

Digitální modulace radiových signálů

Digital Modulation of RF Signals

Bc. Radovan Jurtík

Diplomová práce
2013



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Radovan Jurtík**
Osobní číslo: **A11436**
Studijní program: **N3902 Inženýrská informatika**
Studijní obor: **Počítačové a komunikační systémy**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Digitální modulace rádiových signálů**

Zásady pro vypracování:

1. Zpracujte literární rešerši na téma digitálních modulací radiových signálů.
2. Seznamte se se softwarem pro matematické výpočty (Matlab, Mathematica, Maple).
3. Pro tři nejčastěji používané digitální modulace vypracujte tutoriál, který umožní zobrazit časové průběhy a spektra signálů.
4. Na základě simulace shrňte vlastnosti modulací.
5. Navrhněte možné úpravy dosavadních standardů používaných v telekomunikacích.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. **HOFFNER, Václav. Úvod do teorie signálů. 1. vyd. Praha: SNTL, 1979, 451 s.**
2. **VLČEK, Jiří. Modulace a přenos signálu. 1. vyd. Praha: Jiří Vlček, 2001, 70 s. ISBN 80-239-1585-1.**
3. **HRDINA, Zdeněk a František VEJRAŽKA. Digitální radiová komunikace. 2. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1998, 218 s. ISBN 80-01-01820-2.**
4. **SÝKORA, Jan. Teorie digitální komunikace. 1. vyd. Praha : ČVUT, 2002. 329 s. ISBN 80-01-02478-4.**
5. **MCCUNE, Earl. Practical digital wireless signals. New York: Cambridge University Press, c2010, xxvi, 407 p. Cambridge RF and microwave engineering series. ISBN 05-215-1630-7.**

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Martin Pospíšilík

Ústav počítačových a komunikačních systémů

Datum zadání diplomové práce:

26. února 2013

Termín odevzdání diplomové práce:

31. května 2013

Ve Zlíně dne 26. února 2013



prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
děkan



prof. Ing. Karel Vlček, CSc.
ředitel ústavu

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá digitálními modulacemi radiových signálů. Postupně je vysvětleno, co je to signál a jak signály klasifikujeme. Dále je popsán komunikační systém, tedy jak se signály přenášejí a důvod, proč se vlastně signály moduluji. Práce se detailně zabývá digitálními modulacemi. Pro každou modulaci jsou zobrazeny časové průběhy a konstelační diagramy. Praktická část je zaměřena na vytvoření interaktivních tutoriálů, tzv. notebooků, v prostředí Wolfram Mathematica. Notebooky zobrazují časové průběhy a spektra vybraných modulací.

Klíčová slova:

digitální modulace, radiové signály, APSK, $\pi/4$ -QPSK, GMSK, Wolfram Mathematica

ABSTRACT

This master thesis deals with digital modulations of radio frequency signals. Step by step is explained what the signal is and how can be classified. The next part describes how signals are transmitted what is represented by communication system. Thesis is detailly focused on digital modulation. For each modulation is shown timing diagram and constellation diagram. Practical part is about creation of interactive tutorials so-called notebooks in software Mathematica. Notebooks are showing timing diagram and spectrum of the signal for selected modulations.

Keywords:

digital modulation, radio frequency signal, APSK, $\pi/4$ -QPSK, GMSK, Wolfram Mathematica

Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat mému vedoucímu diplomové práce panu Ing. Martinu Pospíšilíkovi za cenné rady a připomínky při tvorbě této práce.

Dále bych chtěl poděkovat rodině za poskytnuté zázemí a podporu při studiu.

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně

.....
podpis diplomanta

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 SIGNÁLY	11
1.1 KLASIFIKACE SIGNÁLŮ	11
1.1.1 Spojité signály	11
1.1.2 Diskrétní signály	11
1.1.3 Deterministické a stochastické signály	12
2 KOMUNIKAČNÍ SYSTÉM	13
3 DIGITÁLNÍ MODULACE	15
3.1 VLASTNOSTI.....	15
3.1.1 Digitální modulátor	15
3.1.2 Rozdělení modulací.....	16
3.1.3 Signálový prostor	16
3.2 PARAMETRY MODULACÍ	17
3.2.1 Výkon.....	17
3.2.2 Šířka pásma	17
3.2.3 Chybovost	17
3.2.4 Výkonová a spektrální účinnost	18
3.3 ZÁKLADNÍ MODULACE	19
3.3.1 ASK modulace	19
3.3.2 FSK modulace.....	20
3.3.3 PSK modulace.....	21
3.4 SLOŽENÉ MODULACE.....	23
3.4.1 APSK.....	23
3.4.2 QPSK.....	24
3.4.3 $\pi/4$ QPSK	26
3.4.4 CPM	28
3.4.5 CPFSK.....	28
3.4.6 MSK	29
3.4.7 GMSK	30
II PRAKTICKÁ ČÁST	32
4 WOLFRAM MATHEMATICA	33
4.1 HISTORIE VZNIKU	33
4.2 PODSTATA VZNIKU	33
4.3 NOTEBOOK.....	34
4.4 PROGRAMOVACÍ JAZYK.....	34
4.5 VYUŽITÍ	35
5 NOTEBOOKY MODULACÍ	36
5.1 KONCEPCE VYPRACOVÁNÍ.....	36
5.2 NOTEBOOK APSK.....	37
5.2.1 Kód.....	37
5.2.2 Ovládání	39

5.3	NOTEBOOK $\pi/4$ -QPSK	40
5.3.1	Kód	40
5.3.2	Ovládání	42
5.4	NOTEBOOK GMSK	43
5.4.1	Kód	43
5.4.2	Ovládání	45
6	VLASTNOSTI MODULACÍ.....	46
6.1	APSK	46
6.2	$\pi/4$ -QPSK	48
6.3	GMSK	49
6.4	POROVNÁNÍ MODULACÍ	50
7	STANDARDSY V TELEKOMUNIKACÍCH.....	51
7.1	HSCSD	51
7.2	GPRS	52
7.3	EDGE	52
7.4	UMTS	53
7.5	HSPA	53
7.5.1	HSDPA	53
7.5.2	HSUPA	55
7.6	LTE	55
	ZÁVĚR	56
	ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ.....	57
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	58
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	60
	SEZNAM OBRÁZKŮ	62
	SEZNAM TABULEK.....	64
	SEZNAM PŘÍLOH.....	65

ÚVOD

Člověk během dne získává různé informace. Tyto informace se snaží sdílet s ostatními, tedy je dále šířit a přenášet. Informace pro přenos musí být v určité formě a to nejčastěji ve formě signálu. Signál může být reprezentován určitou fyzikální veličinou, jako je například elektrické napětí nebo elektrický proud. Signál generovaný zdrojem zprávy však většinou nemá formu vhodnou pro další přenos. Proto je nejprve nutné signál vhodně upravit, a to buď kódováním, nebo modulováním. Druhou možností se zabývá i tato diplomová práce.

V první kapitole se tato práce věnuje obecně signálům a jejich klasifikací. Po definici signálu jej můžeme začít šířit. Šířením zprávy se věnuje kapitola druhá – komunikační systém. Komunikační systém popisuje celou cestu zprávy, jak se dostane od zdroje signálu až do cíle. Zpráva se kóduje, moduluje, vysílá komunikačním kanálem (vzduchem), následně ji přijímač přijme, demoduluje se a dekóduje se. Modulace nás z těchto kroků zajímají nejvíce.

Digitálními modulacemi se zabývá kapitola třetí. Signál se moduluje z důvodu nejlepšího přizpůsobení jeho stavu pro daný komunikační kanál. Pro každou aplikaci máme určité nároky, proto je i spousta druhů modulací, které mají různé parametry, a tudíž si můžeme vybrat podle požadavků. Kapitola popisuje vlastnosti a parametry modulací. Nejprve jsou popsány základní druhy modulací – ASK, FSK a PSK. Následně jsou popsány modulace, které vznikají složením těchto základních.

Hlavním cílem práce bylo vytvoření tutoriálů, které umožní zobrazit časové průběhy a spektra signálů u vybraných digitálních modulací. Vybrané modulace jsou ty častěji používané, a tedy APSK, $\pi/4$ -QPSK a GMSK. K vypracování byl použit program Mathematica od společnosti Wolfram. Informace o softwaru Mathematica jsou popsány v kapitole čtvrté. Popis vytváření tutoriálů, tzv. notebooků, je popsána v kapitole páté.

Šestá kapitola se věnuje shrnutím a srovnáním vlastností těchto vybraných modulací.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 SIGNÁLY

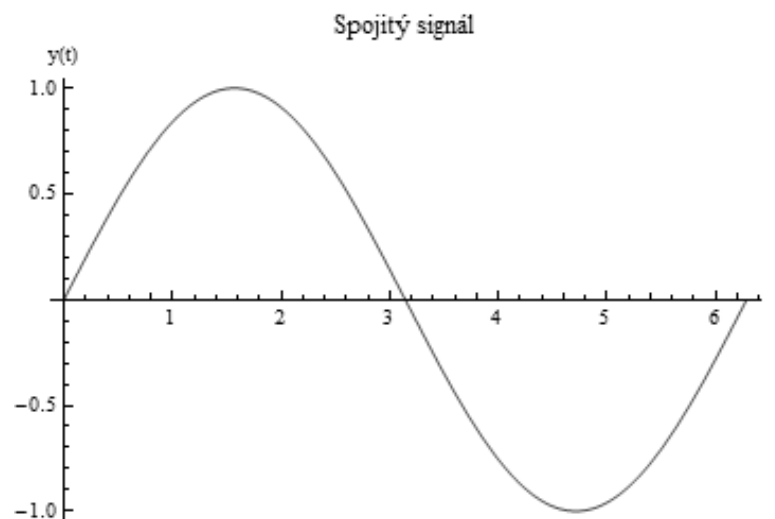
Signál představuje fyzikální vyjádření informace, obvykle ve formě okamžitých hodnot určité fyzikální veličiny (determinované nebo náhodné), která je funkcí jedné nebo více nezávisle proměnných - obvykle času (jednorozměrný nebo vícerozměrný signál). [1, s. 7]

1.1 Klasifikace signálů

Signály můžeme klasifikovat do několika skupin. Základní klasifikace viz následující podkapitoly.

1.1.1 Spojité signály

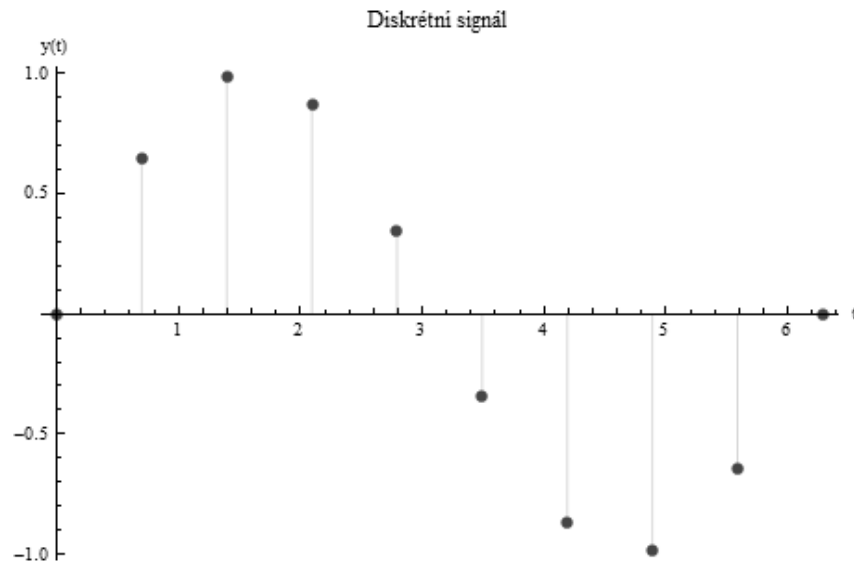
Jsou to takové signály, které mohou nabývat libovolných hodnot nezávislé proměnné a to jak na ose času, tak na ose amplitudy. Jsou to analogové signály, které jsou dány spojitou, nebo po částech spojitou funkcí. Jedná se například o signál EKG, řeč atd. Příklad průběhu spojitého signálu viz Obr. 1.



Obr. 1 Spojitý signál (funkce sinus)

1.1.2 Diskrétní signály

Diskrétní signály vznikají vzorkováním analogového signálu. Jsou to takové signály, které mohou nabývat pouze určitých hodnot nezávislé proměnné na ose času. Na ose amplitudy mohou hodnoty nabývat buď libovolné hodnoty, pokud je signál v amplitudě spojitý (nazývá se nekvantovaný signál). Anebo pouze určitých hodnot, pokud je signál v amplitudě nespojitý (nazývá se kvantovaný). Příklad průběhu diskrétního signálu viz Obr. 2.



Obr. 2 Diskrétní signál (vzorkovaná funkce sinus)

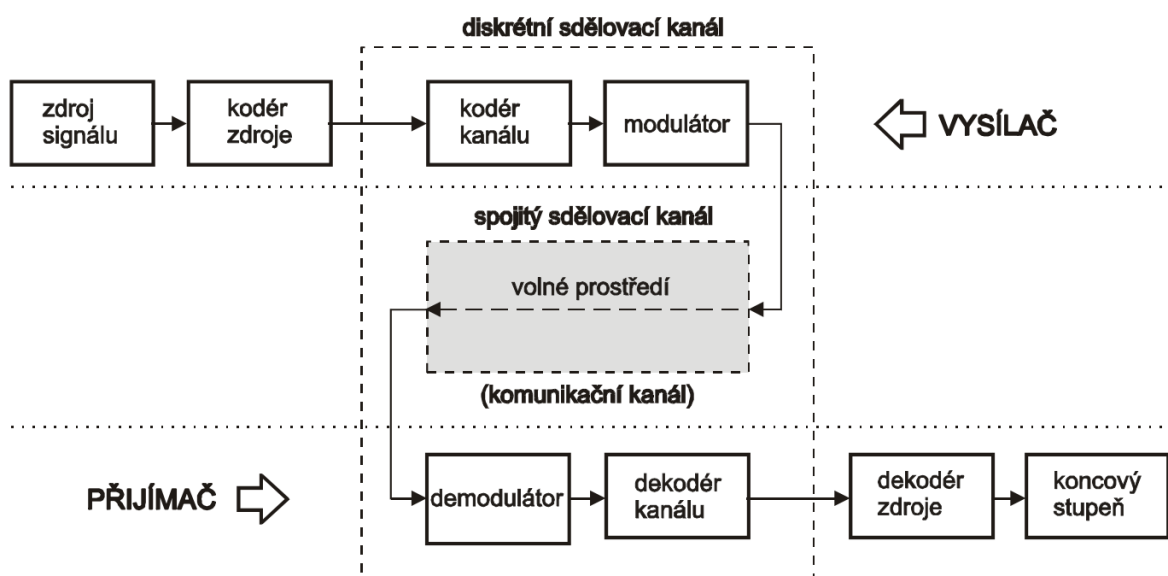
1.1.3 Deterministické a stochastické signály

Deterministický signál je takový signál, u něhož lze přesně vypočítat hodnotu v daném čase.

Stochastický (náhodný) signál je takový signál, u něhož nelze vypočítat hodnotu přesně. Můžeme ji stanovit pouze s určitou pravděpodobností. Hodnoty jsou interpretovány jako soustava náhodných proměnných, nebo je průběh signálu popsán statistickými charakteristikami (střední hodnota, střední kvadratická hodnota, rozptyl, spektrální hustota). [2, s. 4]

2 KOMUNIKAČNÍ SYSTÉM

Pro přenos informace (zprávy) z jednoho místa (místo vzniku informace) do druhého místa (místo spotřeby informace) využíváme přenosového prostředí – kanálu. Na obrázku Obr. 3 je zobrazeno blokové schéma radiokomunikačního systému. Systém se sestává ze dvou hlavních částí a to jsou vysílač a přijímač. Vysílač je složen z bloků kodéru zdroje, kodéru kanálu a modulátoru. Přijímač je složen z bloků demodulátoru, dekodéru kanálu a dekodéru zdroje.



Obr. 3 Blokové schéma radiokomunikačního systému [3, s. 14]

Zdroj signálu nám představuje místo, kde signál vzniká (např. telefonní hovor, osoba mluvící do mikrofону). Ze zdroje je signál přiveden do kodéru zdroje. Ten slouží k odstranění redundance, což zkrátí vysílanou zprávu, respektive se dosáhne vyšší přenosové rychlosti. Jeho další funkcí je převod analogového signálu na digitální signál, obsahuje tedy analogově-digitální převodník.

Z kodéru zdroje je signál přiveden do kodéru kanálu. Zde se signál zabezpečuje proti případným chybám při přenosu. Záměrně se využívá zvýšení redundance. Druh ochrany přenosu závisí na typu použitého systému. Lze ochraňovat bity nebo byty a to buď pomocí paritních kódů, konvolučních kódů, nebo pomocí Reed-Solomonových kódů. K odstranění shlukových chyb se využívá prokládání (interleaving).

Z kodéru kanálu je signál přiveden do modulátoru. Zde se signál moduluje vybranou digitální modulací. Téma modulací je podrobněji popsáno v následující kapitole. Modulovaný signál je přiveden na vysílací anténu, která vyzařuje signál do prostoru.

