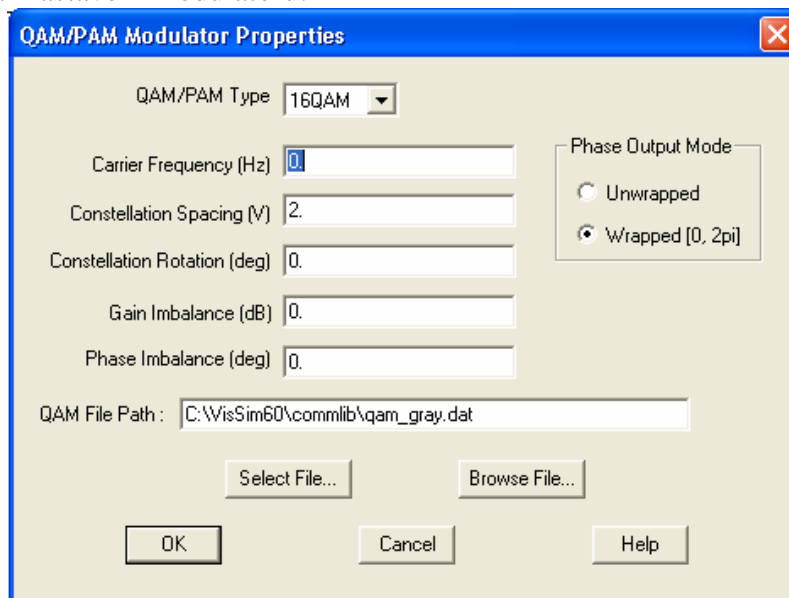
timing – nastavení časování. Nastaven vnitřní generátor hodinového taktu

symbol rate – počet symbolů za jednotku času, při interním časování uváděno přímo v Hz

start time – zpoždění generování symbolů

modulátor – v menu Comm / Modulator – Complex / QAM/PAM. Pro simulaci je možné použít také modulátor z menu Comm / Modulator – Real / QAM/PAM (Re), tento modulátor ale má na výstupu signál a jeho fázi. Pro simulaci se nám tudíž lépe hodí zmiňovaný první modulátor, který má na výstupu komplexní vyjádření signálu označeného jako z. Komplexní signál je možno dále rozdělit na reálnou a imaginární složku pomocí bloku umístěného v menu Comm / Complex Math / Complex to Real/Imag.

Možnosti nastavení modulátoru:



Obr.7.: Nastavení modulátoru QAM

QAM/PAM Type – simulovaný modulátor bude 16 QAM nebo QPSK

Carrier Frequency (Hz) – kmitočet nosné

Constellation Spacing (V) – rozstup bodů konstelačního diagramu

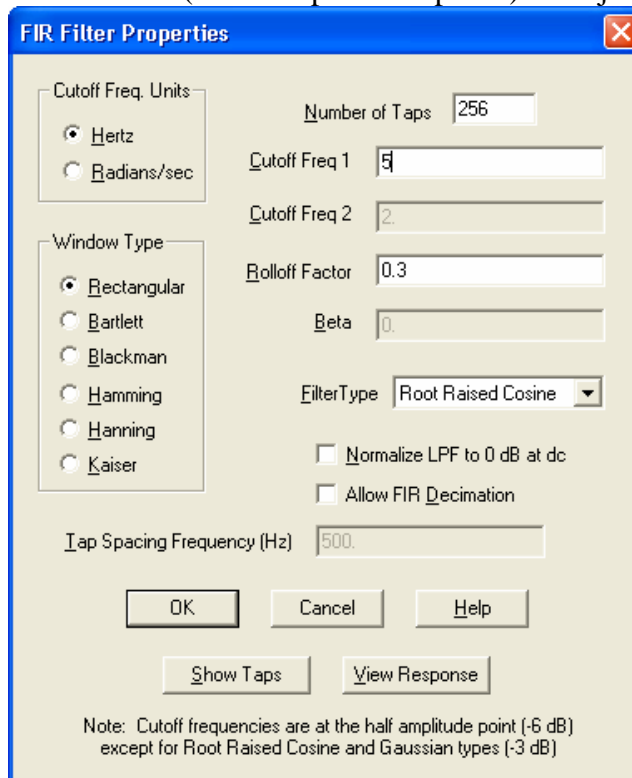
Constellation Rotation (deg) – otočení konstelačního diagramu ve stupních

Gain Imbalance (dB) – modulová nesymetrie

Phase Imbalance (deg) – fázová nesymetrie

Phase Output Mode – nastaveno na Wrapped (fáze je v rozsahu $0 - 2\pi$)

filtr – v menu Comm / Filters / FIR (Finite Impulse Response). Filtr je třeba nastavit:



Obr.8.: Nastavení filtru RRC

Cutoff Freq. Units – v jakých jednotkách bude udávána Cutoff Freq 1

Window Type – jaký typ okna bude filtr používat, nastaveno Rectangular (obdélníkové)

Number of Taps – délka impulsní odezvy

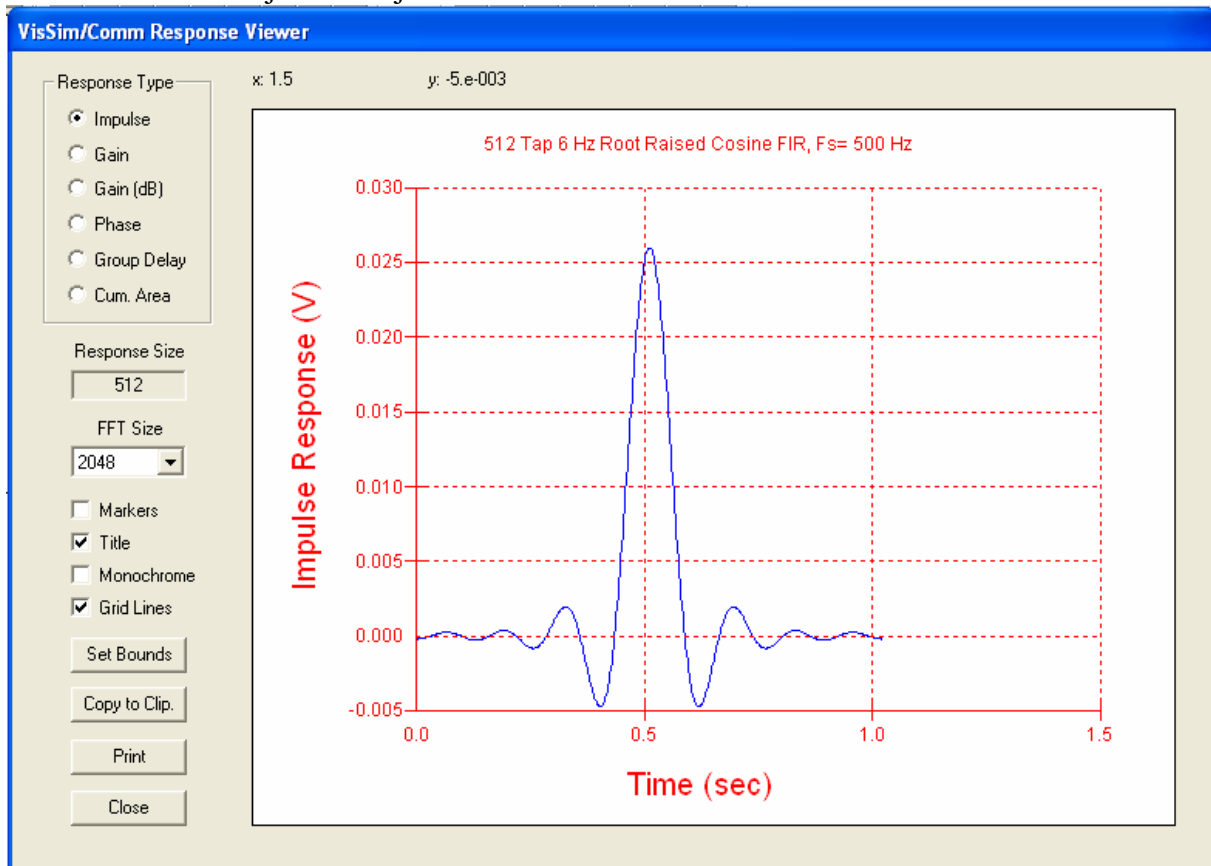
Cutoff Freq 1 – kmitočet, na kterém bude přenos filtru o 3dB nižší než maximální

Roloff Factor – určuje tvar impulsové charakteristiky filtru (strmost)


Filter Type – typ filtru, v nabídce je také mimo Root Raised Cosine také Raised Cosine a další

Normalize LPF to 0 dB at dc – počítá přenos vzhledem k napětí země (0 dB); využívá se pokud je mezní kmitočet relativně mnohem menší než vzorkovací kmitočet a délka impulsní odezvy je relativně malá

Pro kontrolu je možné zobrazit odezvu filtru tlačítkem View Response. Odezva navrhovaného filtru je následující



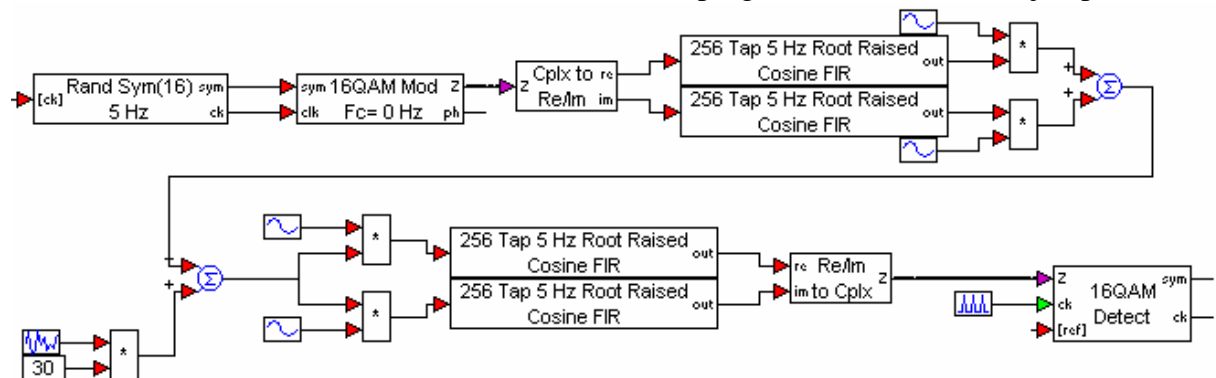
Obr.9.: Impulsní odezva použitého RRC filtru

Dalším významným prvkem pro simulaci je graf, který je možno nalézt v menu Blocks / Signal Consumer / plot nebo také na liště s ikonou . Graf lze použít jak pro časovou závislost signálu, tak také jako zobrazení XY např. pro zobrazení výstupních prvků modulátoru.

Dále se na liště nachází velké množství pomocných prvků jako jsou generátory různých průběhů signálu apod. Veškeré prvky se v programu VisSim spojují pomocí vodiče, který je možno vytvořit kliknutím myši na jeden požadovaný pin a následujícím tažením myši k pinu druhému.

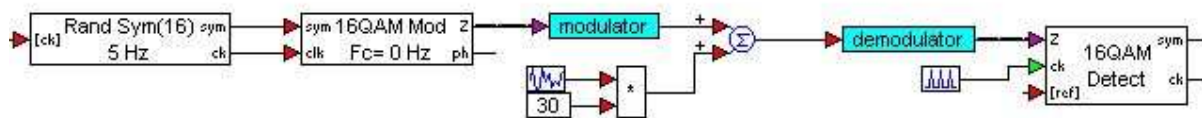
Pro zřehlednění nabízí program tzv. složené bloky.

Blokové schéma uvedené na obr.1 bude mít v programu VisSim následující podobu:



Obr.10.: Komunikační řetězec v programu VisSim

Z předchozího obrázku je patrné že zobrazení není ideální a zapojení je dosti nepřehledné. Program VisSim proto nabízí možnost slučování bloků do větších celků, tzv. složených bloků. Složený blok je možné vytvořit označením více prvků a po následném stisknutí pravého tlačítka myši zvolením možnosti Create compoud. Uvedený komunikační řetězec se poté zpřehlední:



Obr.11.: Komunikační řetězec v programu VisSim s využitím složených bloků

Přehled dalších bloků využívaných v simulacích:

Accumulate & Dump

Pro realizaci metody kompenzace amplitudové a fázové nesymetrie je třeba použít blok Accumulate & Dump. Tento blok je umístěn v nabídce Comm / Digital / Accumulate & Dump (Real). Tento blok provádí akumulaci bitů v čase a po dosažení zadaného počtu sčítaných bitů provede vyslání součtu na výstup. Je řízen dvěma impulsovými signály, z nichž jeden určuje takt sčítání (nutno nastavit podle bitové rychlosti ve větvích), druhý určuje periodu vysílání součtu na výstup. Dále je možno zvolit zda při současném příchodu obou řídicích impulsů se má nejprve akumulovat a poté vyslat výsledek nebo opačně. Vysílaný součet je na výstupu stále na stejné hodnotě dokud není nahrazen součtem novým, což usnadňuje synchronizaci s následujícími prvky.

V nabídce jsou na výběr reálný a komplexní, dále bude využit jen reálný protože jej budeme využívat na signál v jednotlivých větvích I a Q samostatně.

Aritmetické operace

Dalším využívaným blokem bude dělení umístěný v menu Blocks / Arithmetic / /. Ve stejném menu je umístěn také blok násobení, sčítání, odčítání, zesílení, mocniny (odmocniny lze dosáhnout pomocí známého převodu $\sqrt{x} = x^{\frac{1}{2}}$).

Average Power

Tento blok lze najít v menu Comm / Estimators / Average Power (Real). Pomocí něj lze určit výkon signálu. Po otevření vlastností lze nastavit mód určení výkonu – Running (velikost výkonu je určována od začátku simulace, vynulovat jej lze pomocí resetovacího vstupu) nebo Sliding Window (nastaví se počet simulačních kroků a ze signálu se během periody zjišťuje průměrný výkon). Dále se nastavuje velikost zátěže (1 nebo 5 Ohmů) a jednotka výkonu (dBm, Watty nebo dBW).

Bit/Symbol Error Rate

Pomocí tohoto bloku je možné určit velikost bitové nebo symbolové chybovosti. Nastavit lze zpoždění po začátku simulace a zda se počítá symbolová nebo bitová chybovost – zde je nutno zadat počet bitů na symbol.

Vstupními veličinami jsou dekodovaný signál, referenční signál a hodinový takt. Na výstupních portech je bitová/symbolová chybovost, počet chybných bitů/symbolů a jejich celkový počet.

SER/BER Curve Control

Při potřebě vykreslit bitovou nebo symbolovou chybovost je tento blok nepostradatelný. V nastavení se definuje o jakou chybovost jde (bitová – symbolová), počet a délka běhu simulace – v návaznosti na blok AWGN. Vstupními veličinami jsou velikost energie na bit a chybovost, na výstup se pomocí portů připojuje zobrazovač grafu v režimu XY.

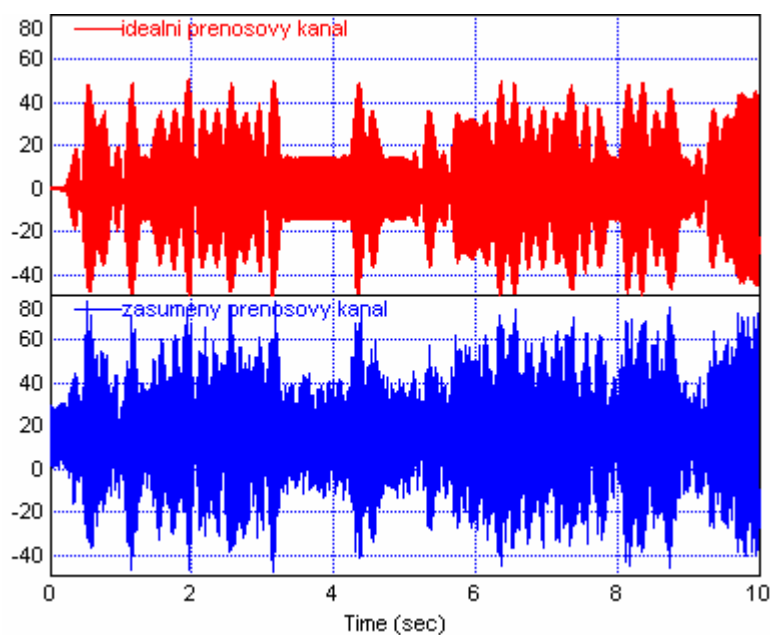
Časové zpoždění

Posledním využitým blokem bude časové zpoždění pro dobrou synchronizaci bloků (zejména pro časovou kompenzaci bloku Accumulate & Dump). Tento blok je umístěn v menu Comm / Operators / Delay (Real).

4. Simulace - parametry obvodu

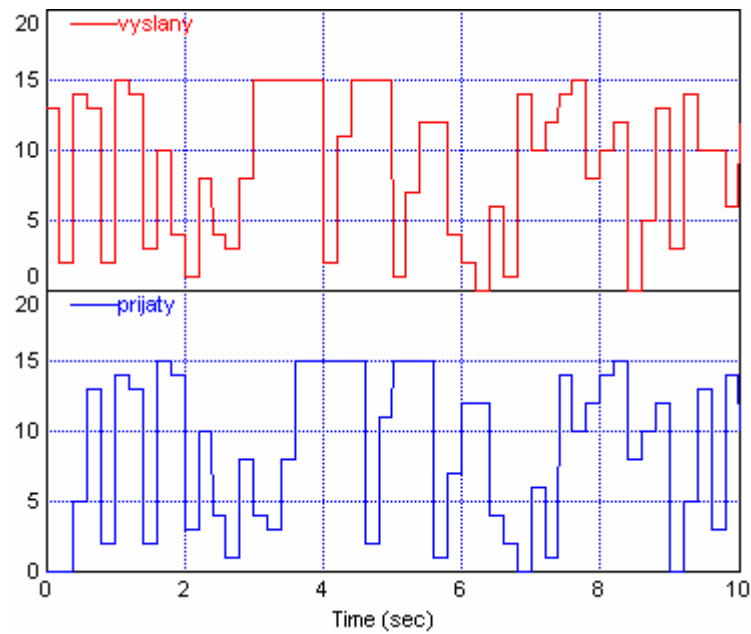
Na obvod se je možné dívat z několika pohledů – z časové oblasti, frekvenční oblasti, chybovosti BER apod. Jednotlivé analýzy jsou proto uvedeny v následujících podkapitolách.

4.1. Parametry obvodu – časová analýza



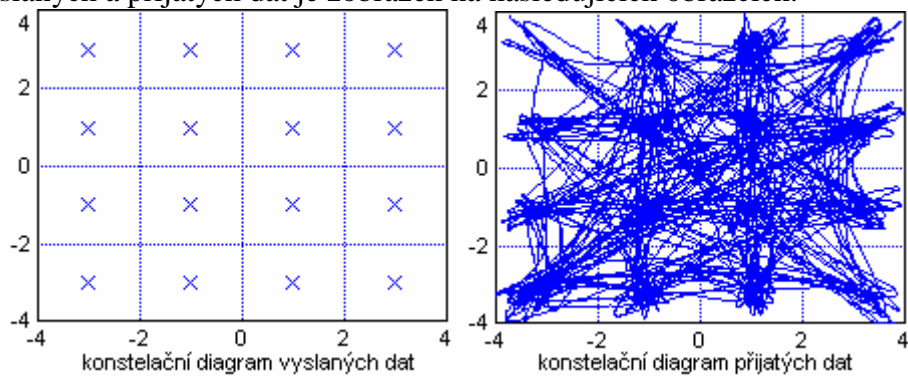
Obr.12.: Ideální a zašuměný přenosový kanál

Z obrázku je patrné relativně velké zašumění vyslaného signálu (byl použit uniformní generátor šumu s amplitudou 30V). I přes takto velké zašumění probíhá komunikace beze ztrát, viz následující obrázek. V tomto průběhu je zřetelné zpoždění výstupního signálu za vstupním. Není to dáno zpožděním přenosového kanálu, ale délkami odezvy filtrů – čím delší bude odezva filtru na impuls, tím větší bude zpoždění mezi vstupním a výstupním signálem.



