

UNIVERZITA PARDUBICE

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Pracoviště pro měření na I/Q modulátoru a
demodulátoru

Pavel Klápa

Bakalářská práce

2013

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Pavel Klápa**
Osobní číslo: **I09025**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komunikační a mikroprocesorová technika**
Název tématu: **Pracoviště pro měření na I/Q modulátoru a demodulátoru**
Zadávající katedra: **Katedra elektrotechniky**

Zásady pro vypracování:

Zabývejte se základními typy digitálních modulací BPSK a QPSK a jejich modelováním.
Seznamte se s moderními obvody, jež se pro modulaci a demodulaci používají (kvadraturní modulátor a demodulátor, oscilátor (syntezátor), VF zesilovač).
Vytvořte model digitální modulace a demodulace BPSK a QPSK.
Zprovozněte pracoviště pro ověření modelu IQ modulací a demodulací.
Ověřte měření model na zprovozněném pracovišti.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Glover, I.A., Grant, P.M., Digital Communication, 3.rd edition, Prentice Hall, 2009
2. Proakis, J.G., Manolakis, D.G., Digital Signal Processing, 4 th edition, Prentice Hall, 2007
3. Sýkora, J. Teorie digitální komunikace, ČVUT, Praha, 2003
4. Dobeš, J., Žalud, V., Moderní Radiotechnika, BEN, 2006

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Marek Pola

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Datum odevzdání bakalářské práce:

21. prosince 2012

Termín odevzdání bakalářské práce:

10. května 2013



prof. Ing. Zdeněk Keránský, Dr.
děkan



I.S.



Ing. Zdeněk Štárek, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 29. března 2013.

Prohlášení autora

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 10.5.2013

Pavel Klápa

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval panu Ing. Marku Polovi za odborné vedení a cenné rady při vedení mé bakalářské práce a katedře elektrotechniky za poskytnutí prostoru a potřebného vybavení pro její realizaci. Dále děkuji své rodině a přátelům za podporu během studia.

Anotace

Předmětem práce je zprovoznění reálného pracoviště pro měření IQ modulací na modulátoru a demodulátoru. V teoretické části jsou popsány základní druhy modulací a potřebné komponenty. Dále je v simulačním prostředí vytvořen model celého procesu modulace a demodulace. V praktické části práce je nejdříve navrženo schéma pracoviště a popsány jeho reálné moduly. Nakonec se práce věnuje naměřeným výsledkům měření a jejich porovnáváním s modelem.

Klíčová slova

Modulace, BPSK, QPSK, modulátor, demodulátor

Title

Workplace for measuring I/Q on modulator and demodulator

Annotation

The aim of the work is to launch a modulator and demodulator for measuring IQ modulation at the workplace. Theoretical part describes the basic types of modulation and its necessary components. In a simulation part, a model is designed to demonstrate the process of modulation and demodulation. In the practical part, firstly, a work scheme is proposed and its real modules are described. Finally, all the results of measurements are compared to a module.

Keywords

Modulation, BPSK, QPSK, modulator, demodulator

Obsah

Seznam zkratk.....	8
Seznam obrázků.....	9
Úvod	11
1 Modulace	12
1.1 Rozdělení.....	12
1.2 Digitální modulace	13
1.3 IQ složky, konstelační digram	16
1.4 BPSK,QPSK.....	17
2 Teoretický popis použitých obvodů	19
2.1 Modulátory	19
2.2 Modulátory BPSK	19
2.3 Modulátory QPSK	20
2.4 Demodulátory BPSK	21
2.5 Demodulátory QPSK.....	22
2.6 Směšovače	22
3 Model BPSK a QPSK.....	23
3.1 BPSK	23
3.2 QPSK.....	25
4 Popis použitých komponent pro laboratorní pracoviště.....	27
4.1 ADL5373	27
4.2 ADL5382	27
4.3 Rohde&Schwarz SM300	28
4.4 Rohde&Schwarz SMB100A.....	28
4.5 Agilent 33220a	29
4.6 Syntezátor ADF 4360	30
4.7 Rozdílový zesilovač.....	32
5 Pracoviště pro měření IQ modulací na modulátoru a demodulátoru	33
5.1 Schéma zapojení pracoviště.....	33
5.2 Schéma zapojení pracoviště pro ověření funkčnosti modulátoru ADL5373.....	35
5.3 Schéma zapojení pracoviště s modulátorem Rohde&Schwarz SM300.....	40

Závěr	45
Literatura	46
Přílohy	47

Seznam zkratek

BPSK	Binary Phase Shift Keying
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
AM	Amplitude Modulation
PM	Phase Modulation
FM	Frequency Modulation
ASK	Amplitude Shift Keying
FSK	Frequency Shift Keying
PSK	Phase Shift Keying
ASK OOF	Amplitude Shift Keying On-Off Keying
BER	Bit Error Rate
PCM	Pulse-code Modulation
PCM-NRZ	Pulse-code Modulation Non Return To Zero
AM DSB-SC	Amplitude Modulation Dual Side Band Spressed Carrier
S&H	Sample And Hold
SMD	Surfaře Mount Device
SMA	SubMiniature version A
LO	Local oscillator
V_{pp}	Amplituda Peak-Peak

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Princip modulace	12
Obrázek 2 - Základní rozdělení modulací	13
Obrázek 3 - Princip ASK OOK	14
Obrázek 4 - ASK On-Off Keying.....	14
Obrázek 5 - Princip FSK	15
Obrázek 6 - FSK.....	15
Obrázek 7 - Princip PSK	16
Obrázek 8 - PSK.....	16
Obrázek 9 - Rozložení stavů 8PSK v IQ rovině.....	17
Obrázek 10 - Rozložení stavů BPSK v IQ rovině	18
Obrázek 11 - Rozložení stavů QPSK v IQ rovině	19
Obrázek 12 - Modulátor BPSK	20
Obrázek 13 - Modulátor QPSK	21
Obrázek 14 - Demodulátor BPSK	22
Obrázek 15 - Demodulátor QPSK.....	22
Obrázek 16 - Model M-PSK.....	23
Obrázek 17 - Oscilogram BPSK.....	24
Obrázek 18 - Detail změny fázového posuvu BPSK.....	24
Obrázek 19 - Spektrum BPSK.....	25
Obrázek 20 - Detail přechodu QPSK	26
Obrázek 21 - Spektrum QPSK	26
Obrázek 22 - ADL5373 a jeho blokové schéma.....	27
Obrázek 23 - ADL5382 a jeho blokové schéma.....	28
Obrázek 24 - Rohde&Schwarz SM300	28
Obrázek 25 - Rohde&Schwarz SMB 100A.....	29
Obrázek 26 - Agilent 33220a.....	29
Obrázek 27 - Ovládací software I.Q. Signal generator.....	30
Obrázek 28 - Syntezátor ADF 4360	30
Obrázek 29 - Ovládací software pro ADF4360.....	31
Obrázek 30 - Spektrum nosné vlny	31
Obrázek 31 - Schéma zapojení a návrh plošného spoje rozdílového zesilovače.....	32
Obrázek 32 - Rozdílový zesilovač.....	32
Obrázek 33 - Původní schéma zapojení s ADL5373.....	34
Obrázek 34 - Schéma s ADL5373	35
Obrázek 35 - IQ složky BPSK.....	36
Obrázek 36 - Spektrum modulovaného signálu BPSK s ADL5373.....	36
Obrázek 37 - IQ data po demodulaci BPSK.....	37
Obrázek 38 - IQ složky QPSK	38

Obrázek 39 - Spektrum QPSK s ADL5373	38
Obrázek 40 - IQ složky po demodulaci QPSK.....	39
Obrázek 41 - Pracoviště s modulátorem ADL5373	39
Obrázek 42 - Schéma zapojení s SM300.....	40
Obrázek 43 - IQ složky BPSK.....	41
Obrázek 44 - Spektrum BPSK s SM300	41
Obrázek 45 - IQ složky po demodulaci	42
Obrázek 46 - IQ složky QPSK	43
Obrázek 47 - Spektrum QPSK s SM300	43
Obrázek 48 - IQ složky po demodulaci	44
Obrázek 49 - Pracoviště s modulátorem R&S SM300	44

Úvod

Předmětem této bakalářské práce je realizace pracoviště pro měření IQ modulací na modulátoru a demodulátoru. Pracoviště bude sloužit studentům k názorné ukázce řešení problematiky digitálních modulací a tudíž k jejich lepšímu porozumění.

V teoretické části této práce je všeobecné seznámení s pojmem modulace. Je vysvětleno, proč a jak se vlastně signály modulují. Dále je rozebráno základní rozdělení modulací, které se pro přenos informace používají. Další část je věnována digitálním modulacím, konkrétně těm dvojjstavovým, které se nazývají klíčování. Jsou popsány principy a názorně ukázány tři základní techniky klíčování. Pro znázornění digitálních modulací se používá IQ rovina, jejíž popsání a příkladné ukázce se věnuje další část. Jelikož se tato práce věnuje výhradně modulacím BPSK a QPSK, jsou v následující podkapitole podrobně rozebrány a popsány základními rovnicemi. Větší prostor bude věnován teoretickému popisu příslušných komponent nezbytných pro realizaci procesu modulace a demulace, např. BPSK modulátor a demodulátor, QPSK modulátor a demodulátor, směšovač. Ve třetí kapitole je zobrazen a popsán model BPSK a QPSK modulace v simulačním prostředí Simulink. Princip jednotlivé modulace a její názorné ukázky v podobě oscilogramů jsou na konci popisu každé z nich. Dále tato práce pojednává o popisu reálných komponentů použitých pro realizaci měřicího pracoviště v laboratoři. Jednotlivé moduly jsou popsány v krátké podkapitole, kde je k dispozici blokové schéma a fotografie reálného zařízení.

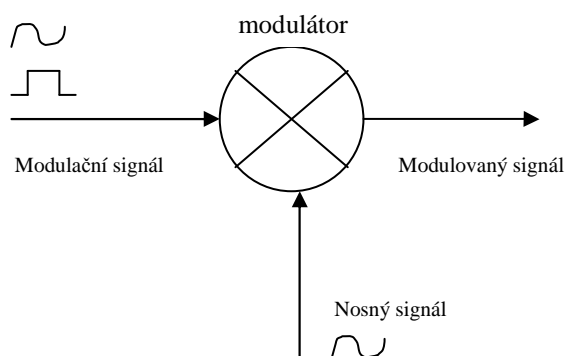
Cílem praktické části byla realizace a zprovoznění měřicího pracoviště pro měření IQ modulací na modulátoru a demodulátoru. Kapitola popisuje postupně tři různé pracoviště, které se od sebe liší použitými moduly. Nejprve je pojednáno o původní konfiguraci pracoviště, které se ovšem přes technické problémy nepodařilo zprovoznit. Nicméně bylo nahrazeno provizorním řešením, které mělo za účel potvrzení poruchy komponentu. Testování přenosu proběhlo nejprve pro modulátor ADL5373, na kterém je vyzkoušena BPSK a poté QPSK modulace. V podkapitole jsou také zobrazeny výsledné naměřené oscilogramy z použitých modulů pracoviště. Jako náhradní řešení tohoto problému bylo zvoleno nahrazení modulátoru ADL5373 vysokofrekvenčním signálovým generátorem Rohde&Schwarz SM300. Ovšem pro použití tohoto modulátoru bylo potřeba přestavět pracoviště a použít jiné komponenty. Realizace pracoviště je provedena přesně dle návrhů uvedených v jednotlivých podkapitolách. Testování proběhne nejprve pro modulaci BPSK a poté pro QPSK. Výsledné oscilogramy sejmuté přímo z konkrétních přístrojů se nacházejí na konci podkapitoly. U každého pracoviště je na fotografii zobrazen celkový náhled na realizované měřicí pracoviště v laboratorním prostředí.

1 Modulace

1.1 Rozdělení

Metod, jakým se přenáší informace z místa na místo, je mnoho. Každá z nich má své klady i zápory, a proto je důležité vybrat si pro svou aplikaci tu správnou. Jelikož základní myšlenkou modulace je přenesení nízkofrekvenčního signálu na vysokofrekvenční, bude testování přenosu informace prováděno ve vyšší části frekvenčního spektra. Přenos lze uskutečnit i v nízkofrekvenční oblasti, ale je potřeba metalického média (drátové dvojlinky nebo čtyřlinky, koaxiální spoje a v posledních letech také spoje optické).[1] Pro bezdrátový přenos informace je potřeba signál přeložit (namodulovat) na vysokofrekvenční nebo mikrovlnnou nosnou vlnu.

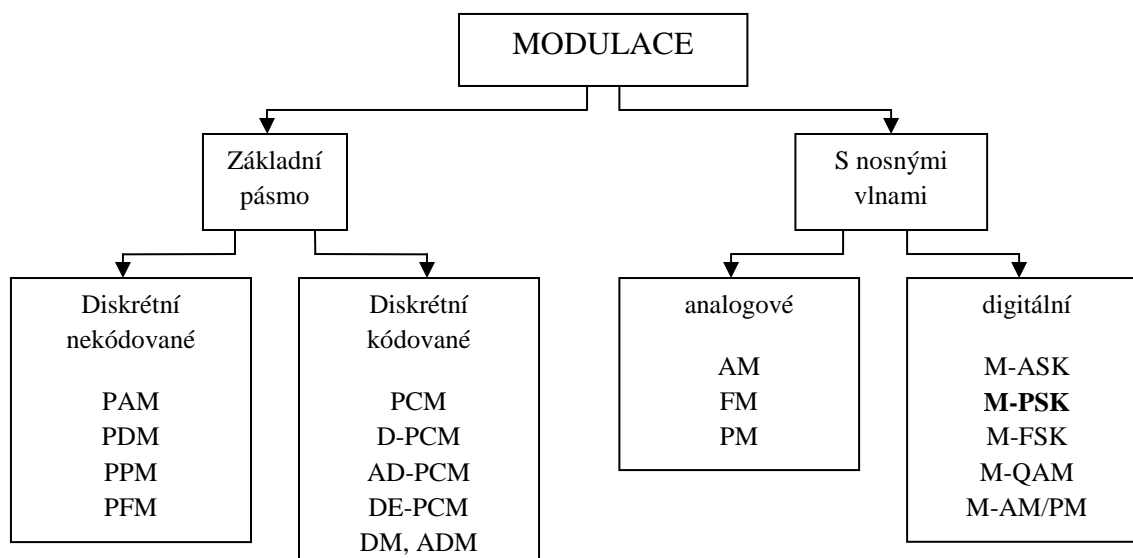
Tento děj probíhá v modulátoru. Proces pro obnovu vyslaných dat se nazývá demodulace a probíhá v demodulátoru. Princip modulace je znázorněn na níže uvedeném obrázku.



Obrázek 1 - Princip modulace

Užitečný signál nesoucí informaci může být analogový i diskretní a nazývá se modulační signál. V modulátoru, který musí obsahovat nelineární prvek, se modulační signál smíchá s vysokofrekvenčním nosným signálem. Výstupní signál se nazývá modulovaný signál.

Modulace je všeobecně brána jako ovlivňování určité vlastnosti subjektu jiným subjektem. Konkrétně jde o změnu určitého parametru nosné vlny v závislosti na hodnotě modulačního signálu. Na základě vlastností nosné vlny můžeme měnit hodnotu amplitudy, fáze a frekvence. Mění-li se amplituda, mluvíme o amplitudové modulaci AM. Pokud jde o změnu fáze, jde o fázovou modulaci PM. Změnu frekvence nazýváme frekvenční modulace FM.



Obrázek 2 - Základní rozdělení modulací [1]

Tato práce se věnuje zejména digitálním modulacím s nosnou vlnou a to variantou M-PSK.

1.2 Digitální modulace

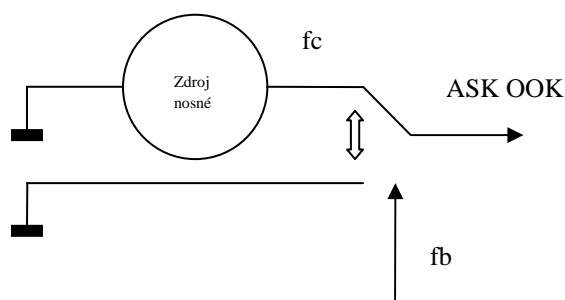
Přenosová média výrazně omezují rozsah přenášeného frekvenčního spektra a navíc nedokáží přenést stejnosměrnou složku. Jelikož digitální signál v základním pásmu stejnosměrnou složku obsahuje a zabírá tak velkou šířku přenášeného pásma, je potřeba použít vhodnou nosnou vlnu, která je dotyčným modulačním signálem modulována. Stejnosměrná složka se dá vhodným kódováním v základním pásmu potlačit.[2]

Oproti analogovým modulacím, kde se hodnota parametru nosné vlny měnila spojitě, u digitálních modulací nabývá hodnota parametru (amplituda, fáze, kmitočet) jen omezeného počtu stavů modulačního signálu. Výsledný modulovaný signál má vlastnosti nosné vlny, tedy je na vysoké frekvenci a jsou v něm zakódována data. Celý proces modulace probíhá nejčastěji tak, že datový tok modulačního signálu se vyjádří vhodným signálem, kterému se říká modulační impuls. Tento signál může nabývat dvou nebo více konečných stavů. Dále pak vstupuje do dalších modulačních obvodů. Počet konečných stavů modulačního signálu se rovná počtu konečných stavů vysílané nosné vlny. S digitálními modulacemi se setkáváme všude tam, kde je potřeba sdílet frekvenční prostředí, např. radiotechnika, přenos signálu metalickým médiem.[3]

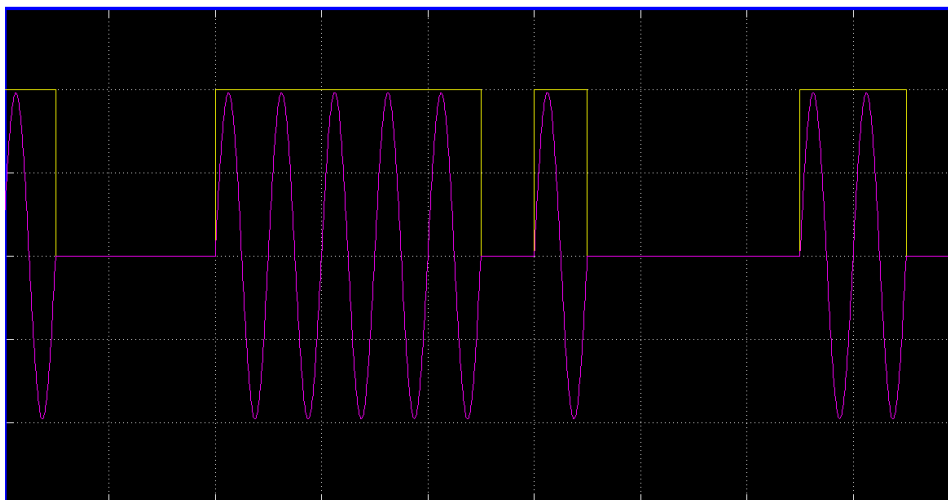
Nejjednodušší digitální modulační signál nabývá pouze dvou stavů (0 a 1). Tedy i jeden z parametrů nosné vlny nabývá jen těchto dvou hodnot. Tento dvojstavový způsob modulace se nazývá klíčování. Pokud binární modulační signál klíčuje amplitudu nosné vlny, jedná se o amplitudové klíčování. Jestliže se mění frekvence nosné vlny, jde o

frekvenční klíčování. U fázového klíčování se mění fáze. Všechny změny konkrétního parametru probíhají skokově.