Na přijímací straně přichází signál z prostoru do antény, kde je pomocí zesilovače zesílen. Dále je postup přesně opačný, než při vysílání signálu. Signál se demoduluje, v dekodéru kanálu a zdroje se dekóduje a dostává se na koncový stupeň, kde by jeho podoba měla být stejná jako u zdroje signálu. [3, s. 14]

3 DIGITÁLNÍ MODULACE

Důvodem, proč se vlastně vůbec přenášené signály modulují, je, abychom dosáhli vyšších přenosových kapacit na přenosovém médiu. Tj. signál se přizpůsobuje tak, aby se na dané přenosové cestě šířil co nejlépe. Můžeme pak dosáhnout přenosu více nezávislých informačních kanálů na jednom komunikačním kanálu. Nemodulovaný signál se přenáší v základním pásmu. Modulované signály se přenášejí v přeloženém pásmu

Termín digitální modulace tedy znamená zobrazení zdrojové datové zprávy, která je ve formě diskrétních datových symbolů (diskrétních v čase) do množiny modulovaných signálů, které jsou v čase spojité. [4, s. 37] To lze zapsat následujícím vztahem:

$$\{\vec{d}\} \rightarrow \{s(t)\}, \quad (1)$$

kde \vec{d} představuje vektor vstupních datových symbolů, $\vec{d} = [d_1, d_2, d_3, \dots, d_n]$;

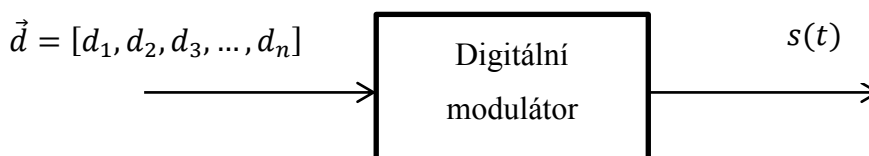
$s(t)$ představuje výstupní modulovaný signál.

Základní modulace je dvoustavová, tedy pro každý bit modulačního signálu je přiřazen jeden stav nosné vlny. U vícestavové modulace vyjadřuje jeden signálový prvek n bitů (tj. určitá kombinace nul a jedniček). Mezi počtem stavů M nosné a počtem bitů n kódového slova platí vztah $M = 2^n$. Například u čtyřstavové modulace vyjadřuje každý stav nosné určitá dvojbitová kombinace. [3, s. 38]

3.1 Vlastnosti

3.1.1 Digitální modulátor

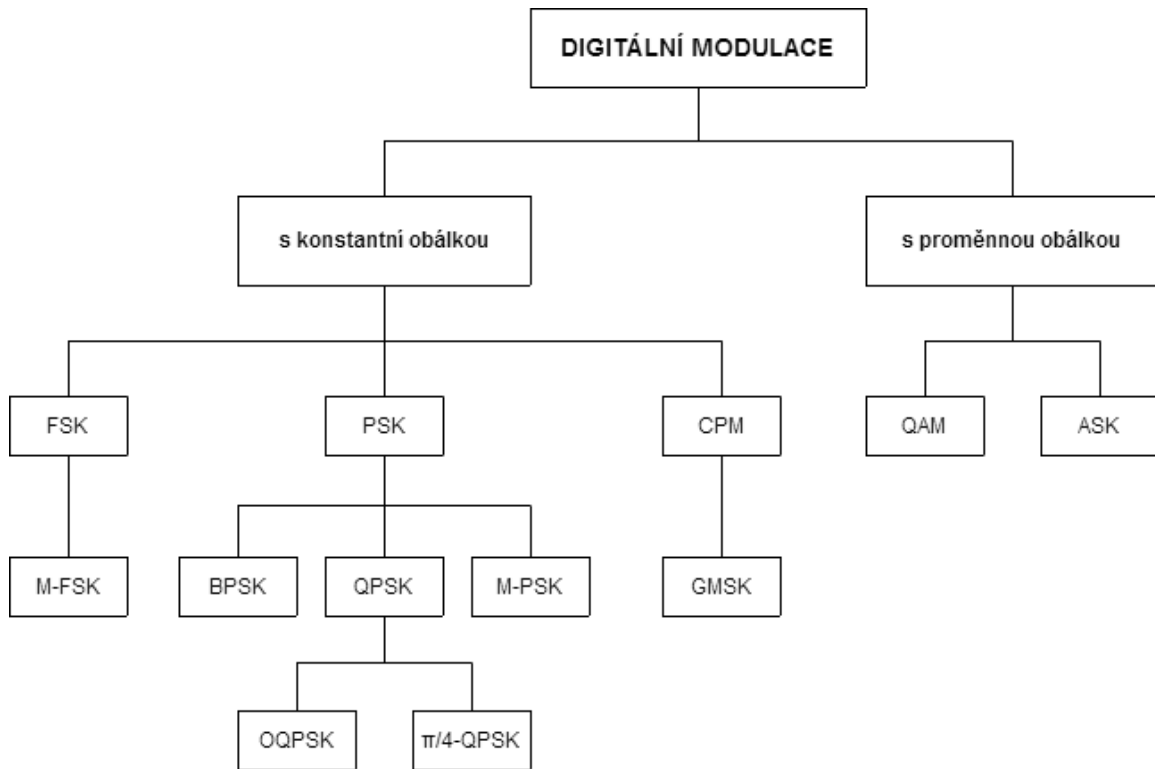
Zařízení provádějící modulaci se nazývá modulátor. Jeho obecné schéma je zobrazeno na obrázku Obr. 4. Zařízení provádějící zpětnou činnost, tedy demodulaci, se nazývá demodulátor.



Obr. 4 Digitální modulátor [4, s. 38]

3.1.2 Rozdělení modulací

Digitálních modulací je celá řada. Strom modulací, kde vidíme, která modulace vychází ze které, je na obrázku Obr. 5. Základní rozdělení je na modulace s konstantní obálkou (nelineární modulace) a proměnnou obálkou (lineární modulace).



Obr. 5 Přehled digitálních modulací [7, s. 220]

3.1.3 Signálový prostor

Signálový prostor slouží k zobrazení modulovaného signálu jako bodu v prostoru. Uspodňuje popis modulovaných signálů a určování jejich vlastností. Báze je tvořena soustavou ortogonálních funkcí na intervalu $(0, T)$. Potom platí

$$\int_0^T \varphi_k(t) \varphi_j(t) dt = \begin{cases} 1 & \text{pro } k = j \\ 0 & \text{pro } k \neq j \end{cases} \quad (2)$$

Pokud budeme uvažovat pouze reálné báze, pak pro modulované signály platí

$$s_i(t) = \sum_{k=1}^n S_{ik} \varphi_k(t) \quad S_{ik} = \int_0^T s_i(t) \varphi_k(t) dt, \quad (3)$$

kde S_{ik} je signálový bod, $s_i(t)$ je modulovaný signál a φ_k představují osy prostoru. [5]

Zobrazení těchto bodů v prostoru s osami se pak nazývá konstelační diagram.

3.2 Parametry modulací

Digitální modulace můžeme popsat řadou parametrů. Základními parametry jsou výkon, šířka pásma, chybovost a výkonová a spektrální účinnost.

3.2.1 Výkon

Střední výkon determinovaného signálu $s(t)$ je dán vztahem

$$P = \lim_{I \rightarrow \infty} \frac{1}{I} \int_{-I/2}^{I/2} s^2(t) dt. \quad (4)$$

U stochastických signálů je takto definován výkon náhodnou veličinou. Proto použijeme operátor střední hodnoty a výkon je pak dán vztahem

$$P = E \left[\lim_{I \rightarrow \infty} \frac{1}{I} \int_{-I/2}^{I/2} s^2(t) dt \right]. \quad (5)$$

Dalším odvozením pak dostaneme výsledný vztah

$$P = \frac{E_s}{T}, \quad (6)$$

kde E_s je střední hodnota energie vysílaného signálu připadající na jeden symbol zprávy. [5, s. 45]

3.2.2 Šířka pásma

Teoreticky je spektrum signálu nekonečně široké. Protože je výkon signálu konečný, je spektrum rozděleno nerovnoměrně. V určitém pásmu frekvencí nabývá signál významných hodnot a mimo toto pásmo jej můžeme zanedbat. Ze Shannon-Kotělnikovy věty odvozením pak dostane šířku pásma

$$B = \frac{n}{2T}, \quad (7)$$

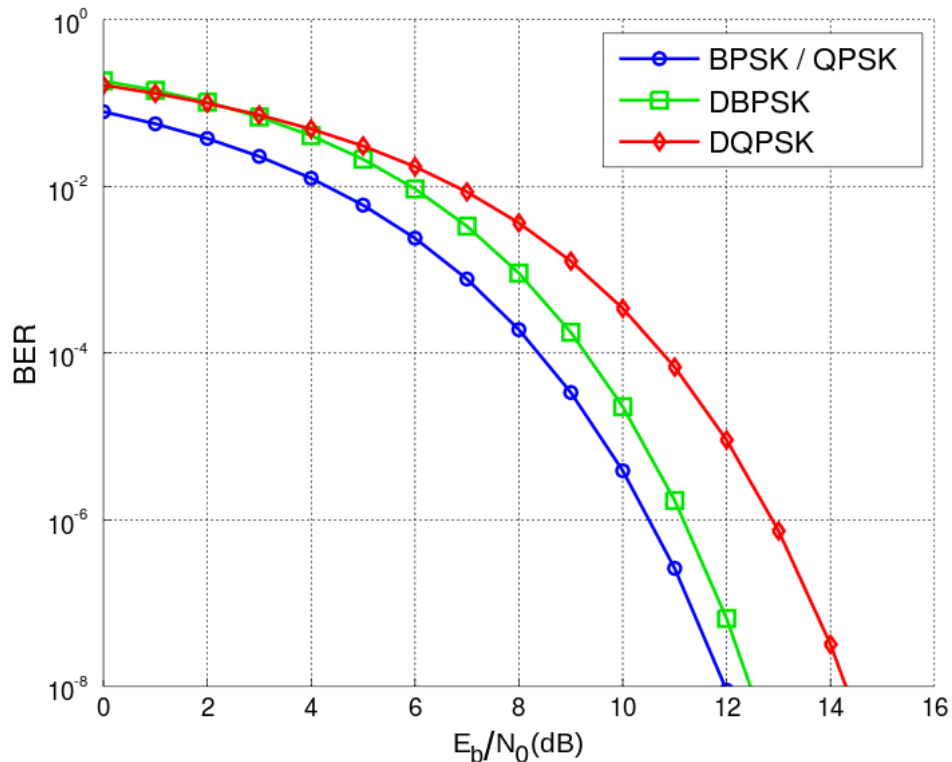
kde n je dimenze signálového prostoru a T je doba trvání signálu. [5, s. 47]

3.2.3 Chybovost

Pravděpodobnost chyby přenosu v bitu P_e je pouze teoretická. Je dána vztahem

$$P_e = \frac{\text{počet chybných bitů přenesených za sekundu}}{\text{celkový počet bitů přenesených za sekundu}}. \quad (8)$$

Konkrétní naměřená bitová chybovost se označuje BER (Bit Error Rate). [7, s. 96] Na obrázku Obr. 6 je zobrazena ukázka chybovosti BER u vybraných modulací.



Obr. 6 Porovnání bitové chybovosti BER u vybraných modulací [6]

3.2.4 Výkonová a spektrální účinnost

Výkonová účinnost je nazývána také jako energetická účinnost. Je definována vztahem (9), jako poměr spektrální výkonové hustoty šumu N_0 ku střední hodnotě užitečného signálu E_b přenášejícího 1 bit informace, při určité specifikované bitové chybovosti BER. [7, s. 98]

$$\eta_e = \frac{N_0}{E_b} \quad \eta_{edB} = 10 \log \frac{N_0}{E_b} [dB] \quad (9)$$

Spektrální účinnost je nazývána též jako pásmová účinnost. Je definována vztahem (10), jako poměr bitové rychlosti f_b ku šířce pásma radiového kanálu B_{RF} . [7, s. 98]

$$\eta_s = \frac{f_b}{B_{RF}} \quad (10)$$

3.3 Základní modulace

3.3.1 ASK modulace

Modulace ASK (Amplitude Shift Keying), neboli amplitudové klíčování, patří jako první ze tří k nejzákladnějším digitálním modulacím. Při této modulaci, jak již z názvu vyplývá, se bude měnit amplituda nosného signálu. Frekvence i fáze zůstávají konstantní. Je to lineární modulace bez paměti.

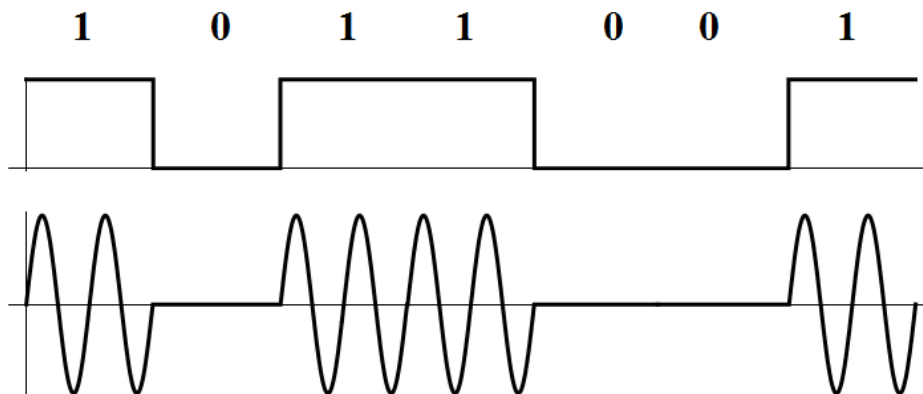
Nejjednodušší verzi této modulace představuje On-off keying (OOK). Podstata je taková, že se využívá pouze dvou stavů - vypnuto (nevysílá) a zapnuto (vysílá). Amplituda signálu bude tedy rovna nule, anebo maximu. Obecně lze toto klíčování označit jako M-ASK, kde M představuje počet stavů nosné. Hodnota M bývá většinou z rozsahu 2 až 64, např. 4ASK, 8ASK atd.

Modulovaný signál vyjádříme vztahem

$$s_i(t) = A_i g(t) \cos(\omega_c t), \quad t \in (0, T), \quad (11)$$

kde $g(t)$ je impuls v základním pásmu o jednotkovém výkonu na intervalu T .

Časový průběh amplitudového klíčování je zobrazen na obrázku Obr. 7.



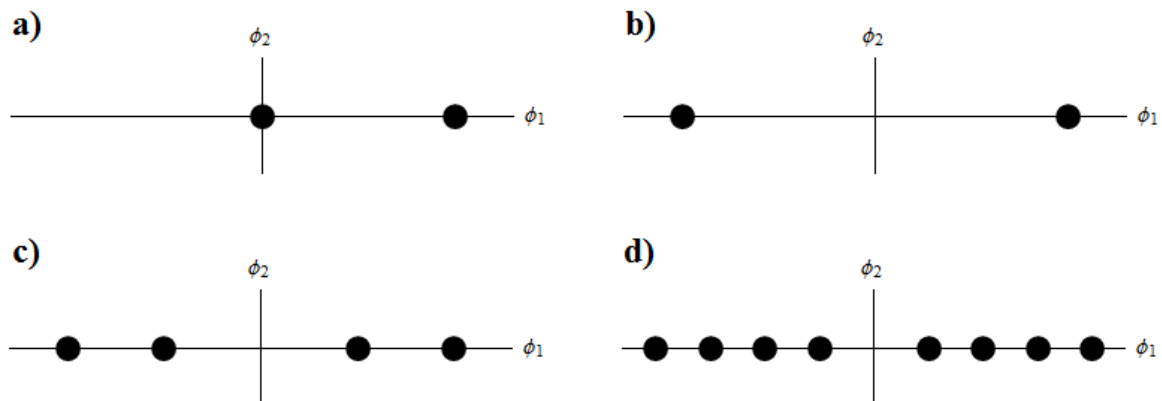
Obr. 7 Časový průběh modulace ASK (OOK)

Jednorozměrný signálový prostor je dán vztahem

$$\varphi(t) = \sqrt{\frac{2}{T}} g(t) \cos(\omega_c t). \quad (12)$$

Souřadnice signálového bodu:

$$s_i(t) = \sqrt{\frac{T}{2}} A_i \quad (13)$$



Obr. 8 Konstelační diagram modulační a) OOK, b) 2ASK, c) 4ASK, d) 8ASK

Tato modulace se příliš nepoužívá z důvodu průběhu jejího spektra. Je citlivá na atmosférický šum, zkreslení a na podmínky šíření na různých trasách. Používá se pro jednoduché aplikace, například při přenosu dat optickými vlákny, přenos Morseovy abecedy a IrDA přenos.

3.3.2 FSK modulace

Modulace FSK (Frequency Shift Keying), neboli frekvenční klíčování, patří jako druhá ze tří k nezákladnějším digitálním modulacím. Při této modulaci, jak již z názvu vyplývá, se bude měnit frekvence nosného signálu. Amplituda i fáze zůstávají konstantní. Je to nelineární modulace bez paměti.