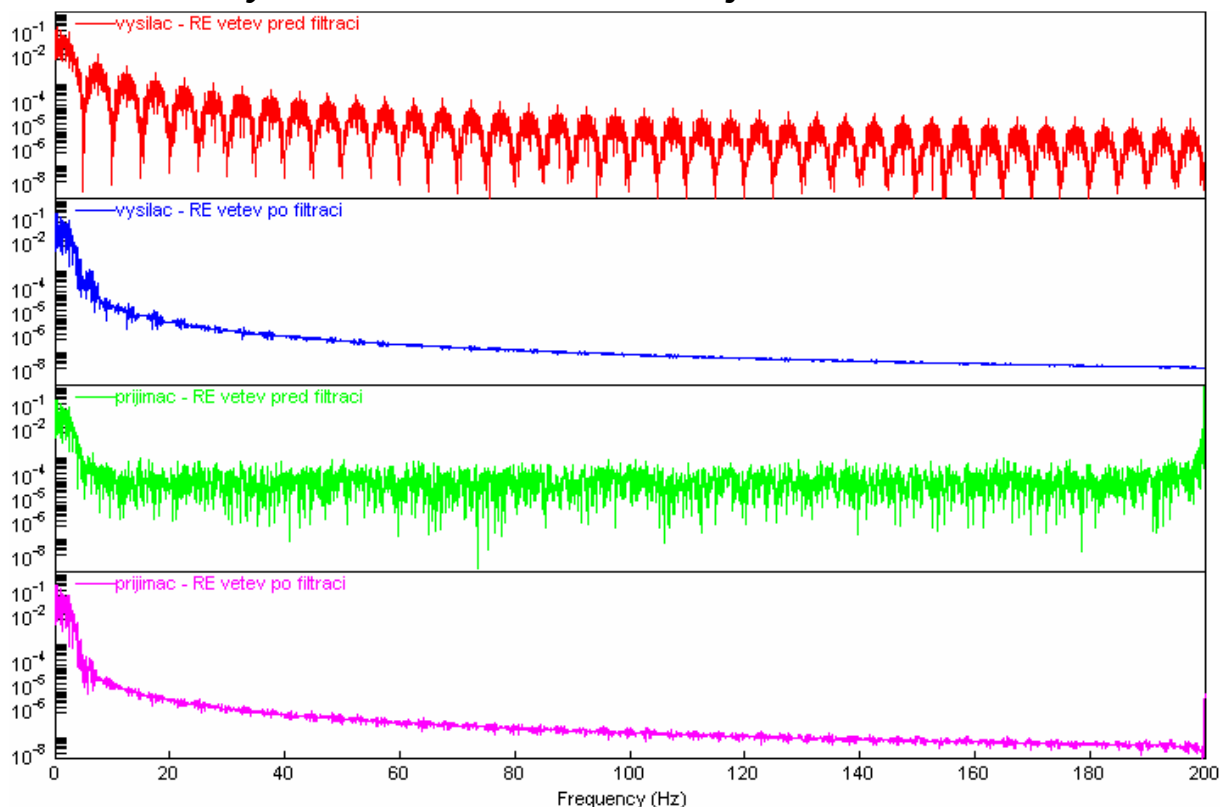
Obr.13.: Vyslaná a přijatá symbolová posloupnost při zašuměném kanálu

Tato skutečnost je dána díky věrohodnosti konstelačního diagramu. Konstelační diagram vyslaných a přijatých dat je zobrazen na následujících obrázcích.



Obr.14.: Konstelační diagram vyslaných a přijatých dat

4.2. Parametry obvodu – frekvenční analýza

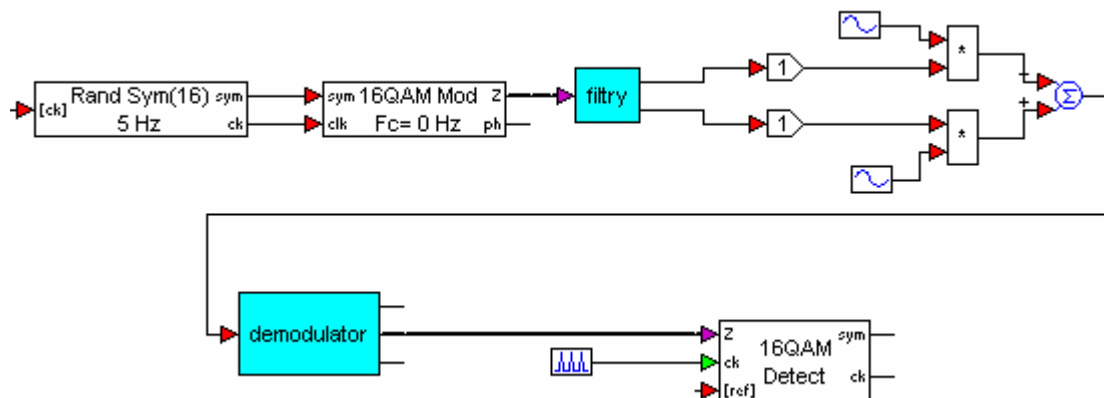


Obr.15.: Frekvenční analýza řetězce

V této analýze je patrná funkce filtrů. Ty jsou nastaveny tak, aby jejich horní mezní kmitočet byl 5Hz (podle kmitočtu generování symbolů). Na frekvenční charakteristice vysílače před filtrací je průběh periodický, což je dáno modulátorem. Po vyfiltrování již jsou vyšší harmonické potlačeny již zmíněným filtrem. Na třetím obrázku je zobrazen komunikační kanál po přidání šumu (amplituda 30V). Na posledním obrázku je znázorněn již vyfiltrovaný průběh.

4.3. Parametry obvodu – nesymetrie modulátoru

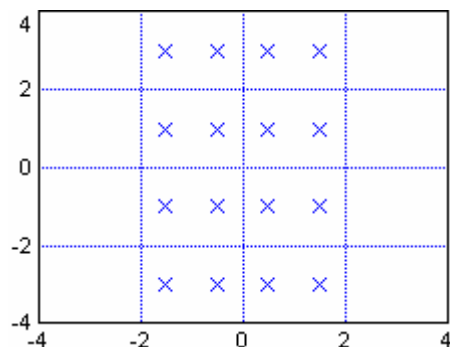
Pro modelování nesymetrií modulátoru je třeba vyjít z modifikovaného zapojení komunikačního řetězce. Zapojení může být následovné:



Obr.16.: Modifikované zapojení komunikačního řetězce pro modelování nesymetrií

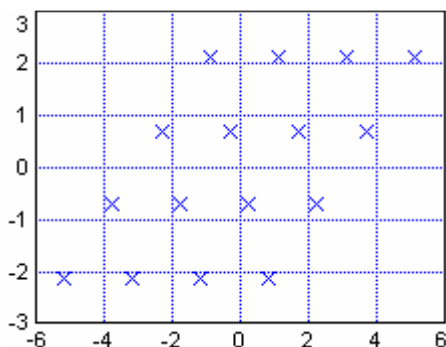
Pro přehlednost je vypuštěn aditivní šum v kanále. Ve větvích I a Q je navíc zesilovač, pomocí kterého je možné modelovat amplitudovou nesymetrii. Fázovou nesymetrii je možné modelovat pomocí změny fáze ve větvi I, konkrétně se bude měnit zpoždění spuštění nosné $\cos(\omega_c t)$. Tímto se vytvoří změna fáze mezi nosnou větví I a Q z původních 90° na hodnotu menší. Je samozřejmě možné vytvářet nesymetrie přímo v nabídce modulátoru, tato varianta je ale mnohem názornější.

Pro modelování amplitudové nesymetrie je tedy třeba měnit zesílení ve větvích. Pro zjednodušení je možné měnit zesílení jen v jedné větvi, např. větvi I. Při zmenšování tohoto zesílení dochází k seskupování bodů konstelačního diagramu v horizontálním směru. Jako příklad je níže zobrazen konstelační diagram pro amplitudovou nesymetrii při zesílení ve větvi I $= 0,5$.



Obr.17.: Konstelační diagram modulátoru, zesílení ve větvi I $= 0,5$

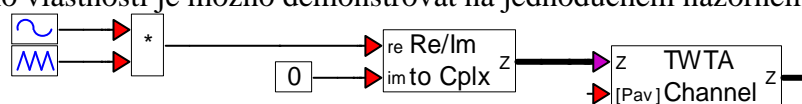
Pro představu je níže ještě uveden případ fázové nesymetrie, kdy je rozdíl mezi nosnými vlnami 45° .



Obr.18.: Konstelační diagram modulátoru, fázová nesymetrie $= 45^\circ$

5. Použití zesilovače TWTA

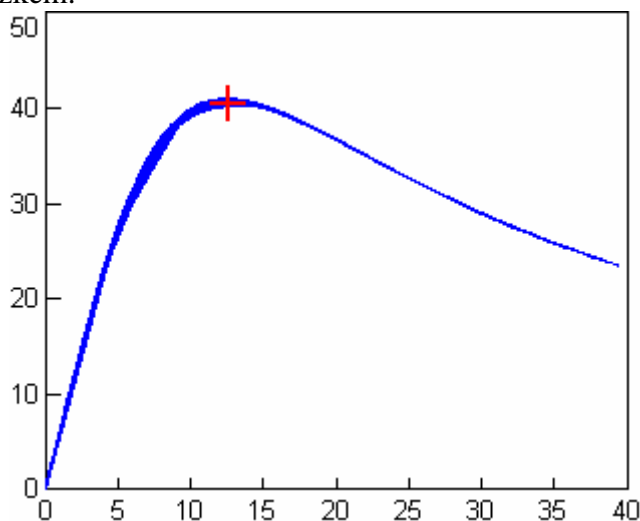
Zesilovač TWTA (Traveling Wave Tube Amplifier – zesilovač s putující vlnou) se používá zejména v simulacích díky svému dobře popsanému modelu. Jedná se o nelineární zesilovací prvek. V praxi je realizován nikoli jako polovodičová součástka, ale jako speciální elektronka. Jeho vlastnosti je možno demonstrovat na jednoduchém názorném zapojení



Obr.19.: Demonstrační zapojení TWTA

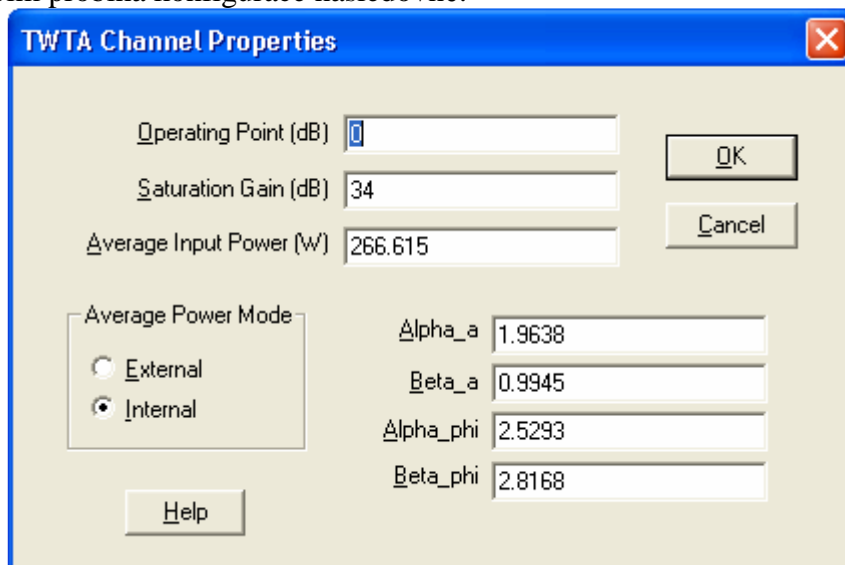
Z blokového zapojení je patrné, že TWTA pracuje obecně s komplexním signálem. Tento je možno z reálného jednoduše vytvořit.

Zesilovač je většinou svými parametry nastaven tak, aby pracoval až do jeho saturace. Celá převodní charakteristika je zobrazena následujícím obrázkem, oblast saturace je znázorněna červeným křížkem.



Obr.20.: Kompletní převodní charakteristika TWTA

Vhodným nastavením parametrů je tedy třeba nastavit pracovní režim TWTA. V programu VisSim probíhá konfigurace následovně:



Obr.21.: Nastavení parametrů TWTA

Význam jednotlivých položek:

Operating Point (dB) – relativní vzdálenost pracovního bodu v dB od místa, kde leží průměrný vstupní výkon TWTA; na převodní charakteristice se projeví délkou z celkové charakteristiky

Saturation Gain (dB) – určí, jaké je zesílení zesilovače v saturaci; na převodní charakteristice se projeví sklonem

Average Input Power (W) – vstupní výkon zesilovače

Alpha_a, Beta_a, Alpha_phi, Beta_phi – parametry určující tvar křivky. Hodnoty jsou dány doporučením.

Hodnotu průměrného vstupního výkonu je možno zjistit pomocí bloku Average Input Power (Complex nebo Real) v nabídce Comm / Estimators.

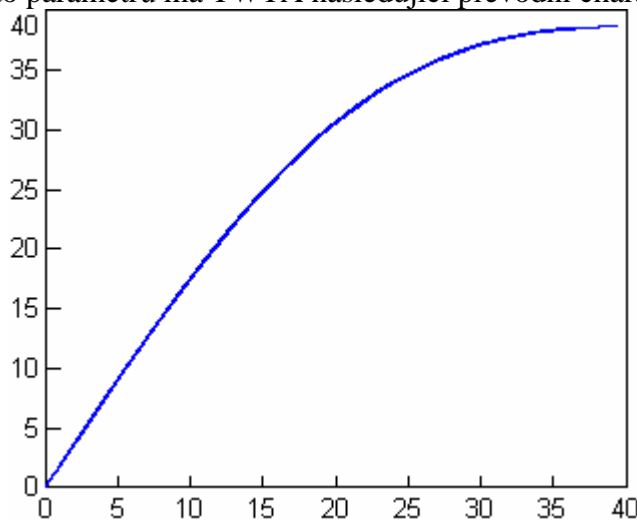
Pro simulaci výše uvedeného demonstračního zapojení jsou vhodné následující hodnoty:

Operating Point: -11dB

Saturation Gain: 33,5dB

Average Input Power: 216,615W

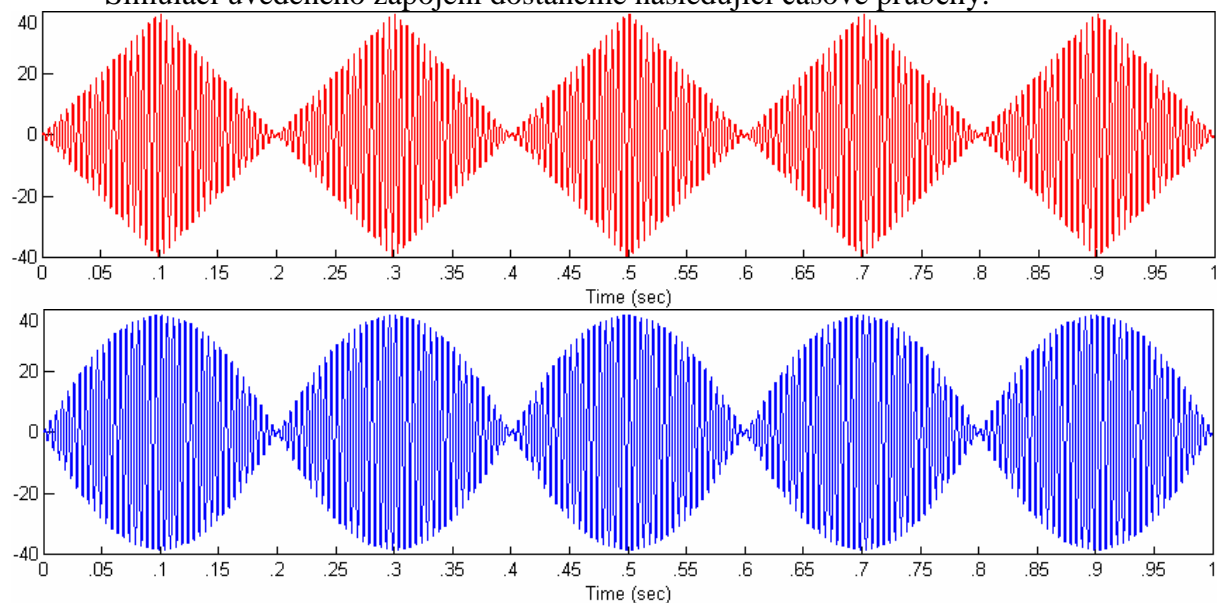
Použitím těchto parametrů má TWTA následující převodní charakteristiku:



Obr.22.: Převodní charakteristika nelineárního TWTA

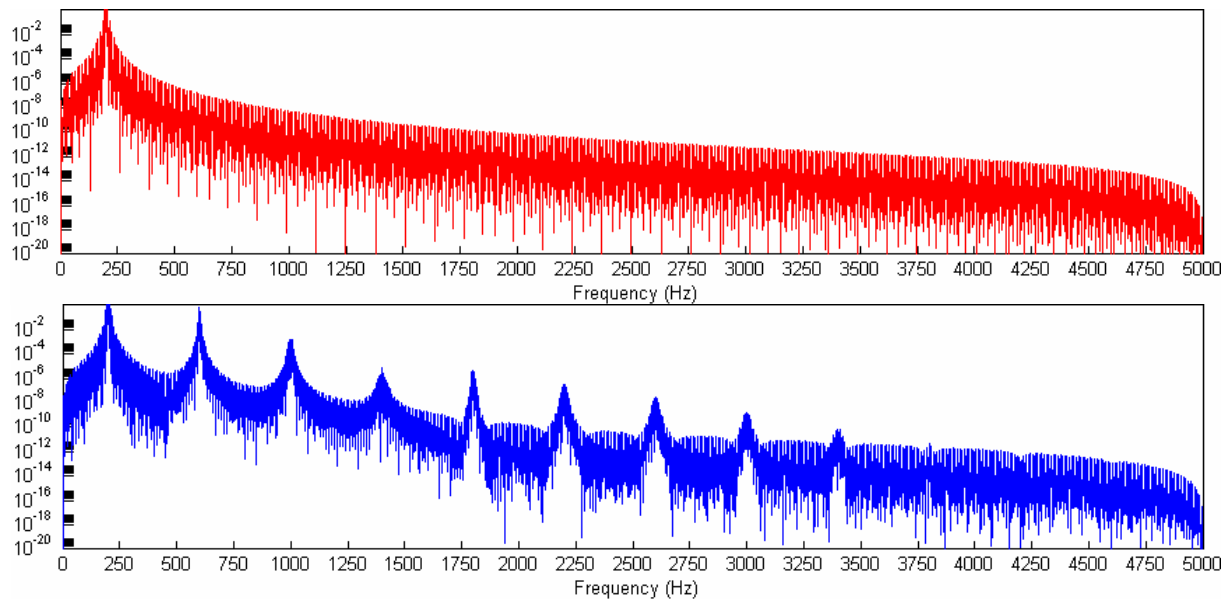
Stejná převodní charakteristika TWTA je použita v dalších simulacích pod pojmem nelineární TWTA.