Amplitude Shift Keying (ASK) – Na výstupu nosná vlna rozeznává pouze logickou „0“ tím, že hodnota amplitudy je nulová a logickou „1“ tím, že nosná vlna má určitou hodnotu amplitudy. Tato modulace nemá v této základní podobě využití, proto se kombinuje s vícestavovým kódováním. Modulace se pak nazývá pulsně-amplitudová modulace (PAM). Obrázek níže ukazuje reakci nosné vlny na bitovou posloupnost modulačního signálu. Zde jde o modulaci ASK OOK.

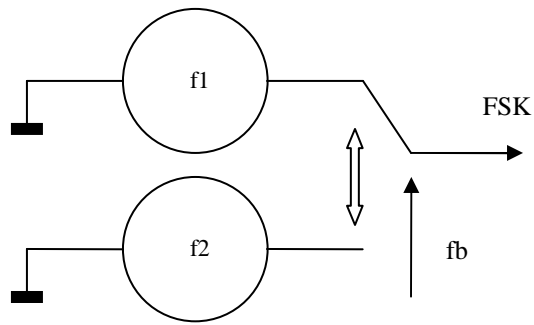


Obrázek 3 - Princip ASK OOK

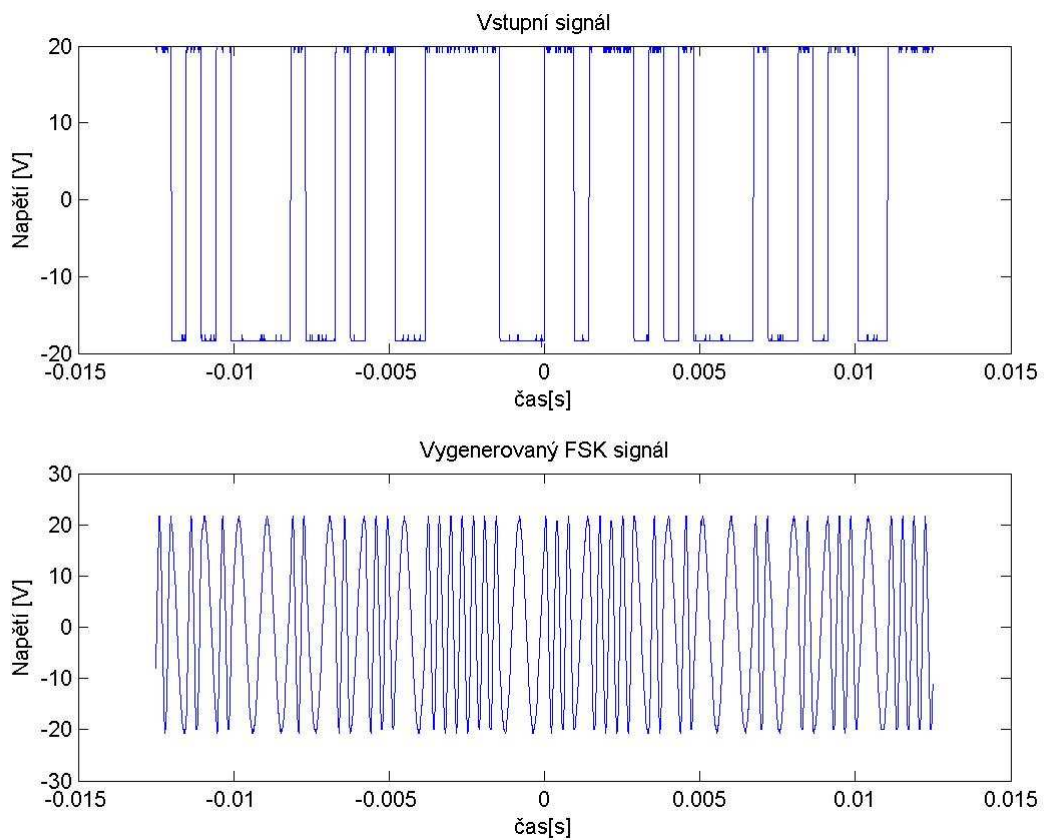


Obrázek 4 - ASK On-Off Keying

Frequency Shift Keying (FSK) – Na výstupu nabývá frekvence nosné vlny dvou odlišných hodnot. Principiálně funguje tak, že jsou v obvodu dva oscilátory o frekvenci f_1 a f_2 , mezi kterými se dle hodnoty modulačního signálu přepíná, a způsobují tak změnu frekvence nosné vlny. Podle návaznosti na změnu frekvence se dělí na dvě skupiny. Plynulý přechod se nazývá koherentní, skokový nekoherentní.

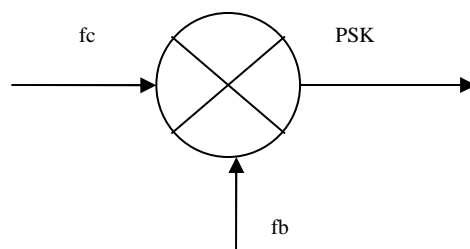


Obrázek 5 - Princip FSK



Obrázek 6 - FSK

Phase Shift Keying (PSK) – Tato modulace je založena na fázovém posuvu (zdvihu) mezi dvěma odlišnými stavy. Např. při stavu „1“ modulačního signálu je fázový posuv π a při stavu „0“ je fázový posuv nulový. Velmi často bývá označována jako 2PSK, nebo BPSK.



Obrázek 7 - Princip PSK



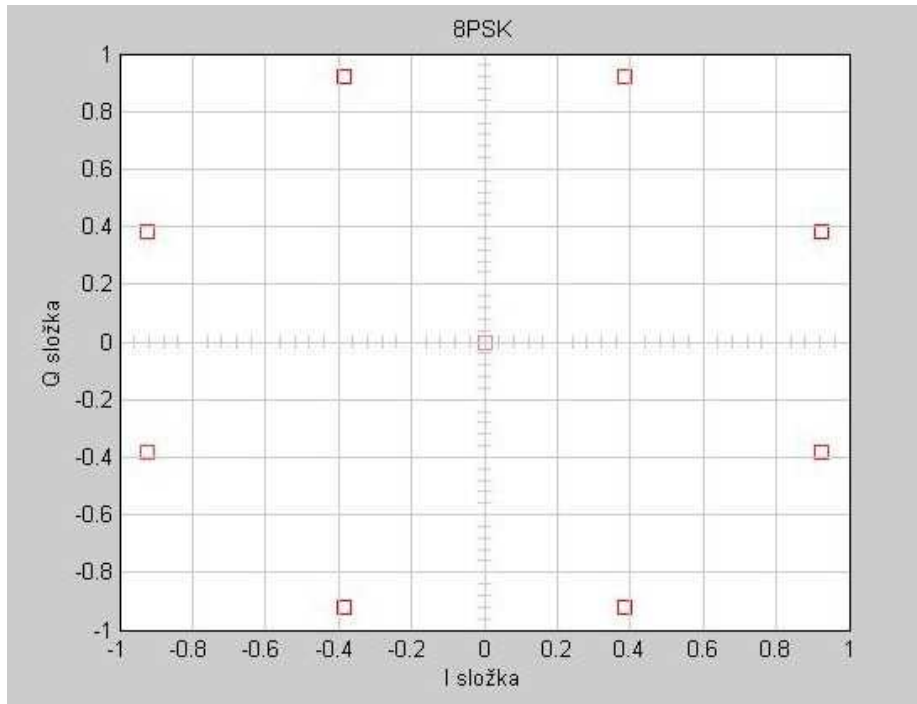
Obrázek 8 - PSK

Všechny tyto typy modulací mají ve své základní podobě velmi vysokou odolnost proti rušení, avšak mají nízkou spektrální účinnost. Z tohoto důvodu se používají vícecestavové modulace.

1.3 IQ složky, konstelační diagram

Pro grafické znázornění digitálních modulací se využívá rovina IQ. Kde I (In-phase) vyjadřuje synfázní složku a Q (Quadrature phase) představuje kvadrurní složku pootočenou o 90° vůči složce synfázní. Tato rovina se nazývá konstelační neboli stavový diagram, do kterého se zakreslují vektory odpovídající jednotlivým stavům nosné vlny. Do diagramů se ovšem zakresluje pouze jejich koncový bod. Pokud se plynule zakresluje výslednice přechodu z jednoho stavu do druhého, vznikají tak vektorové diagramy. Jednotlivé fáze signálu lze rozložit do složek kosinus (I) a složek sinus (Q). Modulovaný signál lze pak zapsat následujícím způsobem:

$$f(t) = I \cos(\omega ct) + Q \sin(\omega ct). \quad (1.3.1)$$



Obrázek 9 - Rozložení stavů 8PSK v IQ rovině

1.4 BPSK, QPSK

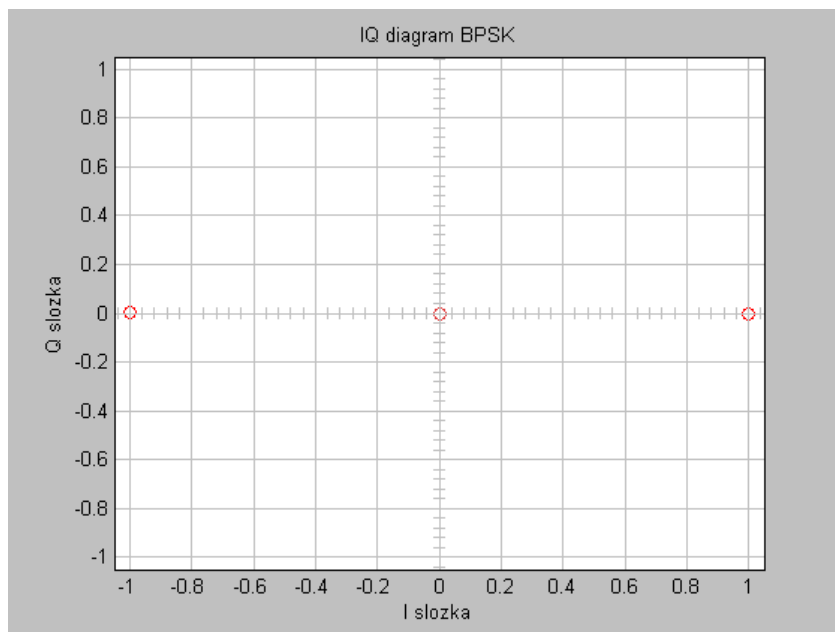
Binary Phase Shift Keying (BPSK) – Základní dvojstavová digitální modulace založená na změně fáze nosné vlny při změně stavu vstupního modulačního signálu, přičemž amplituda zůstává konstantní. Rozložení stavů při posunu o π v IQ rovině je znázorněn na obrázku 8 výše. Hodnota posunutí fáze je libovolná, nejčastěji bývá π , nebo $\pi/2$. Tyto dva stavy nosné vlny lze při pravoúhlých modulačních impulzech o době trvání T_b popsat těmito rovnicemi.

$$S_{bpsk}(t) = \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos(2\pi f_c t), \text{ pro } 0 \leq t \leq T_b \text{ (binární 1)} \quad (1.4.1)$$

$$S_{bpsk}(t) = -\sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos(2\pi f_c t), \text{ pro } 0 \leq t \leq T_b \text{ (binární 0)} \quad (1.4.2)$$

kde $\sqrt{2 * E_b / T_b}$ - je amplituda modulovaného signálu,
 E_b – střední energie modulovaného signálu na jeden bit,
 T_b – perioda jednoho bitu,
 f_c – frekvence nosné vlny[1]

Tím, že nabývá pouze dvou hodnot, je velmi odolná proti rušení, má nízkou chybovost BER a nároky na demodulátor nejsou vysoké. Oproti těmto nesporným výhodám má však velmi nízkou spektrální účinnost a je poměrně náročná na šířku přenášeného pásma.



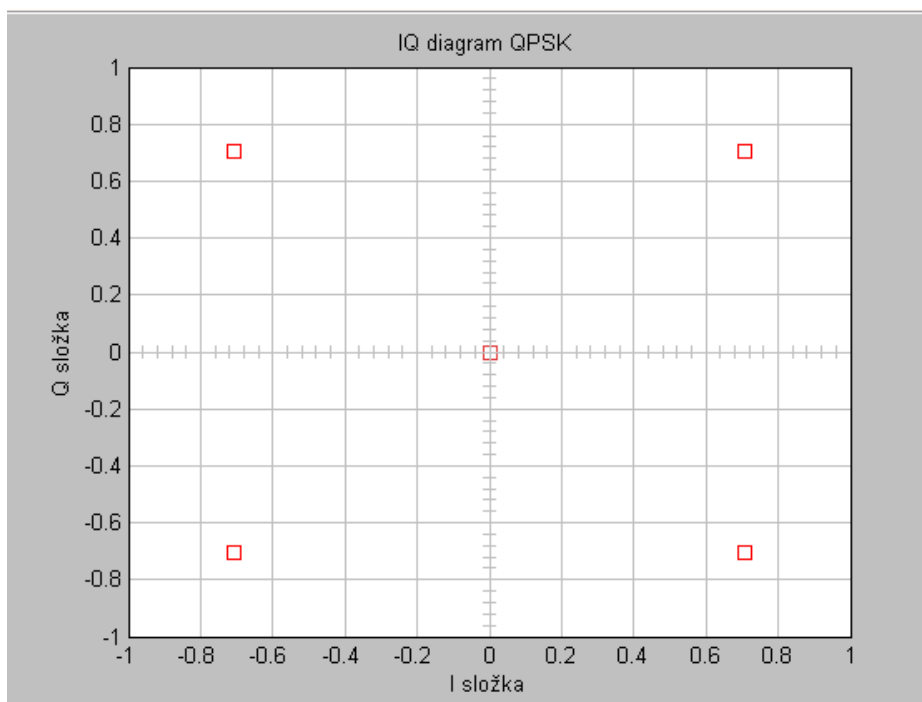
Obrázek 10 - Rozložení stavů BPSK v IQ rovině

Quadrature Phase Keying (QPSK) – V QPSK jsou modulační data modulována do symbolů, kde každý symbol obsahuje dva bity, tzv. dibity, a může tak nabývat čtyř konečných stavů. Nosná vlna zde má konstantní amplitudu. Rozložení koncových bodů v konstelačním diagramu může mít několik podob. Nejběžnější jsou varianty s fázovým posuvem 45° , 135° , 225° , 315° a 0° , 90° , 180° , 270° . První varianta využívá Grayovo kódování a je nejvýhodnější. Dochází zde při chybném vyhodnocení symbolu v přijímači, při jeho záměně za sousední symbol, pouze k chybě v jediném datovém bitu.[1]

$$S_{qpsk}(t) = \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \left[\cos(2\pi f_c t) + (2i - 1) \frac{\pi}{4} \right], \text{ pro } 0 \leq t \leq T_s, i=1,2,3,4 \quad (1.4.3)$$

$$S_{qpsk}(t) = -\sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \left[\cos(2\pi f_c t) + (2i - 1) \frac{\pi}{4} \right], \text{ pro } 0 \leq t \leq T_s, i=1,2,3,4 \quad (1.4.4)$$

kde $\sqrt{2 * E_b / T_b}$ - je amplituda modulovaného signálu,
 E_b – střední energie modulovaného signálu na jeden bit,
 T_b – perioda jednoho bitu,
 f_c – frekvence nosné vlny[1]