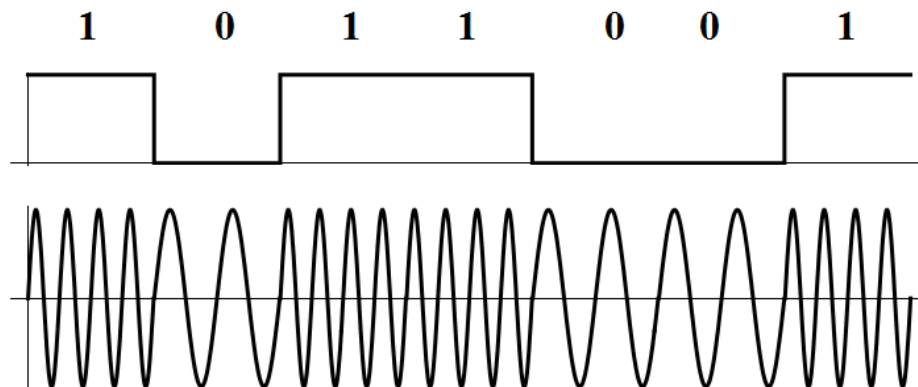
Nejjednodušší verzi této modulace představuje dvoustavová modulace. Frekvence signálu smí nabývat pouze dvou hodnot. Pro úroveň signálu logická 1 má nosný signál přidělenou vyšší frekvenci a pro úroveň signálu logická 0 pak nižší frekvenci. Obecně lze toto klíčování označit jako M-FSK, kde M představuje počet stavů nosné. Hodnota M bývá většinou z rozsahu 2 až 64, např. 4FSK, 8FSK atd.

Modulovaný signál vyjádříme vztahem

$$s_i(t) = A \cos(\omega_i T + \Phi^{(i)}), \quad t \in (0, T), \quad \omega_i T \gg 2\pi, \quad (14)$$

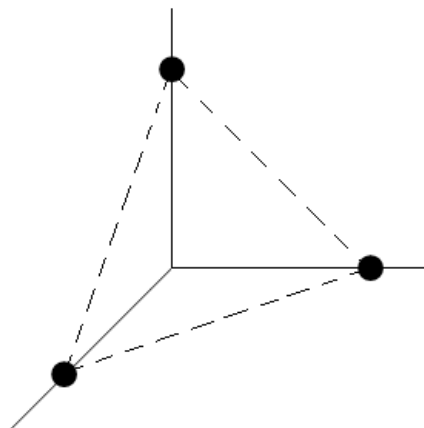
kde $\Phi^{(i)}$ vyjadřuje počáteční fázi nosného signálu, pokud je ke generování signálu použito M oscilátorů. [5, s. 54]

Časový průběh frekvenčního klíčování je zobrazeno na obrázku Obr. 9.



Obr. 9 Časový průběh modulace FSK

Rozložení signálových bodů si můžeme prohlédnout na obrázku Obr. 10. Všechny modulované signály mají stejnou energii, tudíž všechny body jsou stejně vzdálené od počátku souřadnic. Vzdálenost d mezi dvěma signálovými body se vypočítá: $d = \sqrt{2 E_s}$.



Obr. 10 Rozložení signálových bodů FSK pro $M = 3$

3.3.3 PSK modulace

Modulace PSK (Phase Shift Keying), neboli fázové klíčování, patří jako poslední ze tří k nejzákladnějším digitálním modulacím. Při této modulaci, jak již z názvu vyplývá, se bude měnit fáze nosného signálu. Amplituda i frekvence zůstává konstantní. Je to lineární modulace bez paměti.

Nejjednodušší verzi této modulace představuje dvoustavová modulace 2PSK neboli také BPSK (Binary PSK). Fáze signálu může nabývat pouze dvou různých hodnot.

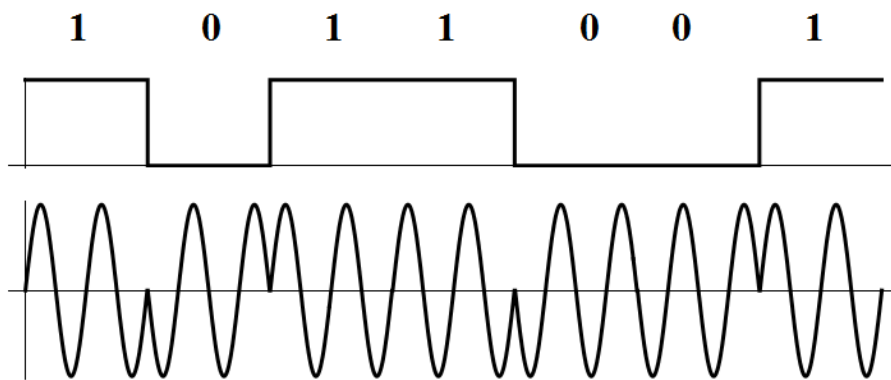
Například pro úroveň signálu logická 1 má nosný signál přidělen posuv fáze o 0° a pro úroveň signálu logická 0 posuv fáze o 180° .

Modulovaný signál vyjádříme vztahem

$$s_i(t) = A \cos(\omega_c t + \Phi_i) = A \cos(\omega_c t) \cos(\Phi_i) - A \sin(\omega_c t) \sin(\Phi_i), \quad (15)$$

$$t \in (0, T), \quad \omega_c t \gg 2\pi.$$

Časový průběh fázového klíčování je zobrazen na obrázku Obr. 11.



Obr. 11 Časový průběh modulace PSK

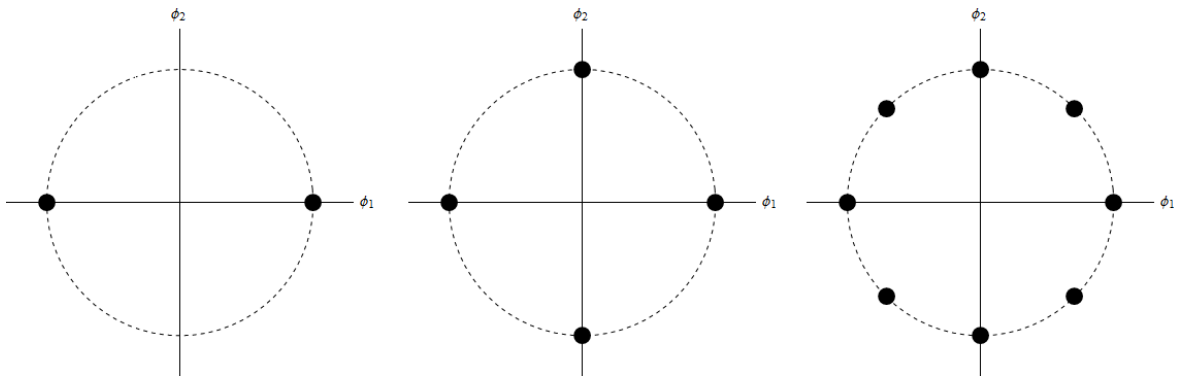
Dvourozměrný signálový prostor je dán vztahy

$$\varphi_1(t) = \sqrt{\frac{2}{T}} \cos(\omega_c t) \quad \text{a} \quad \varphi_2(t) = \sqrt{\frac{2}{T}} \sin(\omega_c t). \quad (16)$$

Souřadnice signálových bodů:

$$s_{i1}(t) = \sqrt{\frac{T}{2}} A \cos(\Phi_i) \quad \text{a} \quad s_{i2}(t) = \sqrt{\frac{T}{2}} A \sin(\Phi_i). \quad (17)$$

Konstelační diagram vybraných PSK modulací je zobrazen na obrázku Obr. 12.



Obr. 12 Konstelační diagram pro modulace BPSK, 4PSK, 8PSK

Modulace se používá například při přenosu RFID, Bluetooth a nebo Wi-Fi. Dále se používá v mnoha kombinacích jako modulace APSK, QPSK atd.

3.4 Složené modulace

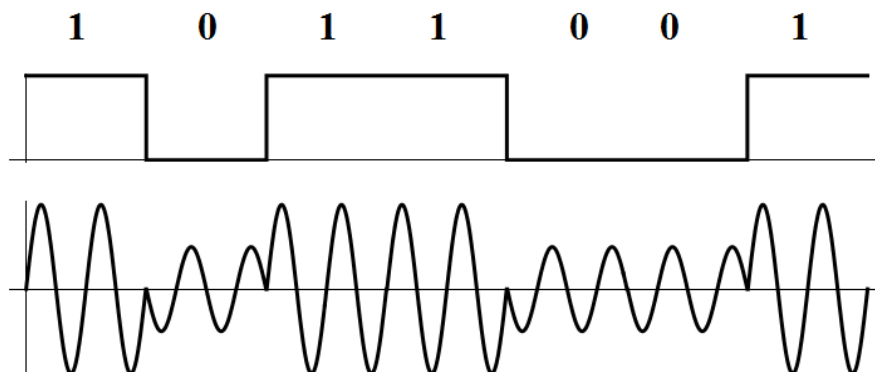
3.4.1 APSK

Modulace APSK (Amplitude and Phase-shift keying, nebo Asymmetric Phase-shift keying), neboli amplitudové a fázové klíčování, vzniká složením modulace ASK a PSK. Mění se tedy amplituda a fáze signálu, frekvence zůstává zachována. Je to lineární modulace bez paměti.

Modulovaný signál vyjádříme vztahem

$$s_i(t) = A_j g(t) \cos(\omega_c t + \Phi_k), \quad t \in (0, T), \quad \begin{matrix} j = 1, \dots, J \\ k = 1, \dots, K \end{matrix} \quad (18)$$

Časový průběh APSK modulace je zobrazen na obrázku Obr. 13.



Obr. 13 Časový průběh modulace APSK

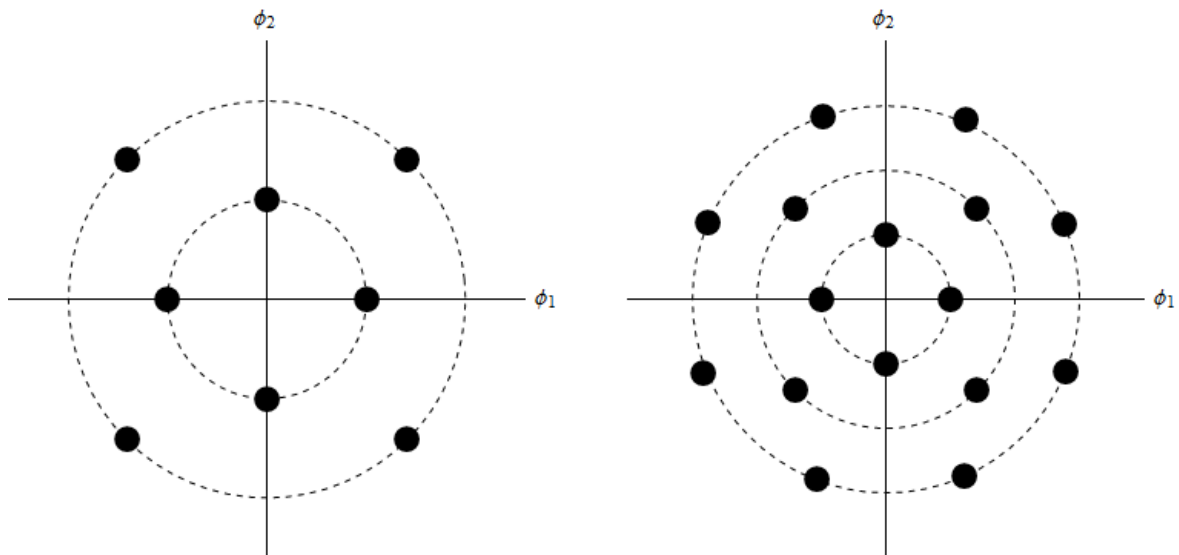
Dvourozměrný signálový prostor je dán vztahy

$$\varphi_1(t) = \sqrt{\frac{2}{T}} g(t) \cos(\omega_c t) \quad \text{a} \quad \varphi_2(t) = \sqrt{\frac{2}{T}} g(t) \sin(\omega_c t). \quad (19)$$

Souřadnice signálových bodů jsou dány vztahy

$$s_{i1}(t) = \sqrt{\frac{T}{2}} A_j \cos(\Phi_k) \quad \text{a} \quad s_{i2}(t) = \sqrt{\frac{T}{2}} A_j \sin(\Phi_k). \quad (20)$$

Hodnoty amplitudy a fáze volíme tak, aby signálové body byly rozloženy symetricky kolem počátku souřadnic. [5, s. 52] Konstelační diagram si můžeme prohlédnout na obrázku Obr. 14.



Obr. 14 Konstelační diagram modulační 8APSK a 16APSK

Modulace APSK se používá pro digitální satelitní televizní vysílání DVB-S2 (Digital Video Broadcasting - Satellite - Second Generation). Konkrétně se zde využívá modulace 16-APSK a 32-APSK.

3.4.2 QPSK

Modulace QPSK (Quadrature Phase Shift Keying), neboli kvadrurní fázová modulace, vychází z fázového klíčování, respektive 4PSK. Je to lineární modulace bez paměti.

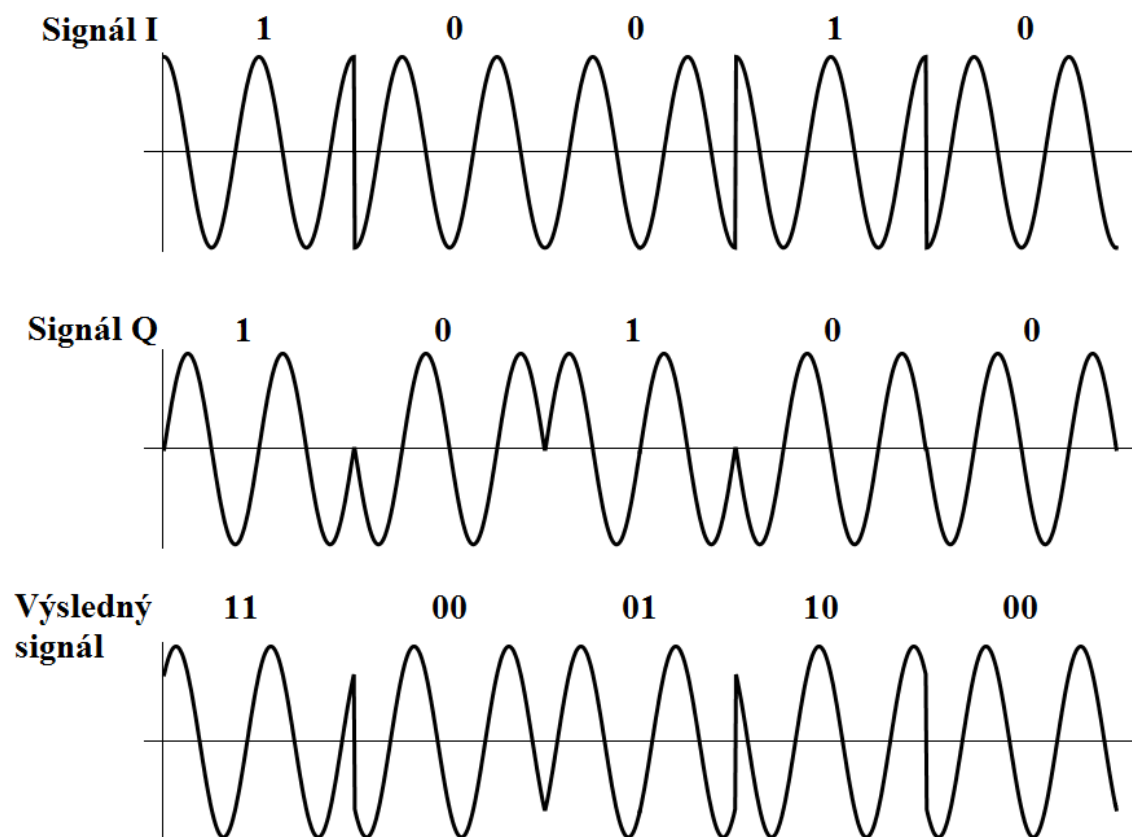
QPSK má signálové body v porovnání s 4PSK vzájemně fázově posunuty. Tímto posunem získáme možnost kódovat dva bity na symbol. Při použití QPSK oproti BPSK lze využít

dvojnásobnou rychlost přenosu dat při stejné šířce pásma signálu, nebo zachovat rychlost přenosu dat, a snížit tak o polovinu šířku přenosového pásma. [6]

Modulovaný signál vyjádříme vztahem

$$s_i(t) = \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos\left(\omega_c t + (2n-1)\frac{\pi}{4}\right), \quad n = 1, 2, 3, 4. \quad (21)$$

Časový průběh QPSK modulace je zobrazen na obrázku Obr. 15. Binární data jsou rozdělena na liché a sudé bity. Pro liché bity je nosná vlna reprezentována funkcí cosinus (signál I), pro sudé bity pak funkcí sinus (signál Q). Výsledný signál je dán součtem těchto signálů, tedy $I + Q$.