Simulací uvedeného zapojení dostaneme následující časové průběhy:



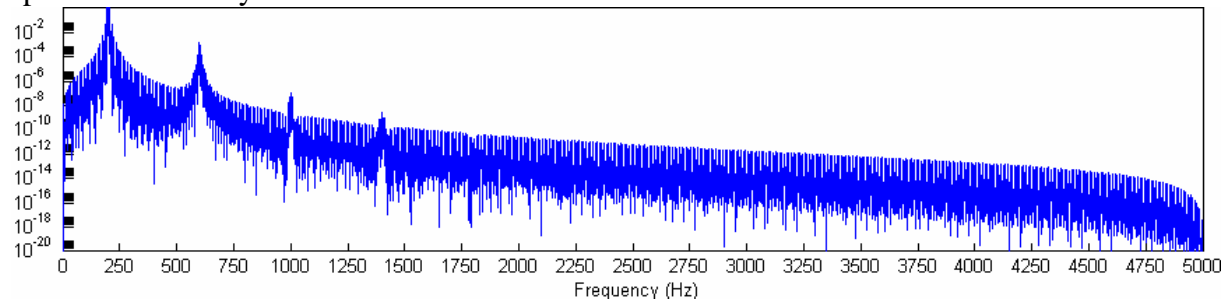
Obr.23.: Časové průběhy vstupu a výstupu TWTA demonstračního zapojení

Červený časový průběh je signál vstupující do TWTA, modrý průběh je signál vystupující ze zesilovače TWTA. Z těchto průběhů je patrné, že zvolenými parametry má výstupní signál stejnou amplitudu jako vstupní, je ovšem zkreslený podle převodní charakteristiky. Zajímavými charakteristikami jsou rovněž spektra signálů:

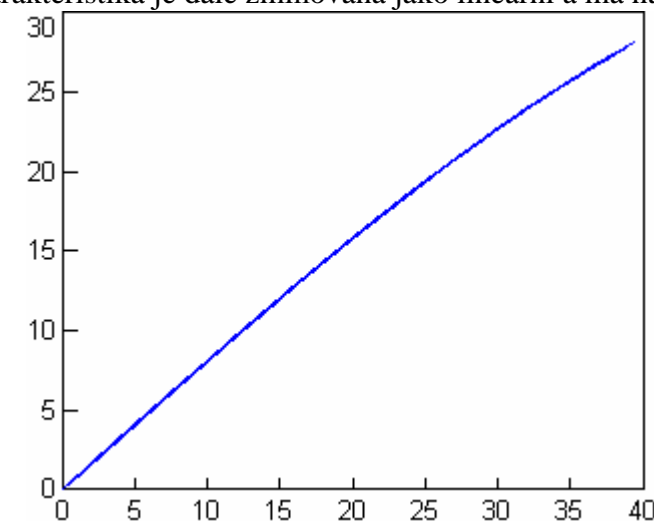


Obr.24.: Spektra vstupního a výstupního signálu TWTA demonstračního zapojení

Červené spektrum je vstupního signálu (trojúhelníkový signál namodulovaný na nosném sinusovém signálu). Na výstupu zesilovače je možno pozorovat spektrum obohacené (nežádoucí jev, protože se signál objevuje i na jiných kmitočtech). Nežádoucích spektrálních čar je tím více, čím nelineárnější je převodní charakteristika TWTA. Snížíme-li tedy např. parametr Operating Point (OP) z původních -11dB na hodnotu např. -15dB , vedlejších spektrálních čar výrazně ubude – viz obrázek.

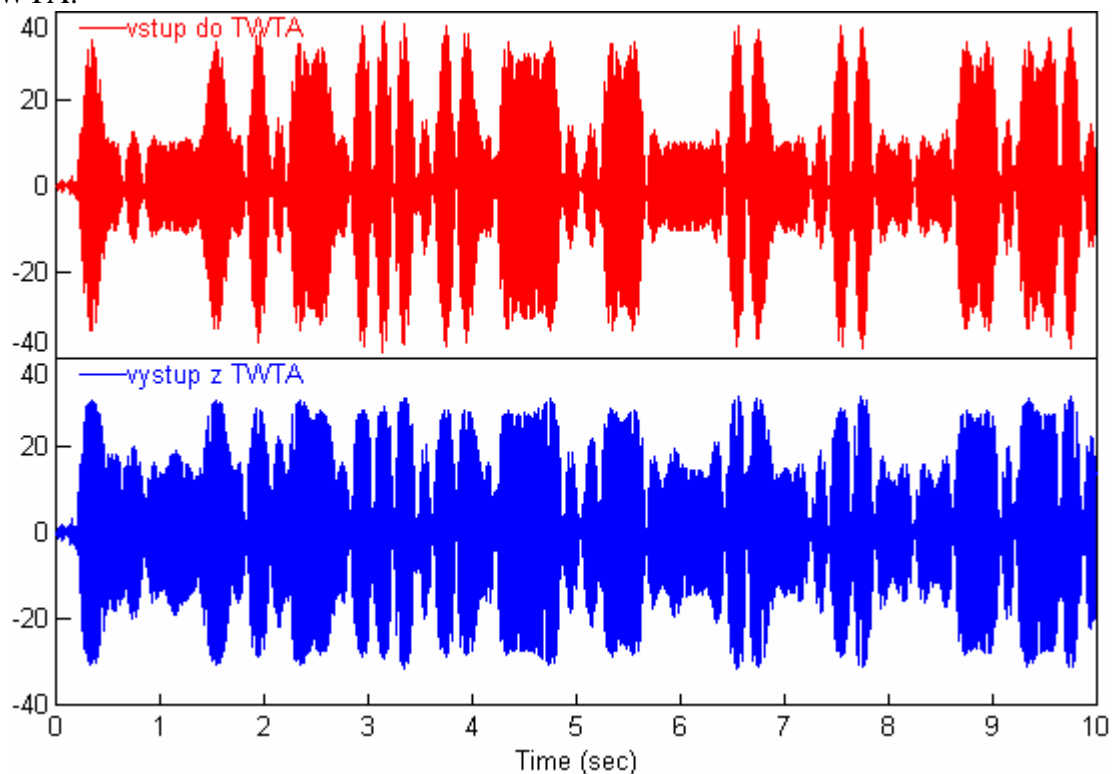
Obr.25.: Spektrum výstupního signálu TWTA demonstračního zapojení pro $\text{OP} = -20\text{dB}$

Převodní charakteristika je dále zmiňována jako lineární a má následující tvar

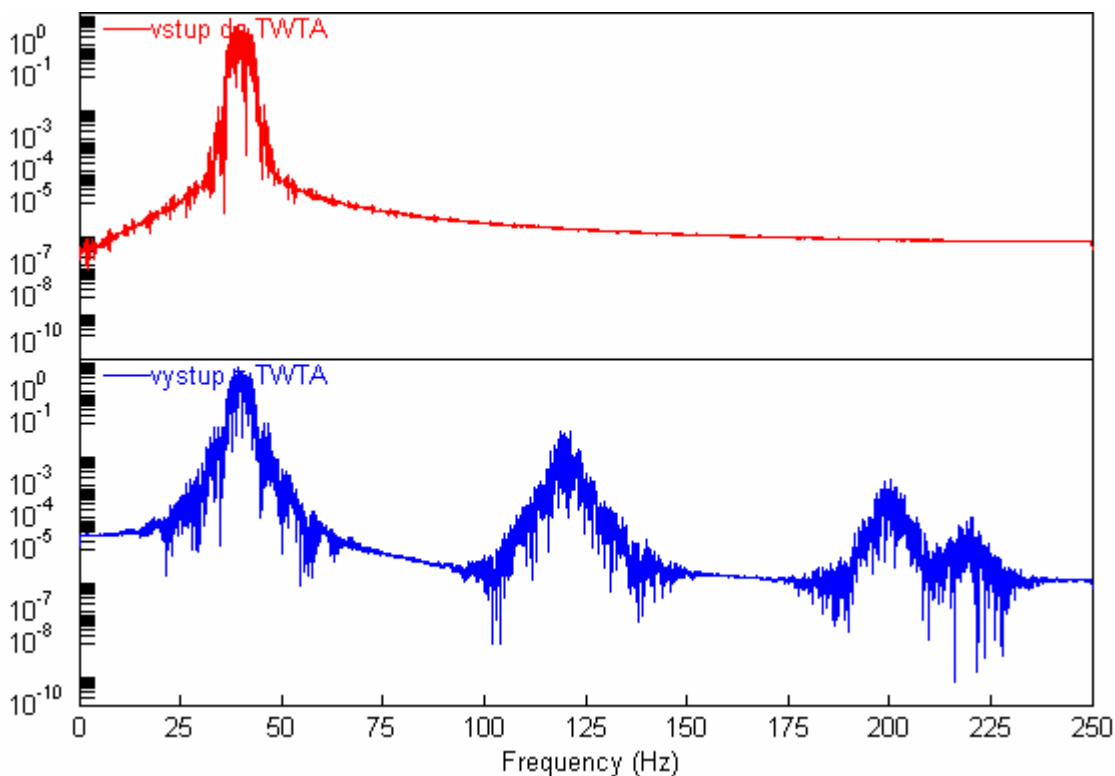


Obr.26.: Převodní charakteristika lineárního TWTA

Po vložení TWTA do přenosového kanálu simulovaného zapojení komunikačního řetězce je možno sledovat následující časové průběhy signálu vstupujícího a vystupujícího z TWTA:



Obr.27.: Časový průběh signálu vstupujícího a vystupujícího z TWTA kom. kanálu



Obr.28.: Spektrum signálu vstupujícího a vystupujícího z TWTA kom. kanálu

Červené průběhy opět patří signálu vstupujícímu do TWTA, modré signálu z TWTA vystupujícímu. Ve frekvenční oblasti je patrné obohacení spektra stejně tak jako tomu bylo u

demonstračního zapojení. Převodní charakteristika TWTA je podobná charakteristice na Obr.22.

6. Metoda kompenzace amplitudové a fázové nesymetrie

6.1. Teoretický rozbor metody

Níže popsaná metoda je převzata z [5].

Tato metoda pro korekci amplitudové a fázové nesymetrie pracuje v časové oblasti. Byla původně vyvinuta pro kompenzaci nesymetrií ve WLAN sítích, zvláště v mobilních terminálech pro výpočetní i finanční nenáročnost použitých komponent. Nicméně je vhodná i pro použití v analyzovaném komunikačním řetězci jak s QPSK, tak i 16 QAM modulátorem. Hlavním zdrojem nesymetrií je právě modulátor, proto je vhodné kompenzaci provádět hned za zdrojem nesymetrií (tedy zmiňovaným modulátorem) a vysílat signál již kompenzovaný.

Při užití této metody se k signálu přistupuje podle rovnice

$$s = s_I + j * s_Q$$

kde s - výsledný komplexní signál
 s_I - signál větve I modulátoru
 s_Q - signál větve Q modulátoru

Popis jednotlivých signálů s_I a s_Q je dán maticí

$$\begin{bmatrix} s_I[k] \\ s_Q[k] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_I & 0 \\ -K_Q * \sin \varphi_{err} & K_Q * \cos \varphi_{err} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} s'_I[k] \\ s'_Q[k] \end{bmatrix} \quad (1)$$

kde K_I - zesílení větve I
 K_Q - zesílení větve Q
 φ_{err} - fázová nesymetrie
 s'_I - ideální signál větve I
 s'_Q - ideální signál větve Q
 s_I - skutečný signál větve I
 s_Q - skutečný signál větve Q
 $[k]$ - pořadové číslo vzorku signálu

Jednoduchou úpravou matice získáme vztahy pro signály s_I a s_Q

$$\begin{aligned} s_I[k] &= K_I * s'_I[k] \\ s_Q[k] &= -K_Q * \sin \varphi_{err} * s'_I[k] + K_Q * \cos \varphi_{err} * s'_Q[k] \end{aligned} \quad (2)$$

Tímto jsme získali model signálu znehodnoceného amplitudou a fázovou nesymetrií. Aby bylo možné odhalit velikost těchto nesymetrií, vyžaduje metoda vysílání tzv. tréninkové sekvence, ze které odhadne velikost amplitudové a fázové nesymetrie. Tréninková sekvence musí mít stejný počet všech symbolů – tedy jejich rovnoměrné rozložení. Aby bylo tohoto rovnoměrného rozložení dosaženo, je třeba aby délka tréninkové sekvence byla násobkem použité modulace, tedy pro modulaci QPSK i 16 QAM je možno využít tréninkové sekvence délky 64 symbolů. Bude-li použita délka tréninkové sekvence např. 63 nebo 65 symbolů,

zhorší se přesnosti odhadů nesymetrií. Délkou tréninkové sekvence L se také určuje přesnost odhadu nesymetrií, pro modelovaný obvod je přesnost pro délku zmiňovaných 64 symbolů dostatečná.

Pro odhad amplitudové nesymetrie lze využít jeden ze vztahů

$$K_{est} = \frac{\sum_{k=1}^L |s_Q[k]|}{\sum_{k=1}^L |s_I[k]|} \quad (3)$$

$$K_{est} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^L |s_Q^2[k]|}{\sum_{k=1}^L |s_I^2[k]|}} \quad (4)$$

$$K_{est} = \frac{\sum_{k=1}^L |s_Q[k] - s_Q[k+1]|}{\sum_{k=1}^L |s_I[k] - s_I[k+1]|} \quad (5)$$

kde K_{est} - odhadovaná velikost amplitudové nesymetrie
 L – délka tréninkové sekvence, ideálně např. $L = 64$ symbolů

Srovnáním výsledků odhadů rovnic (3), (4) a (5) se dospěje k závěru, že pro délku tréninkové sekvence $L=64$ symbolů je nejpresnější odhad pomocí vzorce (4), proto je nadále využíván.

Odhadu K_{est} lze při korekci amplitudové nesymetrie využít dle následujících vztahů

$$\begin{aligned} s_{Ia}[k] &= K_{est} * s_I[k] \\ s_{Qa}[k] &= s_Q[k] \end{aligned} \quad (6)$$

kde s_{Ia} - signál větve I po amplitudové korekci
 s_{Qa} - signál větve Q po amplitudové korekci

Z rovnic vyplývá, že amplitudově je korigována jen větev I, zatímco signál ve větvi Q zůstává nezměněný. Pokud je tedy zesílení ve větvi $Q = 1$ a ve větvi $I > 0$, bude mít signál po kompenzaci ideální zesílení ve větvi I a $Q = 1$ - nezmění se rozestup bodů konstelačního diagramu v porovnání s ideálním konstelačním diagramem. Naopak bude-li zesílení ve větvi $Q > 0$, bude rozestup bodů dán zesílením větve Q. V praxi si lze tento příklad představit zesílením před kompenzací ve větvi $I = 1$ a $Q = 0,5$, po kompenzaci bude velikost zesílení ve větvích $I = Q = 0,5$ a rozestup bodů v konstelačním diagramu bude poloviční proti ideálnímu konstelačnímu diagramu.

Rovněž pro odhad fázové nesymetrie je použit výpočetní vztah

$$P_{est} = \frac{\sum_{k=1}^L (s_I[k]^* s_Q[k])}{\sum_{k=1}^L s_I^2[k]} \quad (7)$$

kde P_{est} - odhad fázové nesymetrie

L – délka tréninkové sekvence, ideálně např. L = 64 symbolů

Úpravou vztahu (7) lze dospět k vyjádření

$$P_{est} \approx -\sin \varphi_{err} \quad (8)$$

a použitím známé rovnosti

$$\cos^2 x + \sin^2 x = 1$$

dostaneme vztah

$$\sqrt{1 - P_{est}^2} \approx \cos \varphi_{err} \quad (9)$$

Při kompenzaci fázové nesymetrie nevzniká problém popsáný výše, protože fázová nesymetrie je jen jedna (odlišnost od ortogonálních složek signálu s_I a s_Q), zatímco amplitudové nesymetrie mohou být chápány jak dvě (odlišnost od ideálního zesílení 1 v každé větvi signálu). Odhad nesymetrie je tedy jen jeden a výsledkem se ovlivňuje znehodnocený signál.

Odhad fázové nesymetrie je možné pro korekci znehodnoceného signálu využít dle následujících vztahů:

$$s_{Ip}[k] = s_I[k]$$

$$s_{Qp}[k] = \frac{1}{\sqrt{1 - P_{est}^2}} [s_Q[k] - P_{est} s_I[k]] \quad (10)$$

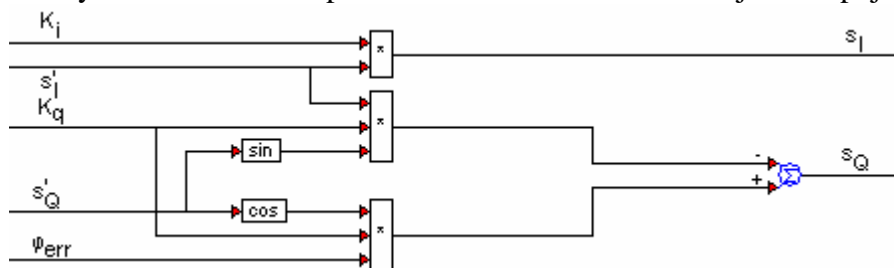
kde s_{Ip} - signál větve I po fázové korekci

s_{Qp} - signál větve Q po fázové korekci

6.2. Praktické použití metody kompenzace nesymetrií

6.2.1. Model nesymetrií

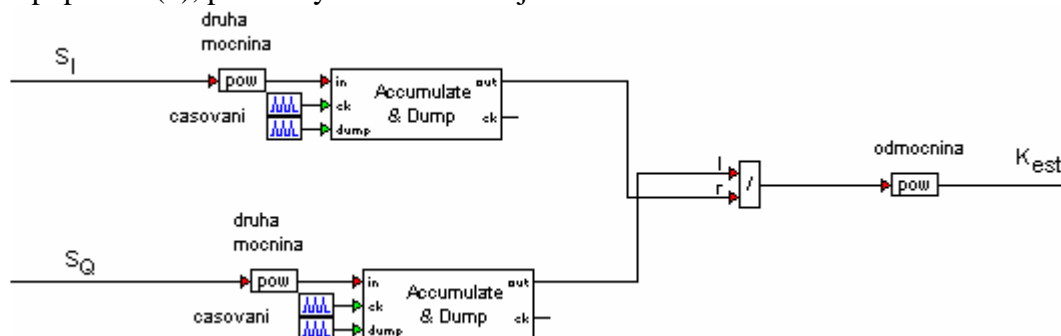
Použitá metoda vyžaduje nesymetrie popsané pomocí rovnic (2). V programu VisSim je možné tyto nesymetrie modelovat pomocí složeného bloku obsahujícím zapojení



Obr.29.: Model nesymetrií

6.2.2. Kompenzace amplitudové nesymetrie

Nejdříve je nutné odhadnout velikost amplitudové nesymetrie K_{est} . Matematicky je odhad popsán v (4), prakticky slouží následující blokové schéma



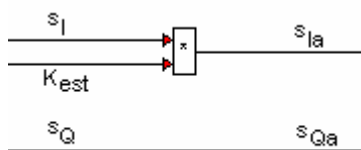
Obr.30.: Odhad amplitudové nesymetrie K_{est}

Signály ve větvích I a Q je třeba nejprve umocnit a poté akumulovat v zadané délce tréninkové sekvence L (použití bloku Accumulate & Dump s odpovídajícím časováním – viz

kap. 3) a následně podělit v poměru $\frac{\sum_{k=1}^L |s_Q^2[k]|}{\sum_{k=1}^L |s_I^2[k]|}$. Posledním krokem k získání odhadu

amplitudové nesymetrie je odmocnění podílu.