Obrázek 11 - Rozložení stavů QPSK v IQ rovině

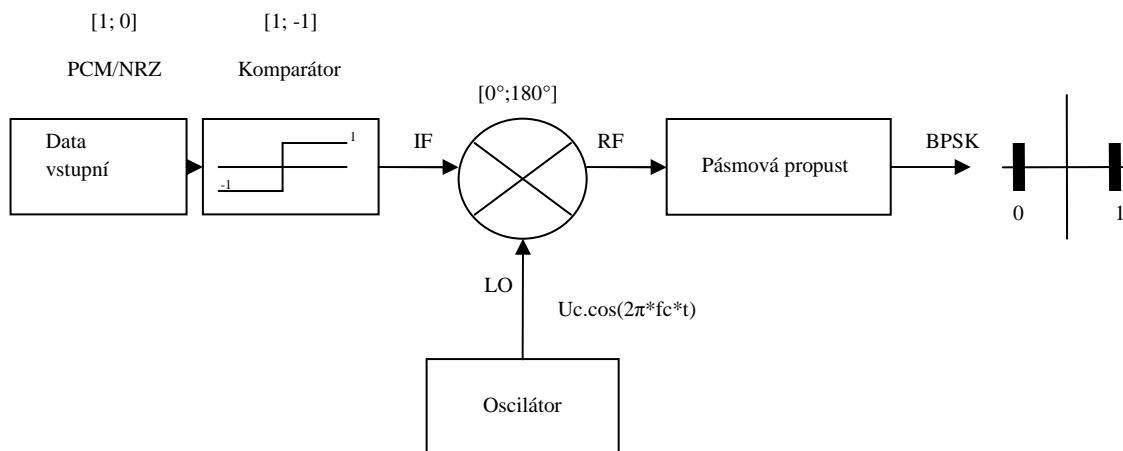
2 Teoretický popis použitých obvodů

2.1 Modulátory

Základní princip modulátoru je jednoduchý. Modulační signál je třeba kvůli potřebě přenosu přeložit ze základního pásma do vysokofrekvenční části spektra. Tento signál je tedy vstupem do modulátoru a může být jak analogový (sin, cos), tak i digitální (nejčastěji PCM). Druhým vstupem do modulátoru je vstup vysokofrekvenční nosné vlny, jejíž konkrétní parametr (amplituda, frekvence, fáze) se mění dle hodnoty vstupního signálu. Tyto dva signály se ve směšovači smísí a na výstupu modulátoru je vysokofrekvenční modulovaný signál se zakódovanými informacemi. Velký prostor je věnován teoretickému popisu nezbytných komponentů pro realizaci modulace a demodulace (BPSK modulátor a demodulátor, QPSK modulátor a demodulátor)

2.2 Modulátory BPSK

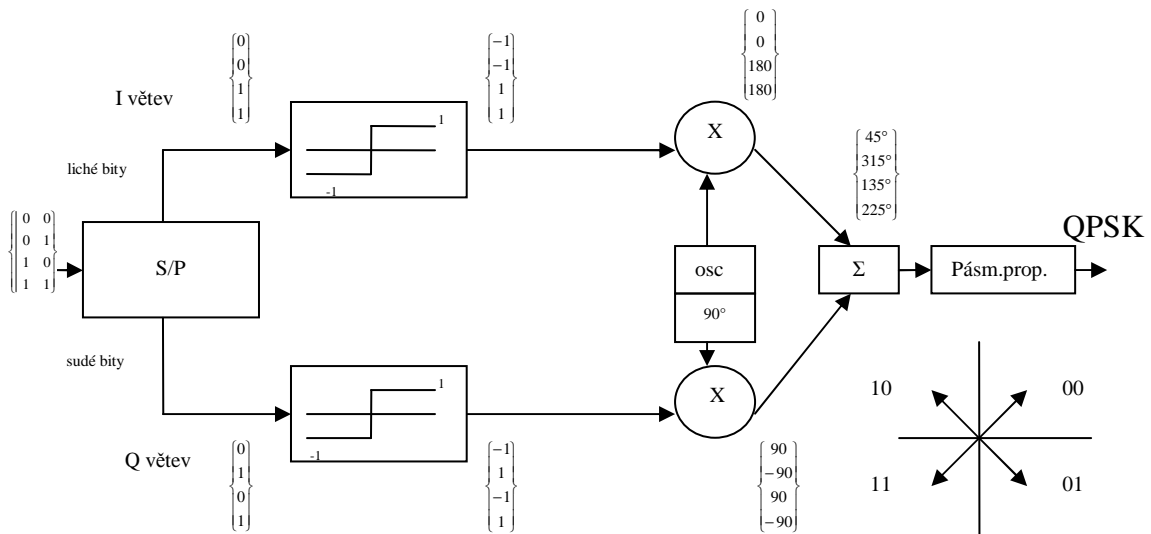
Jsou využívány pro změnu fáze nosné vlny přenášející informaci obsaženou ve vstupním signálu. Vstupní unipolární signál PCM/NRZ, který se nachází v základním pásmu, se v komparátoru změní na bipolární kódování a je přiveden do jednoho vstupu násobiče. Do druhého vstupu je přivedena z lokálního oscilátoru (LO) vysokofrekvenční nosná vlna popsána vztahem z obrázku 12. Na výstupu násobiče je zapojena pásmová propust, která potlačuje nadbytečné postranní laloky spektra modulovaného signálu i vyšší harmonické nosné vlny, tudíž se na jeho výstupu objevuje požadovaný BPSK signál.



Obrázek 12 - Modulátor BPSK

2.3 Modulátory QPSK

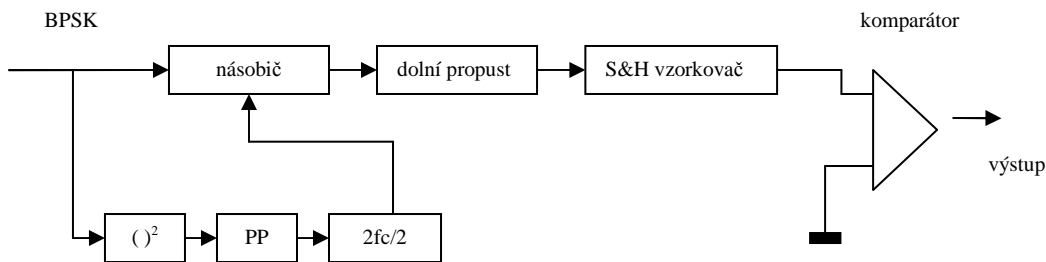
Modulátory QPSK pracují na principu součtu synfázní a kvadrurní složky nosné vlny. Vstupní modulační signál PCM/NRZ je přiváděn do sériově-paralelního převodníku, který liché bity (první sloupec matice) přivede do I větve modulátoru a sudé bity do Q větve modulátoru. Tímto paralelním rozdělením vznikají dvojice bitů, tzv. dibity. Přitom bit I nabývá své logické hodnoty prvního bitu a bit Q odpovídá logické hodnotě bitu druhého. Oba bity musí větvemi po dobu trvání procházet současně. Každá větev má vlastní modulátor, do kterého je ze společného oscilátoru přiváděna vysokofrekvenční nosná vlna. Tyto dvě nosné vlny jsou vzájemně posunuty o 90° (jsou v kvadratuře) a v modulátorech se násobí s modulačním signálem. Jejich sčítáním vzniká fázová změna a požadovaný signál QPSK, který kvůli potlačení nežádoucích postranních laloků prochází pásmovou propustí.



Obrázek 13 - Modulátor QPSK [4]

2.4 Demodulátory BPSK

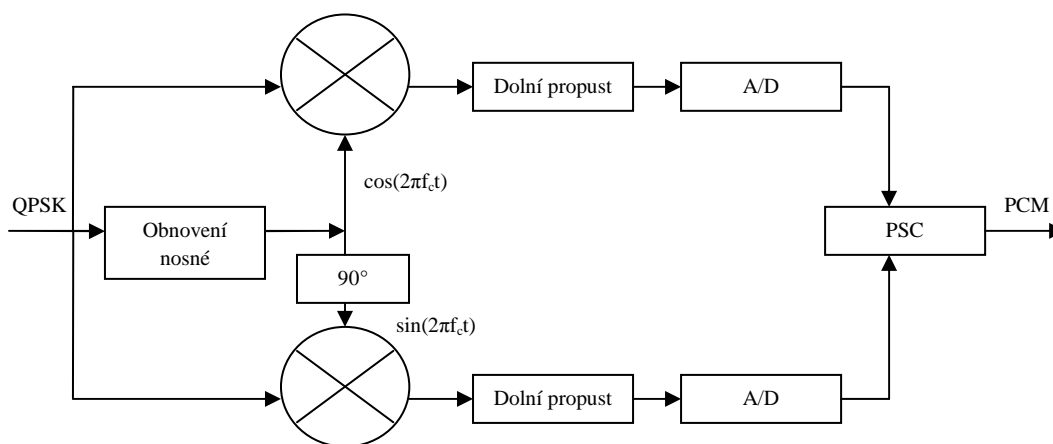
Jelikož je přenášená informace zakódována ve změně fáze modulovaného signálu, musí být demodulátor koherentní. Vstupní signál BPSK je přiveden na vstup součinnového demodulátoru, kde je násoben se znovu vygenerovanou referenční nosnou vlnou, která musí být v dokonalé frekvenční i fázové shodě s nosnou vlnou vstupního signálu. Referenční vlna se získává z kvadrátu vstupního signálu, vznikne tak signál o dvojnásobné frekvenci, pásmová propust potlačí složku základního pásma a v děliči frekvence dvěma se získá požadovaná referenční nosná vlna. Výstupní signál z násobiče je přiveden do dolní propusti, která potlačuje druhou harmonickou složku nosné vlny. Tím se získá původní signál PCM/NRZ, který je dále vzorkován S&H vzorkovačem. Okamžik vzorkování probíhá uprostřed bitového intervalu, kdy je největší poměr signál/šum. Před výstupem demodulátoru je zařazen komparátor, který rozhoduje o tom, zdali má přijatý signál vyšší nebo nižší hodnotu než je úroveň referenční hodnoty komparátoru. Výsledný demodulovaný signál má opět tvar pravoúhlých impulzů.



Obrázek 14 - Demodulátor BPSK[1]

2.5 Demodulátory QPSK

Vstupní signál QPSK se rozděluje do dvou stejných složek, které prochází I a Q větví. Každá z nich je následně v násobičích pomocí synfázní a kvadrurní obnovené referenční nosné vlny synchronně demodulována. Demodulované signály po průchodu dolní propustí procházejí vzorkovacími a rozhodovacími obvody, které je přemění na IQ složky, odpovídající IQ složkám v modulátoru. Jejich sloučením v paralelně-sériovém převodníku PSC se získá replika původního datového vstupního signálu. [1]



Obrázek 15 - Demodulátor QPSK

2.6 Směšovače

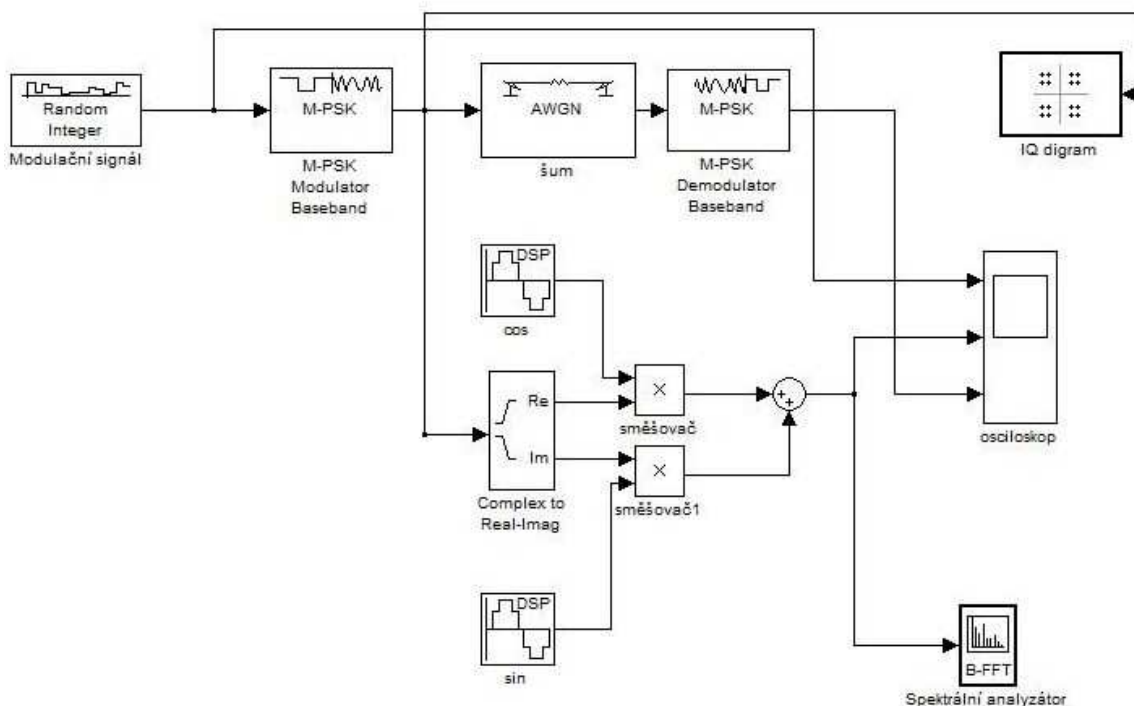
Směšovač je obvod, který slouží ke smíchání dvou vstupních signálů. Na jeden vstup je přiveden přijatý signál a na druhý je přivedena vysokofrekvenční vlna z lokálního oscilátoru. Ve směšovači se tyto dva signály vynásobí a převede tak vstupní vysokofrekvenční vlnu z libovolného frekvenčního pásma beze změny informací zakódovaných v modulačním signálu. Na výstupu ovšem nevzniká jen násobek těchto signálů, ale také součet, rozdíl, mocniny a také jejich různé celočíselné násobky. Pro potlačení těchto nežádoucích složek se využívá dvojitě vyváženého směšovače (např.

Gilbertův), který svým vnitřním zapojením odfiltruje oba násobené signály. Směšovače se využívají v modulátorech, demodulátorech a v zesilovačích.

3 Model BPSK a QPSK

Pro sestavení modelu modulace BPSK a QPSK je použit výpočetní software Matlab a jeho simulační prostředí Simulink. Na obrázku 16 je schéma modelu, kde jsou použity moduly M-PSK modulátoru a M-PSK demodulátoru. Písmenu M odpovídá počet konečných stavů příslušné modulace, tzn. $M=2,4,8$. Z důvodu náročnosti na paměťové místo je simulace provedena v tisíckrát menších hodnotách frekvence než na reálném pracovišti, tj. kmitočet modulačního signálu je 1kHz. V zobrazení spektra tento problém odpadá a jsou uvažovány původní hodnoty.

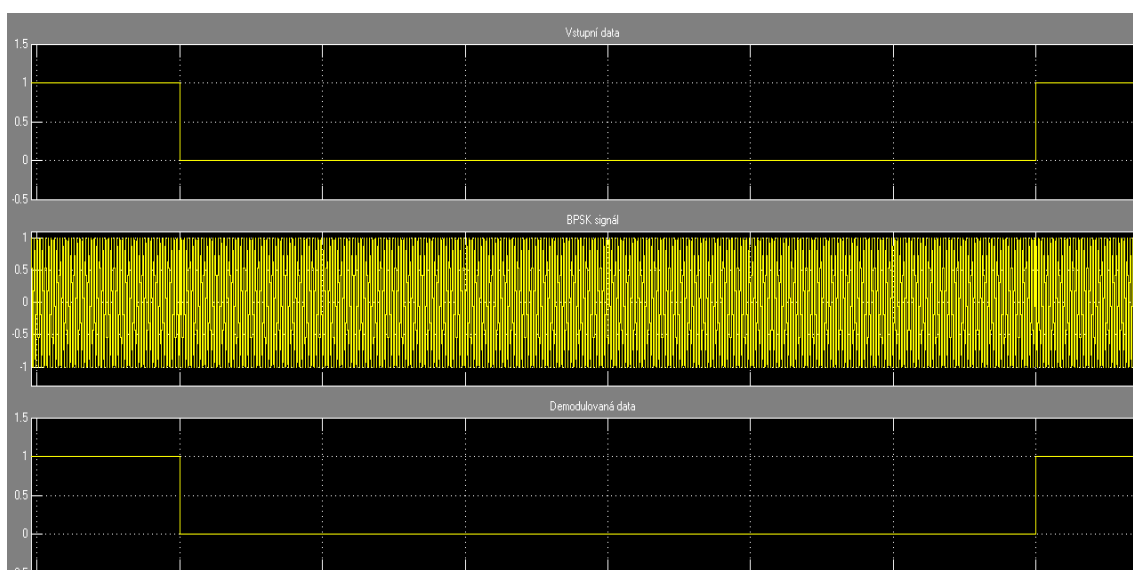
3.1 BPSK



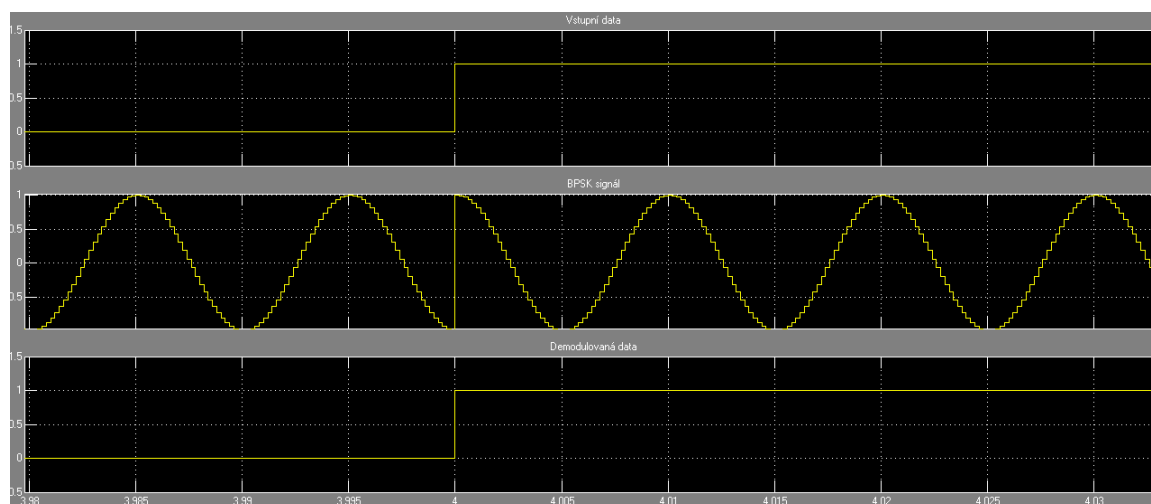
Obrázek 16 - Model M-PSK

Zdrojem vstupních dat je blok „Modulační signál“, který v modulaci BPSK nabývá pouze dvou konečných stavů, tudíž se na jeho výstupu generuje náhodná posloupnost 0 a 1. Pro názornost je tento signál přiveden na první kanál osciloskopu. Modulační signál je přiveden do BPSK modulátoru, jenž je nastaven na fázové posunutí π . Toto fázové posunutí znamená, že stav logické „1“ leží v kladné polovině reálné osy IQ diagramu a logická úroveň „0“ leží v její záporné polovině. Z tohoto bloku je výstupem modulovaná vlna, jenž v sobě obsahuje zakódované informace odpovídající hodnotě modulačního