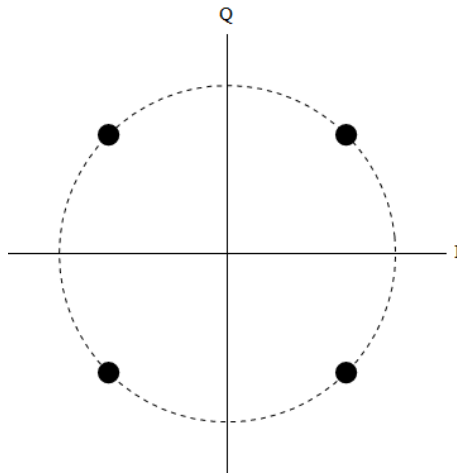


Obr. 15 Časový průběh modulace QPSK

Dvourozměrný signálový prostor je dán vztahy

$$\varphi_1(t) = \sqrt{\frac{2}{T}} \cos(\omega_c t) \quad \text{a} \quad \varphi_2(t) = \sqrt{\frac{2}{T}} \sin(\omega_c t). \quad (22)$$

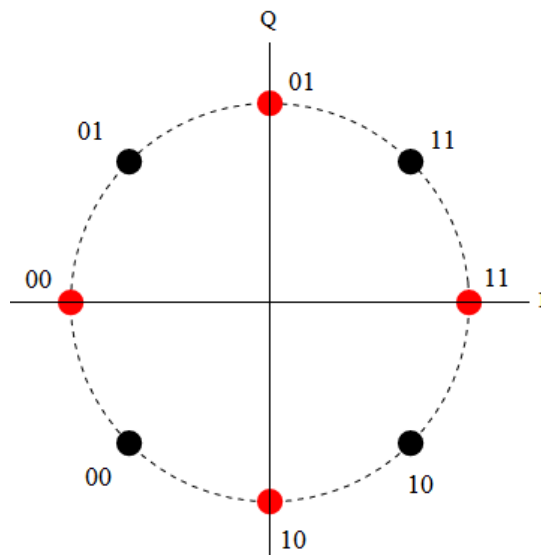
Konstelační diagram si můžeme prohlédnout na obrázku Obr. 16.



Obr. 16 Konstelační diagram modulace QPSK

3.4.3 $\pi/4$ QPSK

Tato modulace využívá dvojici konstelací modulace QPSK, kdy druhá konstelace je vůči první posunuta o $\pi/4$ radiánu (45°), viz obrázek Obr. 17. Liché bity se řídí černými body z konstelačního diagramu, sudé pak červenými body. Toto nastavení může být i opačné, tedy liché bity – červené body, sudé bity – černé body. Tím se zmenší maximální posun fáze o $\pi/4$, tedy ze 180° na 135° . Fázově se tedy lze posunout pouze o dvě možné hodnoty a to $\pi/4$ (45°), nebo $3 \times \pi/4$ (135°). To má za následek snížení kolísání amplitudy. [6]

Obr. 17 Konstelační diagram modulace $\pi/4$ -QPSK

Časový průběh $\pi/4$ -QPSK modulace je zobrazen na obrázku Obr. 18. Binární data jsou rozdělena na liché a sudé bity. Pro liché bity je nosná vlna reprezentována funkcí kosinus (signál I), pro sudé bity pak funkcí sinus (signál Q). Pro liché bity, jak signálu I tak i signálu Q platí černé body konstelačního diagramu. Pro sudé bity pak platí červené body konstelačního diagramu. Výsledný signál je dán součtem těchto signálů, tedy $I + Q$.

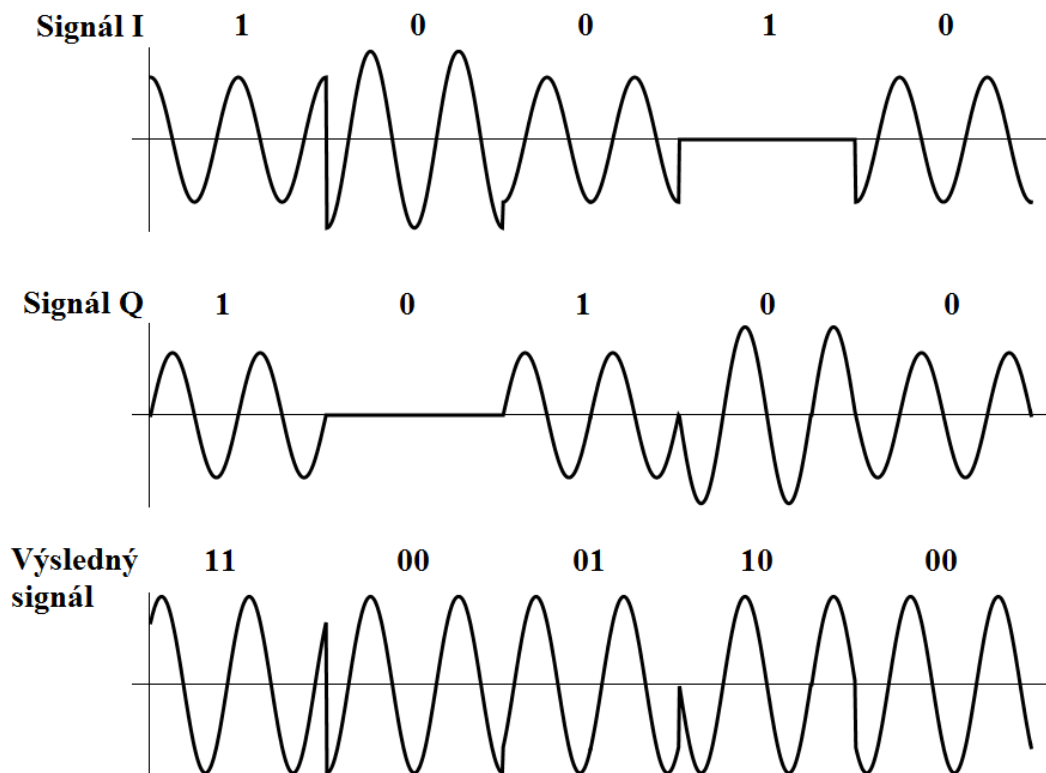
Velikosti amplitud signálu I a Q jsou dány vztahem (23). u_k představuje amplitudu signálu I, v_k představuje amplitudu signálu Q.

$$u_k = \frac{1}{\sqrt{2}}(u_{k-1} I_k - v_{k-1} Q_k)$$

$$v_k = \frac{1}{\sqrt{2}}(u_{k-1} Q_k - v_{k-1} I_k)$$
(23)

I_k a Q_k musí nabývat hodnot 1 nebo -1. Počáteční hodnoty jsou $u_0 = 1$ a $v_0 = 0$. Amplitudy tedy mohou nabývat hodnot ± 1 , 0 a $\pm \frac{1}{\sqrt{2}}$. Signál je dán vztahem (24). [10]

$$s(t) = A \cos(2\pi f_c t + \Phi_k), \quad kT \leq t \leq (k+1)T.$$
(24)



Obr. 18 Časový průběh modulace $\pi/4$ -QPSK

Modulace $\pi/4$ -QPSK se používá v oblasti mobilních telefonů s přenosem dat v režimu TDMA (Time Division Multiple Access).

3.4.4 CPM

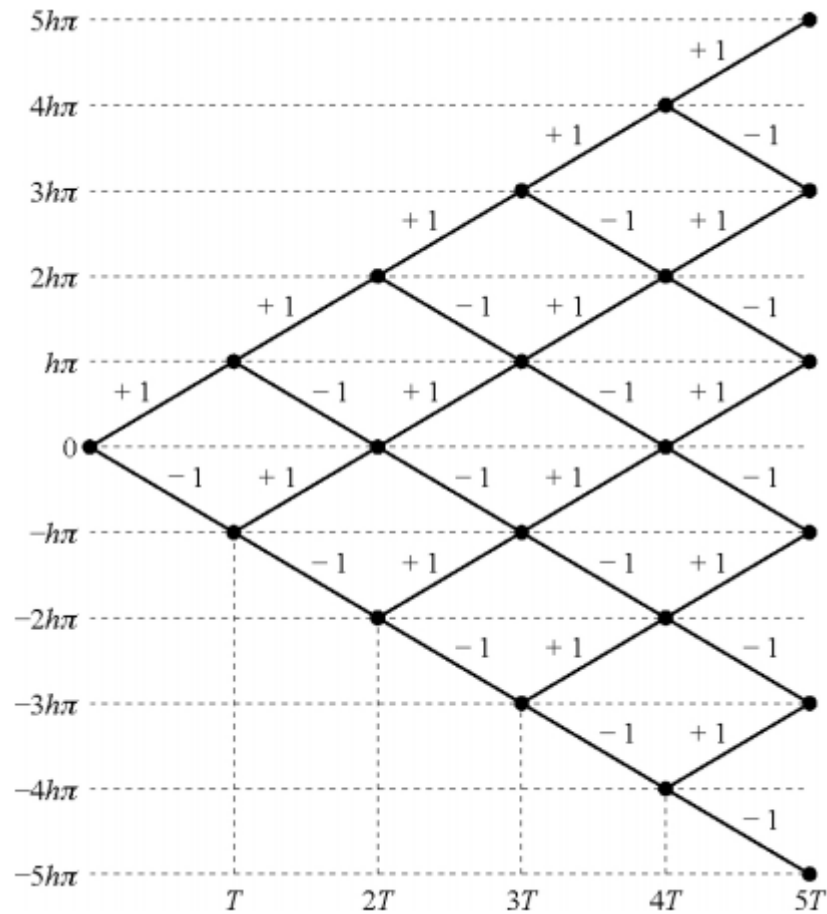
Modulace CPM (Continous Phase Modulation) mají spojitě fázové přechody při změnách modulačních symbolů. Dále jsou spojitě i změny frekvence.

3.4.5 CPFSK

Modulace CPFSK (Continous-Phase Frequency Shift Keying) je třídou modulace CPM. Signalizační frekvence modulované vlny je uvnitř každé symbolové periody konstantní. Změny frekvence v okamžicích změny modulačních symbolů se uskutečňují tak, že je vždy zachována spojitost fáze modulovaného signálu. [7, s. 247]

Fázová funkce CPFSK s plnou odezvou je dána vztahem (25). Tímto vztahem je pak dána fázová mříž na obrázku Obr. 19.

$$q(t) = \begin{cases} 0, & \text{pro } t \leq 0 \\ \frac{t}{2T}, & \text{pro } 0 \leq t \leq T_s \\ \frac{1}{2}, & \text{pro } t \geq T_s \end{cases} \quad (25)$$

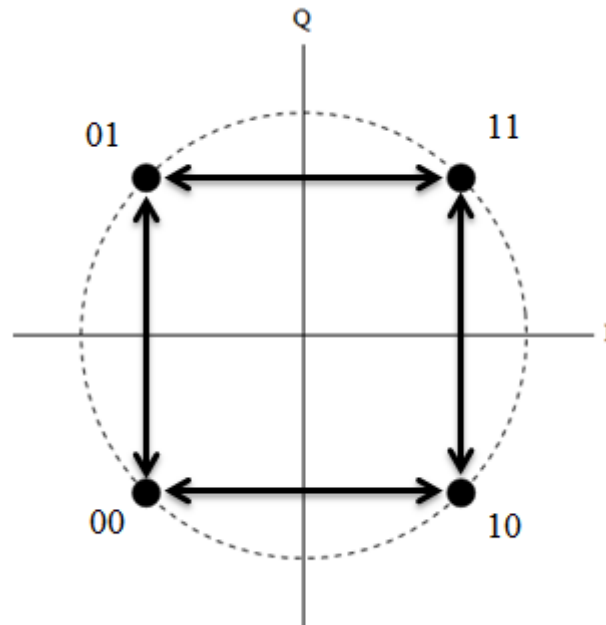


Obr. 19 Fázová mříž systému CPFSK [12]

3.4.6 MSK

Modulace MSK (Minimum Shift Keying) je typu CPPSK. Je podobná OQPSK modulaci. MSK je kódována tak, že signál Q je od signálu I zpožděn o půl symbolové periody. Využívá konstelačního diagramu, který je zobrazen na obrázku Obr. 20. Signál je dán vztahem

$$s(t) = A I(t) \cos\left(\frac{\pi t}{2T}\right) \cos(2\pi f_c t) - A Q(t) \sin\left(\frac{\pi t}{2T}\right) \sin(2\pi f_c t). \quad (26)$$



Obr. 20 Konstelační diagram MSK

3.4.7 GMSK

Modulace GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying) je variantou MSK modulace. MSK používá pravoúhlé modulační impulzy, zatímco u GMSK modulace tyto impulzy procházejí přes modulátor s gaussovskou dolní propustí GLPF (Gaussian Low Pass Filter), která je zaoblí. [7, s. 252]

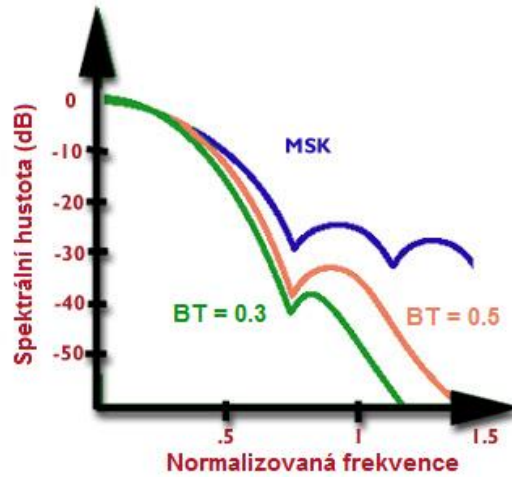
Zásadním parametrem pro návrh Gaussovského filtru je šířka pásma filtru B a perioda jednoho bitu T . Součin BT pak udává tvar odezvy filtru. Na obrázku Obr. 21 jsou zobrazeny spektra signálu pro jednotlivé hodnoty součinu BT v porovnání s modulací MSK. MSK má hodnotu $TB = \infty$. Takže čím je nižší hodnota součinu, tím i rychleji padá spektrum. Z toho by se dalo usuzovat, že stačí zvolit parametry B a T tak, aby byl jejich součin co nejmenší. Na druhou stranu při porovnání odezvy filtru pro jednotlivé hodnoty viz obrázek Obr. 22 zjistíme, že se prodlužuje čas odezvy. Tudiž je třeba zvolit kompromis mezi užším spektrem a časovou odezvou.

Přenosová funkce Gaussova filtru je dána vztahem

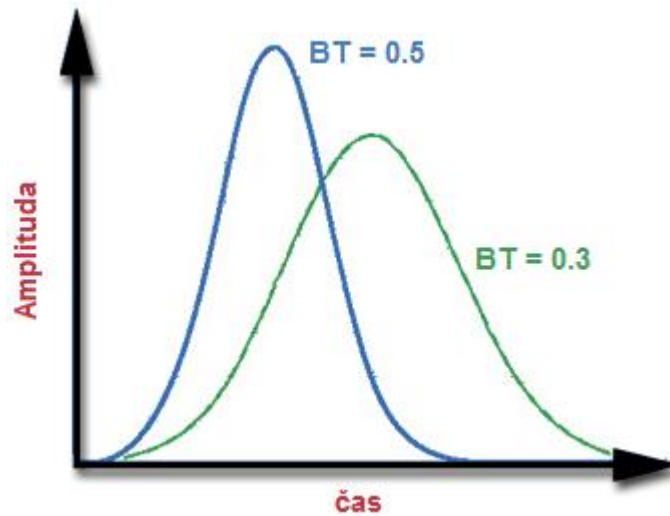
$$G(f) = e^{-\frac{\ln \sqrt{2}}{B^2} f^2} e^{j \varphi} . \quad (27)$$

Odvozením dostaneme frekvenční impulz, který je dán vztahem

$$\mu(t) = \frac{B}{2T} \sqrt{\frac{\pi}{\ln \sqrt{2}}} \int_{t-T}^t e^{-\frac{\pi^2 B^2}{\ln \sqrt{2}} \tau^2} d\tau. \quad (28)$$



Obr. 21 Spektrum modulae MSK a GMSK [13]



Obr. 22 Odezva Gaussova filtru [13]

Tato modulace se používá nejvíce v mobilních sítích GSM. Standardem je použití parametru $BT = 0,3$. To znamená, že 99% procent spektra signálu se vejde do šířky pásma 250 kHz. [13]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 WOLFRAM MATHEMATICA

Software Mathematica je jedním z prostředí, které integruje nástroje pro numerickou a symbolickou matematiku, grafický a dokumentační systém a zajišťuje pokročilé propojení s dalšími aplikacemi. [8, s. 7]



Obr. 23 Logo Wolfram Mathematica 9 [9]

