Použití softwarově definovaného rádia v leteckých navigačních aplikacích.

Simulace a implementace vybraných částí vysílače

Autor: Petr BOJDA
Adresa: Morávka 575, okr. Frýdek-Místek
Dne: 30. května 2017
Verze dokumentu: 2.0

1 Úvod

Hlavní cíl zprávy

Zpráva vzniká na podnět výzkumného týmu Katedry Leteckých elektrotechnických systémů k podpoře výzkumného úkolu v oblasti terestriálních navigačních systémů s rozprostřeným spektrem. Cílem je nalézt vhodnou strukturu a parametry signálu tak, aby co nejlépe vyhověl požadavkům na celkový systém. V této fázi bude důraz kladen zejména na co nejlepší autokorelační vlastnosti signálu tak, aby bylo dosaženo co nejpřesnější synchronizace, resp. měření časového zpoždění.

Sekundární cíl zprávy

Dalším důvodem ke vzniku této zprávy je snaha demonstrovat, případně i pomoci s přípravou výuky v oblasti digitálních rádiových systémů. Pozornost je věnována hlavně moderním přístupům k návrhu, analýze, verifikaci a implementaci jednotlivých částí digitálního rádiového systému na bázi softwarově definovaného rádia (SDR). Nedílnou součástí zprávy jsou ucelené bloky softwaru (knihovny a aplikace) vytvořené tak, aby jednak plnily požadovanou funkci v rámci návrhu systému, ale zároveň aby dostatečně srozumitelně demonstrovaly způsob psaní daného typu programu a jeho použití.

Použité prostředky

Zpráva vznikla jako komentovaný popis a dokumentace návrhu digitálního rádiového systému. Zahrnuje základní kroky návrhu - simulaci, testování (verifikaci) a nakonec i finální implementaci. Cílovou platformou je SDR, tudíž lze předpokládat, že funkce rádiového systému bude popsána, definována a implementována formou bloků software. Veškeré softwarové nástroje a prostředky použité při zpracování této zprávy jsou v kategorii "Open-Source Software License", zejména BSD licence v případě simulačních nástrojů a GNU GPL v případě implementačních nástrojů. Textová část je editována v systému Latex. Jednotlivé práce byly odvedeny na počítačích s operačním systémem Linux, distribuce Ubuntu. Nebyly použity žádné softwarové nástroje podléhající komerční licenci.

K simulaci je využit systém knihoven v jazyce Python, zejména pak knihovny NumPy, Matplotlib a SciPy. S využitím funkcí těchto knihoven byly vytvořeny knihovny vlastních funkcí ke generování signálů, jejich modulace v základním pásmu (baseband), jejich konverze do vyššího kmitočtového pásma (up-convertor), filtrace, tvarování impulzu s ohledem na minimalizaci mezisymbolové interference při přenosu signálu kanálem s omezeným kmitočtovým pásmem (ISI - Inter-Symbol Interference) a další. Jak bylo uvedeno výše, všechny simulace jsou psány v programovacím jazyce Python.

Prvky digitálního rádiového systému jsou implementovány do SDR E310 firmy Ettus

a/nebo s pomocí levného USB přijímače DVB-TV signnálu s čipem RTL2832U. Implementace je ve většině případů provedena pomocí softwarového balíku GNU Radio. Některé části jsou pak implementovány přímo za použití knihovních funkcí výrobce rádia E310, tzv. API funkcí v jazyce C++.