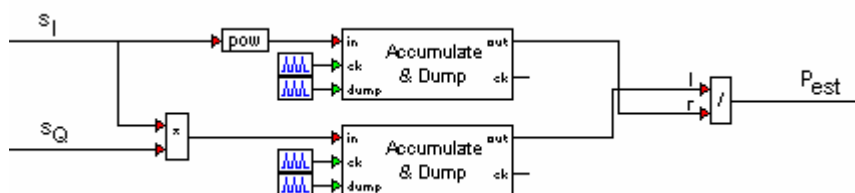
Kompenzace znehodnoceného signálu je opět matematicky popsána v (6) v kapitole 6.1., praktické zapojení lze znázornit pomocí následujícího schéma



Obr.31.: Schéma kompenzace amplitudové nesymetrie

6.2.3. Kompenzace fázové nesymetrie

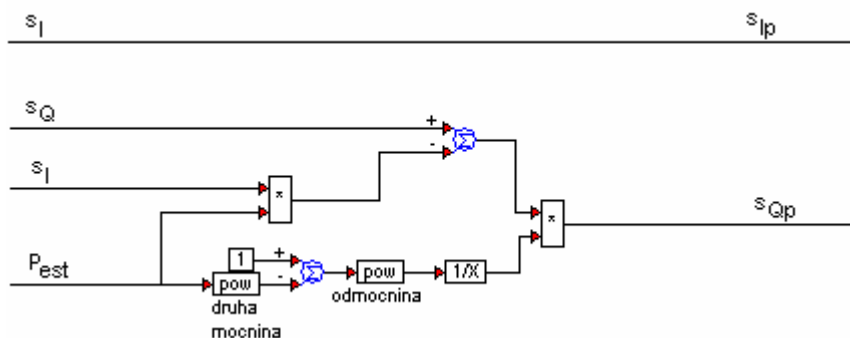
Stejně jako u amplitudové, tak i u fázové nesymetrie je třeba nejprve zjistit velikost odhadu nesymetrie P_{est} . Matematicky je odhad rovněž popsán v kap. 6.1 vztah (7), převedením vzorce na praktické zapojení získáme následující schéma



Obr.32.: Odhad fázové nesymetrie P_{est}

Násobené signály větví s_I a s_Q je třeba akumulovat v délce tréninkové sekvence L a poté podělit akumulovanou hodnotou druhé mocniny signálu větve s_I .

Odhad fázové nesymetrie je možné použít pro kompenzaci podle vztahů (10) v kapitole 6.1., praktické schéma bude mít podle teorie tvar



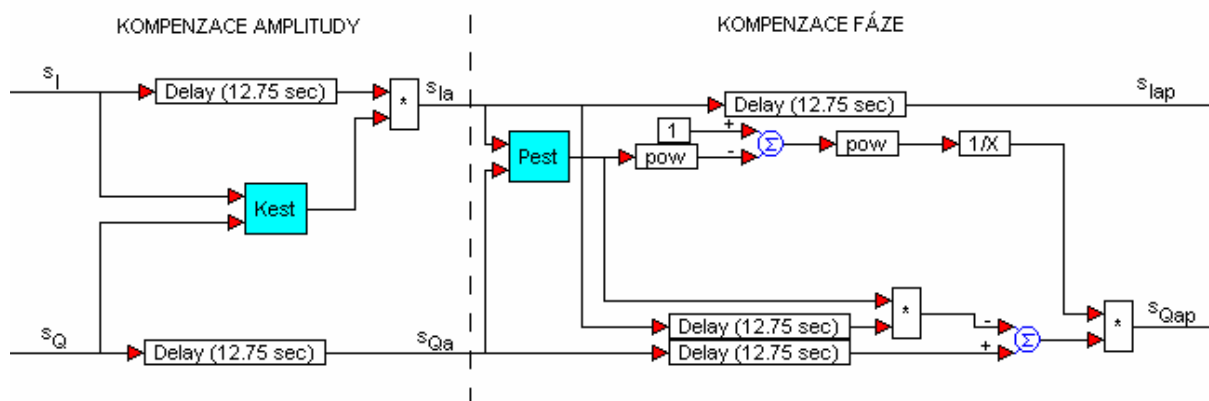
Obr.33.: Schéma kompenzace fázové nesymetrie

6.2.4. Kompenzace amplitudové a fázové nesymetrie

Pro kompenzaci amplitudové a fázové nesymetrie současně se používá předchozích poznatků tak, že je třeba nejprve provést odhad amplitudové nesymetrie pomocí tréninkové sekvence, poté tréninkovou sekvenci amplitudově kompenzovat a následně z kompenzované tréninkové sekvence získat hodnotu fázové nesymetrie. Kompenzace znehodnoceného signálu se provádí tak, že se signál nejprve kompenzuje amplitudově a až poté fázově.

Při simulaci nesmíme opomenout zpoždění signálu ve větvích I a Q (akumulace trvá určitou dobu podle délky tréninkové sekvence L), proto je nutné i signál ve větvi ve které není žádná úprava zpozdít, v prostředí VisSim například pomocí bloku Delay (viz kapitola 3).

V programu VisSim je možno kompenzaci realizovat pomocí schéma



Obr.34.: Zapojení kompenzace amplitudy a fáze

Na obrázku je znázorněn postup kompenzace amplitudové a fázové nesymetrie. Vstupními signály jsou s_I a s_Q , po amplitudové kompenzaci jsou označeny jako s_{Ia} a s_{Qa} . Tyto amplitudově kompenzované signály jsou vstupní pro kompenzaci fáze, po níž jsou signály již plně amplitudově a fázově vykompenzovány a jsou označeny jako s_{Iap} a s_{Qap} .

7. Simulace

Při simulaci kompletního komunikačního řetězce je na vstupu posloupnost symbolů podle modulace – při modulaci QPSK jsou symboly z rozsahu $\{0;1;2;3\}$, při modulaci 16QAM z rozsahu $\{0;1;...;15\}$.

Signál byl mapován pomocí příslušného modulátoru, poté byly kompenzovány nesymetrie, filtrován a kvadraturně modulován a případně zesílen pomocí zesilovače TWTA.

Simulací přenosového kanálu byl signál zašuměn AWGN, následně demodulován a dekódován QPSK či 16QAM demodulátorem. U simulací je umístěno konkrétní zapojení.

Analyzována byla zapojení:

- bez zesilovače TWTA
 - bez nesymetrií
 - s kompenzovanou amplitudovou a fázovou nesymetrií,
 - s nekompenzovanou amplitudovou a fázovou nesymetrií
- se zesilovačem TWTA
 - bez nesymetrií
 - s kompenzovanou amplitudovou a fázovou nesymetrií
 - s nekompenzovanou amplitudovou a fázovou nesymetrií
 - s kompenzovanou amplitudovou a fázovou nesymetrií při použití zesilovače TWTA až do bodu saturace (nelineární oblast)

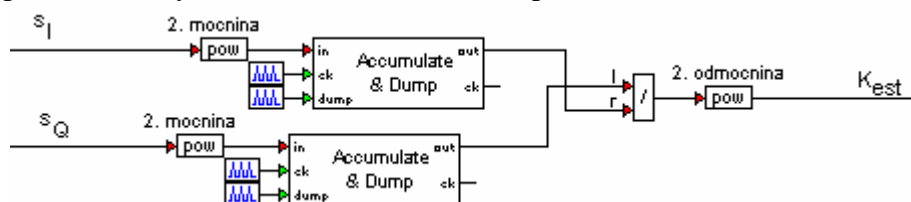
Všechna tato zapojení byla zkoumána při modulaci QPSK i 16QAM pro bloky s plovoucí i pevnou řádovou čárkou.

7.1. Simulace obvodu s pevnou a plovoucí řádovou čárkou

Podle toho, jaké budou využívány reálné součástky, je nutné obvod simulovat s pevnou nebo plovoucí řádovou čárkou. Rozdíl mezi nimi není v délce slova, ale v nastavení jednotkové a desetinné části. Obvody s plovoucí řádovou čárkou nastavují počet bitů pro desetinnou část podle potřeby (v různých časech simulace je desetinná čárka v jiném místě čísla), zatímco pro obvody s pevnou řádovou čárkou je třeba nastavit počet bitů pro každou část.

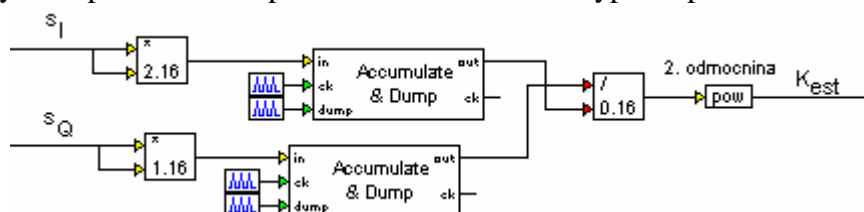
Šířka sběrnice procesorů se liší podle typu a pro účely odhadu a kompenzace nesymetrie se pohybuje kolem hodnoty 16 nebo 18 bitů. Samozřejmě šířka sběrnice s postupujícím vývojem procesorů roste. Pro simulaci je použita šířka sběrnice 16 bitů.

Zkoumány byly simulace obvodů s pevnou a plovoucí řádovou čárkou. Například blok odhadu amplitudové nesymetrie K_{est} má v obvodu s plovoucí řádovou čárkou strukturu



Obr.35.: Blok odhadu amplitudové nesymetrie K_{est} s plovoucí řádovou čárkou

Stejný blok při simulaci s pevnou řádovou čárkou vypadal podobně



Obr.36.: Blok odhadu amplitudové nesymetrie K_{est} s pevnou řádovou čárkou

V předchozím obrázku je vidět zapojení bloků násobení. Druhou mocninu je tedy možné realizovat násobením stejného signálu, na druhou odmocninu ovšem takový předpis neexistuje. Protože program VisSim 6.0 nenabízí možnost několika bloků v provedení

s pevnou řádovou čárkou, nezbyvá nic jiného než tyto bloky nechat v plovoucí řádové čárce. Mezi tyto bloky se řadí odmocnina, funkce sinus a cosinus.

Rovněž je v obrázku 36 vidět nastavení. Číslo 2.16 říká, že pro celou část jsou vyhrazeny 2 bity a celková délka čísla je 16 bitů (pracuje se tedy s číslem max. 2^{16}). Po otevření vlastností bloku kategorie fixed point je možno nastavit délku jednotkové části ručně pod položkou Radix Point, nebo zaškrtnout políčko Auto scale a délku jednotkové části nastavovat automaticky podle popisu níže. Poslední položkou je Word size, což značí šířku slova a v našem případě je již zmiňovaných 16.

Po nastavení všech bloků na Auto scale je nutné spustit v menu Tools položku Fixed Point Block Set Configure. Zde se nastavuje 5 parametrů:

Word Size (bits) – šířka slova, nastavuje se pro všechny bloky

Override Word Size – povolení přepsat šířku slova ve všech bitech

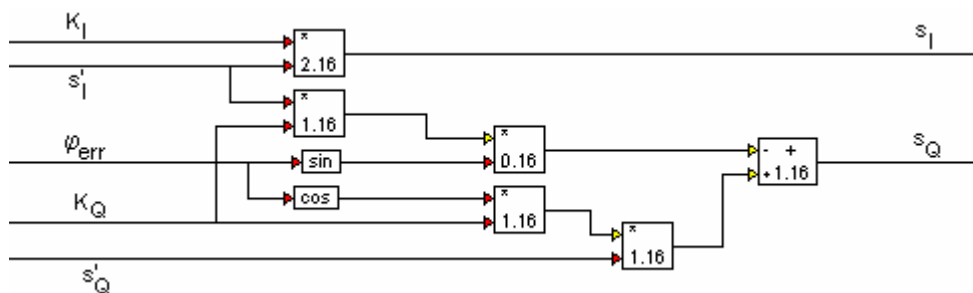
Enable Auto scaling – povolení automatického nastavení desetinné čárky

Reset Radix Point at Sim Start – resetuje počet bitů vyhrazených pro jednotky

Enable Overflow Alert Messages – povolí upozorňování při přetečení čísla některého bloku

Z těchto možností je vhodné mít trvale zaškrtnuty možnosti Override Word Size a Enable Overflow Alert Messages. Další 2 položky se zaškrťávají při nutnosti nastavit desetinnou čárku. To se provede tak, že se zaškrtnou zbývající 2 možnosti a spustí se simulace. Při tvorbě této práce byl další postup takový, že byla simulace stopnuta a položky Enable Auto scaling a Reset Radix Point at Sim Start odškrtnuty aby se v případě přetečení slova desetinná čárka automaticky nepřesunula ale bylo nutno spustit simulaci znovu s novým nastavením bloků.

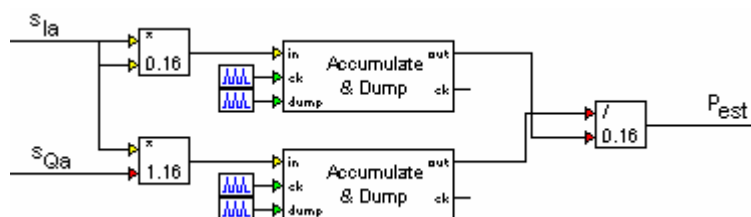
V této práci jsou zobrazeny všechny bloky komunikačního řetězce s plovoucí řádovou čárkou, pro úplnost několik schémat s pevnou řádovou čárkou v zapojení s modulátorem QPSK:



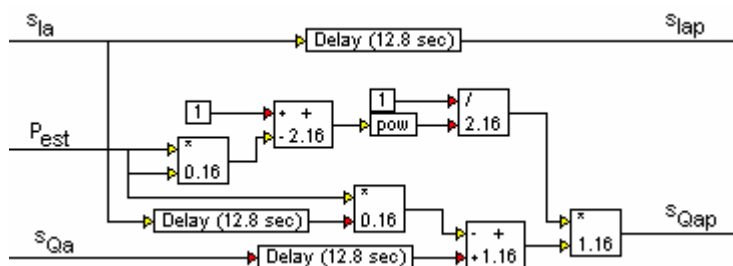
Obr.37.: Schéma bloku Model nesymetrií s pevnou řádovou čárkou



Obr.38.: Schéma bloku Kompenzace amplitudy s pevnou řádovou čárkou



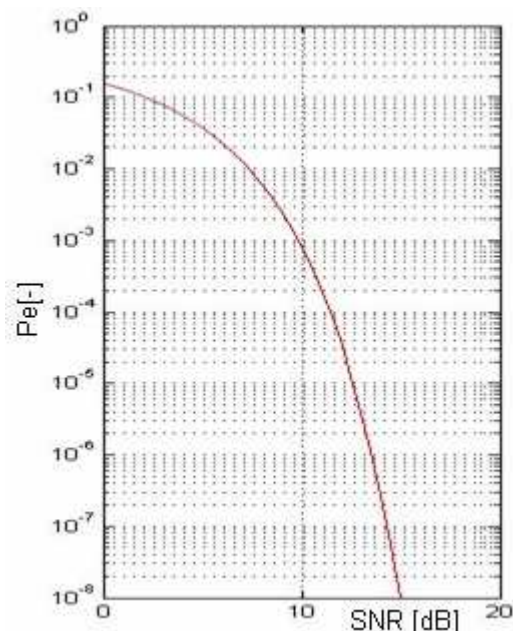
Obr.39.: Schéma bloku Odhad fázové nesymetrie P_{est} s pevnou řádovou čárkou



Obr.40.: Schéma bloku Kompenzace fáze s pevnou řádovou čárkou

7.2. Simulace komunikačního řetězce s QPSK modulátorem

Při použití QPSK modulátoru jsou vstupní bity z množiny $\{0;1;2;3\}$, konstelační diagram modulovaných vstupních dat je na obr.3. Teoretický průběh chybovosti bitů (BER) v závislosti na poměru signál / šum (SNR) pro modulaci QPSK je zobrazen v grafu 1, průběh je převzat z [6].



Graf 1.: Teoretická chybovost při modulaci QPSK

Z průběhu vyplývá, že při poměru signál /šum 0dB je bitová chybovost asi 0,17, tedy při stejné velikosti signálu a šumu na něj působící je chybných 17 bitů ze 100. Při dvoustavové modulaci to znamená, že v nejlepším případě bude chybných symbolů 8,5% (každé 2 chybné bity budou tvořit jeden symbol), v nejhorším 17% (každý chybný bit bude v kombinaci s bitem bezchybným). Různá procenta bitové a symbolové chybovosti jsou způsobena rozdílnou energií na 1 bit a na 1 symbol. Při modulaci QPSK je tento rozdíl za předpokladu 1 symbol = 2 bity dán vztahem plynoucím z odvození:

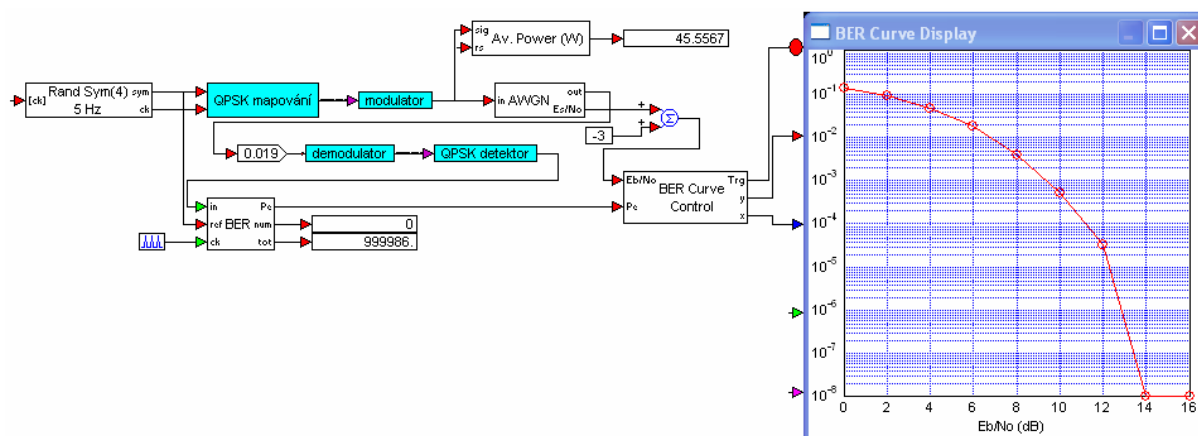
$$E_s = 2.E_b \Rightarrow E_s = E_b + 3dB \Rightarrow E_b = E_s - 3dB \quad (11)$$

analogicky

$$\frac{E_s}{N_0} = \frac{2.E_b}{N_0} \Rightarrow \frac{E_b}{N_0} = \frac{E_s}{N_0} - 3dB$$

V grafu 1 je bitová i symbolová chybovost vyznačena červeným průběhem.

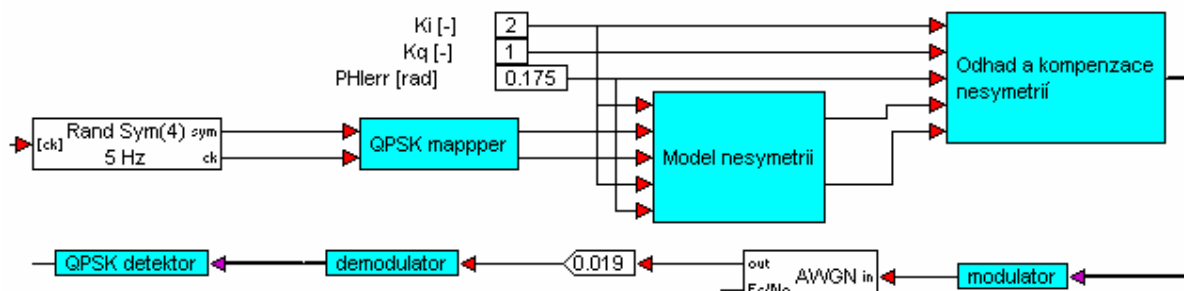
Schéma pro zjištění bitové chybovosti přenosu při použití QPSK modulátoru bez kompenzací a zesilovače TWTA je následovné:



Obr.41.: Schéma komunikačního řetězce s QPSK modulátorem bez kompenzací, bez TWTA

Předchozí schéma je kompletní i s přidavnými bloky jako je průměrný vysílaný výkon, blok pro počítání chybovosti BER a blok pro její vykreslení. Pro přehlednost se v dalších schématech se již tyto bloky vyskytovat nebudou. Posledním novým blokem je předzesilovač, který vhodně upravuje amplitudu signálu pro další zpracování v kvadrurním demodulátoru a detektoru. Ve schématu je rovněž od poměru E_b/N_0 odečteno číslo 3, vysvětlení tohoto kroku ve vztahu (11). Teoretický průběh bitové chybovosti BER by měl být stejný jako v grafu 1, protože signál není nijak znehodnocován ani kompenzován. Výsledky simulací jsou uvedeny v kapitole 8.1, tabulka 1 a 2, graf 3 a 4.