4.1 Historie vzniku

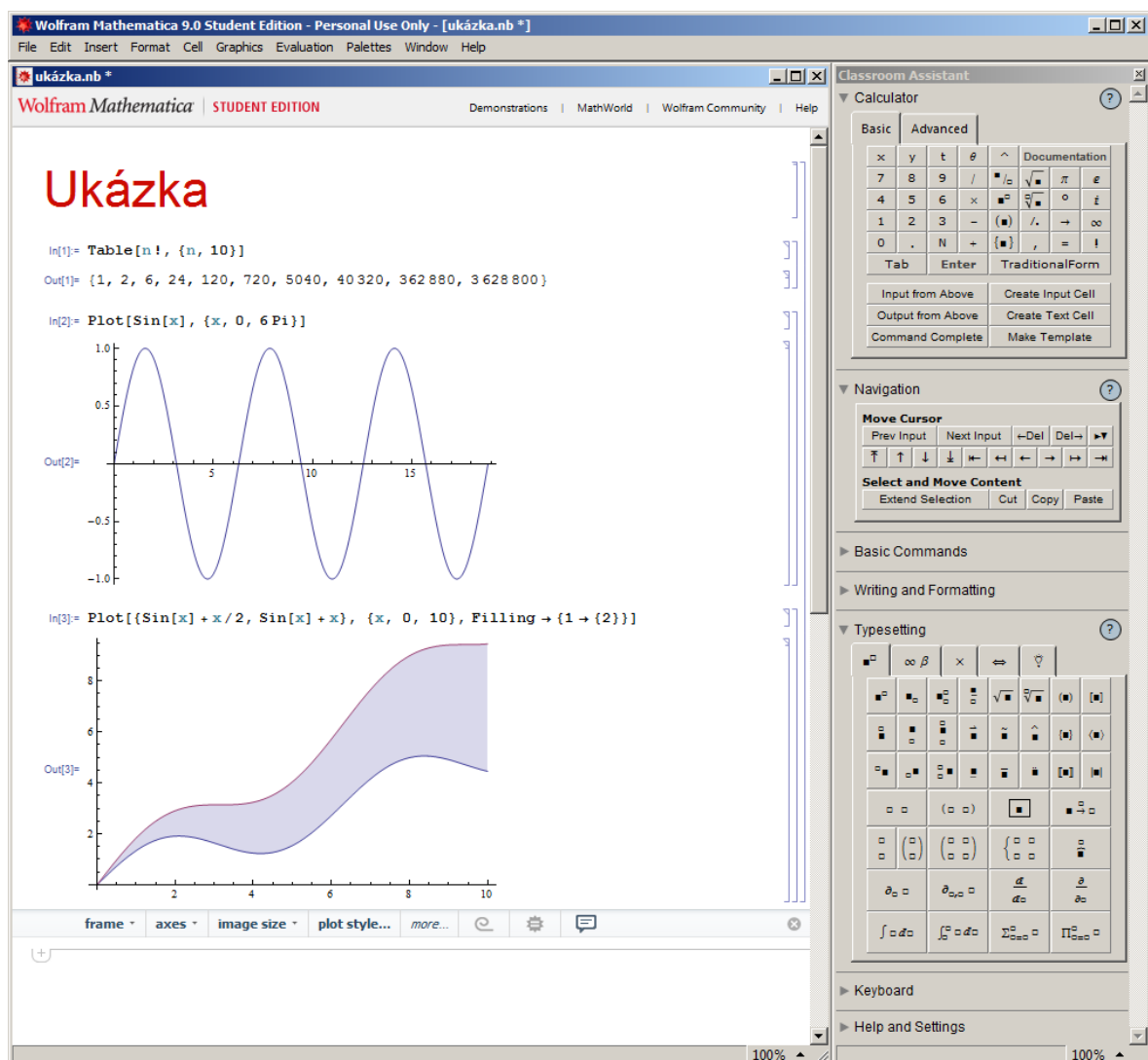
V roce 1987 byla založena Stephenem Wolframem společnost Wolfram Research, Inc., kde byl a je tento program vyvíjen. První verze softwaru Mathematica vznikla v roce 1988. Mělo zásadní význam pro způsob využívání počítačů v řadě technických i jiných odvětví. Říká se, že právě vydáním software Mathematica začal nový věk tzv. technical computing. Od 60. let 20. století existovaly samostatné sady, které byly vhodné vždy jen pro určité specifické úlohy (numerické, algebraické, grafické). Mathematica představuje zlom v tom, že vše integruje do jednoho produktu. [8, s. 7]

4.2 Podstata vzniku

Myšlenkou vzniku softwaru Mathematica byla podstata objevení nového symbolického jazyka. Symbolické programování dává možnost prezentace dat, funkcí, grafů apod. jednotným způsobem, tj. symbolickým výrazem. Například výraz $f[x]$ může v Mathematice představovat matematickou funkci, grafický prvek, zvuk nebo celý dokument. Zároveň může fungovat jako vstup nebo výstup jiné funkce. To přináší nespočet výhod: stručnější a jednodušší kódování, jednodušší rozšiřování funkce atd. [8, s. 7]

4.3 Notebook

Mathematica používá interakční dokumentační systém nazývaný notebook. Ukázka prostředí Mathematica je zobrazeno na obrázku Obr. 24. Toto notebookové rozhraní se skládá z buněk, které jsou řazeny pod sebe. Buňky vizuálně i funkčně oddělují vstupy, výstupy, text, grafiku. Všechny součásti jsou však stále jednoduchými výrazy, tudíž jsou snadno přizpůsobitelné, jednoduše upravitelné a snadno rozšiřitelné. Notebook je možné převést do jiných formátů, např. PDF, TeX, HTML. [8, s. 7,8]



Obr. 24 Ukázka prostředí Wolfram Mathematica 9

4.4 Programovací jazyk

Programový kód Mathematica dokáže odrážet specifičnost problému, což jej dělá kratším a přehlednějším. Tato skutečnost přináší snadnější přechod z jiného programovacího jazyka

a také je přívětivější pro ty, co předtím nikdy neprogramovali. Není třeba předem deklarovat typ proměnných, dimenzi matic, nebo překládat program. Obsahuje spoustu vestavěných procedur – řazení, vyhledávání, práce se soubory. Programy napsané v Mathematice jsou tak mnohem úspornější v množství napsaného kódu oproti jiným programovacím jazykům. [8, s. 8]

4.5 Využití

Mathematica je velmi komplexní nástroj a je možné ji použít pro řadu úkolů, jakými jsou například:

- zpracování komplexních symbolických výpočtů, které obsahují velké množství členů
 - zavádění, analýza a vizualizace dat
 - řešení rovnic, diferenciálních rovnic a minimalizace problémů numericky nebo symbolicky
 - provádění numerických modelů a simulací, od jednoduchých regulačních systémů po srážku galaxií, finančních, složitých biologických systémů, chemických reakcí či vlivů na prostředí
 - výroba profesionálně kvalitních, interaktivních technických dokumentů pro elektronickou distribuci či tisk
 - ilustrace matematických nebo vědeckých konceptů pro studenty
 - sazba technických informací
 - provádění odborných prezentací a seminářů
 - usnadnění rychlého rozvoje engineeringových společností a finančních institucí
- [8 s. 10]

5 NOTEBOOKY MODULACÍ

Úkolem diplomové práce bylo vytvořit tutoriál k nejčastěji používaným digitálním modulacím se zobrazením časového průběhu a spektra. Byly vybrány modulace APSK, $\pi/4$ -QPSK a GMSK. Definice těchto modulací byly popsány v kapitole 3. K vytvoření tutoriálů jsem si z vybraných softwarů pro matematické výpočty vybral program Mathematica. Tomuto softwaru byla podrobněji věnována kapitola 4.

Každá modulace je vypracována zvlášť v jednotlivém notebooku. Notebooky jsou součástí přílohy na CD.


5.1 Koncepce vypracování

Koncepce vypracování je pro všechny modulace stejná. Modulace je napsána jako vlastní funkce s lokálními proměnnými (příkaz *Module*). Funkce se následně volá s definovanými argumenty. Volání je prováděno s příkazem *Manipulate*, což umožňuje dynamicky měnit argumenty vstupující do funkce.

Jednoduchý příklad je uveden na obrázku Obr. 25. Jedná se o vytvoření funkce x^2 . Na prvním řádku je funkce definována. Na druhém řádku je funkce volána v příkazu *Manipulate*, kde je definováno jakého rozsahu smí nabývat hodnota x a jaký je krok mezi hodnotami. Výstupem je okénko, kde nahoře je posuvník argumentu x , který může nabývat hodnot 0 až 10 po kroku 1. Dole je pak výsledek kvadratické funkce pro danou hodnotu x .

```
In[1]:= funkce[parametr_] := parametr^2
Manipulate[funkce[x], {x, 0, 10, 1}]
```

Out[2]=



The image shows a Mathematica notebook cell. The input consists of two lines of code: `funkce[parametr_] := parametr^2` and `Manipulate[funkce[x], {x, 0, 10, 1}]`. The output of the cell is a graphical interface. At the top, there is a slider labeled 'x' with a range from 0 to 10 and a step of 1. The slider is currently set to 3. Below the slider, the output of the function is displayed as the number 9.

Obr. 25 Příklad vytvoření vlastní funkce v Mathematice

5.2 Notebook APSK

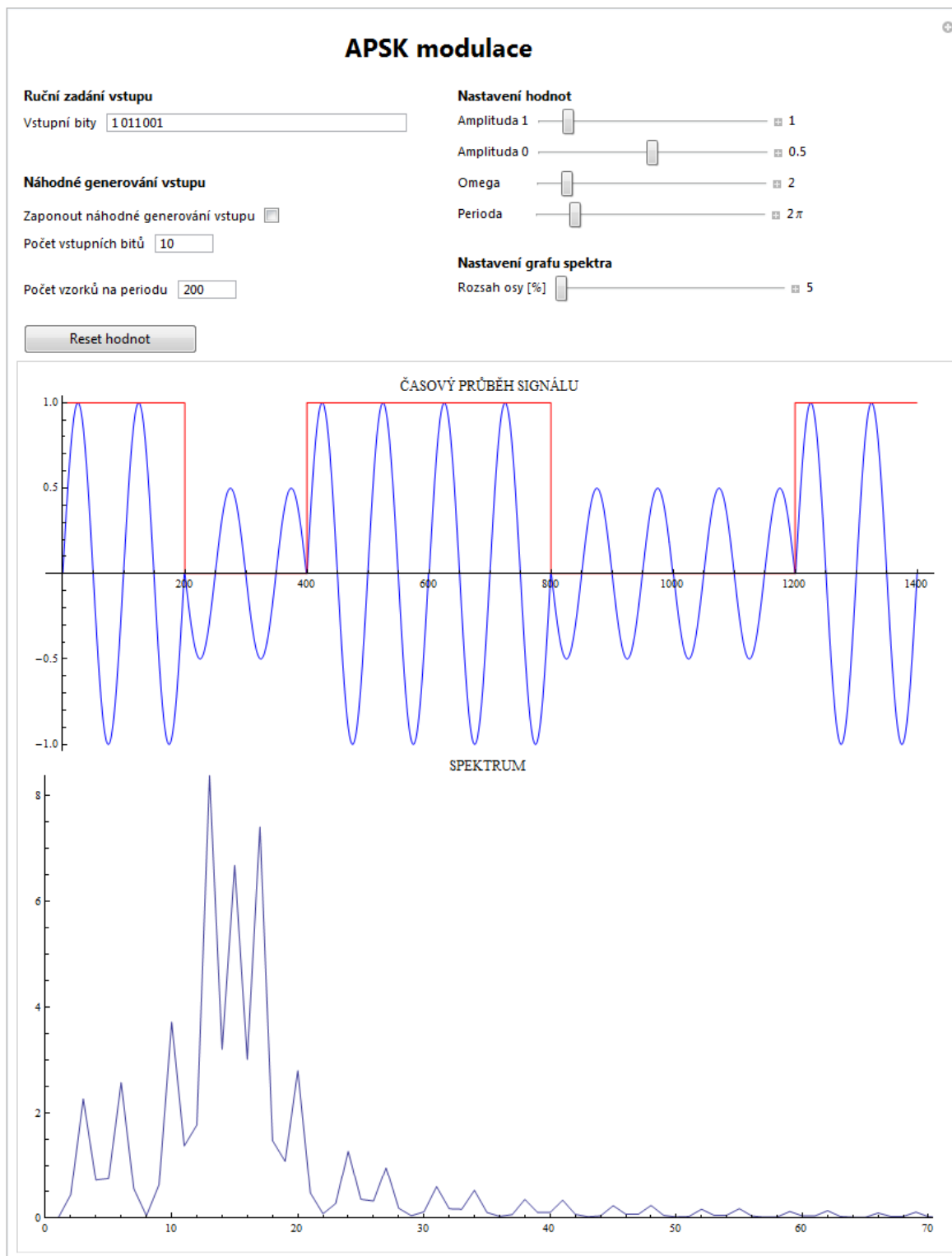
Princip modulace APSK je popsán v kapitole 3.4.1.

5.2.1 Kód

Do funkce modulace vstupuje parametr, podle kterého se rozhoduje, zda bude vstup zadán uživatelem, nebo bude náhodně generován. Pokud uživatel vybere náhodný vstup, budou vygenerována náhodná čísla (0 nebo 1) v počtu, který uživatel též zadá. Ze zadané vstupní sekvence se vygeneruje graf průběhu těchto bitů, viz Obr. 26 – časový průběh signálu, červená čára.

Podle zadaných hodnot amplitud (Amplituda 1 a Amplituda 0) jsou vygenerovány vzorky signálu sinus o délce nastavené periody. Dále jsou vygenerovány signály s opačnou fází. Procházením vstupní sekvence bitů se podle hodnoty skládají příslušné vzorky signálu za sebe. Tímto postupem získáme výsledný časový průběh signálu. Jako poslední se provede diskrétní Fourierova transformace, z níž dostaneme graf spektra signálu.

Nakonec se vytvořená funkce volá s parametry, které se pomocí posuvníků mohou dynamicky měnit. Parametry mají nastaveny své rozsahy a krok, po kterých se hodnota mění. Jak tento notebook vypadá, si můžeme prohlédnout na obrázku Obr. 26.



Obr. 26 Notebook APSK modulace

5.2.2 Ovládání

Ovládání notebooku APSK je zobrazeno na obrázku Obr. 27.

Obdélník č. 1 představuje oblast pro zadávání sekvence vstupních bitů, které se budou modulovat. V horní části je políčko pro zadání vlastního vstupu. Je nutné zadat sekvenci bitů pouze z hodnot 0 a 1. Dále je zde zaškrtačací políčko pro náhodné generování bitů. Přimo pod ním se nachází políčko pro nastavení počtu, kolik bitů se má náhodně generovat.

V obdélníku č. 2 nastavujeme parametry modulovaného signálu. Hodnota amplitudy pro úroveň signálu hodnoty logická 1 (Amplituda 1) a hodnotu amplitudy pro úroveň signálu logická 0 (Amplituda 0). Dále nastavujeme parametr omega a délku trvání signálu – periodu.

Obdélník 3 slouží pro nastavení počtu vzorků na periodu. Pro vyšší hodnoty periody, nebo hodnoty omega je nutné nastavit vyšší počet vzorků, neboť dochází k podvzorkování signálu. Vyšší počet vzorků však znamená delší výpočetní čas.

V obdélníku č. 4 nastavujeme rozsah osy x v procentech grafu spektra, který se má zobrazit.

Tlačítko „Reset“ slouží pro vrácení původních hodnot, které byly nastaveny při otevření notebooku.

The screenshot shows the 'APSK modulace' control interface. It is divided into several sections:

- 1 (Green border):** 'Ruční zadání vstupu' (Manual input) with a text field containing '1 011 001' and a checkbox 'Zapnout náhodné generování vstupu' (Enable random input).
- 2 (Blue border):** 'Nastavení hodnot' (Parameter settings) with sliders for 'Amplituda 1' (set to 1), 'Amplituda 0' (set to 0.5), 'Omega' (set to 2), and 'Perioda' (set to 2π).
- 3 (Red border):** 'Počet vzorků na periodu' (Samples per period) with a text input field set to '200'.
- 4 (Pink border):** 'Nastavení grafu spektra' (Spectrum graph settings) with a slider for 'Rozsah osy [%]' (Axis range [%]) set to '5'.

A 'Reset hodnot' button is located at the bottom of the interface.

Obr. 27 Ovládání notebooku APSK

5.3 Notebook $\pi/4$ -QPSK

Princip modulace $\pi/4$ -QPSK je popsán v kapitole 3.4.3.

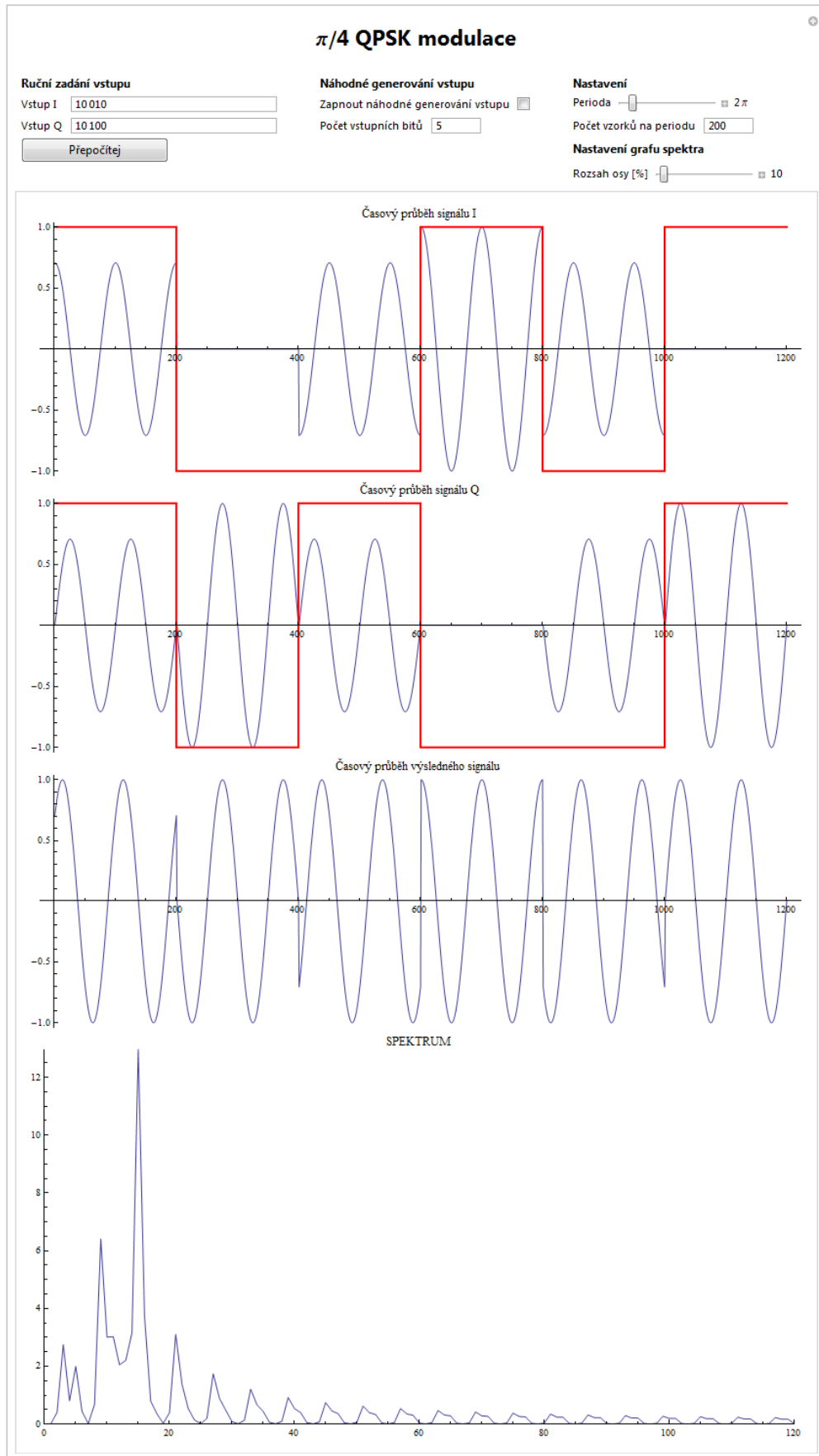
5.3.1 Kód

Do funkce modulace vstupuje parametr, podle kterého se rozhoduje, zda bude vstup zadán uživatelem, nebo náhodně generován. Vstupní bity by měly mít hodnoty -1 a 1 nikoliv 0 a 1. Je to z důvodu výpočtu amplitud, protože při použití hodnoty 0 by následně i všechny amplitudy vycházely nulové. Pro jednodušší zadávání je ale zvolena metoda, kdy se zadávají hodnoty 0 a 1. Následně se poté již uvnitř funkce převede hodnota 0 na hodnotu -1.