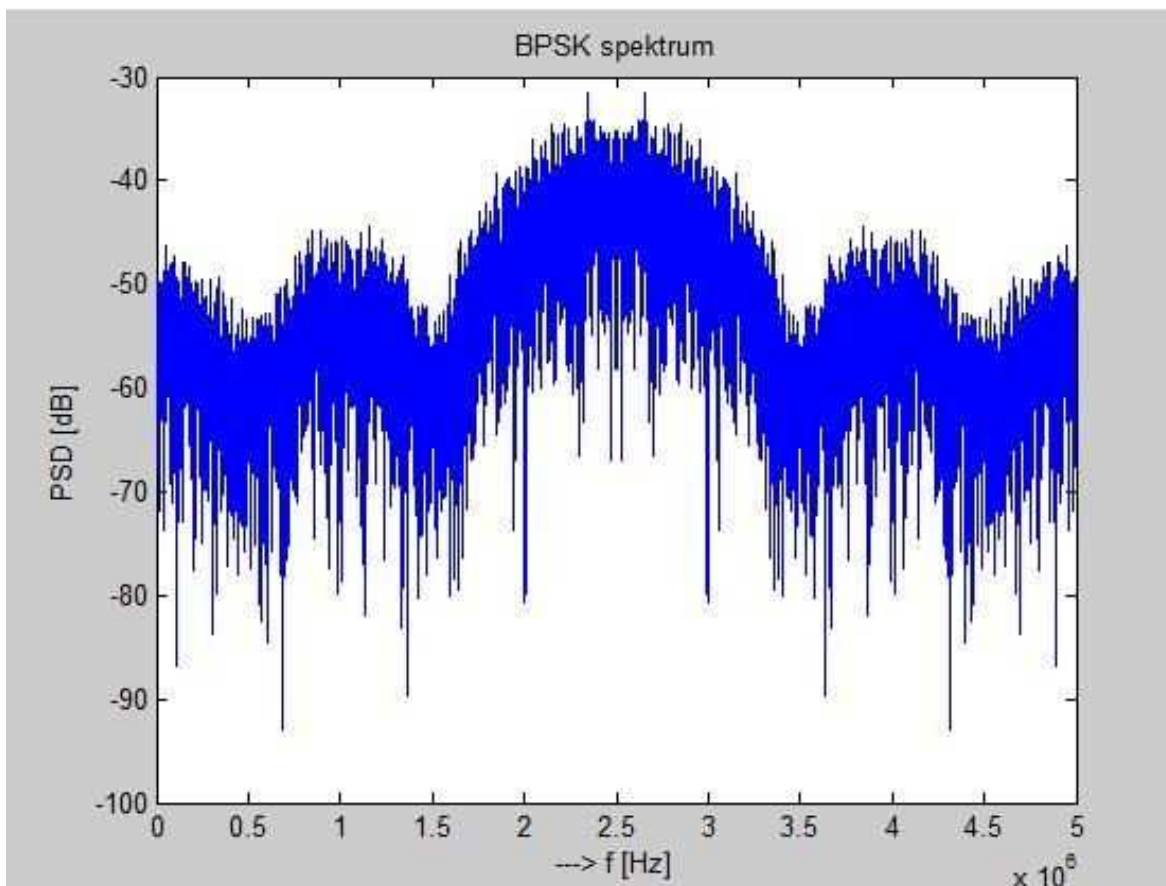
signálu. Pro zobrazení v časové rovině je tento komplexní signál potřeba rozdělit do jeho reálné a imaginární části. Jelikož se stavy modulačního signálu nachází na reálné ose IQ diagramu, uplatňuje se pouze reálná složka komplexního signálu. Ve směšovači se tato složka vynásobí se zdrojem diskrétní kosinusové vlny. Takto vzniklý signál představuje požadovaný modulovaný BPSK signál v časové oblasti, který je přiveden na druhý kanál osciloskopu. K zobrazení spektra BPSK signálu ve frekvenční oblasti je použit spektrální analyzátor. Pro demodulaci modulovaného signálu je použit BPSK demodulátor, který pro správnou demodulaci dat musí pracovat se stejnou hodnotou fázového posuvu jako BPSK modulátor. Jeho výstup je přiveden na třetí kanál osciloskopu.



Obrázek 17 - Oscilogram BPSK



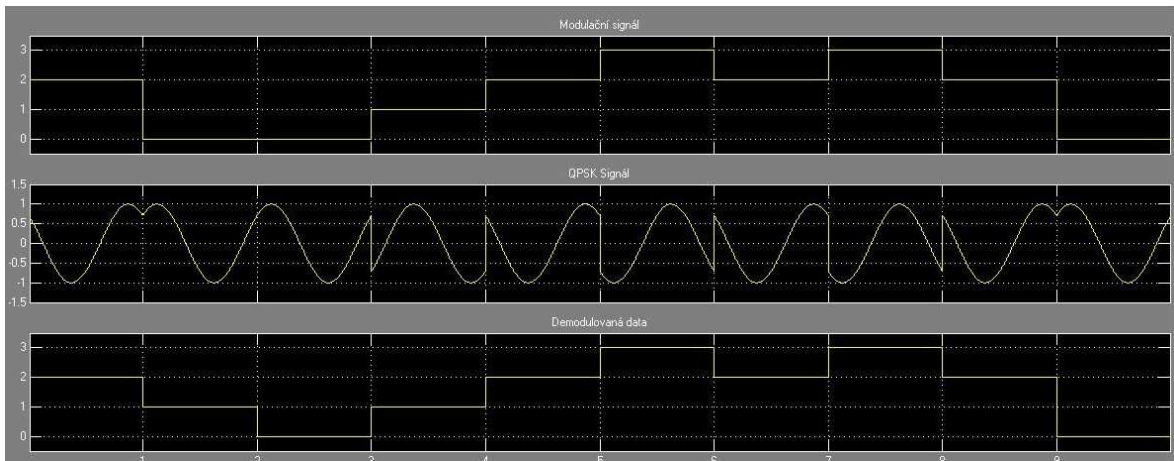
Obrázek 18 - Detail změny fázového posuvu BPSK



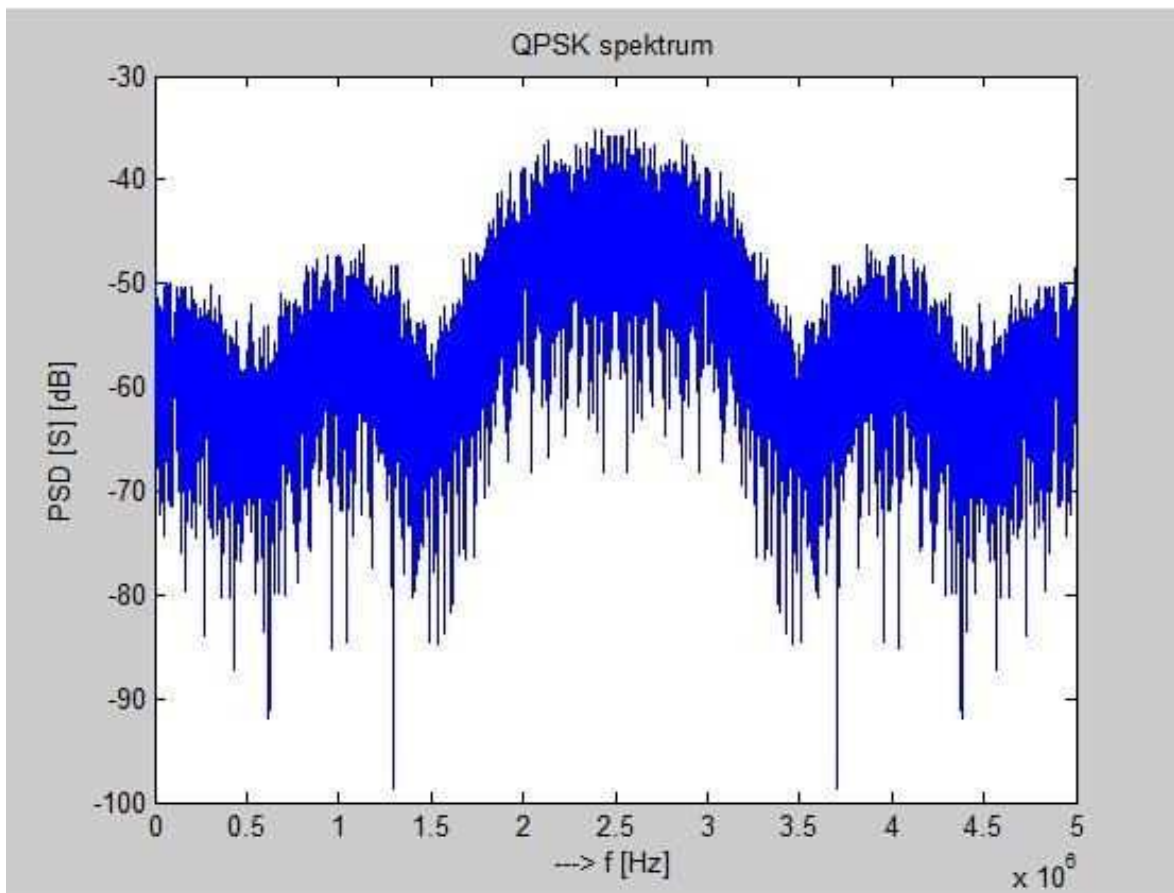
Obrázek 19 - Spektrum BPSK

3.2 QPSK

Schéma modelu modulace QPSK vychází ze schématu z obrázku 14. Zdroj modulačního signálu vychází z bloku “Modulační signál“, který nabývá čtyř konečných stavů s jednotlivým fázovým posuvem $\pi/4$, $3\pi/4$, $5\pi/4$ a $7\pi/4$. Fázový posuv modulátoru je kvůli výhodám Grayova kódování nastaven na $\pi/4$. Výstupem z modulátoru je již modulovaný signál se zakódovanými informacemi o aktuální hodnotě modulačního signálu. Pro zobrazení této vlny v časové oblasti se využívá převodu komplexního čísla na reálnou a imaginární složku. U modulace QPSK je každý stav dán hodnotami obou složek. Na ukázkou je signál přiveden na druhý kanál osciloskopu. Pro zobrazení ve frekvenční oblasti je signál připojen na spektrální analyzátor.



Obrázek 20 - Detail přechodu QPSK

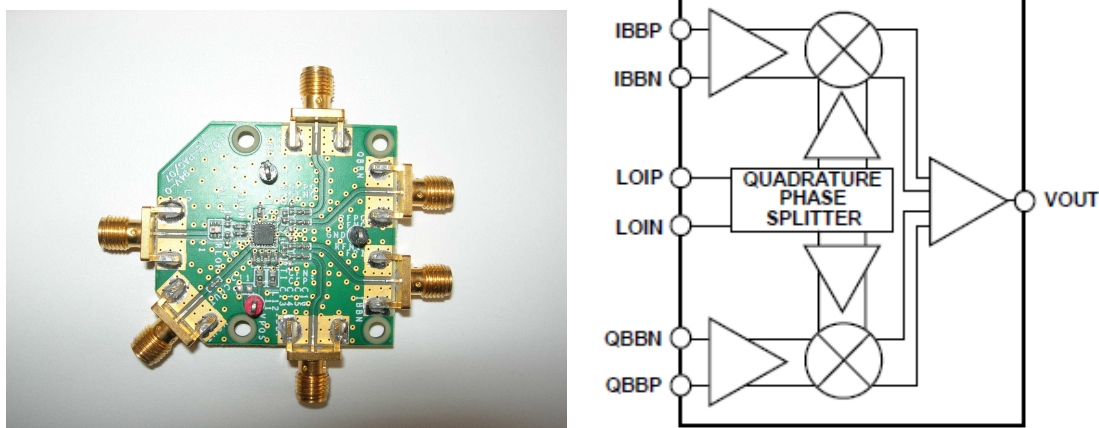


Obrázek 21 - Spektrum QPSK

4 Popis použitých komponent pro laboratorní pracoviště

4.1 ADL5373

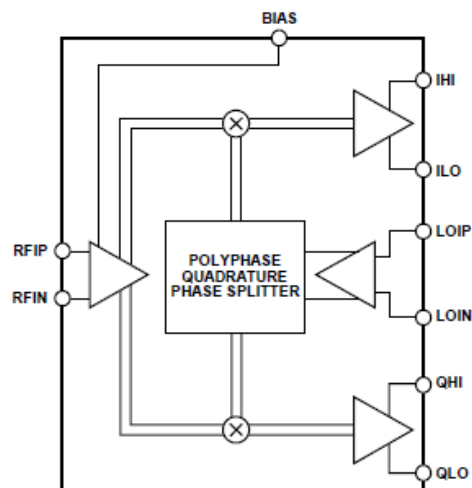
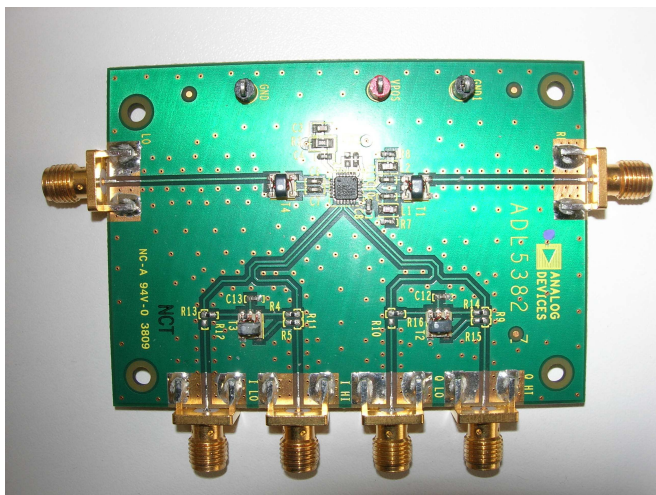
ADL5373 je kvadrurní modulátor pracující ve frekvenčním pásmu od 2.4GHz do 2.7GHz. Modulátor nabízí vstupy IBBP a IBBN pro I složku signálu. Pro Q složku signálu pak QBBP a QBBN. Vstup místního oscilátoru je zprostředkován LOIP a LOIN. Výstup z modulátoru je realizován SMA konektorem, na němž se objevuje výsledný modulovaný signál.



Obrázek 22 - ADL5373 a jeho blokové schéma [5]

4.2 ADL5382

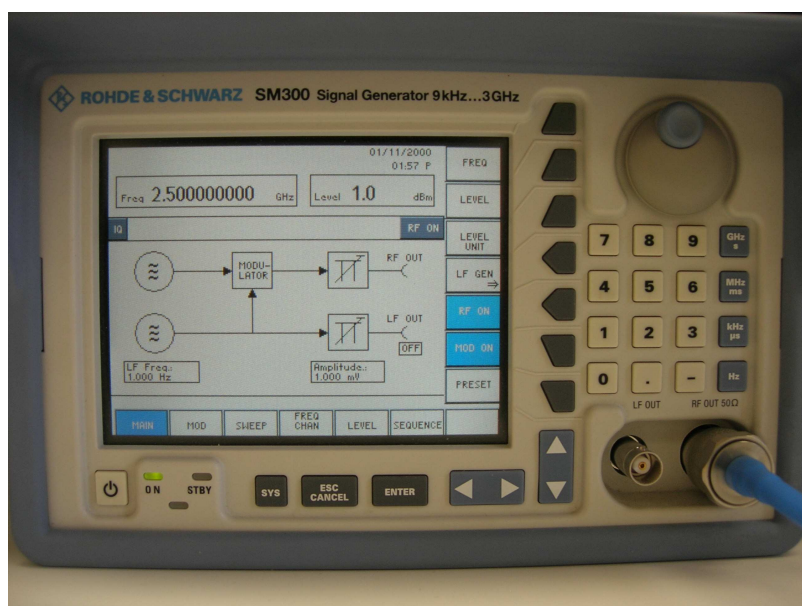
ADL5382 je širokopásmový I-Q demodulátor od firmy Analog Devices pracující ve frekvenčním pásmu od 700MHz do 2,7GHz. Vstup vysokofrekvenčního signálu je realizován vstupy RFIP a RFIN. Vstup pro synchronizační frekvenci přes LO rozhraní, které generuje dva signály s pootočenou fází o 90°. Demodulátor obsahuje dva směšovače, které fungují na principu Gilbertova zapojení. ADL5382 disponuje výstupy IHI, ILO, QHI a QLO. Obvod je napájen 5V.



Obrázek 23 - ADL5382 a jeho blokové schéma [6]

4.3 Rohde&Schwarz SM300

Rohde&Schwarz SM300 je vysokofrekvenční signálový generátor, který poskytuje možnost pracovat s IQ modulacemi. Vstupy EXT I a EXT Q pro externí IQ složky jsou na zadním panelu přístroje. Jelikož generátor dokáže generovat signály od 9kHz až do frekvence 3GHz, je pro testování přenosu na 2,5GHz zcela dostačující.