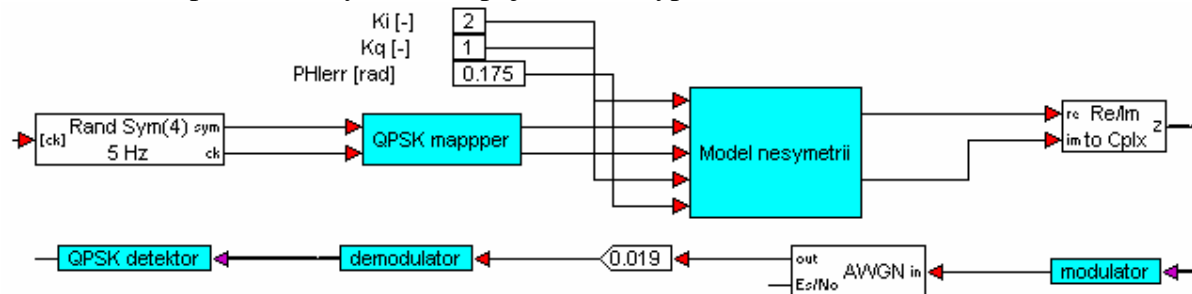
Dalším zapojením je komunikační řetězec s kompenzací amplitudové a fázové nesymetrie, popis nesymetrií je v kap. 4.3, metoda použita pro jejich kompenzaci je v kapitole 6.



Obr.42.: Schéma komunikačního řetězce s QPSK modulátorem s kompenzací, bez TWTA

Ve schématu jsou novými prvky vstupní parametry pro určení velikosti zesílení amplitudy signálu ve větvích I a Q (amplitudová nesymetrie) a velikost chybového úhlu ve smyslu odchylky od ortogonality (fázová nesymetrie, zadává se v radiánech). Dalšími bloky jsou Model nesymetrií a Odhad a kompenzace nesymetrií – popsáno v kapitole 6. Teoretický průběh BER by měl být opět shodný s teoretickým průběhem výše, drobné odchylky ovšem mohou nastat vlivem chyby metody. Výsledky simulace jsou uvedeny v tabulce 1 a 2 a grafu 3 a 4.

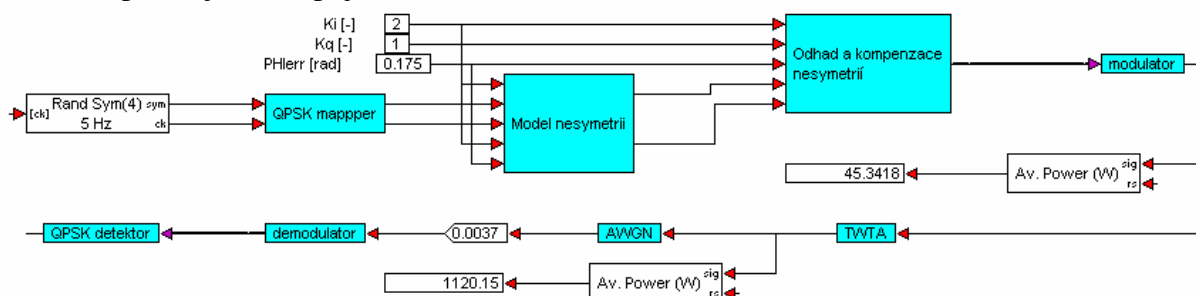
Posledním zapojením ze skupiny modulátoru QPSK bez zesilovače TWTA je s nesymetriemi modulátoru, avšak tyto nejsou kompenzovány. Ve schématu tedy nebude blok Odhadu a kompenzace nesymetrií, zapojení bude vypadat následovně:



Obr.43.: Schéma komunikačního řetězce s QPSK modulátorem bez kompenzací, bez TWTA

Chybovost tohoto zapojení bude mnohem vyšší než u předchozích schémat, protože jsou zde zavedeny nesymetrie které nejsou kompenzovány. Výsledky simulací jsou opět uvedeny v tabulce 2 a grafu 4.

Zavedením nelineárního zesilovače TWTA se změní zapojení (zesilovač TWTA bude umístěn mezi blokem kvadraturního modulátoru a přenosovým kanálem reprezentovaným přidáním šumu AWGN) a také teoretická chybovost v závislosti na nastavení pracovního bodu TWTA. Tento zesilovač bude přidán do všech zapojení stejně, pro demonstraci je uvedeno pouze jedno zapojení:



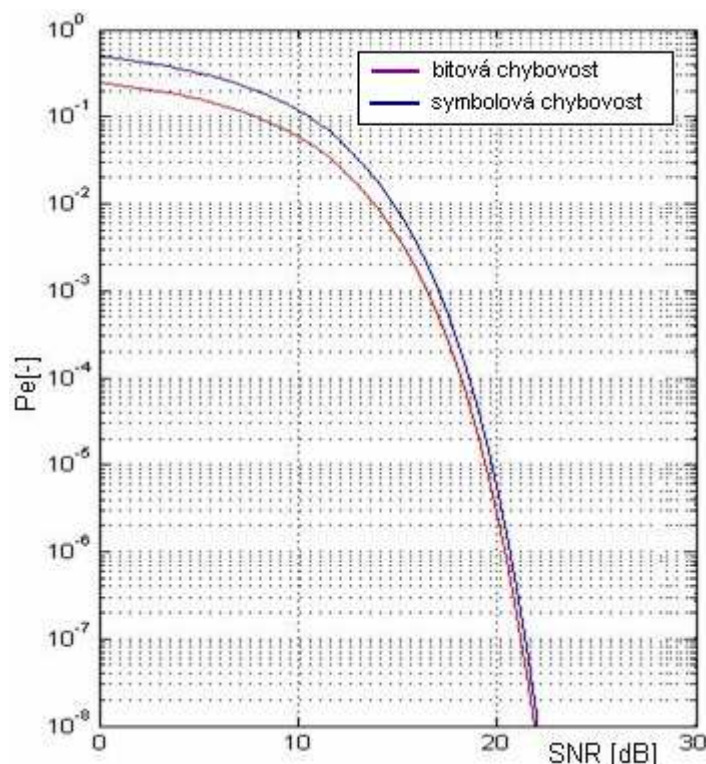
Obr.44.: Schéma komunikačního řetězce s QPSK modulátorem s kompenzací, s TWTA

V zapojení jsou patrné dva odhady výkonu procházejícího signálu. Jeden je tam z důvodu nastavení velikosti výkonu do bloku AWGN, druhý k nastavení velikosti výkonu do zesilovače TWTA.

Chybovost jednotlivých zapojení bude závislá na typu zapojení (bez nesymetrií, s kompenzací, bez kompenzace) a také na již zmíněném nastavení pracovního bodu zesilovače TWTA.

7.3. Simulace komunikačního řetězce s 16QAM modulátorem

Při použití 16QAM modulátoru jsou symboly vstupující do 16QAM modulátoru z množiny $\{0,1,2,\dots,15\}$. Konstelační diagram je rozdělen na 4 kvadranty, z každým z nich jsou vždy 4 symboly. Konstelační diagram 16QAM je na obrázku 2. Teoretická chybovost je následující (průběh je převzat z [6]):



Graf 2.: Teoretická chybovost při modulaci 16QAM

V grafu 2 jsou 2 průběhy, jeden pro bitovou (červený) a druhý pro symbolovou (modrý) chybovost. Rozdíl mezi těmito chybovostmi vychází z faktu 1 symbol = 4 bity a je dán podle odvození:

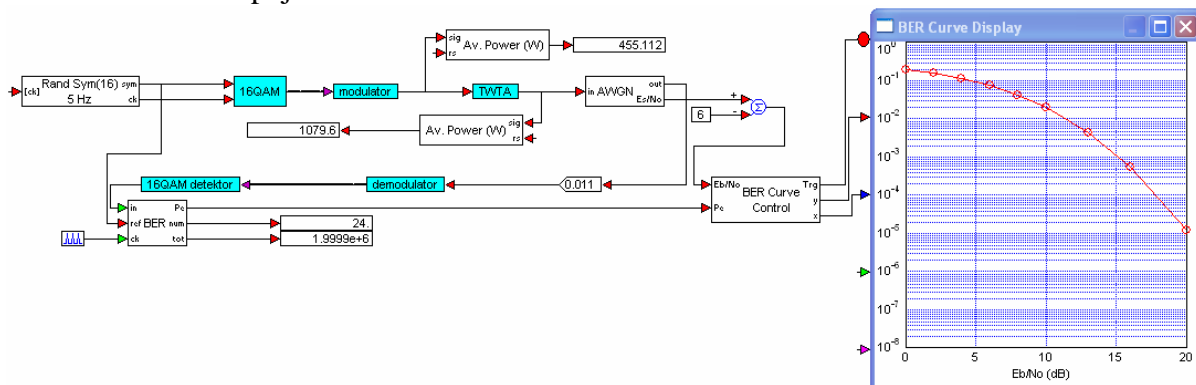
$$E_s = 4.E_b \Rightarrow E_s = E_b + 6dB \Rightarrow E_b = E_s - 6dB \quad (12)$$

analogicky

$$\frac{E_s}{N_0} = \frac{4.E_b}{N_0} \Rightarrow \frac{E_b}{N_0} = \frac{E_s}{N_0} - 6dB$$

Z tohoto důvodu bude pro převod E_b/N_0 odečteno od příslušného výstupu bloku AWGN odečteno číslo 6.

Schémata pro simulaci s modulátorem 16QAM budou stejná jako příslušná schémata pro modulaci QPSK jen s tím rozdílem, že místo modulátoru QPSK bude modulátor 16QAM. Pro demonstraci zapojení:



Obr.45.: Schéma řetězce s modulátorem 16QAM, bez nesymetrií, s TWTA

Bitové chybovosti jednotlivých zapojení budou horší než u modulátoru QPSK kvůli většímu počtu bodů konstelačního diagramu, tzn. pro stejnou chybovost při použití QPSK a 16QAM musí mít 16QAM mnohem větší energii na jeden bit. Proto se u aplikací, kde je předpoklad vysokého rušení, používají méněstavové modulace (u satelitních přenosů je to BPSK), u aplikací s nízkou úrovní rušení je možné použít modulace vícestavové (kabelové rozvody používají 64QAM nebo až 256QAM). Stejně tak se budou lišit chybovosti jednotlivých druhů zapojení (bez nesymetrií, s kompenzací, bez kompenzace, v závislosti na nastavení TWTA) ze stejných důvodů jako jsou uvedeny u simulací s QPSK modulátorem.

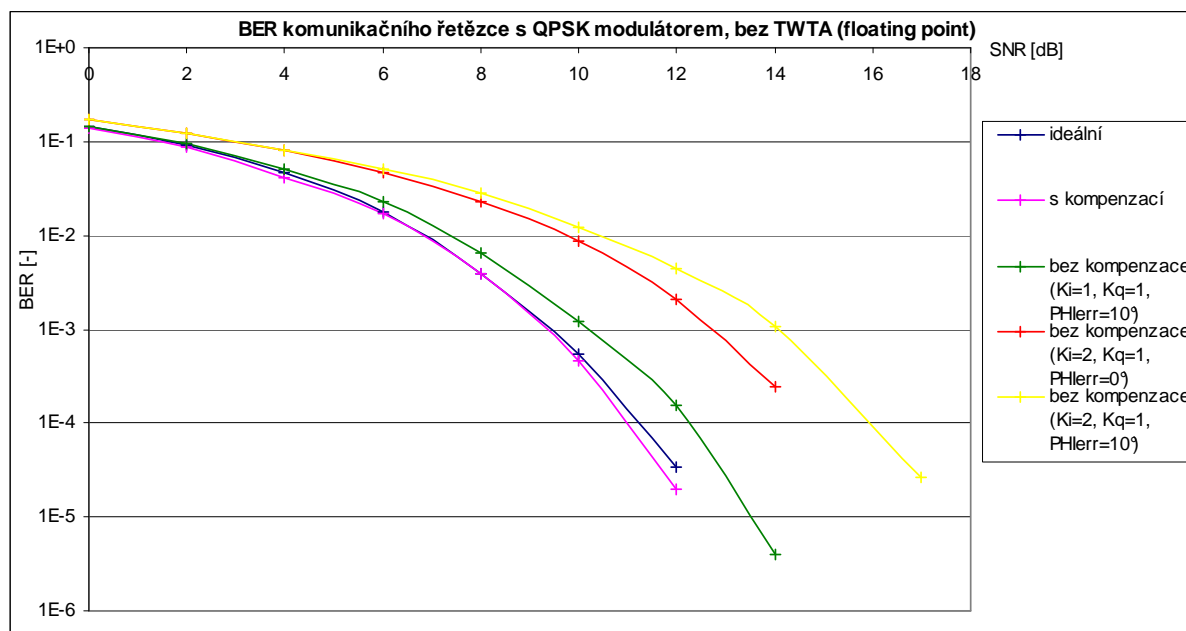
8. Výsledky simulací

8.1. Simulace řetězce s modulátorem QPSK

Simulací komunikačního řetězce s modulátorem QPSK a bez zesilovače TWTA dostaneme při výpočtech s plovoucí řádovou čárkou následující hodnoty

	ideální	s kompenzací				bez kompenzace		
K_i [-]	1	1	2	1	2	1	2	2
K_q [-]	1	1	1	1	1	1	1	1
φ_{err} [°]	0	0	0	10	10	10	0	10
E_b/N_0 [dB]	BER [-]	BER [-]	BER [-]	BER [-]	BER [-]	BER [-]	BER [-]	BER [-]
0	0,142199	0,138204	0,138204	0,138204	0,138204	0,145504	0,168836	0,171039
2	0,089926	0,086827	0,086827	0,086827	0,086827	0,096936	0,121871	0,123072
4	0,047366	0,041102	0,041102	0,041102	0,041102	0,050671	0,079411	0,082115
6	0,018109	0,01675	0,01675	0,01675	0,01675	0,022777	0,045688	0,051324
8	0,003901	0,003926	0,003926	0,003926	0,003926	0,006489	0,022904	0,027767
10	0,000533	0,000451	0,000451	0,000451	0,000451	0,001225	0,008526	0,012293
12	3,33E-05	2,00E-05	2,00E-05	2,00E-05	2,00E-05	0,000157	0,002107	0,004384
14	0	0	0	0	0	4,00E-06	0,00025	0,001052
17	0	0	0	0	0	0	0	2,60E-05

Tab.1.: Tabulka BER řetězce s modulátorem QPSK, bez TWTA, plovoucí řádová čárka



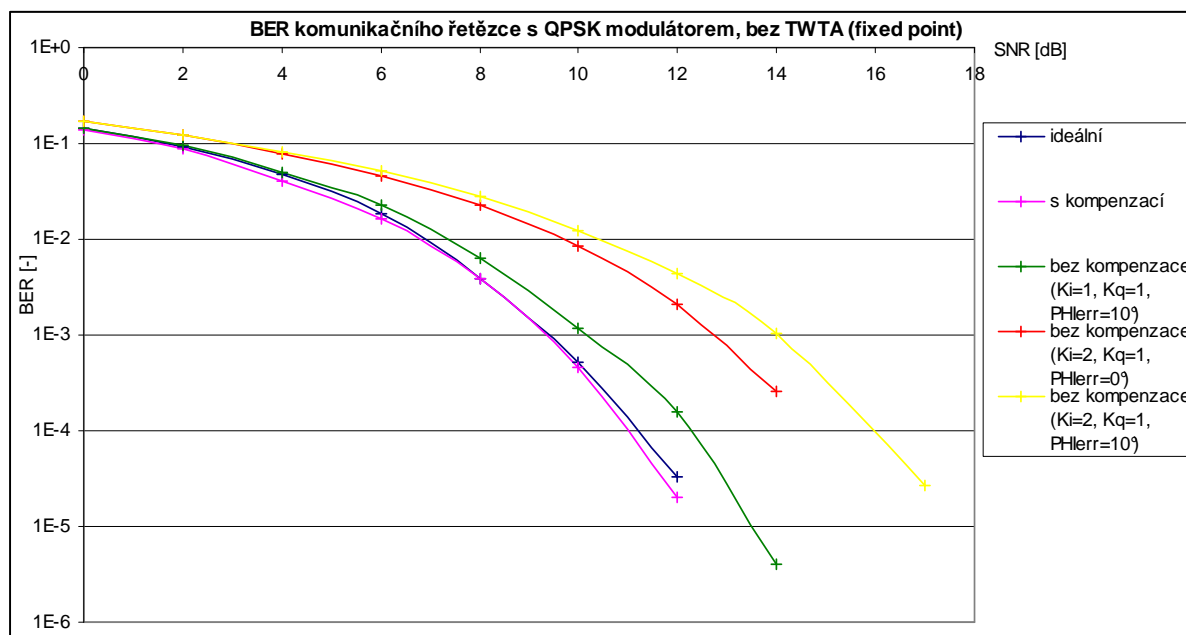
Graf 3.: BER komunikačního řetězce s QPSK modulátorem, bez TWTA, plovoucí řádová čárka

Průběh grafu bylo možné očekávat vzhledem k teoretickému průběhu v grafu 1. Jelikož jsou hodnoty průběhů s kompenzací stejné (důsledek vhodné metody), je nahrazen jen jedním průběhem s kompenzací. Obvod bez kompenzací má vyšší chybovost v závislosti na velikosti a druhu nesymetrie. Nepředvídaná je skutečnost, že průběh zapojení bez nesymetrií a kompenzací (ideální) má horší parametry než s kompenzovaným nesymetriemi – tento rozdíl ale již hraničí se statistickou odchylkou.