Ze zadaných vstupních sekvencí se vygenerují grafy průběhu těchto bitů.

Podle zadaných vstupních bitů se vypočítají amplitudy pro jednotlivé signály I a Q. Následně se vygenerují vzorky signálu I, tedy funkce kosinus a -kosinus a vzorky signálu Q tj. funkce sinus a -sinus. Procházením vstupních bitů se podle jejich hodnoty za sebe skládají příslušné vzorky signálu násobené o vypočtenou amplitudu. Dostaneme tak signály I a Q, které následně sečteme, čímž získáme výsledný časový průběh signálu. Dále se provede diskrétní Fourierova transformace výsledného signálu, z níž dostane graf spektra.

Nakonec se vytvořená funkce volá s parametry, které se pomocí posuvníků mohou dynamicky měnit. Parametry mají nastaveny své rozsahy a krok, po kterých se hodnota mění. Vzhled tohoto notebooku je zobrazen na obrázku Obr. 28.



Obr. 28 Notebook π/4-QPSK modulace

5.3.2 Ovládání

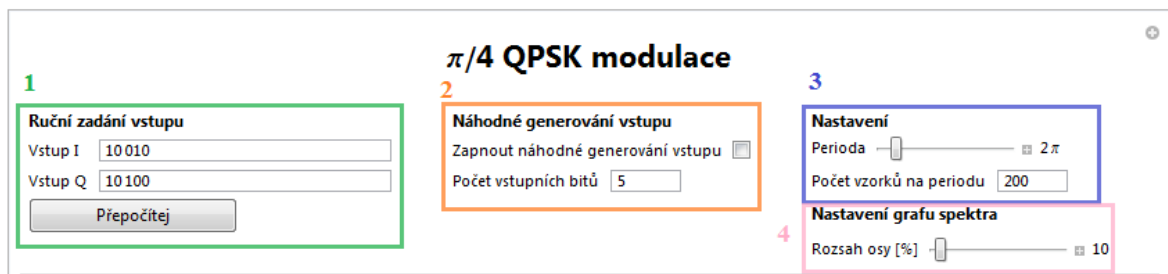
Ovládání notebooku $\pi/4$ -QPSK je zobrazeno na obrázku Obr. 29.

Obdélník č. 1 označuje oblast pro zadání vstupních bitů, které se budou modulovat. Teoreticky by zde mělo být políčko pouze jedno, avšak já jsem už zde rozdělil vstupní bity na liché (Vstup I) a sudé (Vstup Q). A to z důvodu toho, že jsou následně zobrazeny časové průběhy zvlášť signálu I a zvlášť signálu Q. Tudiž uživatel hned vidí, jaké jsou zadány hodnoty. Zadaný počet v obou polích musí být stejný. Po zadání hodnot je třeba zmáčknout tlačítko „Přepočítej“.

V obdélníku č. 2 je možno si zapnout náhodné generování vstupních bitů. Je zde nutné vyplnit políčko s nastavením, kolik bitů se má generovat.

Obdélník č. 3 slouží pro nastavení periody signálu. Pod ním je políčko pro nastavení počtu vzorků na periodu. Tyto dva parametry mají mezi sebou přímou souvislost. Pro vyšší hodnoty periody je nutné nastavit vyšší počet vzorků, jinak dojde k podvzorkování signálu. Vyšší počet vzorků však znamená delší výpočetní čas.

V obdélníku č. 4 nastavujeme rozsah osy x grafu spektra, která se zobrazí.



Obr. 29 Ovládání notebooku $\pi/4$ -QPSK

5.4 Notebook GMSK

Princip modulace GMSK je popsán v kapitole 3.4.7.

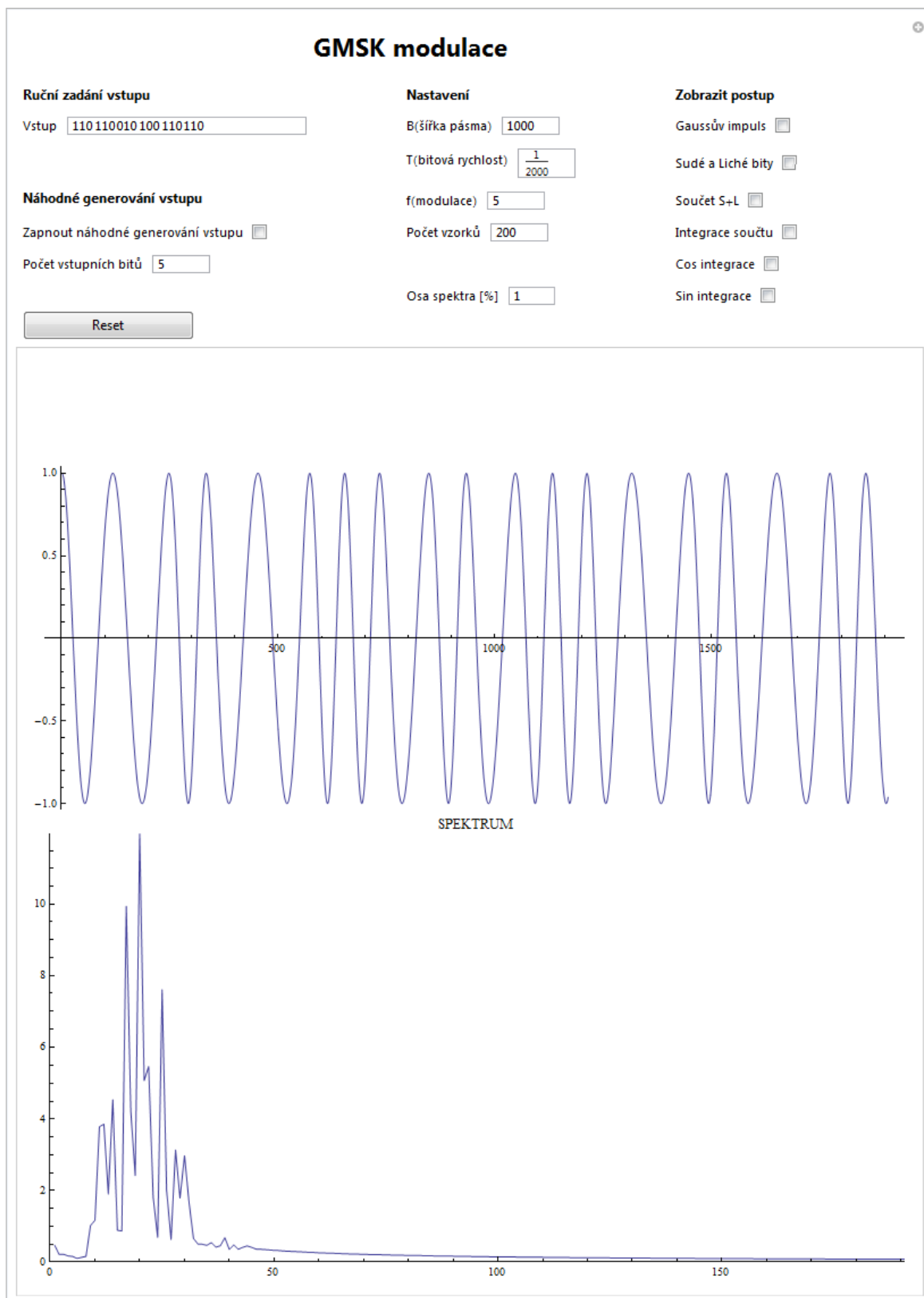
5.4.1 Kód

Do funkce modulace vstupují parametry B a T , jejichž součinem je ovlivněna odezva Gaussovského filtru. Podle vzorce (29) je vygenerován graf této odezvy. Dále se načítají vstupní bity, které se budou modulovat. Rozhoduje se, zda jsou uživatelem zadané, nebo se náhodně generují podle zadaných parametrů.

$$s = \frac{B}{2T} \sqrt{\frac{\pi}{\ln \sqrt{2}}} \int_{t-T}^t e^{-\frac{\pi^2 B^2}{\ln \sqrt{2}} \tau^2} d\tau \quad (29)$$

Vstupní bity se rozdělí na liché a sudé. Podle hodnot bitů se seskládá graf ze vzorku odezvy filtru. Máme tedy jeden graf pro liché bity a druhý graf pro sudé bity. Graf sudých bitů je navíc posunut vůči grafu lichých bitů o půl periody Gaussovy křivky. Tyto dva grafy se sečtou. Součet grafů se následně integruje. Na výsledek integrace použijeme funkce sinus a kosinus, čímž dostaneme signály I a Q . Signály se sečtou a dostaneme tak výsledný časový průběh modulace. Nakonec se provede diskrétní Fourierova transformace, z níž dostane graf spektra signálu.

Vytvořená funkce se volá s parametry, které se mohou dynamicky měnit pomocí vpisování hodnot do políček a zaškrtování čtverečků pro vybrání položky. Vzhled notebooku zachycuje obrázek Obr. 30.



Obr. 30 Notebook GMSK modulace

5.4.2 Ovládání

Ovládání notebooku GMSK je zobrazeno na obrázku Obr. 31.

Obdélník č. 1 označuje políčko pro zadávání vstupních bitů. Je možné zadat pouze posloupnost hodnot 0 a 1, jinak nebude výpočet správný.

V obdélníku č. 2 je možné si vybrat náhodné generování vstupních bitů. Je zde políčko pro nastavení počtu bitů, které se mají vygenerovat.

Obdélník č. 3 slouží pro nastavování parametrů modulace. Pole B slouží pro nastavení šířky pásma Gaussova filtru a pole T pro nastavení bitové rychlosti přenosu. Parametr f slouží pro nastavení frekvence nosných signálů sinus a kosinus podle vztahu (30), kde $s(t)$ představuje výsledný modulovaný signál. Dále je zde nastavení počtu vzorků signálu na periodu. Vyšší počet vzorků na periodu znamená vyšší přesnost výpočtu, ale zato trvá výpočet déle. Poslední políčko slouží pro nastavení, kolik % z osy spektra se má zobrazit.

$$s(t) = \sin(2\pi ft) I(t) + \cos(2\pi ft) Q(t) \quad (30)$$

V obdélníku č. 4 si můžeme zobrazit postup signálu při modulaci. Pomocí zaškrtnutých čtverečků je možno vybrat jednotlivé možnosti, v jakém stavu se signál právě nachází.

Tlačítko „Reset“ slouží pro vrácení původních hodnot, které byly nastaveny při otevření notebooku.

Obr. 31 Ovládání notebooku GMSK

Na rozdíl od předchozích notebooků APSK a $\pi/4$ -QPSK, kdy probíhá přepočítání při změně parametrů jen velmi krátce, trvá výpočet modulace GMSK o něco déle. Není tedy nutné se obávat, že někde nastala chyba, jen je třeba počkat na dopočítání.

6 VLASTNOSTI MODULACÍ

6.1 APSK

Modulace APSK vznikla složením modulace ASK a PSK. Modulace ASK se v praxi příliš nepoužívají, nebo jen velmi málo z důvodu nepříznivých vlastností.

Při porovnání modulace BPSK s více stavovými modulacemi PSK na konstelačním diagramu vidíme, že BPSK má body vzdáleny daleko od sebe. Díky tomu má velmi dobrou odolnost proti šumu, rušení a dalším nežádoucím vlivům. Nevýhodou však jsou velké nároky na šířku vř pásma. Spektrální účinnost můžeme zvýšit přechodem k více stavovým modulacím M-PSK. Se zvětšujícím se počtem stavů modulace a zachováním bitové rychlosti signálu se zmenší symbolová rychlost a tím pádem i potřebná šířka pásma pro přenos signálu. Naopak při zachování šířky pásma můžeme využít vyšší přenosovou kapacitu. Se zvyšováním počtu stavů modulace přibývá stále více bodů v konstelačním diagramu, které jsou umístěny na jedné kružnici. Mezi body jsou tak stále menší rozestupy. To vede ke zvyšování chybovosti v přenosu. Chybovost snížíme zvýšením vysílacího výkonu. [7, s. 218]

Důvodem vzniku APSK byl tedy fakt, že u PSK modulace jsou všechny body konstelačního diagramu umístěny na kružnici a vnitřek kružnice tak zůstává nevyužit. Proto se moduluje i amplituda.

Z pohledu spektra signálu můžeme jednotlivé modulace porovnat na obrázku Obr. 32. Graf byl získán pomocí vytvořeného notebooku APSK. Zadané hodnoty byly:

vstupní bity = {1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 0}; $\omega = 5$; $T = 2\pi$;

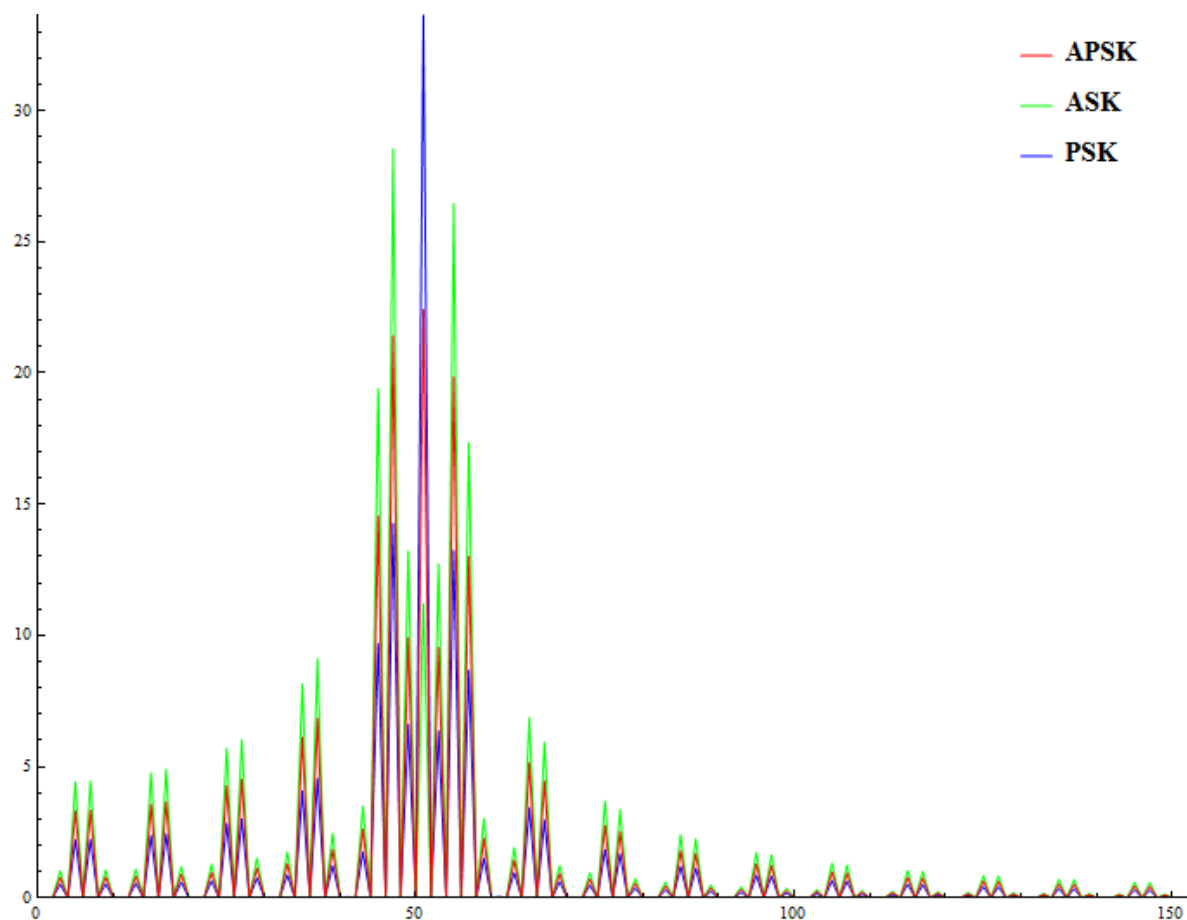
modulace APSK: $A_1 = 1$, $A_0 = 0.5$;

modulace ASK: $A_1 = 1$, $A_0 = 0$ (toto nastavení představuje modulaci OOK);