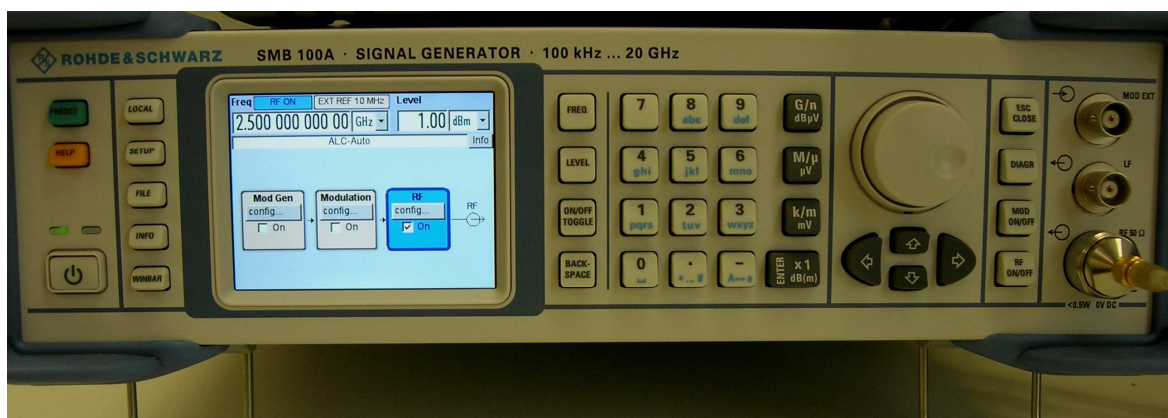


Obrázek 24 - Rohde&Schwarz SM300

4.4 Rohde&Schwarz SMB100A

Rohde&Schwarz je vysokofrekvenční signálový generátor, který dokáže generovat signály od frekvence 100kHz do 20GHz. V tomto měření slouží jako zdroj synchronizačního signálu o kmitočtu 2,5GHz, jenž je přiveden do vstupu LO demodulátoru ADL5382.

Zároveň nabízí možnost externí synchronizace 10MHz synchronizačním signálem s SM300.



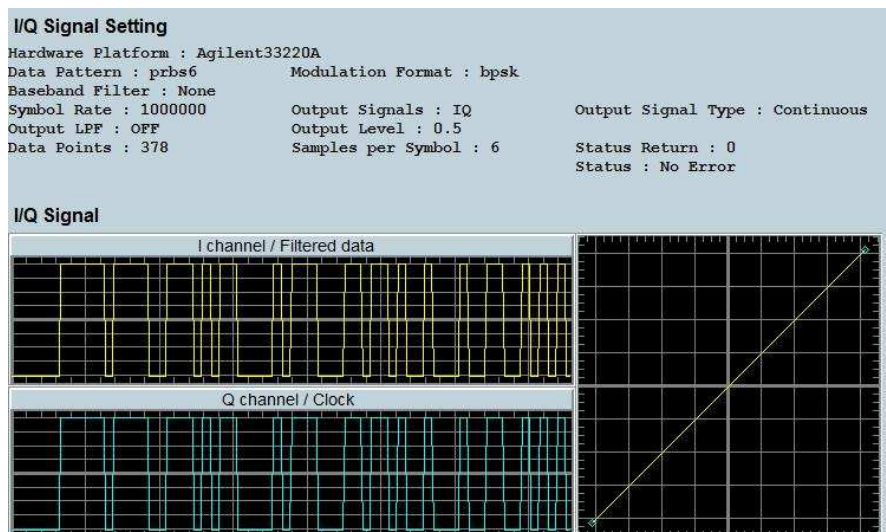
Obrázek 25 - Rohde&Schwarz SMB 100A

4.5 Agilent 33220a

Agilent 33220a je 20MHz generátor funkcí, který umí generovat nejen základní funkce, ale nabízí i možnost vytvoření libovolného signálu. Pro potřeby této práce slouží jako reálný zdroj IQ složek. Generátor může být přes USB port propojen s řídicím počítačem, kde je nainstalován potřebný ovládací software Agilent Technologies I.Q. Signal generator. K vzájemné synchronizaci je využita možnost propojit dva generátory přes výstup REF OUT a vstup REF IN na zadním panelu. V ovládacím softwaru je jeden z nich nastaven jako jednotka Master a druhý jako jednotka Slave. V tomto případě je generátor Q složek veden jako řídicí člen.



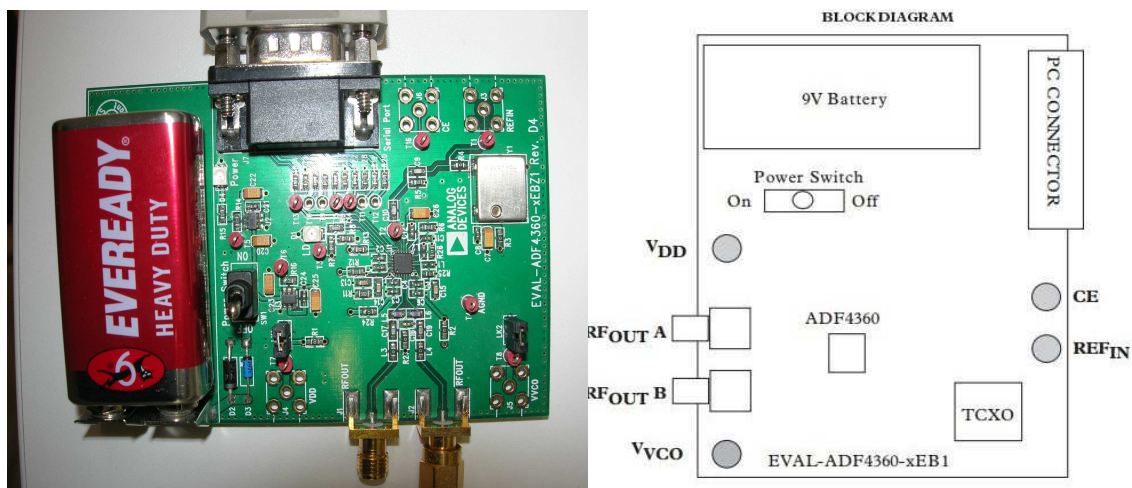
Obrázek 26 - Agilent 33220a



Obrázek 27 - Ovládací software I.Q. Signal generator

4.6 Syntezátor ADF 4360

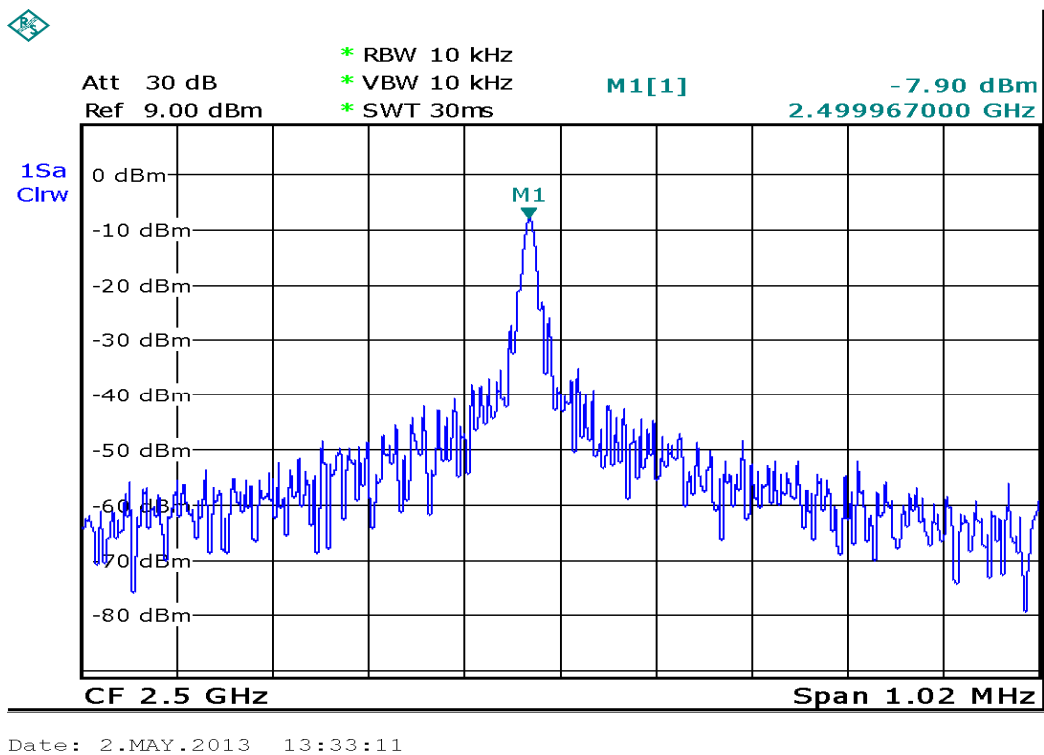
Syntezátor ADF 4360 je přes PC konektor spojen s řídicím počítačem, kde je ovládán pomocí softwaru ADF 4360. Deska je napájena 9V baterií a je založena na principu integrovaného napětím řízeného oscilátoru a fázového závěsu, který udržuje konstantní výstupní hodnotu oscilátoru. Pro potřeby testování je hodnota výstupní frekvence nastavena na 2500MHz.



Obrázek 28 - Syntezátor ADF 4360 a jeho blokové schéma [7]



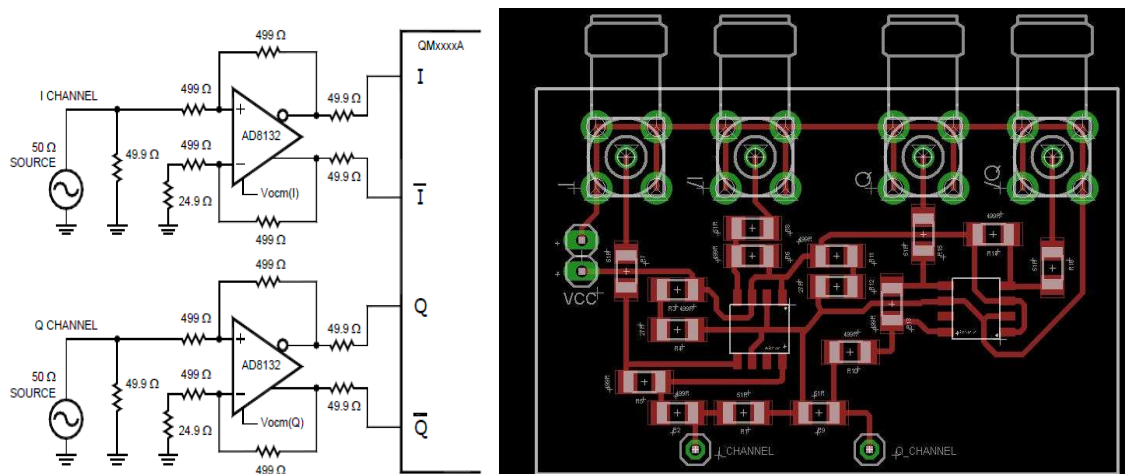
Obrázek 29 - Ovládací software pro ADF4360



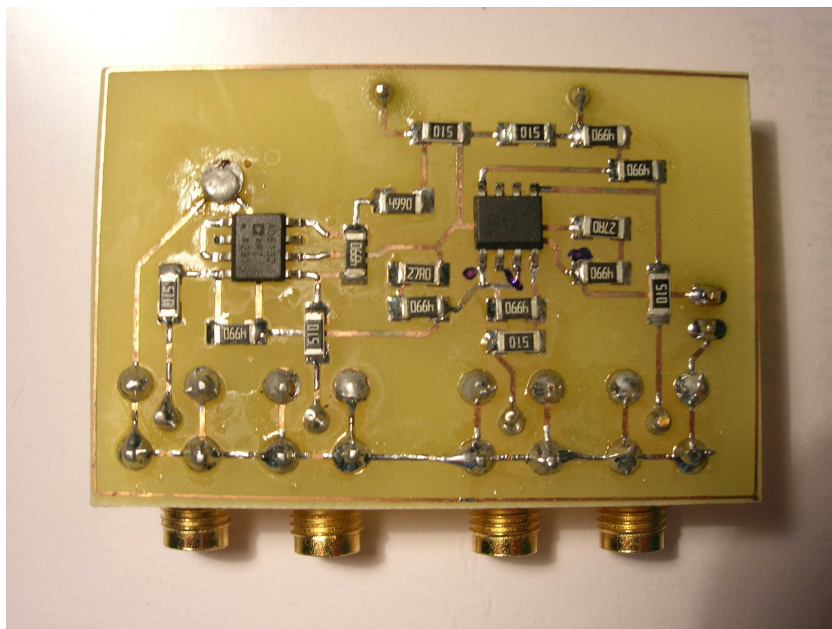
Obrázek 30 - Spektrum nosné vlny

4.7 Rozdílový zesilovač

Pokud jsou k dispozici dva oddělené vstupy I a Q, je kvůli potřebě propojení s modulátorem ADL5373 nutnost sestavit jednoduchý rozdílový zesilovač, který rozdělí vstup I i Q na výstup I a /I resp. Q a /Q. Obvod je založený na analogovém integrovaném obvodu AD8132. Obvod je napájen 5V, rezistory jsou v SMD provedení a výstupy jsou realizovány SMA konektory.



Obrázek 31 - Schéma zapojení [8] a návrh plošného spoje rozdílového zesilovače



Obrázek 32 - Rozdílový zesilovač

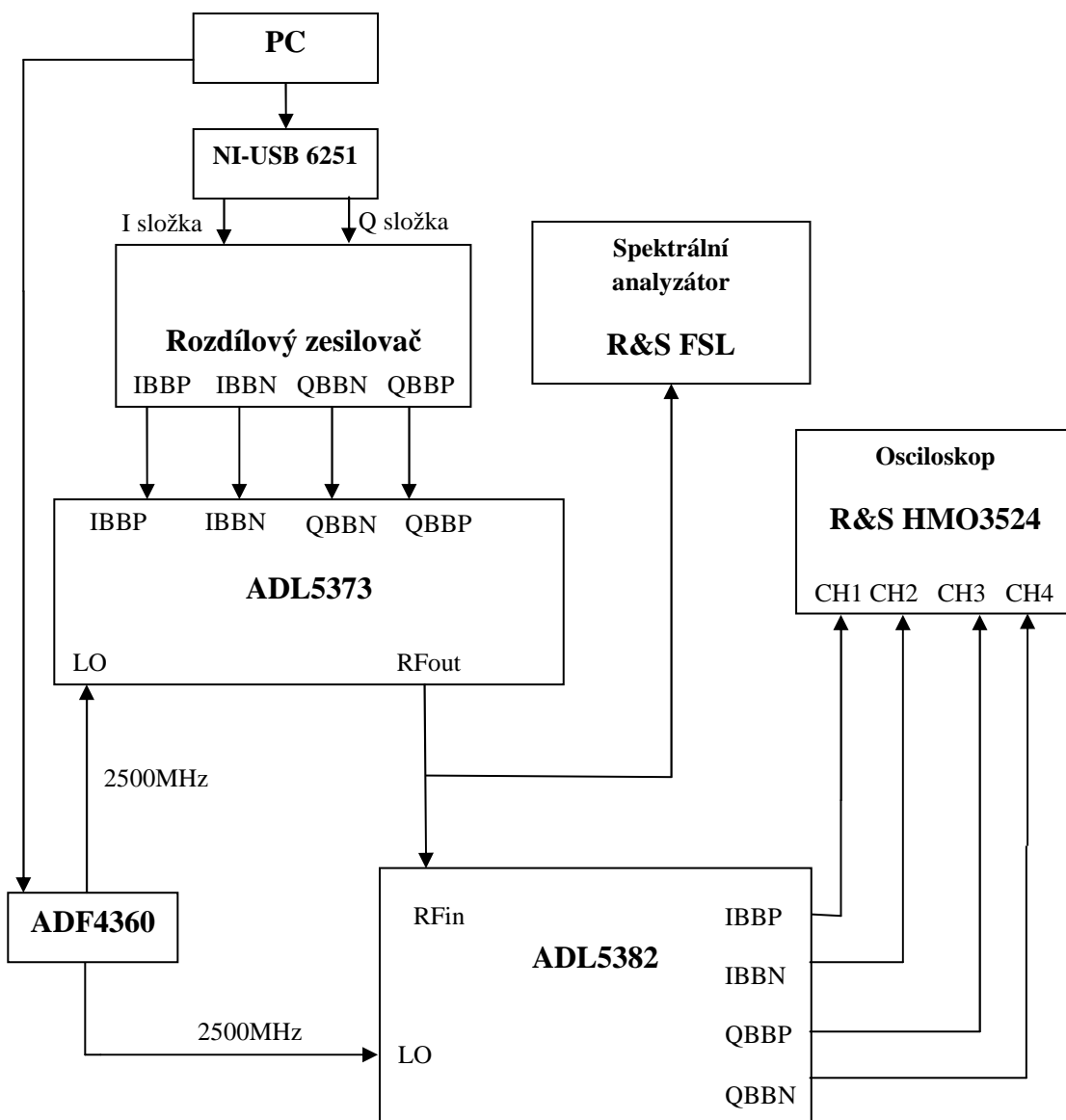
5 Pracoviště pro měření IQ modulací na modulátoru a demodulátoru

5.1 Schéma zapojení pracoviště

Laboratorní pracoviště se skládá z následujících přístrojů a softwaru:

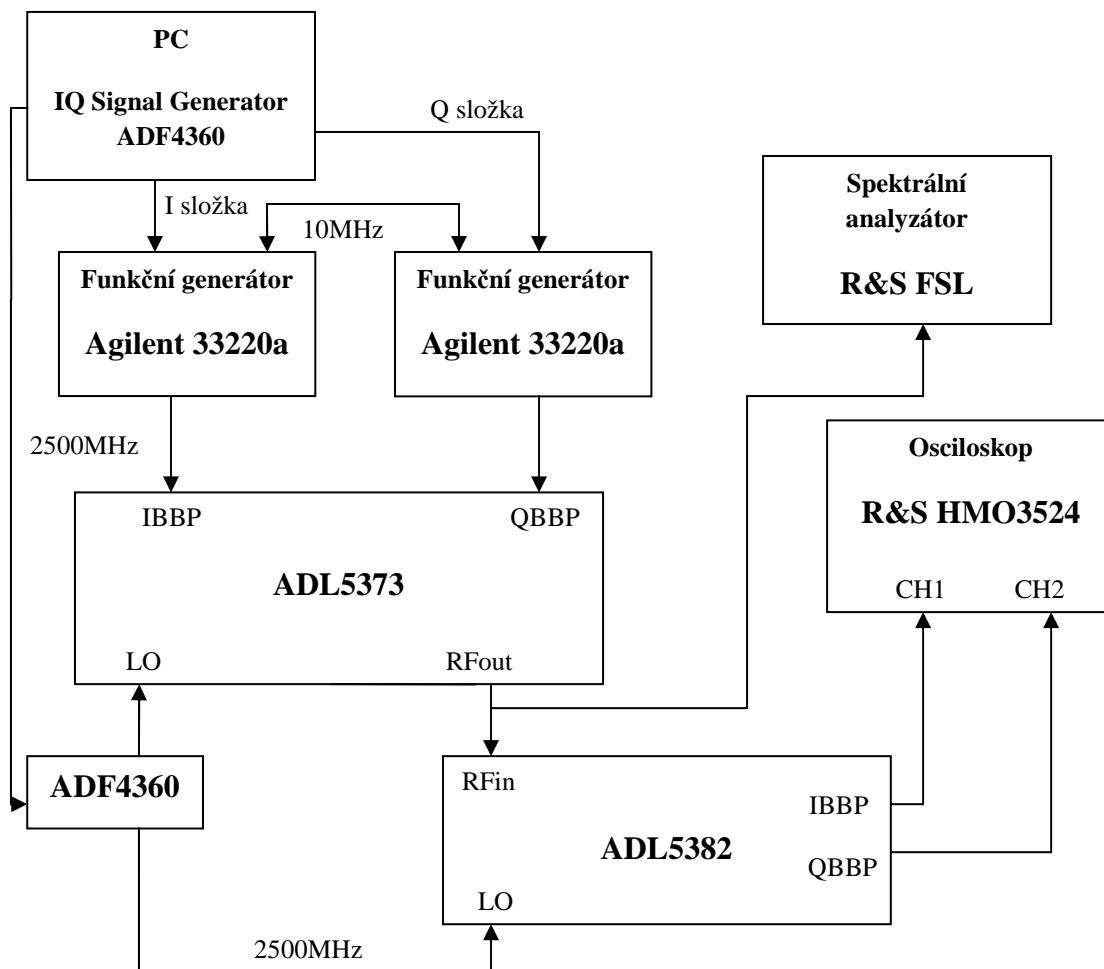
- 1x řídicí počítač s operačním systémem Microsoft Windows Vista
- 2x funkční generátor Agilent 33220a 20MHz
- 1x signálový generátor Rohde&Schwarz SM-300 9kHz-3GHz
- 1x spektrální analyzátor Rohde&Schwarz FSL 9kHz-3GHz
- 1x signálový generátor Rohde&Schwarz SMB100A
- 1x rozdílový zesilovač
- 1x Eval-ADF4360
- 1x napájecí zdroj P230R51D
- 1x NI-USB 6251
- 1x osciloskop Rohde&Schwarz HMO 3524
- software Agilent Technologies I.Q. Signal generator
- software Agilent Technologies IO Control
- software ADF436

Pro generování libovolného pravoúhlého signálu rozloženého do IQ složek z řídicího počítače byl využit program Matlab. Karta NI-USB 6251 je spojena s PC přes USB port a jako výstup poskytuje 2 analogové výstupy. Ty představují I a Q složku modulačního signálu. K rozdělení jednotlivé složky na pozitivní a negativní část byl navržen rozdílový zesilovač, jehož výstupy jsou propojeny k odpovídajícím vstupům modulátoru ADL5373. Jako zdroj nosné vlny a k synchronizaci modulátoru ADL5373 s demodulátorem ADL5382 je využit syntezátor EVAL-ADF4360. Tento modul je připojen přes USB port k řídicímu počítači a ovládán softwarem ADF4360. Zvolená hodnota frekvence nosného signálu je 2500MHz. Signál je přiveden na LO vstup modulátoru ADL5373, avšak následným měřením byla zjištěna jeho nesprávná funkčnost. Z tohoto důvodu byl jako alternativní řešení zvolen vysokofrekvenční generátor SM300 od firmy Rohde&Schwarz.



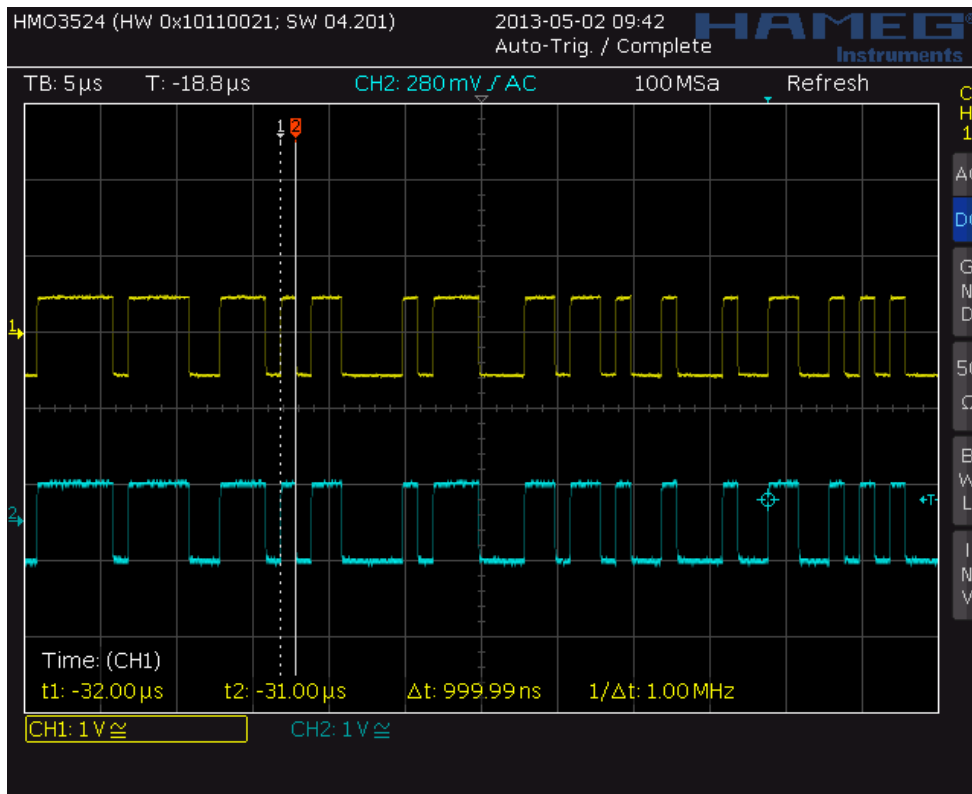
Obrázek 33 - Původní schéma zapojení s ADL5373

5.2 Schéma zapojení pracoviště pro ověření funkčnosti modulátoru ADL5373



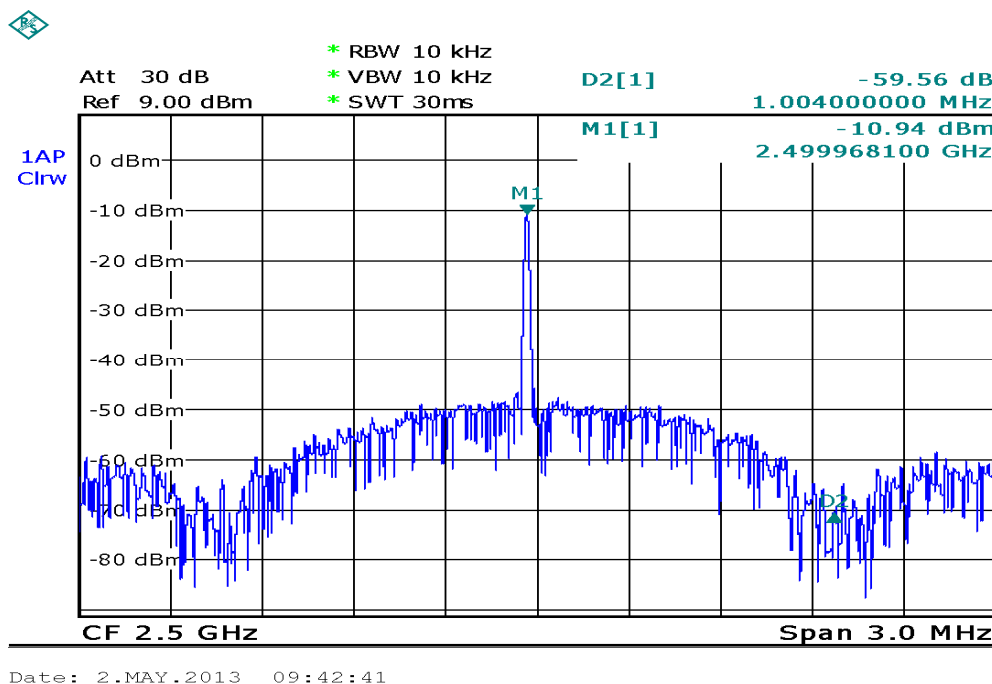
Obrázek 34 - Schéma s ADL5373

Generované IQ složky modulačního signálu jsou posílány do dvou funkčních generátorů Agilent 33220a, které jsou spojeny s odpovídajícím vstupem modulátoru ADL5373. Zdroj nosné vlny a zároveň k synchronizaci modulátoru a demodulátoru byl zvolen obvod ADF4360, který je ovládán z řídicího počítače. Hodnota kmitočtu byla nastavena na 2500MHz. Funkční generátory jsou přivedeny na vstupy IBBP a QBBP modulátoru. Namodulovaná nosná vlna je z výstupu modulátoru přivedena na vstup RF_{in} demodulátoru a pro zobrazení ve frekvenční oblasti je připojena ke spektrálnímu analyzátoru. Spektrum vysokofrekvenčního signálu je zobrazeno na obrázku 36. Výstupy IBBP a QBBP z modulátoru jsou pro zobrazení v časové oblasti vyvedeny na kanál 1 a na kanál 2 osciloskopu. Výsledné demodulované složky I a Q jsou zobrazeny na obrázku 37.



Obrázek 35 - IQ složky BPSK

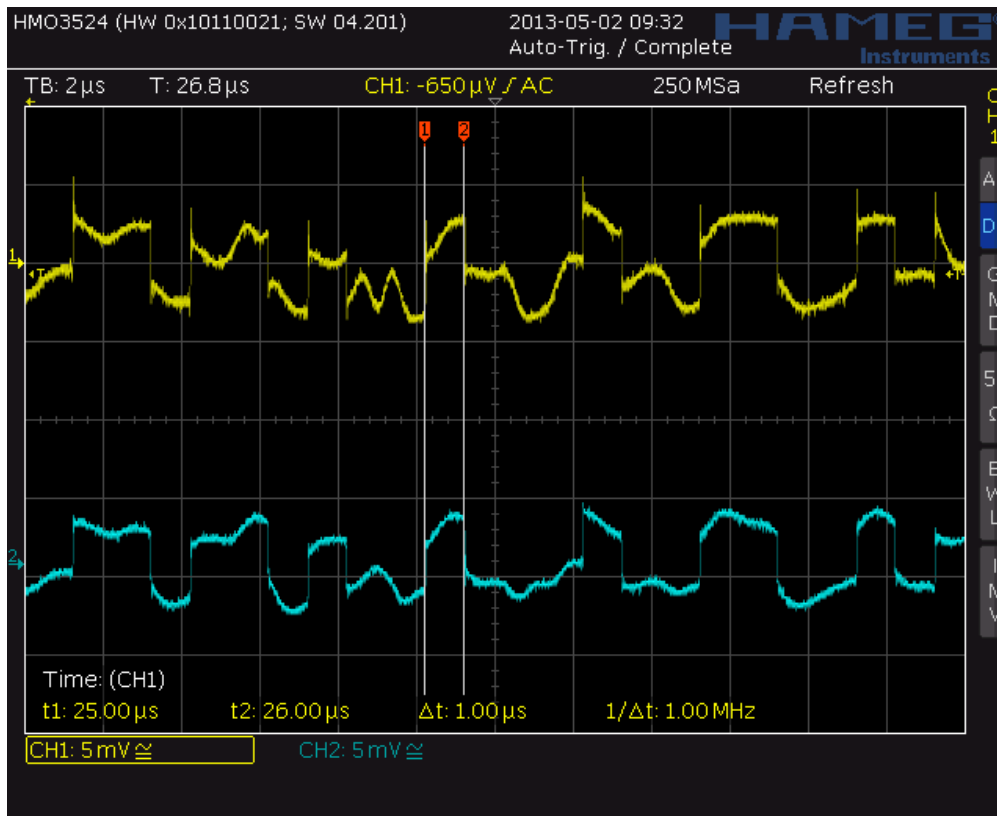
Pravouhý modulační signál je generován v počítači se softwarem IQ Signal Generator. Modulační signál pro modulaci BPSK o frekvenci 1 MHz s amplitudou 1V_{pp} je zobrazen na obrázku 35, kde první kanál představuje I složku a druhý kanál zobrazuje Q složku.



Date: 2.MAY.2013 09:42:41

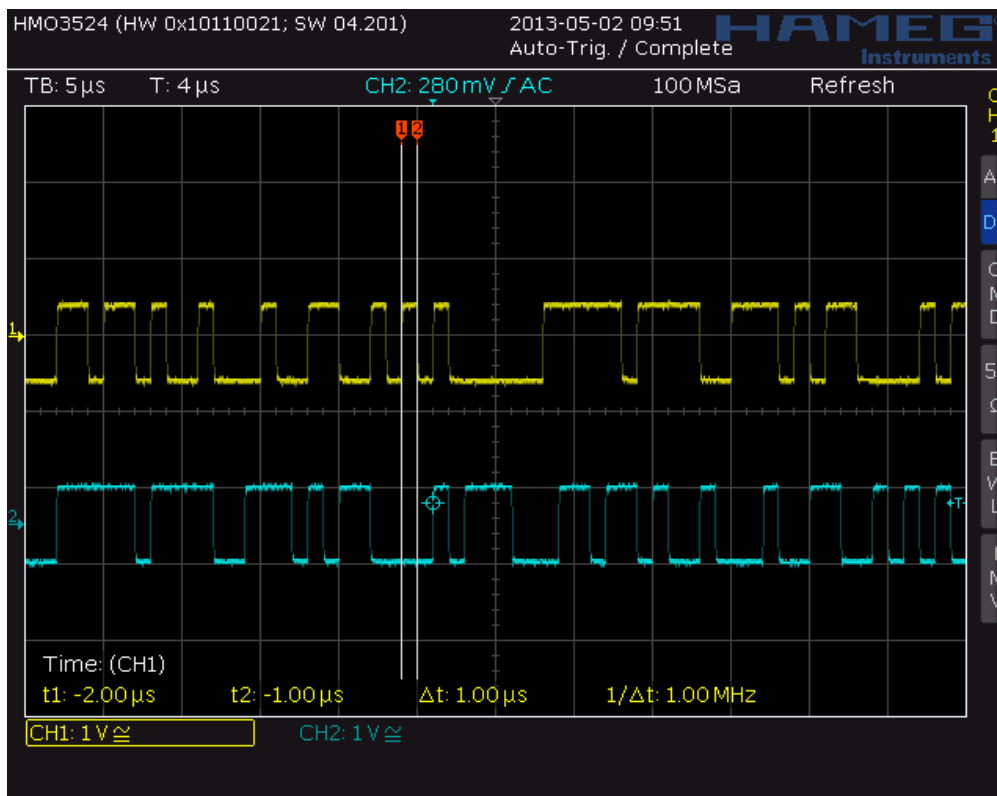
Obrázek 36 - Spektrum modulovaného signálu BPSK s ADL5373

Naměřené spektrum modulaace BPSK nemá dle teoretických předpokladů obsahovat nosnou vlnu, což se při měření nepotvrdilo. Navíc má nosná vlna oproti ostatním složkám spektra o 40dBm vyšší výkon, čímž jsou postranní laloky velmi potlačeny. Tato chyba je pravděpodobně způsobena nedokonalou symetrií vstupů modulátoru ADL5373.



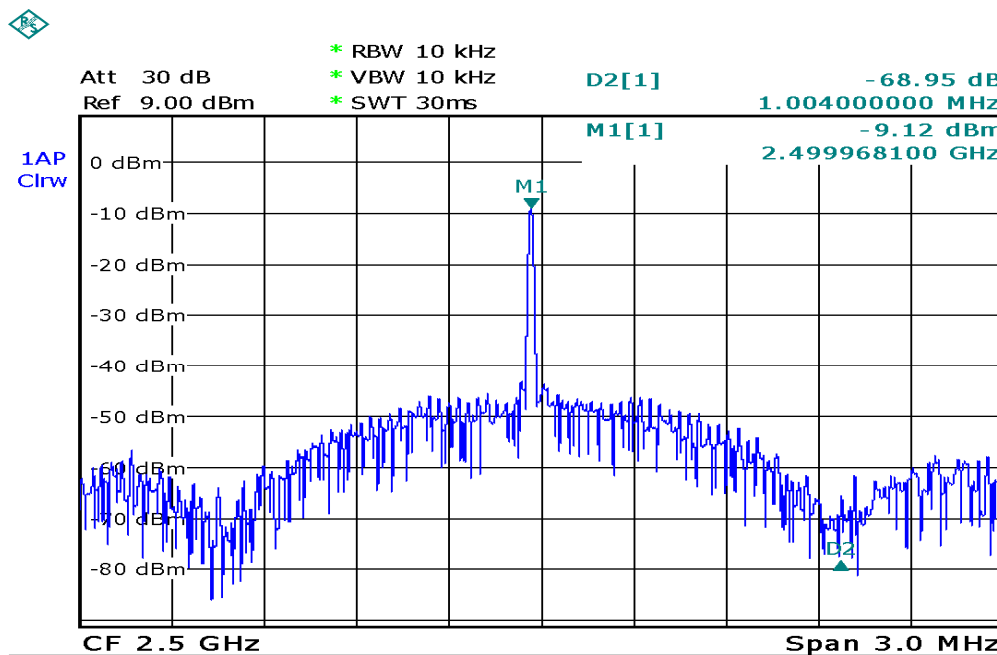
Obrázek 37 - IQ data po demodulaci BPSK

Důsledek tohoto jevu je evidentní při procesu demodulace. Demodulované IQ složky jsou demodulovány s amplitudou V_{pp} 5mV, což oproti vstupní hodnotě amplitudy, která činila 1V_{pp}, znamená útlum hodnoty napětí signálu o 46dB. Demodulovaná data jsou při BPSK relativně dobře čitelná a celkem odpovídají vstupní posloupnosti.