V následující tabulce jsou obsažena data řetězce s modulátorem QPSK, bez zesilovače TWTA, simulace probíhala s pevnou řádovou čárkou. Malá odchylka směrem k horším výsledkům je patrná vzhledem k méně přesným výsledkům – přesnost je dána nastavením pevné řádové čárky. Výsledky jsou rovněž zobrazeny v grafu – opět platí že téměř shodné průběhy kompenzovaných nesymetrií jsou vykresleny jen jednou křivkou.

	ideální	s kompenzací				bez kompenzace		
Ki [-]	1	1	2	1	2	1	2	2
Kq [-]	1	1	1	1	1	1	1	1
φ_{err} [°]	0	0	0	10	10	10	0	10
E_b/N_0 [dB]	BER [-]	BER [-]	BER [-]	BER [-]	BER [-]	BER [-]	BER [-]	BER [-]
0	0,142099	0,138101	0,139026	0,138615	0,139026	0,147241	0,169137	0,17134
2	0,090327	0,086724	0,087546	0,087444	0,087649	0,097036	0,122371	0,123573
4	0,046866	0,040588	0,041513	0,040999	0,041513	0,050371	0,079211	0,082816
6	0,018309	0,016481	0,016649	0,016649	0,01675	0,022644	0,045755	0,051557
8	0,003851	0,003926	0,004051	0,004026	0,004076	0,006414	0,022992	0,027905
10	0,000525	0,000459	0,000468	0,000451	0,000468	0,001183	0,008643	0,01241
12	3,33E-05	2,00E-05	2,00E-05	2,00E-05	2,00E-05	0,000157	0,00213	0,00438
14	0	0	0	0	0	4,00E-06	0,000262	0,001048
17	0	0	0	0	0	0	0	2,70E-05

Tab.2.: Tabulka BER řetězce s modulátorem QPSK, bez TWTA, pevná řádová čárka

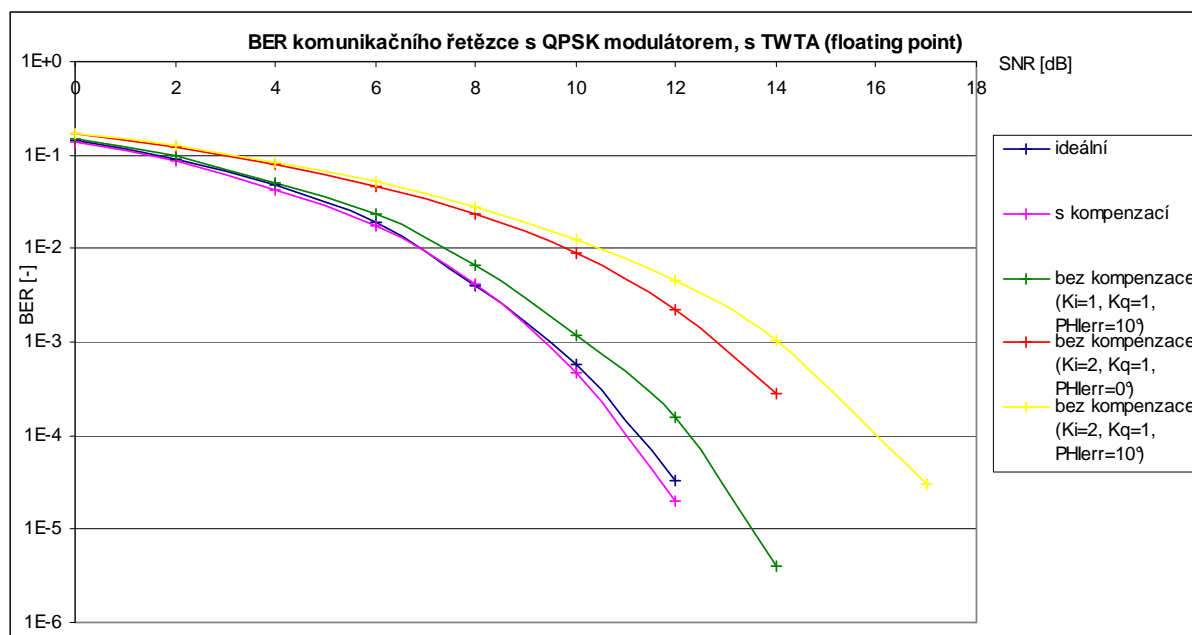


Graf 4.: BER komunikačního řetězce s QPSK modulátorem, bez TWTA, pevná řádová čárka

V tabulce níže jsou data komunikačního řetězce s modulátorem QPSK, se zesilovačem TWTA, s plovoucí řádovou čárkou. Opět je patrná téměř shodnost průběhu s kompenzací a ideálního, vzhledem k tomu že je zesilovač TWTA nastaven na téměř lineární zesílení (viz obr. 26) nejsou patrné odchylky od zapojení bez zesilovače TWTA.

	ideální	s kompenzací				bez kompenzace		
K_i [-]	1	1	2	1	2	1	2	2
K_q [-]	1	1	1	1	1	1	1	1
φ_{err} [°]	0	0	0	10	10	10	0	10
E_b/N_0 [-]	BER [-]	BER [-]	BER [-]	BER [-]	BER [-]	BER [-]	BER [-]	BER [-]
0	0,143901	0,13954	0,13954	0,13954	0,13954	0,147206	0,169637	0,172141
2	0,091128	0,088368	0,088368	0,088368	0,088368	0,097136	0,123072	0,124374
4	0,048268	0,04254	0,04254	0,04254	0,04254	0,051072	0,080312	0,083517
6	0,018876	0,017254	0,017254	0,017254	0,017254	0,023178	0,046155	0,051991
8	0,004026	0,004139	0,004139	0,004139	0,004139	0,006589	0,023379	0,028217
10	0,000575	0,000476	0,000476	0,000476	0,000476	0,001208	0,008826	0,01256
12	3,33E-05	2,00E-05	2,00E-05	2,00E-05	2,00E-05	0,000157	0,002213	0,0045
14	0	0	0	0	0	4,00E-06	0,000288	0,001064
17	0	0	0	0	0	0	0	3,00E-05

Tab.3.: Tabulka BER řetězce s modulátorem QPSK, s TWTA, plovoucí řádová čárka

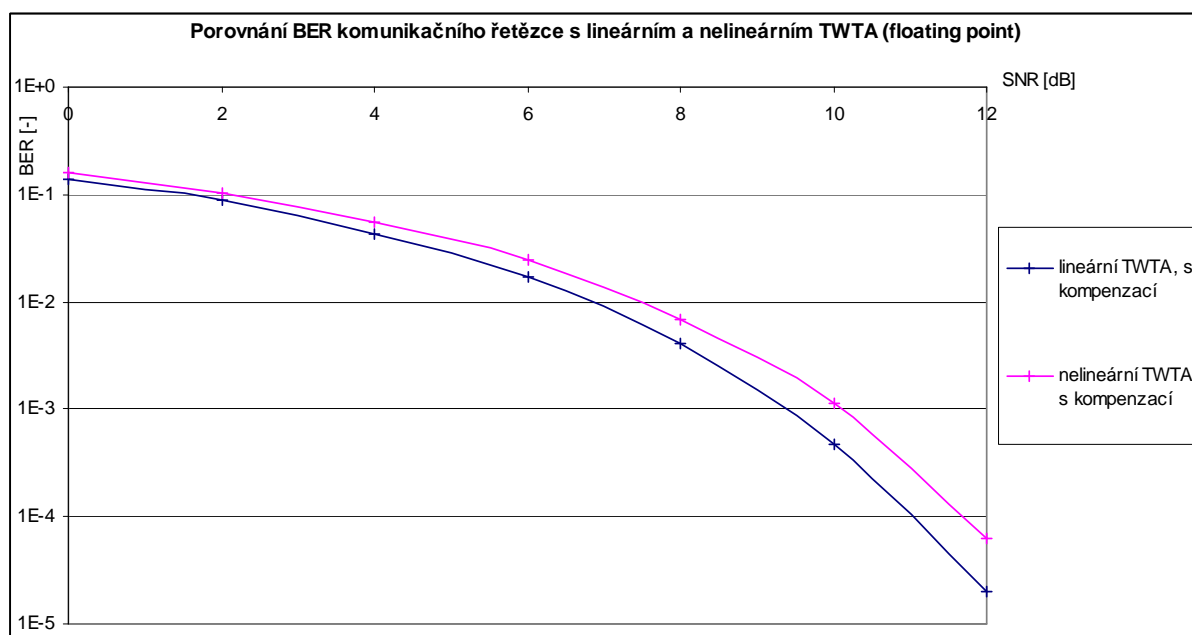


Graf 5.: BER komunikačního řetězce s QPSK modulátorem, s TWTA, plovoucí řádová čárka

Zajímavý je průběh chybovosti v zapojení s nelineárním zesilovačem TWTA, jehož převodní charakteristika je znázorněna na obrázku 22. Teoreticky bude chybovost s nelineárním prvkem větší než s lineárním, což je simulací dokázáno. V grafu jsou pro přehlednost kvůli stejným hodnotám opět jen 2 průběhy.

	lineární TWTA, s kompenzací				nelineární TWTA, s kompenzací			
Ki [-]	1	2	1	2	1	2	1	2
Kq [-]	1	1	1	1	1	1	1	1
φ_{err} [°]	0	0	10	10	0	0	10	10
E_b/N_0 [-]	BER [-]	BER [-]	BER [-]	BER [-]	BER [-]	BER [-]	BER [-]	BER [-]
0	0,13954	0,13954	0,13954	0,13954	0,157727	0,157727	0,157727	0,157727
2	0,088368	0,088368	0,088368	0,088368	0,103062	0,103062	0,103062	0,103062
4	0,04254	0,04254	0,04254	0,04254	0,055898	0,055898	0,055898	0,055898
6	0,017254	0,017254	0,017254	0,017254	0,024721	0,024721	0,024721	0,024721
8	0,004139	0,004139	0,004139	0,004139	0,006911	0,006911	0,006911	0,006911
10	0,000476	0,000476	0,000476	0,000476	0,001128	0,001128	0,001128	0,001128
12	2,00E-05	2,00E-05	2,00E-05	2,00E-05	6,34E-05	6,34E-05	6,34E-05	6,34E-05

Tab.4.: Srovnání BER komunikačního řetězce s lineárním a nelineárním TWTA, plovoucí řádová čárka

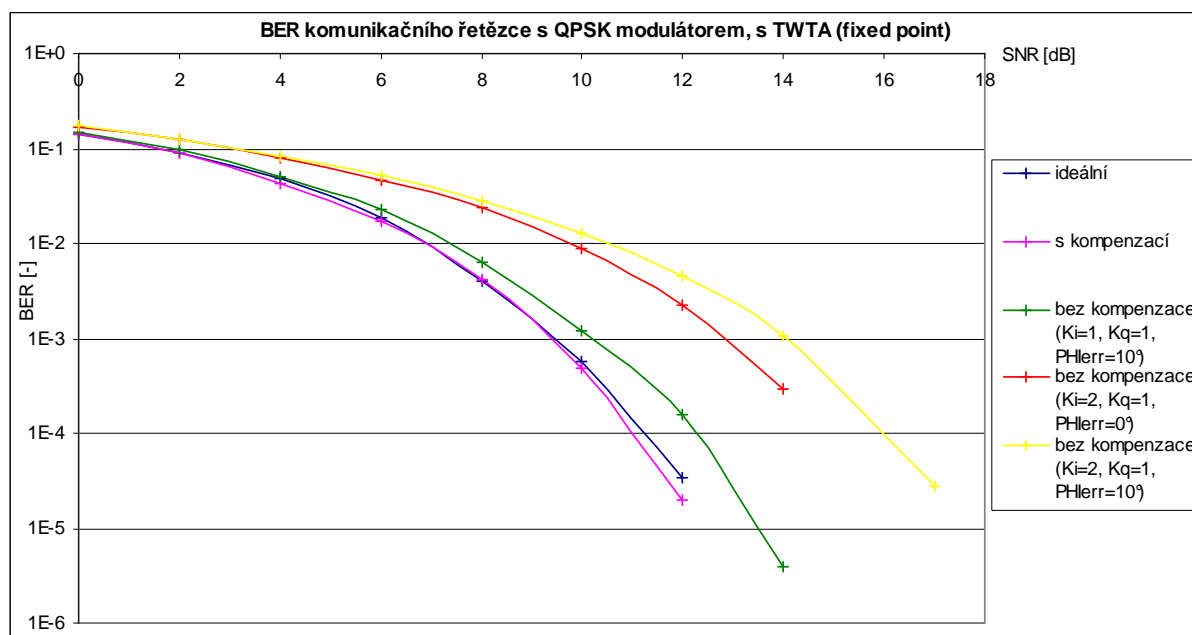


Graf 6.: Porovnání BER komunikačního řetězce s lineárním a nelineárním TWTA, plovoucí řádová čárka

V tabulce níže jsou hodnoty simulace obvodu s modulátorem QPSK a zesilovačem TWTA, pevná řádová čárka. Hodnoty jsou opět o málo horší než v průběhu s plovoucí řádovou čárkou (tab.3, graf 5).

	ideální	s kompenzací				bez kompenzace		
K_i [-]	1	1	2	1	2	1	2	2
K_q [-]	1	1	1	1	1	1	1	1
φ_{err} [°]	0	0	0	10	10	10	0	10
E_b/N_0 [-]	BER [-]	BER [-]	BER [-]	BER [-]	BER [-]	BER [-]	BER [-]	BER [-]
0	0,143901	0,13954	0,140464	0,140259	0,14067	0,146605	0,169738	0,172141
2	0,091328	0,088677	0,089088	0,088779	0,088882	0,096836	0,123473	0,124875
4	0,048268	0,042643	0,043362	0,042951	0,043362	0,051172	0,080513	0,084218
6	0,018842	0,017254	0,017456	0,017355	0,01749	0,023144	0,046322	0,052324
8	0,004051	0,004139	0,004189	0,004202	0,004202	0,006464	0,023604	0,028255
10	0,000567	0,000476	0,000484	0,000476	0,000493	0,001208	0,008909	0,012568
12	3,33E-05	2,00E-05	2,00E-05	2,00E-05	2,00E-05	0,000157	0,00224	0,00452
14	0	0	0	0	0	4,00E-06	0,00029	0,001062
17	0	0	0	0	0	0	0	2,80E-05

Tab.5.: Tabulka BER řetězce s modulátorem QPSK, s TWTA, pevná řádová čárka

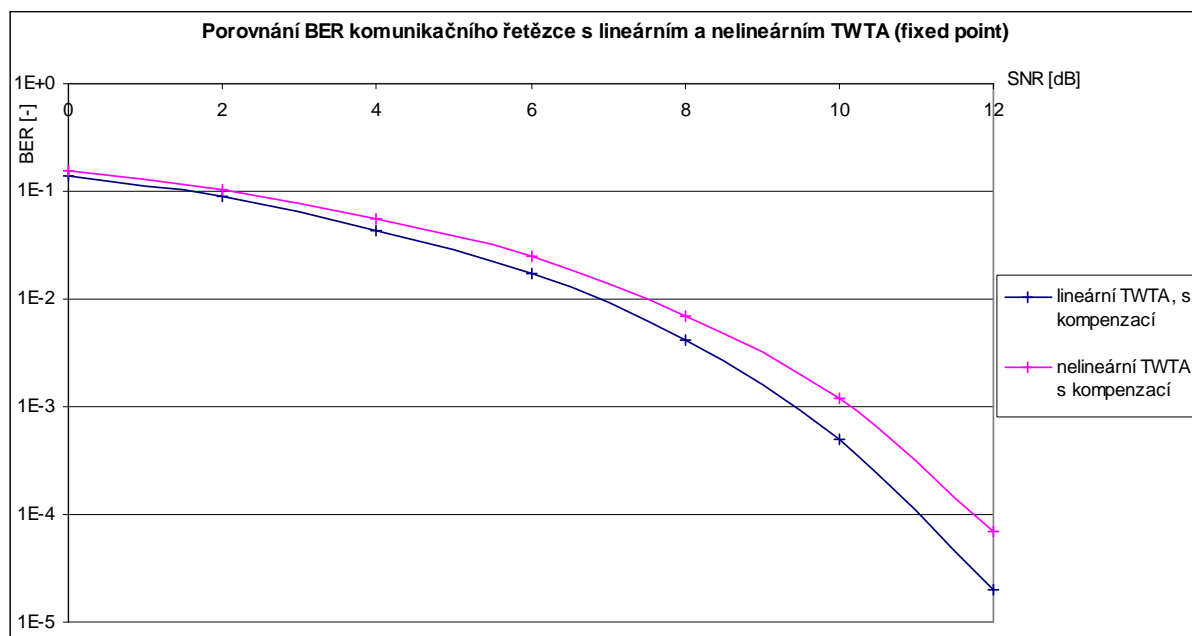


Graf 7.: BER komunikačního řetězce s QPSK modulátorem, s TWTA, pevná řádová čárka

Opět srovnání simulace s lineárním a nelineárním zesilovačem TWTA při pevné řádové čárce. V zapojení je obsažen model nesymetrií i jejich kompenzace. Ze stejných důvodů jako výše jsou uvedeny jen 2 průběhy.

	lineární TWTA, s kompenzací				nelineární TWTA, s kompenzací			
Ki [-]	1	2	1	2	1	2	1	2
Kq [-]	1	1	1	1	1	1	1	1
φ_{err} [°]	0	0	10	10	0	0	10	10
E_b/N_0 [-]	BER [-]	BER [-]	BER [-]	BER [-]	BER [-]	BER [-]	BER [-]	BER [-]
0	0,13954	0,140464	0,140259	0,14067	0,156905	0,157213	0,157111	0,157316
2	0,088677	0,089088	0,088779	0,088882	0,103062	0,103268	0,102959	0,103268
4	0,042643	0,043362	0,042951	0,043362	0,056206	0,056309	0,056309	0,056309
6	0,017254	0,017456	0,017355	0,01749	0,02462	0,024553	0,024553	0,02462
8	0,004139	0,004189	0,004202	0,004202	0,006948	0,006898	0,006911	0,006898
10	0,000476	0,000484	0,000476	0,000493	0,001144	0,001169	0,001194	0,001186
12	2,00E-05	2,00E-05	2,00E-05	2,00E-05	6,67E-05	7,01E-05	6,67E-05	7,01E-05

Tab.6.: Srovnání BER komunikačního řetězce s lineárním a nelineárním TWTA, pevná řádová čárka



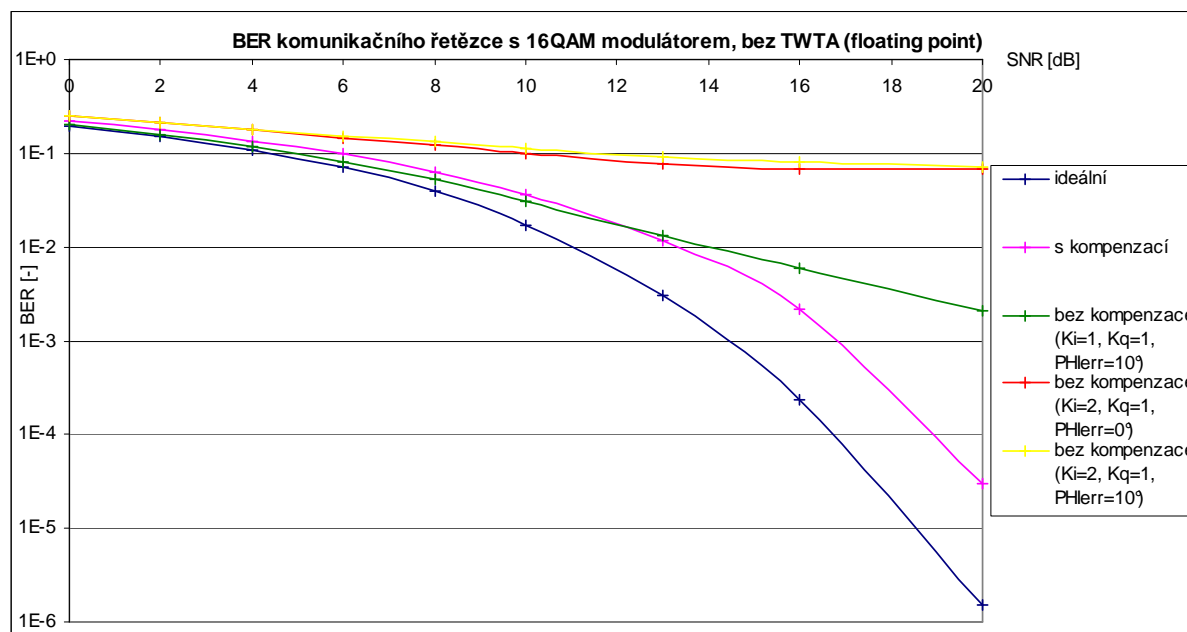
Graf 8.: Porovnání BER komunikačního řetězce s lineárním a nelineárním TWTA, pevná řádová čárka

8.2. Simulace řetězce s modulátorem 16QAM

Simulací komunikačního řetězce s modulátorem 16QAM dostaneme data uvedená v tabulce 7.