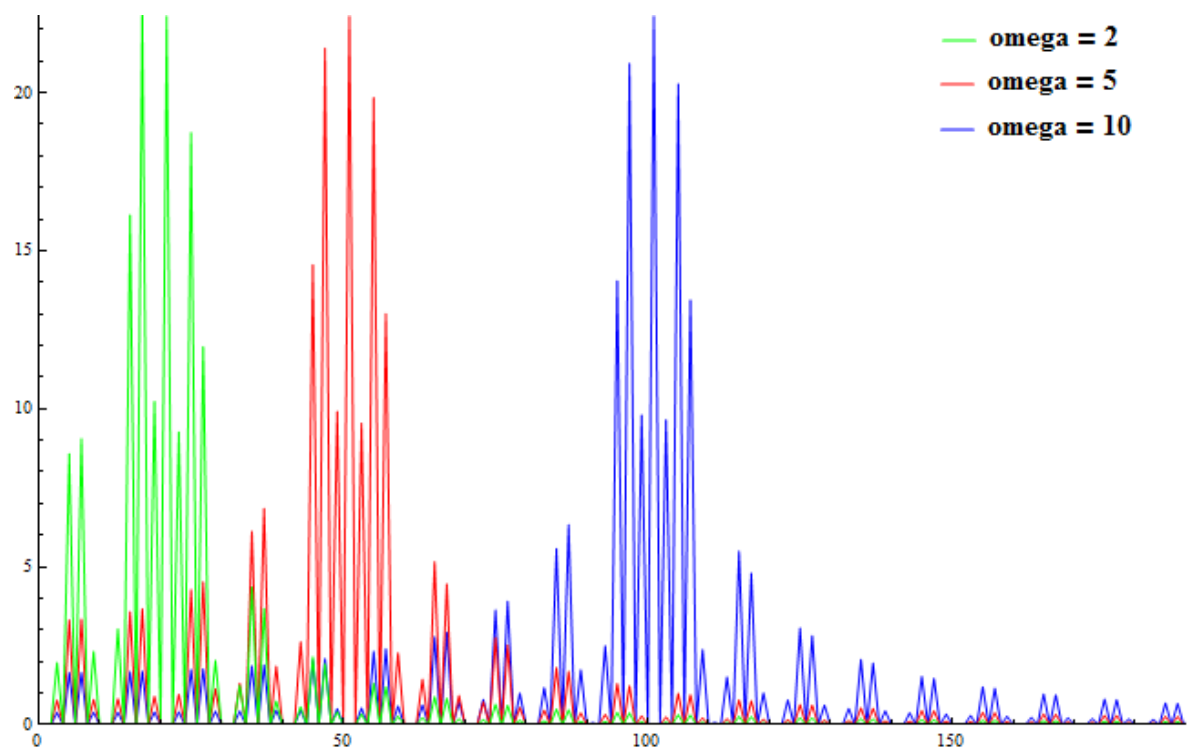
modulace PSK: $A_1 = 1$, $A_0 = 1$.

Z průběhu vidíme, že nejrychleji spektrum klesá u modulace PSK a nejpomaleji u modulace ASK.

Na obrázku Obr. 33 vidíme vliv nastavení parametru ω na výsledné spektrum. Čím je hodnota ω vyšší, tím se nám spektrum rozšiřuje a posouvá se blíže ke středu osy.



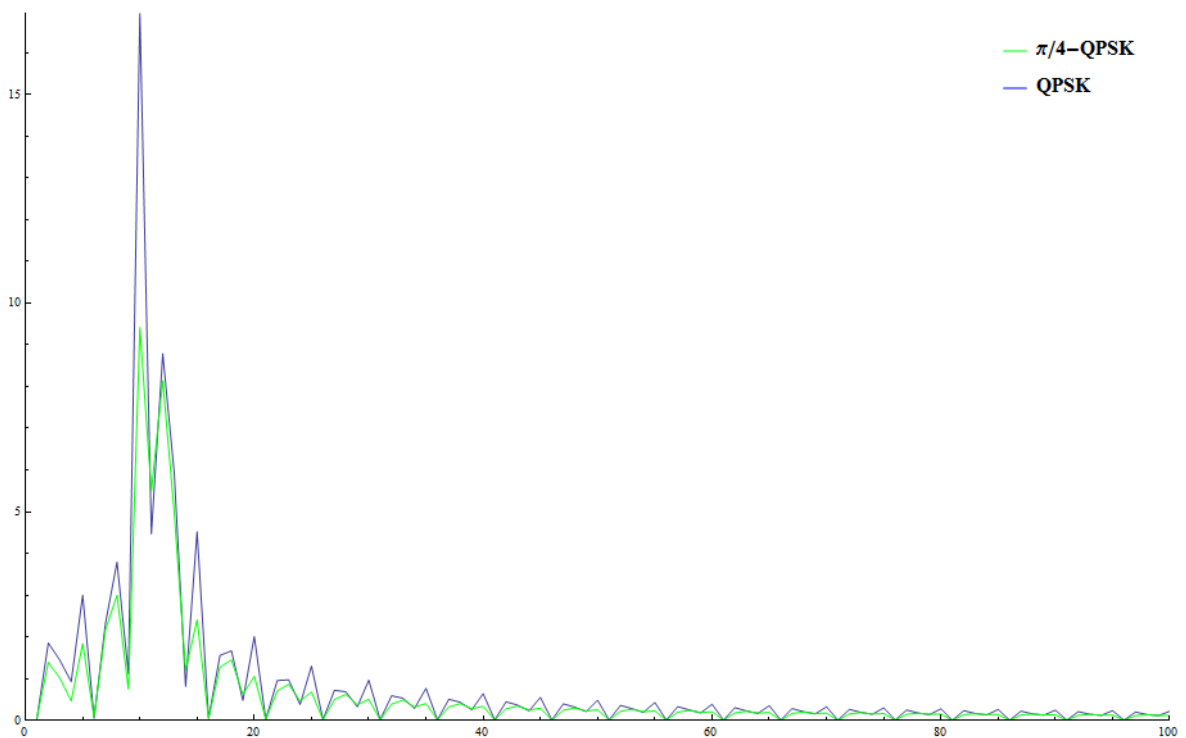
Obr. 32 Spektrum modulace APSK, ASK, PSK



Obr. 33 Vliv parametru omega na spektrum

6.2 $\pi/4$ -QPSK

Modulace $\pi/4$ -QPSK využívá dvojitého konstelačního diagramu, vzájemně pootočeného o $\pi/4$ radiánů. To znamená, že maximální změna fáze je oproti QPSK o 45° menší, tedy 135° . Tím dosáhneme nižšího kolísání amplitudy. To je vidět i na obrázku Obr. 34, při porovnání těchto dvou modulací, při stejných zadaných parametrech.



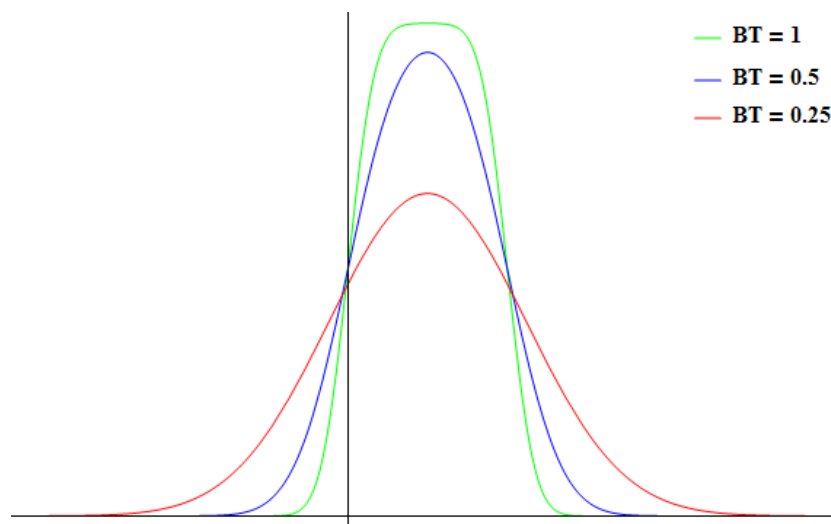
Obr. 34 Spektrum modulace QPSK a $\pi/4$ -QPSK

Jde o nejvýznamnější kategorii modulací PSK, protože má optimální poměr mezi spektrální a výkonovou účinností.

V porovnání s BPSK je bitová chybovost stejná. Avšak bitová rychlost je dvojnásobná při stejném vysokofrekvenčním pásmu, tudíž je dvojnásobná i spektrální účinnost. [7, s. 236]

6.3 GMSK

Základními parametry modulace jsou: B – šířka pásma Gaussova filtru pro pokles o 3dB a T – bitová perioda modulačního signálu. Součinem B a T získáme relativní šířku pásma. Hodnota tohoto součinu ovlivňuje tvar impulzu po průchodu Gaussovým filtrem, tudíž i výsledné vlastnosti signálu. Odezvy impulzů jsou zobrazeny na obrázku Obr. 35. Z obrázku je patrné, že čím je hodnota součinu menší, tím je i menší amplituda, ale roste čas odezvy. U GMSK modulace se používají hodnoty součinu z intervalu od 0 d 1. U modulace MSK má tento parametr hodnotu nekonečno tzn., že impulzy jsou pravoúhlé.



Obr. 35 Gaussova křivka v závislosti na parametru BT

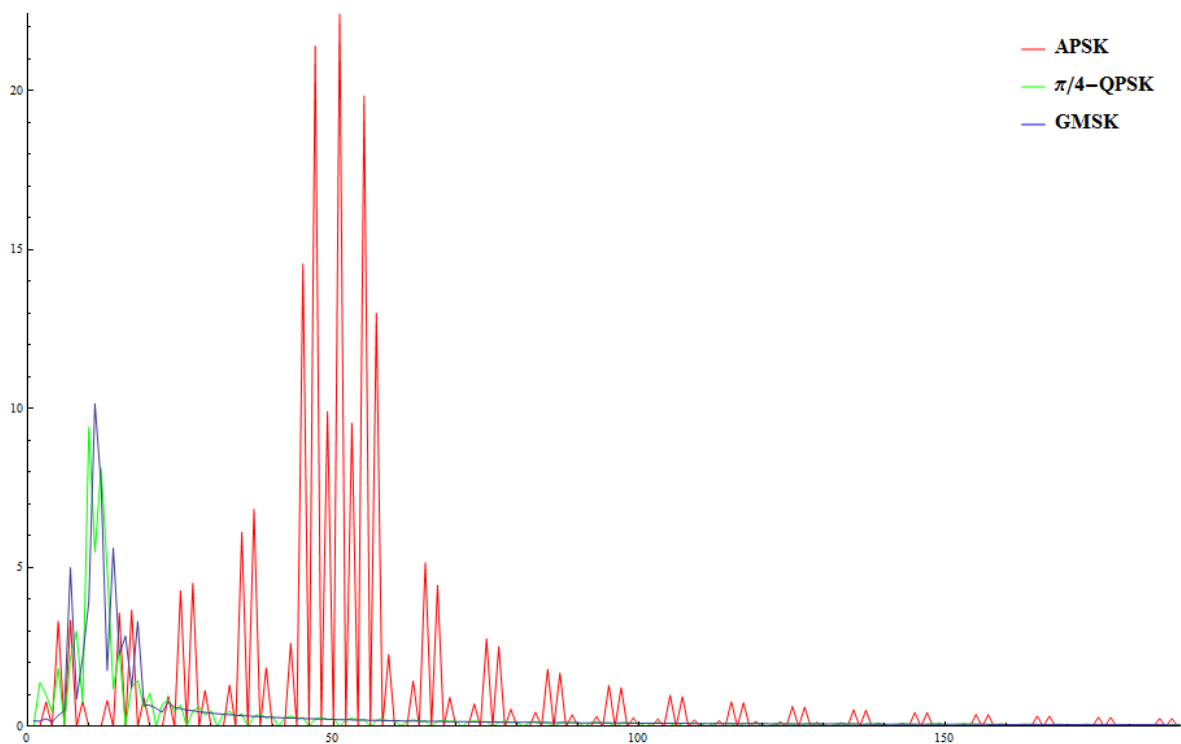
Nejvýhodnější by bylo, kdyby hodnota součinu byla co nejnižší, což by přineslo rychlejší klesání spektra. Na druhou stranu při nižší hodnotě součinu je delší časová odezva a může docházet k interferenci. Proto je nutné zvolit vhodný kompromis mezi parametrem B a T .

Spektrum na rozdíl od dvou předchozích modulací klesá rychleji a to z důvodu, že vstupní impulzy jsou zaobleny Gaussovým filtrem a změny fáze jsou spojitě.

6.4 Porovnání modulací

Na obrázku Obr. 36 jsou zobrazena spektra všech tří vybraných modulací. Spektra byla získána při stejně nastavených hodnotách pro všechny modulace.

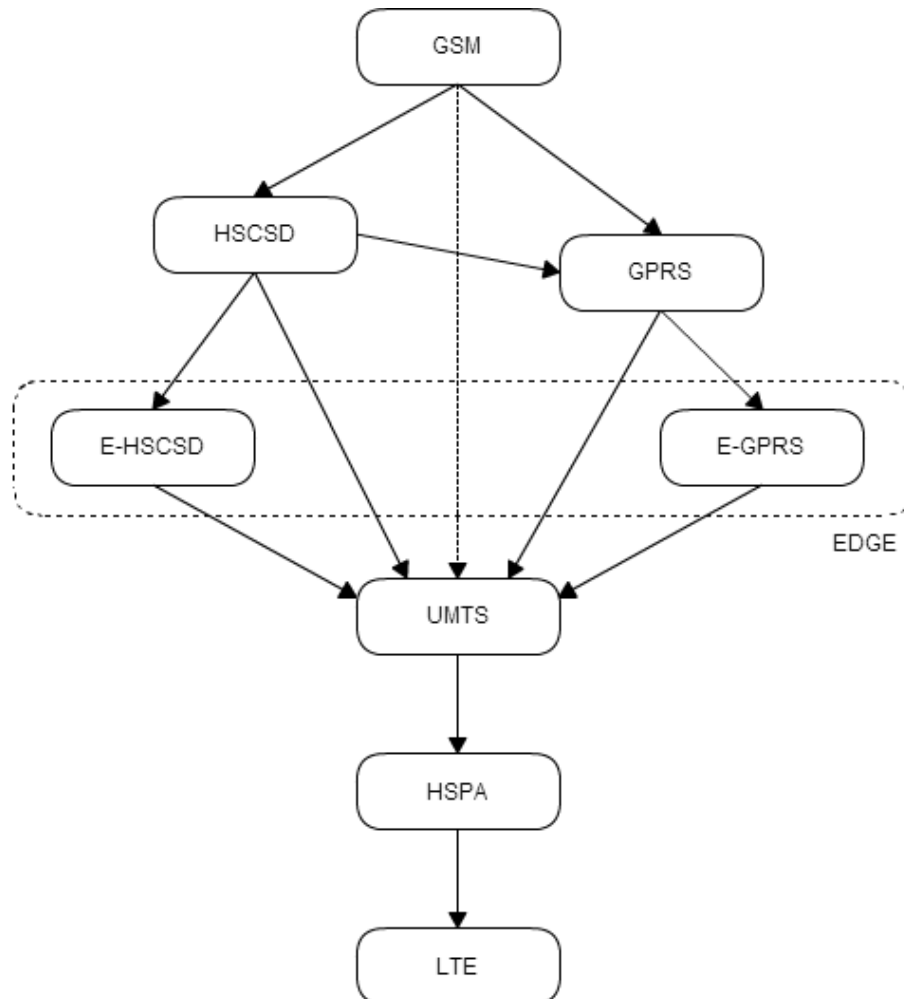
Na první pohled je zřejmé, že nejširší spektrum má modulace APSK. Modulace $\pi/4$ -QPSK a GMSK mají spektra podobná. Příznivěji však o trochu lépe vychází spektrum u GMSK modulace.



Obr. 36 Spektrum modulace APSK, $\pi/4$ -QPSK, GMSK

7 STANDARDY V TELEKOMUNIKACÍCH

V následující kapitole jsou popsány standardy používané v telekomunikacích. Na obrázku Obr. 37 je zobrazen digram postupného vývoje GSM.



Obr. 37 Vývoj GSM

7.1 HSCSD

HSCSD (High-Speed Circuit-Switched Data) je služba pro přenos dat s využitím přepojování okruhů (CSD). Právě z tohoto důvodu je služba nevýhodná a je používána velmi zřídka.