Obrázek 38 - IQ složky QPSK

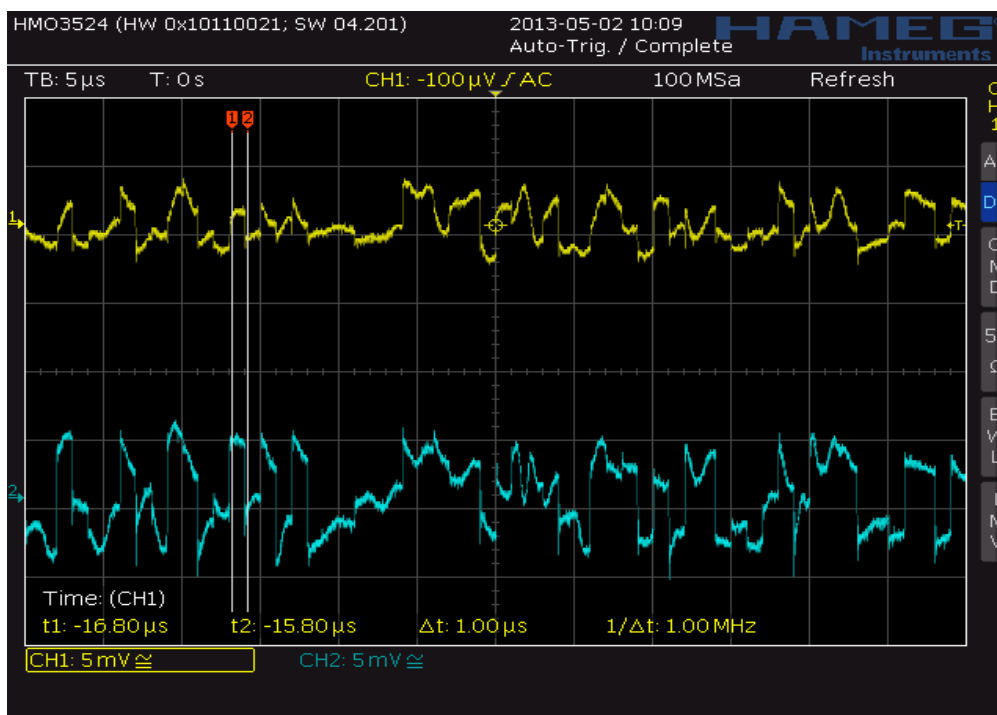
Pro testování QPSK modulační byly v řídicím softwaru vygenerovány IQ složky. Na prvním kanálu je zobrazena I složka a na druhém Q složka. Amplituda modulačního signálu je $1V_{pp}$ a frekvence je opět 1 MHz.



Date: 2.MAY.2013 10:21:49

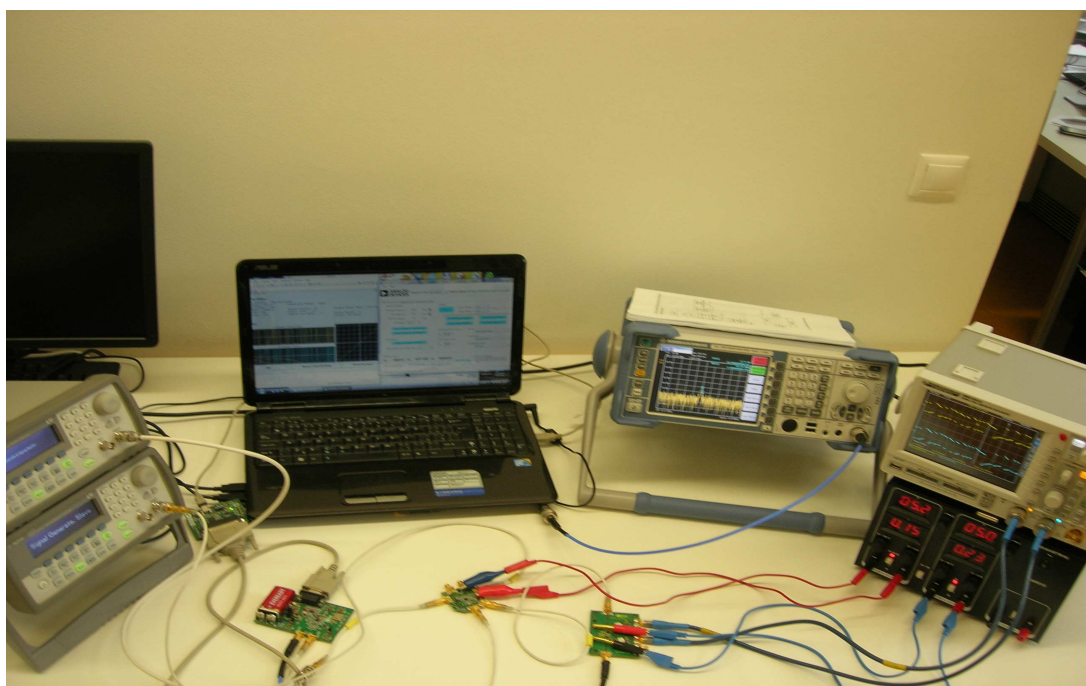
Obrázek 39 - Spektrum QPSK s ADL5373

Při zobrazení výsledného signálu na spektrálním analyzátoru se ve frekvenčním spektru na hodnotě frekvence nosné vlny (2,5GHz) nachází nosná vlna. Dle teoretických předpokladů by měla být potlačena. Důsledek nepotlačené nosné vlny je viditelný i u modulační QPSK.



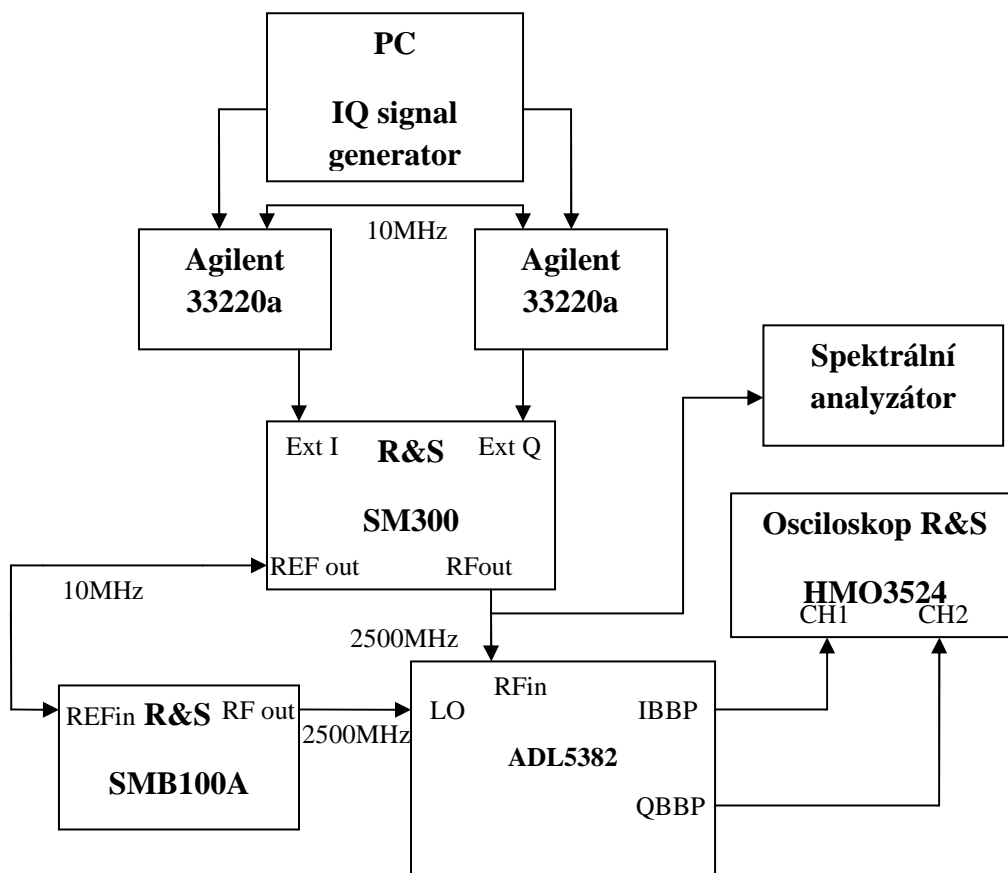
Obrázek 40 - IQ složky po demodulaci QPSK

Úroveň IQ složek po demodulaci je vůči vstupním hodnotám nižší o 46dB. Z důvodu nedokonalé fázové a kmitočtové synchronizaci jsou výsledná data špatně čitelná.



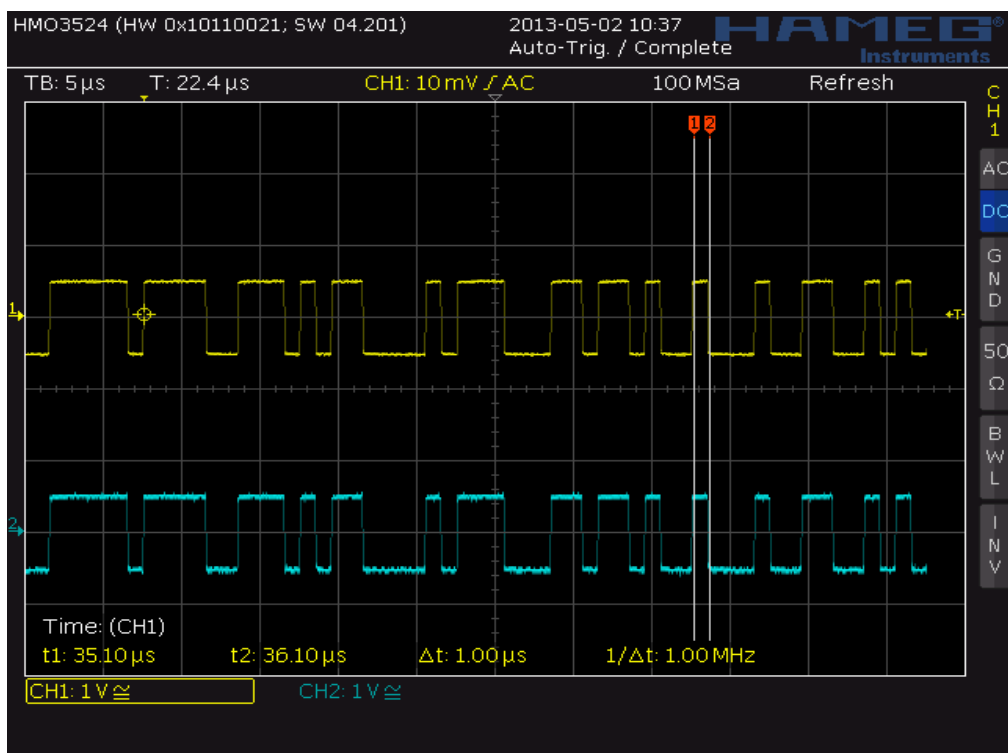
Obrázek 41 - Pracoviště s modulátorem ADL5373

5.3 Schéma zapojení pracoviště s modulátorem Rohde&Schwarz SM300



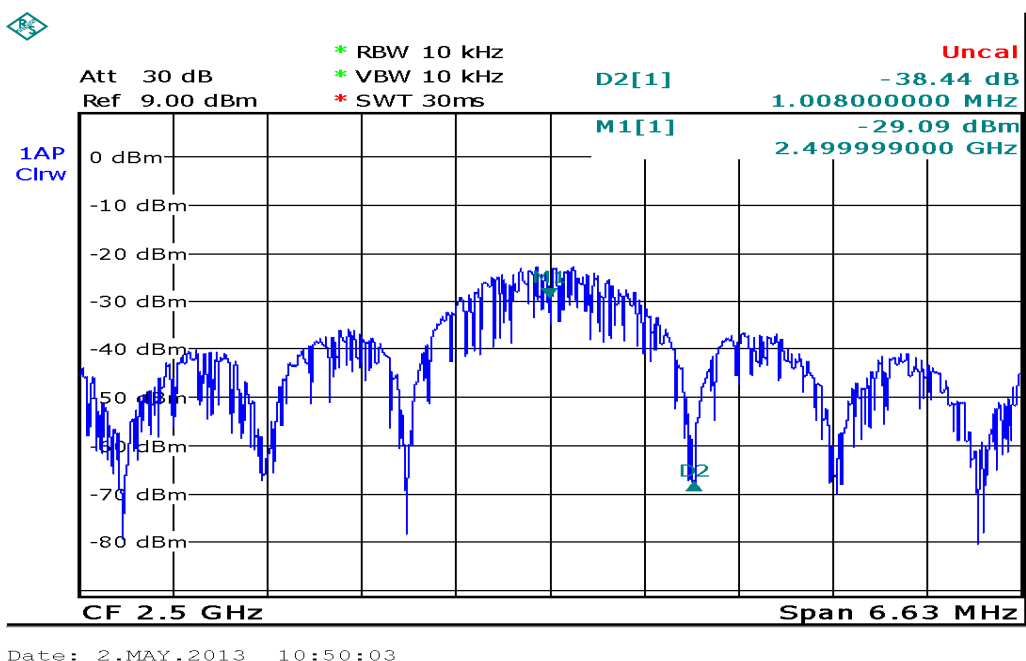
Obrázek 42 - Schéma zapojení s SM300

Zdroj modulačního signálu je realizován softwarově v řídicím počítači. Program IQ Signal Generator od Agilent Technologies nabízí generování I a Q složek zvlášť. Jednotlivá složka je přes USB port poslána do jednoho z funkčních generátorů, které jsou s tímto programem kompatibilní. Dále jsou oba funkční generátory Agilent 33220a mezi sebou synchronizovány 10MHz signálem. Výstupy z generátoru jsou přivedeny na vstupy EXT I a EXT Q vysokofrekvenčního generátoru Rohde&Schwarz SM300. Zde funguje jako modulátor, který moduluje vstupní signály na nosnou vlnu o hodnotě 2,5GHz. Pro zobrazení signálu ve frekvenční oblasti je nosná vlna přivedena na spektrální analyzátor. Signál je dále přiveden na vstup RF_{in} modulátoru ADL5373. Jako zdroj synchronizačního signálu je místo syntezátoru ADF4360 použit vysokofrekvenční generátor, z jehož výstupu je vyveden signál o frekvenci 2500MHz. K synchronizaci modulátoru SM300 a vysokofrekvenčního generátoru je využita možnost nastavit v generátoru externí synchronizaci 10MHz sinusovým signálem z výstupu REF_{out} modulátoru. Na vstup demodulátoru ADL8352 je přiveden výstupní signál z modulátoru a na vstup LO je přiveden signál z vysokofrekvenčního generátoru. Pro zobrazení demodulovaných signálů v časové oblasti jsou na kanál 1 a na kanál 2 osciloskopu přivedeny výstupy IBBP resp. QBBP.



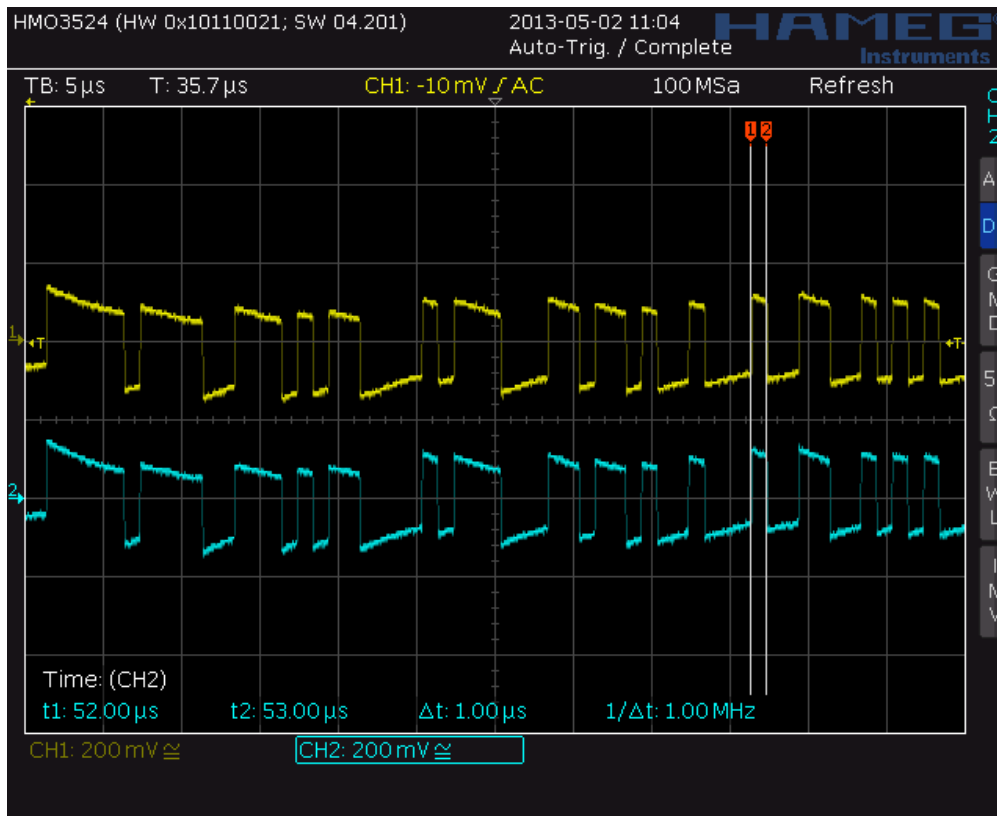
Obrázek 43 - IQ složky BPSK

Pro testování modulace BPSK je jako zdroj IQ složek využit ovládací software. Generuje pravouhlé impulzy o frekvenci 1MHz s amplitudou V_{pp} 1V. Žlutý průběh představuje I složku a modrý průběh Q složku. U BPSK jsou obě posloupnosti shodné. Tento signál je přiveden do modulátoru, který jej namoduluje na vysokofrekvenční nosnou vlnu kmitočtu 2,5GHz.