	ideální	s kompenzací				bez kompenzace		
Ki [-]	1	1	2	1	2	1	2	2
Kq [-]	1	1	1	1	1	1	1	1
φ_{err} [°]	0	0	0	10	10	10	0	10
E_b/N_0 [dB]	BER [-]	BER [-]	BER [-]	BER [-]	BER [-]	BER [-]	BER [-]	BER [-]
0	0,195869	0,218582	0,218582	0,218582	0,218582	0,202453	0,246983	0,246934
2	0,151519	0,175884	0,175884	0,175884	0,175884	0,158637	0,209018	0,212603
4	0,108942	0,135796	0,135796	0,135796	0,135796	0,118204	0,175816	0,180172
6	0,070561	0,097258	0,097258	0,097258	0,097258	0,081729	0,146085	0,153183
8	0,038663	0,063124	0,063124	0,063124	0,063124	0,051921	0,121266	0,130485
10	0,017253	0,036368	0,036368	0,036368	0,036368	0,030314	0,100228	0,112809
13	0,003014	0,011849	0,011849	0,011849	0,011849	0,013128	0,078153	0,092496
16	0,000236	0,002147	0,002147	0,002147	0,002147	0,00586	0,068636	0,080622
20	1,50E-06	3,00E-05	3,00E-05	3,00E-05	3,00E-05	0,002093	0,066651	0,072295

Tab.7.: Tabulka BER řetězce s modulátorem 16QAM, bez TWTA, plovoucí řádová čárka



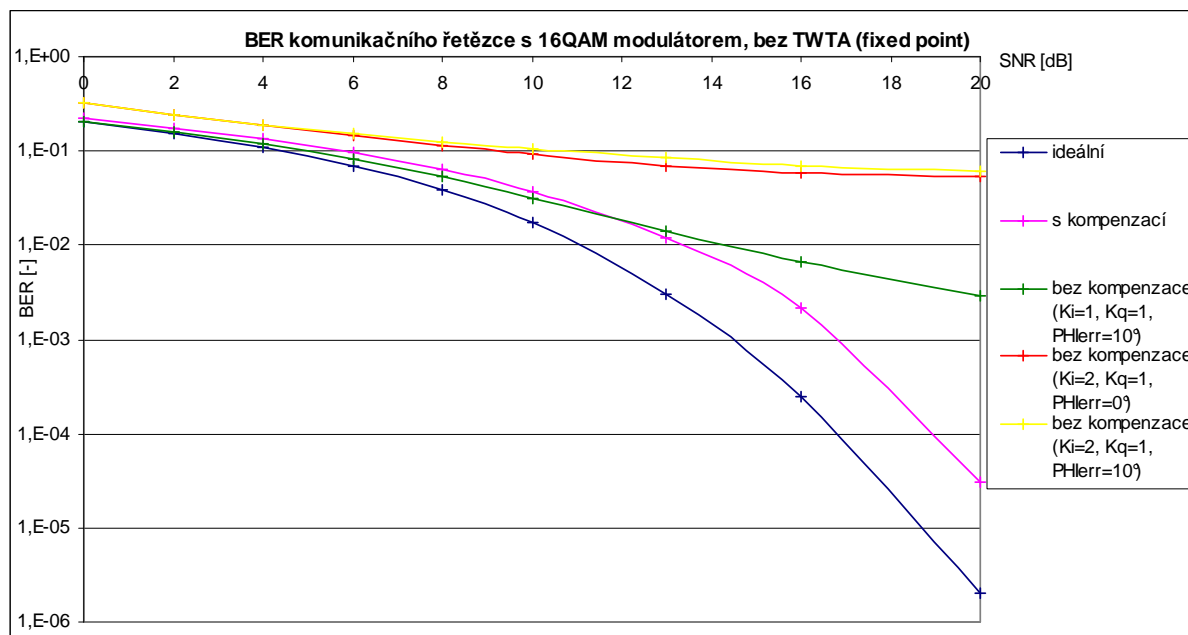
Graf 9.: BER komunikačního řetězce s 16QAM modulátorem, bez TWTA, plovoucí řádová čárka

Ideální (bez nesymetrií a bez kompenzace) průběh lze opět předpokládat stejný jako v grafu 2. Průběh kompenzovaných nesymetrií je opět jen jeden z důvodu stejných hodnot. Tentokrát má průběh s kompenzací vyšší hodnoty chybovosti než průběh ideální, rozdíl je možné chápat jako chybu metody kompenzace pro modulaci 16QAM. Průběhy bez kompenzací mají opět předvídaně mnohem vyšší hodnoty chybovosti než průběhy kompenzované.

Hodnoty chybovosti BER řetězce s modulátorem 16QAM, bez TWTA s výpočty s pevnou řádovou čárkou jsou uvedeny v tabulce níže. Jsou opět o málo horší než s plovoucí řádovou čárkou.

	ideální	s kompenzací				bez kompenzace		
K_i [-]	1	1	2	1	2	1	2	2
K_q [-]	1	1	1	1	1	1	1	1
φ_{err} [°]	0	0	0	10	10	10	0	10
E_b/N_0 [dB]	BER [-]	BER [-]	BER [-]	BER [-]	BER [-]	BER [-]	BER [-]	BER [-]
0	0,200995	0,222245	0,222658	0,222503	0,222606	0,206823	0,3174	0,321472
2	0,152522	0,175833	0,176874	0,176366	0,176848	0,159966	0,243784	0,245839
4	0,108954	0,135405	0,1364	0,136111	0,136463	0,118416	0,187006	0,190961
6	0,070586	0,096923	0,09797	0,097492	0,09802	0,082738	0,145651	0,15239
8	0,038725	0,062911	0,064166	0,063482	0,064185	0,052853	0,116363	0,125569
10	0,017259	0,036305	0,03753	0,036876	0,037514	0,031438	0,093626	0,106223
13	0,00304	0,011879	0,012699	0,012325	0,01271	0,013926	0,069319	0,083738
16	0,000246	0,00217	0,002483	0,002307	0,002482	0,006732	0,057819	0,070157
20	2,00E-06	3,10E-05	4,40E-05	3,55E-05	4,30E-05	0,002949	0,053748	0,060195

Tab.8.: Tabulka BER řetězce s modulátorem 16QAM, bez TWTA, pevná řádová čárka

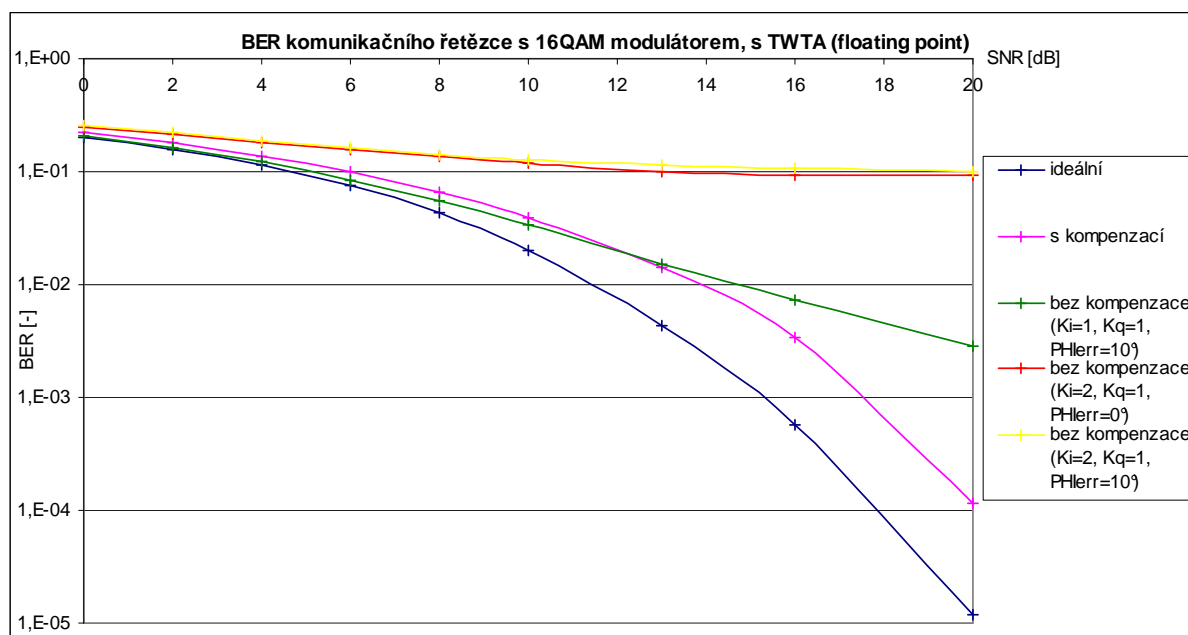


Graf 10.: BER komunikačního řetězce s 16QAM modulátorem, bez TWTA, pevná řádová čárka

Simulací řetězce s modulátorem 16QAM, s lineárním TWTA a výpočty v plovoucí řádové čárce dosáhneme hodnot uvedených v tabulce. Hodnoty jsou opět vyneseny v grafu, pro hodnoty s kompenzací nesymetrií jedním průběhem.

	ideální	s kompenzací				bez kompenzace		
K_i [-]	1	1	2	1	2	1	2	2
K_q [-]	1	1	1	1	1	1	1	1
φ_{err} [°]	0	0	0	10	10	10	0	10
E_b/N_0 [dB]	BER [-]	BER [-]	BER [-]	BER [-]	BER [-]	BER [-]	BER [-]	BER [-]
0	0,200191	0,221265	0,221265	0,221265	0,221265	0,205921	0,250955	0,253669
2	0,155429	0,178016	0,178016	0,178016	0,178016	0,162623	0,21526	0,21937
4	0,113022	0,136829	0,136829	0,136829	0,136829	0,121295	0,183226	0,187757
6	0,074548	0,09895	0,09895	0,09895	0,09895	0,084974	0,156294	0,162733
8	0,042759	0,065082	0,065082	0,065082	0,065082	0,055399	0,134813	0,143287
10	0,020444	0,038469	0,038469	0,038469	0,038469	0,033552	0,118164	0,129338
13	0,004367	0,014281	0,014281	0,014281	0,014281	0,015345	0,100361	0,114096
16	0,000564	0,003366	0,003366	0,003366	0,003366	0,007181	0,093356	0,106079
20	1,20E-05	0,000117	0,000117	0,000117	0,000117	0,00284	0,092951	0,100354

Tab.9.: Tabulka BER řetězce s modulátorem 16QAM, s TWTA, plovoucí řádová čárka

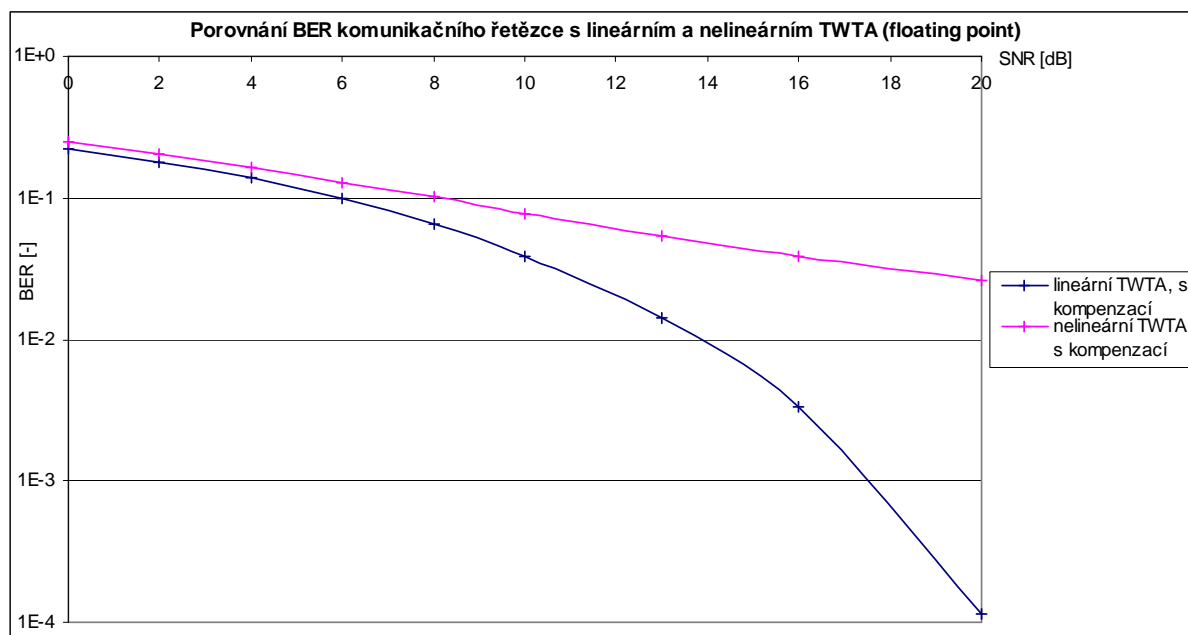


Graf 11.: BER komunikačního řetězce s 16QAM modulátorem, s TWTA, plovoucí řádová čárka

Srovnání simulací lineárním a nelineárním zesilovačem TWTA je provedeno níže. Lze předpokládat, že výsledky s nelineárním TWTA budou tentokrát mnohem horší než s lineárním TWTA. Toto je dáno tím, že ve větvích I a Q jsou nyní čtyřstavové signály (v případě s QPSK modulátorem byly jen dvoustavové). Nelinearitou TWTA často dochází ke splnutí stavů v jednotlivých větvích se stejným znaménkem a později ke špatnému rozpoznání symbolu.

Ki [-]	lineární TWTA, s kompenzací				nelineární TWTA, s kompenzací			
	1	2	1	2	1	2	1	2
Kq [-]	1	1	1	1	1	1	1	1
φ_{err} [°]	0	0	10	10	0	0	10	10
E_b/N_0 [dB]	BER [-]	BER [-]	BER [-]	BER [-]	BER [-]	BER [-]	BER [-]	BER [-]
0	0,221265	0,221265	0,221265	0,221265	0,247885	0,247885	0,247885	0,247885
2	0,178016	0,178016	0,178016	0,178016	0,203357	0,203357	0,203357	0,203357
4	0,136829	0,136829	0,136829	0,136829	0,164227	0,164227	0,164227	0,164227
6	0,09895	0,09895	0,09895	0,09895	0,129163	0,129163	0,129163	0,129163
8	0,065082	0,065082	0,065082	0,065082	0,100782	0,100782	0,100782	0,100782
10	0,038469	0,038469	0,038469	0,038469	0,078241	0,078241	0,078241	0,078241
13	0,014281	0,014281	0,014281	0,014281	0,053215	0,053215	0,053215	0,053215
16	0,003366	0,003366	0,003366	0,003366	0,038203	0,038203	0,038203	0,038203
20	0,000117	0,000117	0,000117	0,000117	0,025809	0,025809	0,025809	0,025809

Tab.10.: Srovnání BER komunikačního řetězce s lineárním a nelineárním TWTA, plovoucí řádová čárka

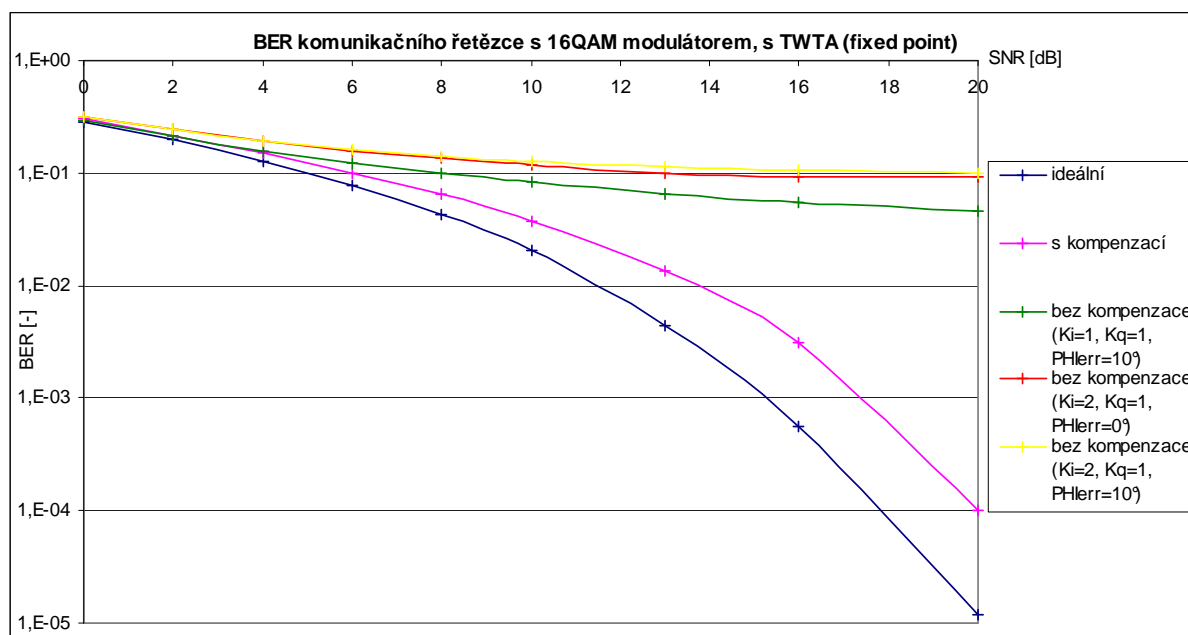


Graf 12.: Porovnání BER komunikačního řetězce s lineárním a nelineárním TWTA, plovoucí řádová čárka

Výsledky simulace s modulátorem 16QAM, s lineárním zesilovačem TWTA a výpočtech s pevnou řádovou čárkou jsou uvedeny v tabulce 11 a grafu 13. Průběhy s kompenzací jsou opět nahrazeny jen jedním.

	ideální	s kompenzací				bez kompenzace		
K_i [-]	1	1	2	1	2	1	2	2
K_q [-]	1	1	1	1	1	1	1	1
φ_{err} [°]	0	0	0	10	10	10	0	10
E_b/N_0 [dB]	BER [-]	BER [-]	BER [-]	BER [-]	BER [-]	BER [-]	BER [-]	BER [-]
0	0,285535	0,30195	0,302363	0,302156	0,302466	0,297648	0,311362	0,313631
2	0,197112	0,213691	0,214199	0,213869	0,214148	0,211299	0,243182	0,246065
4	0,127366	0,149224	0,150144	0,149627	0,150106	0,155415	0,191787	0,195842
6	0,077801	0,101035	0,101806	0,101454	0,101814	0,120563	0,157828	0,164276
8	0,043066	0,064342	0,065452	0,0649	0,065458	0,098045	0,1349	0,143274
10	0,020424	0,037617	0,038536	0,038062	0,038553	0,082112	0,118064	0,128981
13	0,004349	0,013697	0,014444	0,014063	0,014429	0,065681	0,100214	0,113557
16	0,000565	0,003132	0,003429	0,003273	0,003434	0,054928	0,093246	0,105492
20	1,20E-05	0,000102	0,000123	0,000112	0,000124	0,046669	0,092861	0,099799

Tab.11.: Tabulka BER řetězce s modulátorem 16QAM, s TWTA, pevná řádová čárka

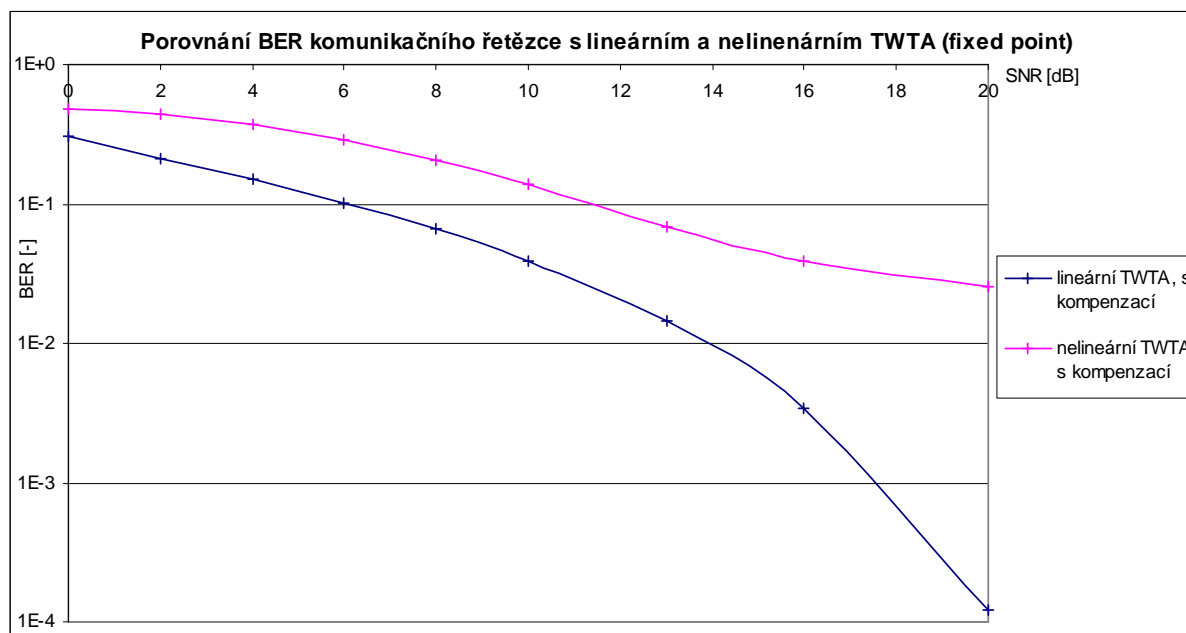


Graf 13.: BER komunikačního řetězce s 16QAM modulátorem, s TWTA, pevná řádová čárka