7.2 GPRS

GPRS (General Packet Radio Service) je služba pro přenos dat v sítích GSM. Využívá se přepojování paketů (PSD). Označuje se jako 2,5. generace mobilních telefonů. GPRS využívá čtyři kódová schémata, viz Tabulka 1. Výběr schématu závisí na odstupu signál/šum tak, aby přenos byl co nejefektivnější. Všechny modulační schémata využívají GMSK modulace.

Tabulka 1 – Kódové schéma GPRS [14]

Kódové schéma	Rychlost (kb/s/slot)	Modulace
CS-1	9,05	GMSK
CS-2	13,4	GMSK
CS-3	15,6	GMSK
CS-4	21,4	GMSK

7.3 EDGE

EDGE (Enhanced GPRS) je vylepšení služby GPRS a HSCSD, tedy EGPRS a ECSD. Slouží tedy pro přenos dat. Označuje se jako 2,75. generace mobilních telefonů. Podstata oproti původní verzi spočívá v použití osmistavové modulace 8-PSK. Je tedy možné přenášet tři bity pomocí jednoho symbolu.

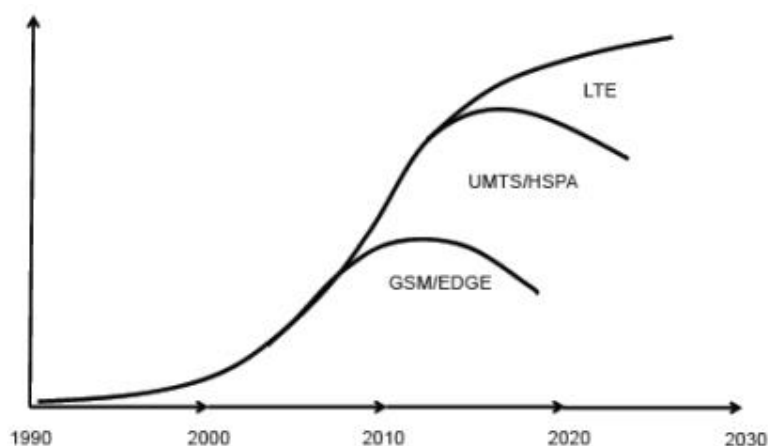
EDGE využívá 9 kódových schémat, viz Tabulka 2. První čtyři, stejně jako GPRS, využívají modulaci GMSK, ostatní pak modulaci 8-PSK.

Tabulka 2 – Kódové schéma EDGE [14]

Kódové schéma	Rychlost (kb/s/slot)	Modulace
MCS-1	8,8	GMSK
MCS-2	11,2	GMSK
MCS-3	14,8	GMSK
MCS-4	17,6	GMSK
MCS-5	22,4	8PSK
MCS-6	29,6	8PSK
MCS-7	44,8	8PSK
MCS-8	54,4	8PSK
MCS-9	59,2	8PSK

7.4 UMTS

UMTS (Universal Mobile Telecommunication System) představuje další vývojový stupeň GSM. Jedná se o 3. generaci. Zahrnuje pod sebe technologie HSPA a LTE. Ty jsou neustále ve vývoji a stále se objevují další verze. Na obrázku Obr. 38 si můžeme prohlédnout teoretický počet uživatelů těchto služeb v budoucnosti.



Obr. 38 Počet uživatelů GSM [15]

Pro oddělení uplinku a downlinku se používají dvě metody:

- FDD (Frequency Division Duplex) – uplink a downlink jsou vysílány na různých frekvencích,
- TDD (Time Division Duplex) – uplink a downlink jsou vysílány na stejné frekvenci, ale střídají se pomocí časových slotů.

7.5 HSPA

HSPA (High Speed Packet Access) sdružuje dva mobilní protokoly HSDPA a HSUPA. Jedná se o 3,5. generaci GSM. Rozšiřuje a upravuje 3. generaci. Je dostupný jak ve verzi FDD, tak i TDD. Podstatně zvyšuje původní rychlosti přenosu.

7.5.1 HSDPA

HSDPA (High-Speed Downlink Packet Access) je protokol pro přijímání paketů. Využívá modulace QPSK a vícestavové modulace QAM, viz Tabulka 3. HS-DSCH je nová transportní vrstva kanálu. Je implementována třemi novými fyzickými vrstevami. [16]

Tabulka 3 – Třídy HSDPA [16]

Třída	HS-DSCH kódů	Modulace	Rychlost [Mbit/s]
1	5	16-QAM	1,2
2	5	16-QAM	1,2
3	5	16-QAM	1,8
4	5	16-QAM	1,8
5	5	16-QAM	3,6
6	5	16-QAM	3,6
7	10	16-QAM	7,2
8	10	16-QAM	7,2
9	15	16-QAM	10,1
10	15	16-QAM	14
11	5	QPSK	0,9
12	5	QPSK	1,8
13	15	64-QAM	17,6
14	15	64-QAM	21,1
15	15	16-QAM	23,4
16	15	16-QAM	28
19	15	64-QAM	35,3
20	15	64-QAM	42,2
21	15	16-QAM	23,4
22	15	16-QAM	28
23	15	64-QAM	35,3
24	15	64-QAM	42,2
25	15	16-QAM	46,7
26	15	16-QAM	55,9
27	15	64-QAM	70,6
28	15	64-QAM	84,4
29	15	64-QAM	63,3
30	15	64-QAM	126,6
31	15	64-QAM	84,4
32	15	64-QAM	168,8
33	15	64-QAM	126,6
34	15	64-QAM	253,2

35	15	64-QAM	168,8
36	15	64-QAM	337,5

7.5.2 HSUPA

HSUPA (High-Speed Uplink Packet Access) je protokol pro odesílání paketů. Třídy a jejich jednotlivé rychlosti jsou popsány viz Tabulka 4.

Tabulka 4 – Třídy HSUPA [16]

Třída	Rychlost [Mbit/s]
1	0,73
2	1,46
3	1,46
4	2,93
5	2,00
6	5,76
7	11,5

7.6 LTE

LTE (Long-Term Evolution) je standard pro bezdrátovou komunikace vycházející ze všech předchozích standardů. Je označován jako 4. generace. Je založen na ortogonálním frekvenčním multiplexu OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex). Používá se modulací QPSK, 16QAM a 64QAM. Data jsou posílána duplexně v režimu TDD nebo FDD.

ZÁVĚR

Diplomová práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. Teoretická část se zabývá popisem od vzniku signálu až po jeho přenos komunikačním systémem. Hlavním tématem jsou digitální modulace. V kapitole 3 jsou postupně nadefinovány základní modulace (ASK, FSK a PSK) a následně modulace z nich vycházející. Jsou zde definice signálových prostorů i bodů. Dále jsou zobrazeny časové průběhy signálů a konstelační diagramy.

Cílem praktické části práce bylo vytvoření tutoriálů pro nejčastěji používané digitální modulace se zobrazením časového průběhu a spektra signálu. Z různých programů pro matematické výpočty, jsem si pro vypracování tutoriálů zvolil software Mathematica od společnosti Wolfram. Rozhodl jsem se tak na základě předchozích zkušeností s tímto programem. Pro vypracování jsme s vedoucím práce vybrali tyto tři modulace: APSK, $\pi/4$ -QPSK a GMSK.

Každá modulace je vypracována zvlášť v jednotlivém notebooku. Notebook umožňuje nastavovat řadu parametrů a hodnot, jako jsou například amplituda, perioda, počet vzorků při vzorkování apod. Vstupní bity je možno zadávat ručně, nebo je nechat náhodně generovat ve zvoleném počtu. Po výpočtu se zobrazí grafy časového průběhu a spektra signálu.

Notebooky jsou umístěny na příloženém CD. Jsou zde uloženy ve dvou verzích. Klasicky jako notebook (přípona *.nb), kde je možno prohlížet i spouštět kód a ve formátu CDF (přípona *.cdf), kde je možno notebook jen prohlížet.

Vypracované notebooky je možno použít jako učební pomůcku v předmětu Digitální komunikace, kde se mimo jiné probírá i téma digitálních modulací.

ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ

The master thesis is divided into theoretical part and practical part. The theoretical part deals with the description of the signal from his creation to transmission through the communication system. The main topic is digital modulation. In chapter 3 are gradually defined the basic modulations (ASK, FSK and PSK) and then composed modulations based on the basic modulations. There are definitions of signal areas and signal points and also there are displayed timing diagrams and constellation diagrams.

The aim of the practical part of this work was to create tutorials for the most commonly used digital modulation with show of the timing diagram and frequency spectrum of the signal. I have chosen to develop tutorials in software Mathematica by company Wolfram from many other programs for mathematical calculations. My decision was based on previous experience with this software. I and my supervisor have chosen these three modulations: APSK, $\pi/4$ -QPSK and GMSK.

Each modulation is created in a single notebook. Notebooks allow setting many parameters and values such as amplitude, period, number of samples, etc. The input bits may be entered manually or it is possible to choose randomly generated input. After calculating are displayed timing diagrams and signal spectrum.

Notebooks are saved on the enclosed CD. They are stored in two versions. The first version is classic notebook (suffix *.exe) where it is possible to view and execute the code. The second version is CDF format (suffix *.cdf) where it is possible only to view the notebook.

Notebooks may be used as a teaching aid for the subject “Digital communications”. There is among other things discussed the topic of digital modulations.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] PRCHAL, Josef. Digitální zpracování signálů v telekomunikacích. 1. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000, 222 s. ISBN 80-010-2149-1.
- [2] MACHALA, Libor. Teorie signálů a informace 1 [online]. [cit. 2013-05-16]. Dostupné z: <http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/texty/tsii1.pdf>
- [3] HANUS, Stanislav. Bezdrátové a mobilní komunikace. 1. vyd. Brno: VUT, 2001, 134 s. ISBN 80-214-1833-8.
- [4] SÝKORA, Jan. Teorie digitální komunikace. 1. vyd. Praha: ČVUT, 2005, 329 s. ISBN 80-010-2478-4.
- [5] HRDINA, Zdeněk a František VEJRAŽKA. Digitální radiová komunikace. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1994, 256 s. ISBN 80-010-1059-7.
- [6] Phase-shift keying. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2013-05-16]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Phase-shift_keying
- [7] DOBEŠ, Josef a Václav ŽALUD. Moderní radiotechnika. 1. vyd. Praha, 2006, 767 s. ISBN 80-730-0132-2.
- [8] CHRAMCOV, Bronislav. Základy práce v prostředí Mathematica. Vyd. 1. Ve Zlíně: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2005, 122 s. ISBN 80-731-8268-8.
- [9] Logo Wolfram Mathematica [online]. [cit. 2013-05-16]. Dostupné z: <http://www.wolfram.com/mathematica/>
- [10] XIONG, Fuqin. Digital modulation techniques. Boston: Artech House, 2000, xv, 653 s. ISBN 08-900-6970-0.
- [11] MCCUNE, Earl. Practical digital wireless signals. New York: Cambridge University Press, c2010, xxvi, 407 p. Cambridge RF and microwave engineering series. ISBN 05-215-1630-7.
- [12] MUQAIBEL, Ali. CPFSK & CPFSK [online]. [cit. 2013-05-16]. Dostupné z: [http://faculty.kfupm.edu.sa/EE/muqaibel/Courses/EE571%20Digital%20Communications%20I/notes/Digital%20Modulation%20Schemes/Continuous-Phase%20Frequency-Shift%20Keying%20\(CPFSK\).pdf](http://faculty.kfupm.edu.sa/EE/muqaibel/Courses/EE571%20Digital%20Communications%20I/notes/Digital%20Modulation%20Schemes/Continuous-Phase%20Frequency-Shift%20Keying%20(CPFSK).pdf)
- [13] GSM Physical Layer Modulation. [online]. [cit. 2013-05-16]. Dostupné z: <http://www.azizi.ca/gsm/modulation/index.html>

- [14] Enhanced Data Rates for GSM Evolution. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2013-05-20]. Dostupné z:
http://en.wikipedia.org/wiki/Enhanced_Data_Rates_for_GSM_Evolution
- [15] HSPA & LTE Advancements. [online]. [cit. 2013-05-20]. Dostupné z:
<http://www.gsma.com/spectrum/wp-content/uploads/2012/03/hspalteenancementsgsmaperfeb2012final.pdf>
- [16] High Speed Packet Access. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2013-05-27]. Dostupné z:
http://en.wikipedia.org/wiki/High_Speed_Packet_Access
- [17] HOFFNER, Václav. Úvod do teorie signálů. 1. vyd. Praha: SNTL, 1979, 451 s.
- [18] KOCOUREK, Petr. Přenos informace. 1. vyd. Praha: ČVUT Praha, 2004, 164 s. ISBN 80-010-2892-5.
- [19] JANSEN, Horst a Heinrich RÖTTER. Informační a telekomunikační technika. Vyd. 1. Praha: Europa-Sobotáles, 2004, 399 s. ISBN 80-867-0608-7.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

APSK	Amplitude and Phase-shift keying
ASK	Amplitude Shift Keying
BER	Bit Error Rate
BPSK	Binary Phase Shift Keying
CD	Compact Discs
CPFSK	Continuous-Phase Frequency Shift Keying
CPM	Continuous Phase Modulation
CSD	Circuit Switched Data
DBPSK	Differential Binary Phase Shift Keying
DQPSK	Differential Quadrature Phase Shift Keying
DVB-S2	Digital Video Broadcasting - Satellite - Second Generation
ECSD	Enhanced Circuit Switched Data
EGPRS	Enhanced General Packet Radio Service
EKG	Elektrokardiogram
FDD	Frequency Division Duplex
FSK	Frequency Shift Keying
GLPF	Gaussian Low Pass Filter
GSM	Global System for Mobile Communications
GMSK	Gaussian Minimum Shift Keying
GPRS	General Packet Radio Service
HSCSD	High-Speed Circuit-Switched Data
HSDPA	High-Speed Downlink Packet Access
HSPA	High Speed Packet Access
HSUPA	High-Speed Uplink Packet Access

HTML	HyperText Markup Language
IrDA	Infrared Data Association
LTE	Long-Term Evolution
M-ASK	M-ary Amplitude Shift Keying
M-FSK	M-ary Frequency Shift Keying
M-PSK	M-ary Phase Shift Keying
MSK	Minimum Shift Keying
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplex
OOK	On-off keying
PDF	Portable Document Format
PSD	Packet Switched Data
PSK	Phase Shift Keying
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RFID	Radio Frequency Identification
TDD	Time Division Duplex
TDMA	Time division multiple access
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
Wi-Fi	Wireless Fidelity

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Spojitý signál (funkce sinus)	11
Obr. 2 Diskrétní signál (vzorkovaná funkce sinus)	12
Obr. 3 Blokové schéma radiokomunikačního systému [3, s. 14]	13
Obr. 4 Digitální modulátor [4, s. 38]	15
Obr. 5 Přehled digitálních modulací [7, s. 220].....	16
Obr. 6 Porovnání bitové chybovosti BER u vybraných modulací [6]	18
Obr. 7 Časový průběh modulace ASK (OOK)	19
Obr. 8 Konstelační diagram modulace a) OOK, b) 2ASK, c) 4ASK, d) 8ASK.....	20
Obr. 9 Časový průběh modulace FSK	21
Obr. 10 Rozložení signálových bodů FSK pro $M = 3$	21
Obr. 11 Časový průběh modulace PSK	22
Obr. 12 Konstelační diagram pro modulace BPSK, 4PSK, 8PSK	23
Obr. 13 Časový průběh modulace APSK	23
Obr. 14 Konstelační diagram modulace 8APSK a 16APSK	24
Obr. 15 Časový průběh modulace QPSK	25
Obr. 16 Konstelační diagram modulace QPSK	26
Obr. 17 Konstelační diagram modulace $\pi/4$ -QPSK.....	26
Obr. 18 Časový průběh modulace $\pi/4$ -QPSK.....	27
Obr. 19 Fázová mříž systému CPFSK [12]	29
Obr. 20 Konstelační diagram MSK	30
Obr. 21 Spektrum modulace MSK a GMSK [13]	31
Obr. 22 Odezva Gaussova filtru [13].....	31
Obr. 23 Logo Wolfram Mathematica 9 [9].....	33
Obr. 24 Ukázka prostředí Wolfram Mathematica 9	34
Obr. 25 Příklad vytvoření vlastní funkce v Mathematice	36
Obr. 26 Notebook APSK modulace.....	38
Obr. 27 Ovládání notebooku APSK	39
Obr. 28 Notebook $\pi/4$ -QPSK modulace	41
Obr. 29 Ovládání notebooku $\pi/4$ -QPSK.....	42
Obr. 30 Notebook GMSK modulace	44
Obr. 31 Ovládání notebooku GMSK	45
Obr. 32 Spektrum modulace APSK, ASK, PSK.....	47

Obr. 33 Vliv parametru omega na spektrum.....	47
Obr. 34 Spektrum modulace QPSK a $\pi/4$ -QPSK	48
Obr. 35 Gaussova křivka v závislosti na parametru BT	49
Obr. 36 Spektrum modulace APSK, $\pi/4$ -QPSK, GMSK.....	50
Obr. 37 Vývoj GSM.....	51
Obr. 38 Počet uživatelů GSM [15]	53

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 – Kódové schéma GPRS [14]	52
Tabulka 2 – Kódové schéma EDGE [14]	52
Tabulka 3 – Třídy HSDPA [16].....	54
Tabulka 4 – Třídy HSUPA [16].....	55

SEZNAM PŘÍLOH

CD s notebooky jednotlivých modulací