2 Struktura digitálního rádiového systému

Složení systému

Tato práce se zabývá obecným digitálním rádiovým systémem. V leteckých aplikacích jsou rádiové systémy použity ve třech základních oblastech: komunikační, navigační a přehledové. Podle toho, jaký je primární účel systému, mění se i jeho složení a nastavení parametrů. Společná je jejich základní struktura:

- Vysílač
- Přenosový kanál
- Přijímač

V dalším budou analyzovány tyto tři komponenty oprostěné od funkcí specifických pro dané oblasti použití. To znamená, že nebude zahrnuto například různé kódování přenášené bitové posloupnosti (zdrojové či kanálové) a podobně. Vstupem vysílače je logický signál. Ten je modulován některou z mnoha digitálních modulací na nosný harmonický signál a anténou vyslán do prostoru. Přenosový kanál reprezentuje souhrnně vliv prostředí (přenosového média) na přenášený signál. Jako příklad je možno jmenovat: přidaný šum, útlum, vícecestné šíření, dopplerův posun, interference, omezení šířky pásma přenášeného signálu a jiné. Zkreslený signál je poté detekován a zpracován pomocí přijímače.

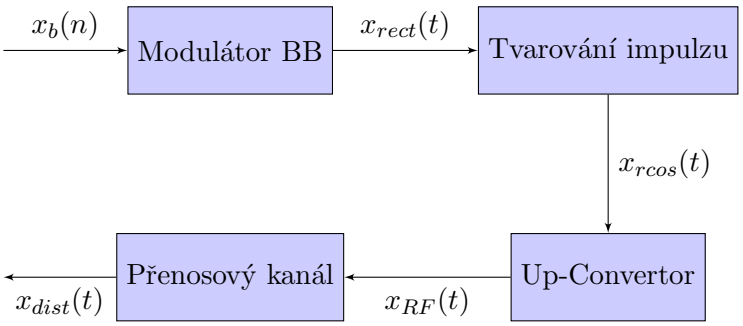
2.1 Vysílač

Popis struktury vysílače

Struktura vysílače, jak bude v následném textu chápána a analyzována je na obr. 1. Vstupní signál $x_b(n)$ je bitovou posloupností nesoucí požadovanou informaci. Blok *Modulátor BB* přemění – moduluje vstupní bitovou posloupnost na komplexní signál v základním pásmu (angl. *baseband*). Signál v základním pásmu $x_{rect}(t)$ pomocí aktuální úrovně své reálné a imaginární složky precizně definuje amplitudu a fázi nosné složky budoucího výstupního signálu vysílače $x_{RF}(t)$. To je již signál s harmonickou nosnou, na kterou vybranou digitální modulací namodulována bitová posloupnost $x_b(n)$.

Baseband modulace – signál v základním pásmu

SDR (ať už simulované, nebo reálně využívané v této zprávě) používá k transformaci (konverzi) ze základního kmitočtového pásma do pásma nosného kmitočtu (angl. *passband*) obvod kmitočtové přeměny (tzv. směšovač) *Up-Convertor* typu kvadraturní modulátor.



Obrázek 1: Základní struktura digitálního rádiového vysílače.

Tento typ obvodu vyžaduje komplexní vstupní signál v základním pásmu. Komplexní signál v základním pásmu je tvořen reálnou (soufázní, angl. *In-Phase*) a imaginární (kvadraturní, angl. *Quadrature*) složkou[1]. Blok *Modulátor BB* tvaruje ze vstupní posloupnosti $x_b(n)$ komplexní $x_{rect}r(t)$ signál, který je charakterizovaný svou tzv. bitovou (symbolovou) rychlostí (angl. *bitrate*)[2] a amplitudou. "*Modulátor BB*"je již navržen konkrétně pro daný typ výsledné digitální modulace signálu na výstupu vysílače $x_{RF}(t)$. Přicházející bity vstupní posloupnosti $x_b(n)$ jsou nejprve seskupovány podle typu výsledné modulace, viz.:

- dvoustavová: 1 symbol signálu $x_{rect}(t)$ odpovídá 1 bitu posloupnosti $x_b(n)$,
- čtyřstavová: 1 symbol signálu $x_{rect}(t)$ odpovídá 2 bitům posloupnosti $x_b(n)$,
- osmistavová: 1 symbol signálu $x_{rect}(t)$ odpovídá 3 bitům posloupnosti $x_b(n)$, ...