Výsledky posledního srovnání simulace řetězce s lineárním a nelineárním zesilovačem TWTA jsou uvedeny v tabulce 12 a grafu 14. Výpočty simulace probíhaly v pevné řádové čárce. Osm průběhů je z důvodu podobných hodnot nahrazeno jen dvěma hlavními.

	lineární TWTA, s kompenzací				nelineární TWTA, s kompenzací			
Ki [-]	1	2	1	2	1	2	1	2
Kq [-]	1	1	1	1	1	1	1	1
φ_{err} [°]	0	0	10	10	0	0	10	10
E_b/N_0 [dB]	BER [-]	BER [-]	BER [-]	BER [-]	BER [-]	BER [-]	BER [-]	BER [-]
0	0,30195	0,302363	0,302156	0,302466	0,474825	0,475134	0,474979	0,475031
2	0,213691	0,214199	0,213869	0,214148	0,436395	0,436726	0,436548	0,436776
4	0,149224	0,150144	0,149627	0,150106	0,367454	0,367202	0,367202	0,367139
6	0,101035	0,101806	0,101454	0,101814	0,285155	0,285038	0,28503	0,28503
8	0,064342	0,065452	0,0649	0,065458	0,20529	0,205159	0,205322	0,205096
10	0,037617	0,038536	0,038062	0,038553	0,137165	0,136767	0,136928	0,136737
13	0,013697	0,014444	0,014063	0,014429	0,068311	0,067786	0,068061	0,067785
16	0,003132	0,003429	0,003273	0,003434	0,039676	0,038966	0,039309	0,038963
20	0,000102	0,000123	0,000112	0,000124	0,026219	0,025345	0,025759	0,025356

Tab.12.: Srovnání BER komunikačního řetězce s lineárním a nelineárním TWTA, pevná řádová čárka



Graf 14.: Porovnání BER komunikačního řetězce s lineárním a nelineárním TWTA, pevná řádová čárka

9. VisSim C-Code

V programu VisSim 7.0 je možné k simulačnímu schématu vygenerovat zdrojový kód jazyka C. Pro tento doplněk je třeba mít nainstalovaný VisSim 7.0 a volitelně VisSim Embedded Controls Developer, díky němuž se do nabídky přidají některé DSP – vhodné pro automatické nastavení parametrů. Kód je možné generovat i v trial verzi programu.

Funkci programu je možné ukázat na jednoduchém příkladu: je požadavek vytvořit zdrojový kód pro samostatný zesilovač se zesílením 32,678. Nejprve tedy vložíme samotný

zesilovací prvek, editujeme jeho parametry a nastavíme zesílení. Poté je třeba definovat vstupní a výstupní porty. To se provede v menu VisSim/DSP / C2407 / digital/AnalogInput for C2407. Zkratka C2407 je vybraný model DSP na kterém chceme zadání realizovat. Editací vstupního portu je možno nastavit je-li vstup analogový nebo digitální a jeho určení na DSP.

Ve stejném menu je také výstupní port digital/AnalogOutput for C2407, jehož parametry jsou stejné jako u portu vstupního.

Samotné vygenerování C kódu se provede v menu Tools / Code Gen.... Ve vyvolaném okně se nastavuje cesta pro výstupní soubor a znovu typ zvoleného procesoru. Tlačítkem Code Gen se spustí vygenerování C kódu, jež si je možné prohlédnout přímo na zvolené adresářové cestě nebo pomocí tlačítka Browse. Vygenerovaný kód je možné také zkompilovat tlačítkem Compile.

Pro výše zvolený příklad se generováním vytvoří následující zdrojový kód uvedený v příloze 1.

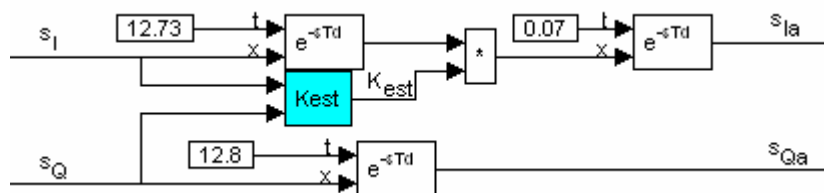
Z hlediska praktické realizace komunikačního řetězce by bylo zajímavé vygenerovat C kód pro odhady a kompenzace nesymetrií, kterým by bylo možné naprogramovat procesor. Mělo by tedy stačit vyjmout bloky odhadu a kompenzace nesymetrií ze zapojení komunikačního řetězce, opatřit je vstupními a výstupními porty a vygenerovat kód. Pokud je ovšem dostupná pouze trial verze VisSim 7.0, tento postup nebude fungovat protože program neobsahuje některé důležité bloky z placené verze a je třeba zapojení modifikovat. Největším problémem je přepracování bloku Accumulate & Dump.

Celkové náhradní schéma odhadu a kompenzace nesymetrií vypadá následovně:

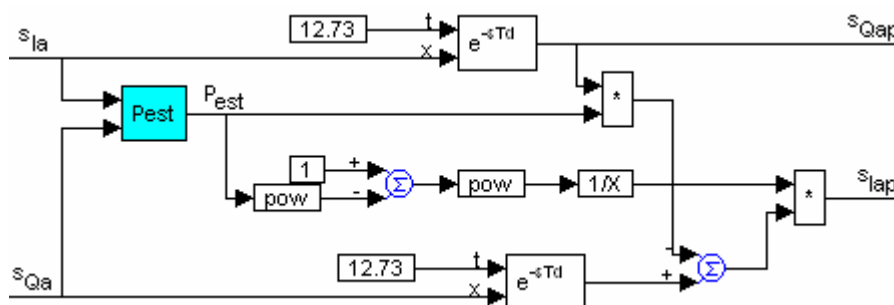


Obr.46.: Modifikovaná metoda kompenzace nesymetrií

Bloky Kompenzace amplitudy a Kompenzace fáze mají stejnou strukturu jako v předchozích simulacích až na blok časového zpoždění – velikost zpoždění se nenastavuje přímo v bloku, ale na jeho vstup b. Zapojení je tedy následující

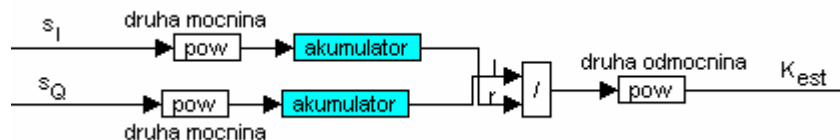


Obr.47.: Modifikovaný blok Kompenzace amplitudy

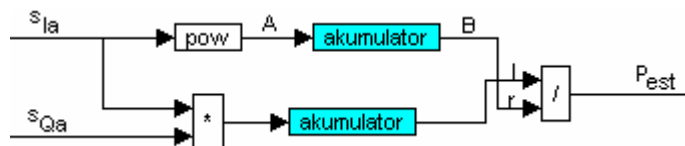


Obr.48.: Modifikovaný blok Kompenzace fáze

Bloky odhadu nesymetrií K_{est} a P_{est} mají zapojení

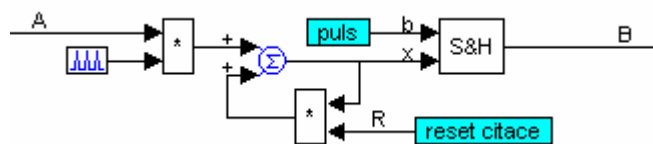


Obr.49.: Modifikovaný blok odhadu amplitudové nesymetrie K_{est}



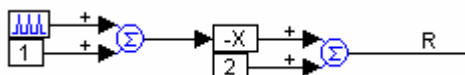
Obr.50.: Modifikovaný blok odhadu fázové nesymetrie P_{est}

Nejedlišnější je zapojení akumulátorů díky již zmiňované absenci bloku Accumulate & Dump a má tvar



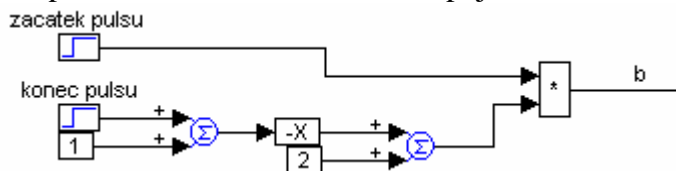
Obr.51.: Modifikovaný blok Accumulate & Dump

Jedná se o smyčku kdy se v každém okamžiku předpokládaného výskytu vstupního bitu A přičte do paměti jeho hodnota. Přičítání ve správném okamžiku je zajištěno násobičkou na vstupu, která na svůj výstup propustí pouze hodnoty dané časováním na jejím druhém vstupu. Po sečtení všech 64 vstupních bitů je výsledek vyslán na výstup B pomocí bloku Sample & Hold (na jeho výstupu je stejná hodnota jako na vstupu v okamžiku určeném vstupem b). Na vstup B je tedy vyslán puls pro blok S&H a poté je hodnota paměti čítače resetována. Reset čítače již není nutný, protože v dalším zpracování signálu je již odhad amplitudové a fázové nesymetrie proveden a ten bývá neměnný (při předpokladu neměnného přenosového kanálu). Z dostupných bloků je možné realizovat reset čítače následovně



Obr.52.: Obvod resetu čítače

Zmiňovaný puls pro blok S&H lze realizovat zapojením



Obr.53.: Řídící puls pro blok Sample & Hold

Na výstupu tohoto bloku je puls obdélníkového průběhu začínajícího v čase 12,73s a končícího v čase 12,74s. Tyto parametry jsou vhodné pouze pro délku tréninkové sekvence 64 symbolů při frekvenci zdroje 5 symbolů/s.

Nyní již nezbývá než provést vygenerování zdrojového kódu, který je uveden v příloze 2.

10. Závěr

V této diplomové je rozebráno schéma komunikačního řetězce včetně popisu jeho bloků. Proběhlo seznámení se simulačním prostředím VisSim 6.0, které je možno k simulaci řetězce použít. Jednotlivé bloky byly ve VisSimu realizovány, odzkoušeny na jednoduchých zapojeních, poté byly zapojeny do větších celků. Proběhlo seznámení s modulátorem, filtry (nastavení mezního kmitočtu, seznámení s odezvou Root Raised Cosine filtru), nelineárním zesilovačem s postupující vlnou TWTA a blokem šumu AWGN. Po vyzkoušení různých nastavení prvků bylo hlavním cílem této práce zjistit bitovou chybovost BER, vliv nesymetrií na chybovost a realizovat metodu kompenzace těchto nesymetrií. V zadání projektu je zmíněn jen modulátor QPSK, pro srovnání jsou všechny výsledky dostupné i pro modulátor 16QAM.

Analyzována byla zapojení bez nesymetrií, s kompenzovanými nesymetriemi, s nesymetriemi bez kompenzací a to všechno se zesilovačem TWTA i bez něj. Z typů modulací byly zkoumány již zmíněné modulace QPSK a 16QAM. Výpočty byly provedeny v pevné i plovoucí řádové čárce.

Bylo zjištěno, že použitá metoda je aplikovatelná na zapojení s QPSK i 16QAM modulátorem za dodržení některých předpokladů, jako je vysílání tréninkové sekvence (posloupnost symbolů s rovnoměrným obsazením všech). Zkoušením bylo dokázáno, že metoda bez této posloupnosti nepracuje. Stačí, aby byl odhad proveden na začátku. Toto je vhodné pro neměnicí se nesymetrie. Pomocí použité metody je možno zkonstruovat i adaptivní kompenzaci, kdy bude jednou za zvolenou dobu vyslána nová tréninková sekvence a z této se provede nový odhad amplitudové a fázové nesymetrie.

Simulací obvodů s plovoucí a pevnou řádovou čárkou nebyla zjištěna žádná větší odchylka mezi výpočty, což je způsobené vhodným nastavením pevné řádové čárky. Odchylky by byly velké v případě, že na desetinnou část připadne málo bitů a tím se značně zhorší přesnost.

Poslední kapitola práce se zabývá možností vytvořit ze simulovaného schéma pomocí VisSim C-Code zdrojový kód jazyka C. Pro tento úkol je nutné při použití trial verze programu VisSim 7.0 přepracovat bloky na volně přístupné (některé stávající nebyly v základní sadě), postup pro přepracování je uveden v kapitole 9. Další práce s prostředím C-Code je relativně příjemná, nezbyl však čas pro případnou praktickou realizaci odhadu a kompenzace nesymetrií na procesoru.

Všechny soubory se simulacemi jsou uloženy na přiloženém CD včetně trial verze softwaru VisSim 7.0. Dále CD obsahuje elektronickou verzi této práce.

Bibliografická citace mé práce:

ŠKÁRA, M. *Modelování komunikačního řetězce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 54 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Roman Maršálek, Ph.D.

Seznam použité literatury

- [1] MARŠÁLEK, R. *Teorie rádiové komunikace – Počítačové cvičení*, skriptum VUT v Brně
- [2] PROKEŠ, A. *Komunikační systémy*, skriptum VUT v Brně
- [3] ŘÍČNÝ, V.; KRATOCHVÍL, T. *Základy televizní techniky*, skriptum VUT v Brně
- [4] HANUS, S. *Rádiové a mobilní komunikace*, skriptum VUT v Brně
- [5] HELD, I.; KLEIN, O.; CHEN, A.; MA, V. *Low complexity digital IQ imbalance correction in OFDM WLAN receivers*, IEEE, 2004, 0-7803-8255-2
- [6] <http://matlab.feld.cvut.cz>

Příloha 1 – Zdrojový kód pokusného zapojení z kap. 9

```
/** VisSim Automatic C Code Generator Version 7.0A7 ***/
/* Output for Diagram2 at Tue May 20 21:26:58 2008 */

#include "math.h"
#include "cgen.h"
#include "c24x.h"

int digitalInState[]={0x1,0x0,0x0,0x0};
int digitalOutState[]={0x0,0x1,0x0,0x0};
extern CGDOUBLE Zed;

static void cgMain();
static SIM_STATE tSim={0, 0.01, 10,0,0.01,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,cgMain,0,0,0,0,0,0,0};
SIM_STATE *sim=&tSim;
static void cgMain()
{
    if (((int)((double)((PADATDIR & 0x1)!=0))*32.678))
        PBDATDIR |= 0x1;
    else
        PBDATDIR &= 0xFFFE;

}

main()
{
    simInit( &tSim );
    startSim();
    return 0;
}
```

Příloha 2 – Zdrojový kód odhadu a kompenzace nesymetrií z kap.9

```

/** VisSim Automatic C Code Generator Version 7.0A7 */
/* Output for kompenzace QPSK.vsm at Tue May 20 21:37:14 2008 */

#include "math.h"
#include "cgen.h"
#include "c24x.h"

int digitalInState[]={0xFFFFFFFF,0xFFFFFFFF,0x0,0x0};
int digitalOutState[]={0x0,0x0,0xFFFFFFFF,0xFFFFFFFF};
extern CGDOUBLE Zed;

static void cgMain();
static CGDOUBLE vSHBufIC0[]={0,0,0,0};
static VECTOR SHBufIC0[1]={4,vSHBufIC0};
static TIME_DELAY_INFO timeDelayInfo0[]={
{4000,4000,0,0}
,{4000,4000,0,0}
,{4000,4000,0,0}
,{4000,4000,0,0}
,{4000,4000,0,0}
,{0}};
static SIM_STATE tSim={0, 0.01, 20,0,0.01,0,0,0,SHBufIC0,0,0,timeDelayInfo0,0,
0,0,0,0,0,0,0,cgMain,0,0,0,0,0,0};
SIM_STATE *sim=&tSim;
static void cgMain()
{
int t130;
CGDOUBLE t109;
int t131;
CGDOUBLE t98;
CGDOUBLE t83;
CGDOUBLE t72;
CGDOUBLE t128;
CGDOUBLE t123;
CGDOUBLE t54;
CGDOUBLE t44;
CGDOUBLE t33;
CGDOUBLE t20;
CGDOUBLE t9;
CGDOUBLE t5;
t128 = ( getTimeDelayVal( 1 ) );
t123 = ( getTimeDelayVal( 2 ) );
t54 = ( getTimeDelayVal( 3 ) );
t130 = ( PADATDIR&0x0 );
t109 = ((sim->T<12.7298727?0:1)*(-(((sim->T<12.7398726?0:1)+1.))+2.));
t131 = ( PBDATDIR&0x0 );
t98 = ((pow(((double) t131 ),2)*((double)pulseTrain(0.1,0.2)))+( t98 *( -
(((double)pulseTrain(0,12.75))+1.))+2.));
if (((int) t109 )) SAMPLE_HOLD(0) = t98 ;
t83 = ((sim->T<12.7298727?0:1)*(-(((sim->T<12.7398726?0:1)+1.))+2.));
t72 = ((pow(((double) t130 ),2)*((double)pulseTrain(0.1,0.2)))+( t72 *( -
(((double)pulseTrain(0,12.75))+1.))+2.));
if (((int) t83 )) SAMPLE_HOLD(1) = t72 ;
t44 = ((sim->T<25.5297447?0:1)*(-(((sim->T<25.5397446?0:1)+1.))+2.));
t33 = ((( t128 * t123 )*((double)pulseTrain(0.1,0.2)))+( t33 *( -
(((double)pulseTrain(12.75,12.8))+1.))+2.));
if (((int) t44 )) SAMPLE_HOLD(2) = t33 ;
t20 = ((sim->T<25.5297447?0:1)*(-(((sim->T<25.5397446?0:1)+1.))+2.));
t9 = ((pow( t128 ,2)*((double)pulseTrain(0.1,0.2)))+( t9 *( -
(((double)pulseTrain(12.75,12.8))+1.))+2.));
if (((int) t20 )) SAMPLE_HOLD(3) = t9 ;
t5 = ( ( SAMPLE_HOLD(2) )/( SAMPLE_HOLD(3) ) );
PCDATDIR = (PCDATDIR & 0xffff)|((int)(((int) t54 )&0x0);
PDDATDIR = (PDDATDIR & 0xffff)|((int)(((int)(1./(pow(1.+(- pow( t5 ,2))))),0.5))*((- ( t54 * t5
)))+( getTimeDelayVal( 4 ) ))))&0x0);

simTimeDelay( 0,12.73, ((double) t130 ));

```

```
    simTimeDelay( 1,0.07, (( getTimeDelayVal( 0 ) *pow((( SAMPLE_HOLD(0) )/( SAMPLE_HOLD(1)
)),0.5)));
    simTimeDelay( 2,12.8, ((double) t131 ));
    simTimeDelay( 3,12.73, t128 );
    simTimeDelay( 4,12.73, t123 );

}

main()
{
    simInit( &tSim );
    startSim();
    return 0;
}
```