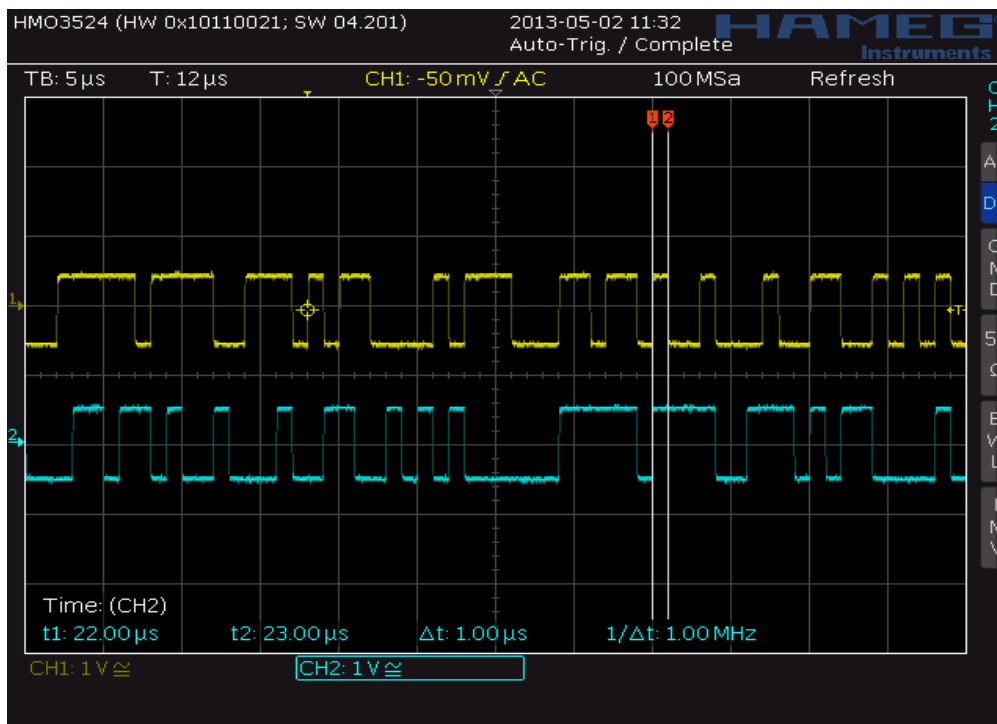
Obrázek 44 - Spektrum BPSK s SM300

Na výstupu modulátoru se objevuje požadovaný BPSK signál, pro jehož zobrazení ve frekvenční oblasti je připojen na spektrální analyzátor. Výsledné spektrum obsahuje potlačenou nosnou vlnu a šířka hlavního laloku odpovídá dvojnásobku kmitočtu modulačního signálu. Spektrum se shoduje s teoretickými předpoklady i modelem.



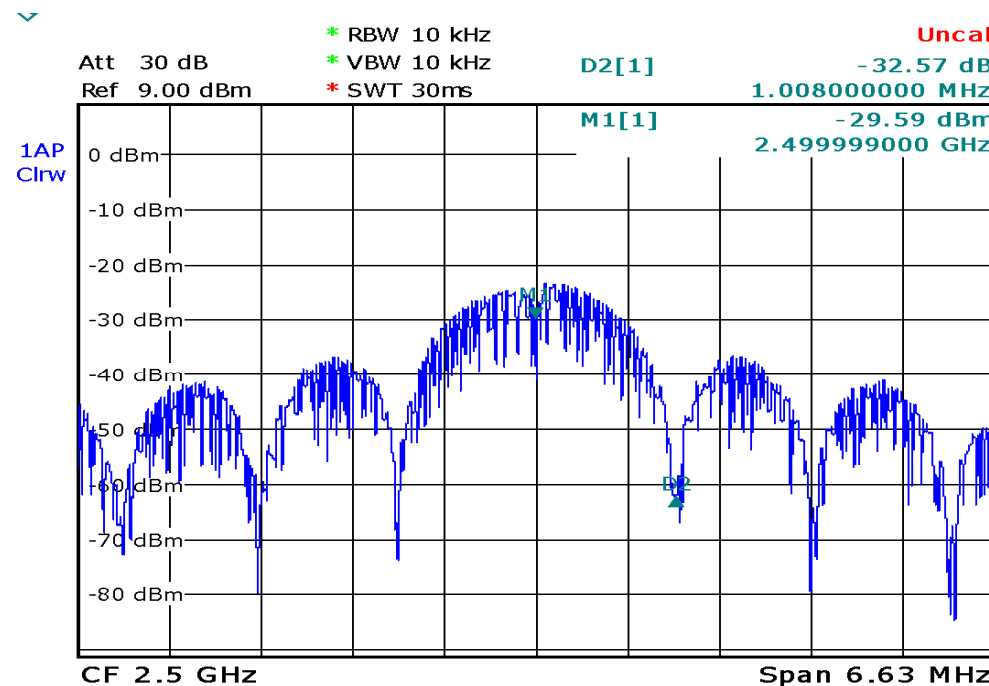
Obrázek 45 - IQ složky po demodulaci

Na výstupu se objevuje požadovaný BPSK signál, pro jehož zobrazení ve frekvenční oblasti je připojen na spektrální analyzátor. Výsledné spektrum obsahuje potlačenou nosnou vlnu a šířka hlavního laloku odpovídá dvojnásobku kmitočtu modulačního signálu. Spektrum se shoduje s teoretickými předpoklady i s modelem. Demodulace BPSK signálu je zpětné získání vstupní posloupnosti. IQ složky jsou demodulovány s amplitudou V_{pp} 200mV a jsou velmi dobře rozlišitelné.



Obrázek 46 - IQ složky QPSK

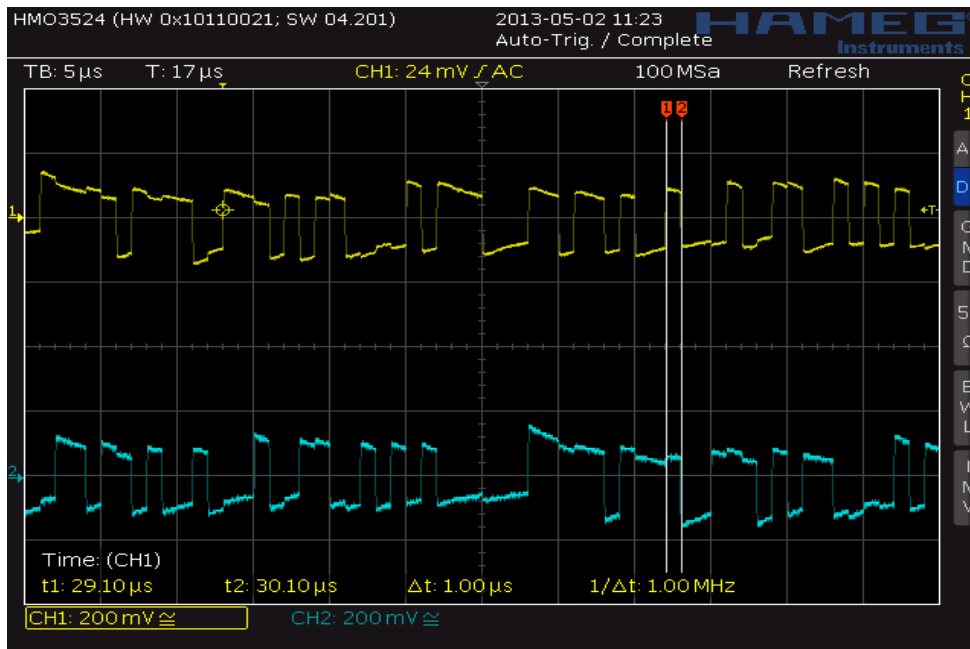
Zdroj IQ složek modulačního signálu je posloupnost pravoúhlých impulzů zobrazených na obrázku. Pro modulaci QPSK jsou tyto posloupnosti rozdílné. Na prvním kanálu je ukázána I složka a na druhém Q složka. Signál je generován s amplitudou V_{pp} 1V a s frekvencí 1MHz. Tyto dvě složky se namodulují na nosnou vlnu s kmitočtem 2,5GHz.



Date: 2.MAY.2013 11:41:17

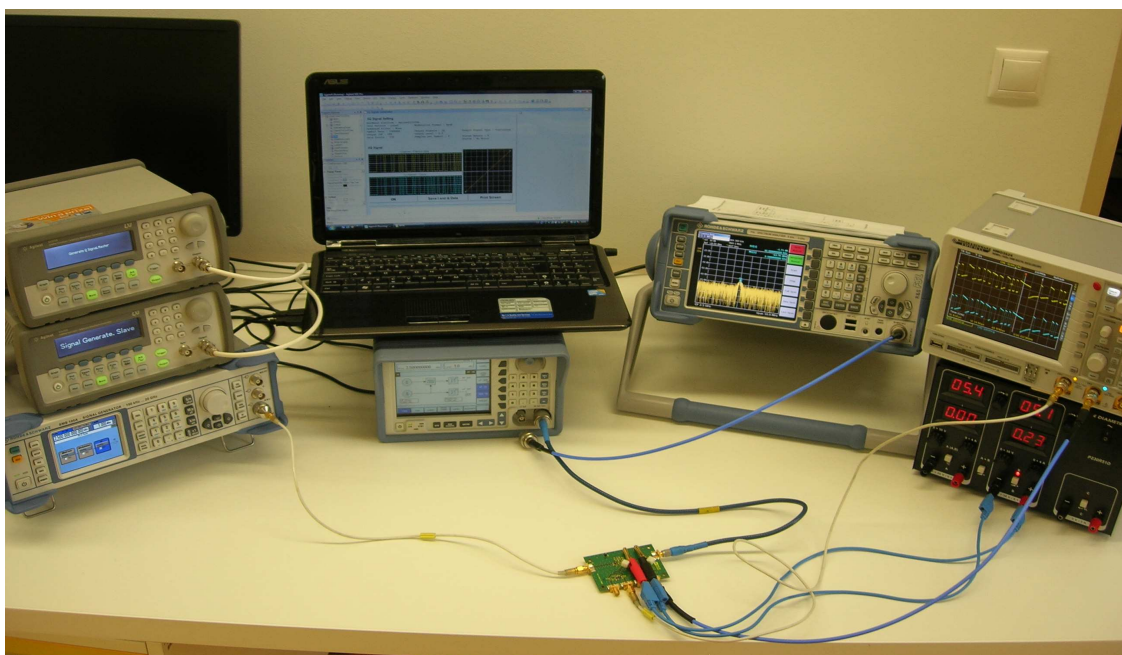
Obrázek 47 - Spektrum QPSK s SM300

Výsledné spektrum QPSK signálu obsahuje potlačenou nosnou vlnu a spektrum odpovídá spektru obdélníku posunutému na nosnou vlnu s hodnotou kmitočtu 2,5GHz. Šířka hlavního laloku odpovídá dvojnásobku modulačního signálu, což potvrzuje i teoretický model spektra.



Obrázek 48 - IQ složky po demodulaci

IQ složky po demodulaci mají hodnotu amplitudy V_{pp} 200mV, což oproti hodnotě původního modulačního signálu ($1V_{pp}$) znamená pětinašobné zeslabení (-14dB). Demodulované IQ složky odpovídají vstupní posloupnosti a jsou velmi dobře čitelné.



Obrázek 49 - Pracoviště s modulátorem R&S SM300

Závěr

V části simulace modulace BPSK a QPSK byl v simulačním prostředí Simulink programu Matlab sestaven model pracoviště pro měření IQ modulací na modulátoru a demodulátoru. Díky předdefinovaným modulům v prostředí Simulink je názorně ukázáno, jak proces modulace a demodulace probíhá. Nejprve byla testována základní dvojjádrová digitální modulace BPSK. V oscilogramu zobrazeném na obrázku 17 je znázorněn spolu s vstupním modulačním signálem i požadovaný BPSK signál. Na třetím kanálu jsou vykreslena demodulovaná data, která zcela odpovídají vstupním datům. BPSK modulace se vykazuje nízkou spektrální účinností přenosu, což je spojeno s vysokou odolností proti šumu. Tato vlastnost byla simulací úspěšně ověřena. Lepší spektrální účinnost nabízí modulace QPSK. Na oscilogramu zobrazeném na obrázku 19 jsou vykreslena vstupní data, požadovaný QPSK signál se změnami fáze a demodulovaná data, která ovšem nejsou zcela totožná se vstupními. Chyba je způsobena menší odolností modulace proti šumu, což se změnami hodnot bloku AWGN potvrdilo. Z tohoto modelu se bohužel nepodařilo získat teorii odpovídající spektra jednotlivých modulací. Proto byl pro tento účel napsán skript v programu Matlab, který je k nahlédnutí v příloze. Spektrum odpovídá spektru obdélníku, jen je posunuto kolem hodnoty kmitočtu nosné vlny 2,5GHz. Šířka pásma hlavního laloku je 2MHz, což odpovídá dvojnásobku hodnoty modulačního signálu. Obě spektra jsou v simulačním prostředí shodná.

Úkolem praktické části této práce bylo zprovoznění reálného měřicího pracoviště pro měření IQ modulací na modulátoru a demodulátoru v laboratoři. Dle původního zadání měly být IQ složky modulačního signálu generovány v Matlabu a prostřednictvím karty NI-USB 6251 přivedeny na rozdílový zesilovač. Z tohoto důvodu byl požadovaný modul nejprve v programu Eagle navržen a později v podobě plošného spoje realizován. Pracoviště bylo zapojeno dle schématu. Během testování BPSK modulace byla při měření spektra objevena nesprávná činnost modulátoru ADL5373. Z tohoto důvodu bylo přistoupeno k náhradnímu řešení, a to nahrazení modulátoru ADL5373 modulátorem SM300. Pro použití tohoto modulátoru bylo nutno navrhnout nové schéma zapojení pracoviště. Oproti předchozímu zapojení nelze použít syntezátor ADF4360, který je nahrazen vysokofrekvenčním signálovým generátorem R&S SMB 100A. Po zapojení pracoviště bylo nejprve provedeno testování modulace BPSK, jejíž výsledky odpovídaly teorii i modelu. Teoretické předpoklady splňují i naměřené výsledky u modulace QPSK. Sejmuté oscilogramy z přístrojů jsou uvedeny v odpovídajících podkapitolách.

Ze dvou modulátorů vyzkoušených na tomto pracovišti se pro potřeby měření jako použitelný jeví vysokofrekvenční generátor SM300, který ovšem byl zvolen jen jako náhradní řešení. Pro lepší názornost procesu modulace a demodulace na pracovišti by byl vhodnější modulátor ADL5373, ale z časové náročnosti na opravu nebyl v konečné podobě pracoviště použit. I přes technické problémy bylo pracoviště zprovozněno a z výsledků měření lze konstatovat, že se získané hodnoty shodují s teoretickými předpoklady.

Literatura

- [1] Dobeš, J., Žalud, V. Moderní Radiotechnika. Praha: Technická literatura – BEN, 2006. 768 s. ISBN 80-7300-132-2.
- [2] Přenos dat. Fyzikální principy [online]. Ostrava: VŠB Ostrava, 2008 [cit. 2013-02-09]. Dostupné z: <http://www.cs.vsb.cz/grygarek/PS/lect/fyzPrincipy.html>
- [3] Přenos digitálního signálu. Modulace a kódy [online]. Brno : VUT Brno, 2009 [cit. 2013-05-02]. Dostupné z: <http://orchard.own.cz/modulace&kody.pdf>
- [4] WJ Communication. TriQuint [online]. 2001 [cit. 2013-04-06]. Dostupné z: http://www.triquint.com/products/techlibrary/docs/WJ_classics/PSK_demod_part1.pdf
- [5] Analog Device. Datasheet ADL5373 [online]. 2008 [cit. 2013-05-08]. Dostupné z: http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADL5373.pdf
- [6] Analog Device. Datasheet ADL5382 [online]. 2012 [cit. 2013-05-09]. Dostupné z: http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADL5382.pdf
- [7] Analog Device. Datasheet Eval-ADF4360-0EB1 [online]. 1999 [cit. 2013-03-06]. Dostupné z: http://www.analog.com/Analog_Root/static/techSupport/designTools/evaluationBoards/downloads/EVAL-ADF4360-0EB1_b1.pdf
- [8] Polyphase Microwave. Datasheet Driving the QM Series Quadrature Modulators [online]. 2008 [cit. 2013-02-09]. Dostupné z: <http://www.polyphasemicrowave.com/datasheets/AN-101A.pdf>

Přílohy

Bakalářská práce – adresář obsahující elektronickou verzi dokumentu v pdf

Model – adresář obsahující model v Simulinku

Spektrum – adresář obsahující skripty na zobrazení spektra BPSK a QPSK modulace