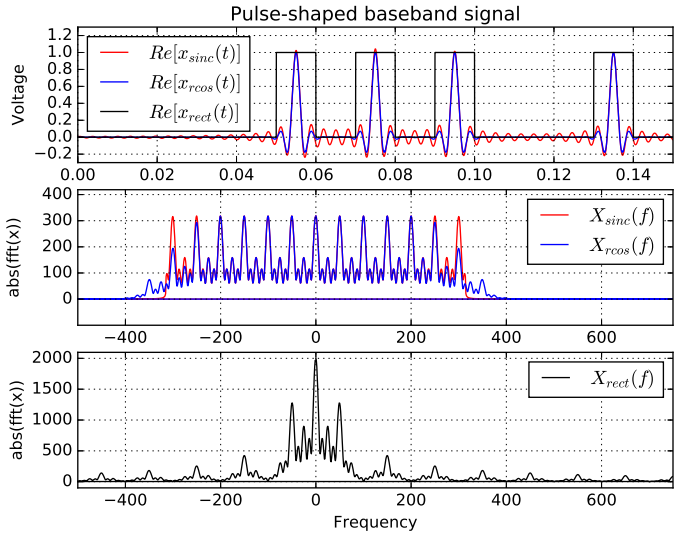
Poté jsou seskupené bity tvořící *m-tice* (angl. *tuples*) mapovány na patřičnou reprezentaci pomocí komplexního signálu $x_{rect}(t)$. Pro každou kombinaci bitů symbolu je definována i kombinace úrovní[3] soufázní a kvadraturní složky signálu $x_{rect}(t)$. Jedním ze základních parametrů digitálních rádiových systémů je i požadovaná přenosová *bitová* (angl. *bitrate*) a z ní odvozená *symbolová* (angl. *symbol–rate*) rychlost. Symbolová rychlost definuje dobu trvání jednoho symbolu (impulzu) T_S.

Za blokem *Modulátoru BB* jsou přechody mezi jednotlivými symboly signálu $x_{rect}(t)$[4] Tvarování pulzu

[1] Soufázní složka signálu bývá v technické praxi často označována jako signál I, kvadraturní pak jako Q.

[2] V případě *m-stavové* modulace je poměr bitové rychlosti k rychlosti symbolové dán počtem bitů přenesených v jednom symbolu.

[3] kvantizační úroveň může být dána přímo napětím, nebo vyjádřena jen číselně. To záleží na aktuální podobě obvodu Up-konvertoru. Někdy je vyžadován vstupní signál v základním pásmu, tzv. I a Q v analogové podobě. Moderní integrované obvody provádějící konverzi však často obsahují na vstupu dva DA převodníky a signál v základním pásmu je na ně přiváděn ve formě diskrétních I a Q vzorků.



Obrázek 2: Příklad tvarování impulzu signálu v základním pásmu. Kvůli jednoduchosti je znázorněná pouze jedna (uvažujme například, že reálná - symfázní) složka komplexního signálu.

ideálně strmé, viz obr. 2. Signál v základním pásmu (*baseband* signál) má v tuto chvíli podobu ideálních obdélníkových impulzů. Obdélníkový průběh je v reálných podmínkách nevýhodný. Skutečné přenosové kanály značně omezují kmitočtové spektrum přenášených signálů a potlačují některé kmitočty. Zjednodušeně lze jejich chování modelovat filtry typu dolní nebo pásmová propust[5]. Pro soudobé systémy pracující s vysokými bitovými (symbolovými) rychlostmi by nepredikovatelné zkreslení impulzu jednotlivých symbolů představovalo vážný problém při detekci a následném zpracování signálu v přijímači. Proto blok *Tvarování impulzu* kontrolovaně omezí pásmo signálu $x_{rect}(t)$ tím, že tvaruje jednotlivé impulzy symbolů podle vhodných matematických funkcí. Teoreticky je jich používáno více (*gauss*, *sinc*, ...), prakticky jsou používány funkce *raised-cosine* (ve zkratce *rcos*). V podstatě se jedná o "utlumenou"funkci sinc (angl. *damped sinc*). Výstupem bloku "*Tvarování impulzu*"je tedy signál $x_{rcos}(t)$, jehož kmitočtové spektrum je na rozdíl od signálu $x_{rect}(t)$ ohraničené a definované už v době návrhu systému. Signál $x_{rect}(t)$ s ideálně obdélníkovým průběhem, signál $x_{rcos}(t)$, kde je impulz tvarován funkcí raised-cosine a nakonec i signál

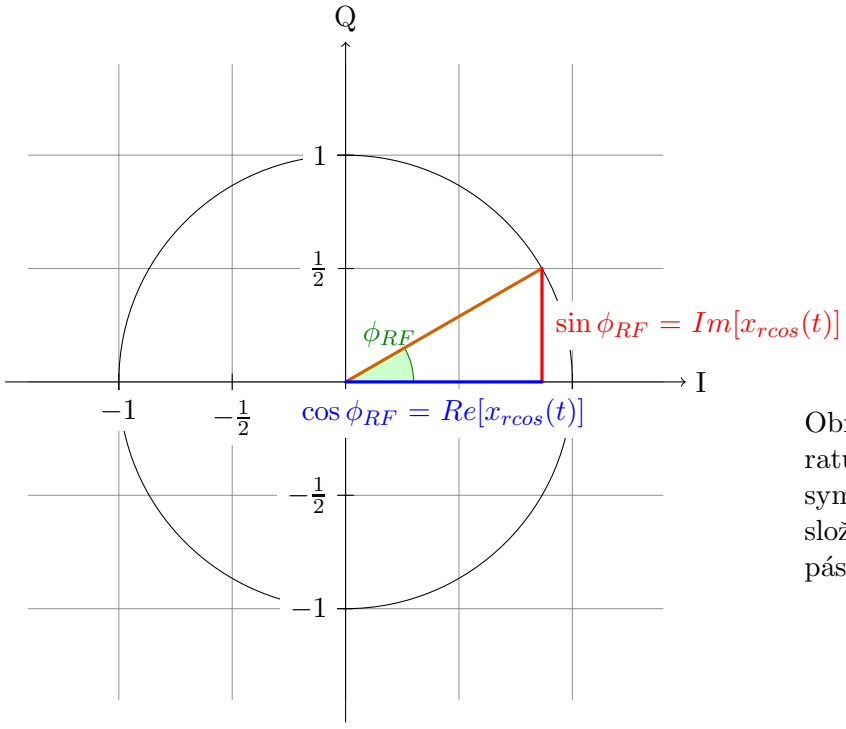
[4]U komplexního signálu v základním pásmu se už nehovoří o "bitech", ale o "symbolech". Přestože v tuto chvíli pojem "symbolu"ještě není precizně definován, je kvůli správnosti výkladu použit. Nicméně, v případě dvoustavových modulací obsahuje symbol jeden datový bit. Proto je možné setkat se někdy v technické literatuře s pojmem "bit"i v případě *baseband* signálu.

[5]V angl. psané literatuře jsou označovány jako "*bandlimited channels*"

$x_{sinc}(t)$ s impulzem ve tvaru funkce sinc spolu se svými kmitočtovými spektry jsou prezentovány na obrázku 2.

Up-Convertor, Transformace do pásma VF

Komplexní signál $x_{rcos}(t)$ je připraven k transformaci (ke konverzi) do kmitočtového pásma vhodného pro daný systém. Většina SDR dnes využívá obvod *kvadraturní modulátor*. Tento typ modulátoru (často pojmenovávaného anglicky *Up-Convertor*) umožňuje obrovskou flexibilitu celého rádia. Je jedním z hlavních stavebních prvků SDR a příčinou "softwarového"přístupu k tvarování signálu rádia. Jde o to, že nezměněná hardwarová struktura může vygenerovat signál $x_{RF}(t)$ s takřka libovolnou digitální modulací. Záleží jen na tom, jak bude vypadat komplexní signál v základním pásmu $x_{rcos}(t)$. Ten, pomocí své reálné složky $Re[x_{rcos}(t)]$ a imaginární složky $Im[x_{rcos}(t)]$ přesně určuje fázi $\phi_{RF}(t)$ a amplitudu výsledného signálu $x_{RF}(t)$. Obrázek 3 demonstruje tento princip. Zde uvažujeme pouze digitální modulace s konstantní amplitudou nosného signálu. U nich je manipulováno jen s fází $\phi_{RF}(t)$[6] nosného harmonického signálu.



Obrázek 3: Princip kvadraturní modulace. Význam symfázní a kvadraturní složky signálu základního pásma.

[6] Skupina modulací manipulujících s fází (v angl. *PSK*, čili *phase shift keying*)

Díky nízkým kmitočtům signálů základního pásma je možné k jejich tvarování využít procesorů (často obsahujících podpůrné struktury pro číslicové zpracování signálů) a tím pádem lze jejich strukturu i parametry určovat softwarem v procesoru. Přeneseně tedy software procesoru tvaruje (definuje) vysokofrekvenční signál na výstupu vysílače $x_{RF}(t)$.

3 Teoretický popis funkce vysílače

Předpokládejme, že systém bude vysílat předem známou – definovanou posloupnost bitů: $b(n)$

$$b(n) = b_0, b_1, \ldots, b_N \tag{1}$$

Známe jednak celkovou délku posloupnosti – N bitů a také hodnotu každého z bitů posloupnosti $b(n)$, přičemž n je z oboru přirozených čísel.

3.1 Moduační schéma

M-stavová modulace

Použita bude jednoduchá digitální modulace bez paměti (*angl.* memoryless), kdy je posloupnost bitů $b(n)$ mapována na jednotlivé symboly z M-prvkové množiny (*v angl. literatuře* M-ary mapping schema). Zvolená modulace je potom pojmenováne podle počtu dostupných symbolů "M-stavová". Podrobněji viz např. [1], [2] nebo jiná literatura věnující se základům digitální modulace signálů. Posloupnost $b(n)$ je tudíž rozděnena na skupinky bitů o délce k, kde

$$k = \log_2 M. \tag{2}$$

Potom se z posloupnosti bitů $b(n)$, viz rovnice (1), stává posloupnost symbolů $a(l)$

$$a(l) = a_0, a_1, \ldots, a_L \tag{3}$$

Délka posloupnosti symbolů je L, kdy $L = \frac{N}{k}$.

Bandpass signál

Každý *symbol* $a(l)$, který je tvořen skupinkou k bitů je mapován na jeden z M možných signálů $s_m(t)$ (*angl.* waveforms).

$$s_m(t), 1 \leq m \leq 2^k. \tag{4}$$

Jedná se o harmonické signály tzv. vysokofrekvenční (VF), tedy fakticky o signály v podobě, v jaké budou vysílány anténou vysílače (*angl.* bandpass). Ty jsou charakteristické (a jedinečné) svou amplitudou, fází nebo svým kmitočtem, podle typu modulace.

V této práci se budeme zabývat převážně signály, u nichž je modulovaná jejich fáze

(*angl.* phase–type of modulation). Podle [2] je takový signál analyticky vyjádřen:

$$s_m(t) = h(t) \cdot e^{j\frac{2\pi(m-1)}{M}} \cdot e^{j2\pi f_c t}. \tag{5}$$

V tuto chvíli je možné $h(t)$ považovat za konstantu, která se v průběhu trvání jednoho symbolu nemění. Prostřední člen, který charakterizuje daný symbol, vyjádříme v exponenciálním tvaru:

$$e^{j\frac{2\pi(m-1)}{M}} = \cos(2\pi\frac{m-1}{M}) + j\sin(2\pi\frac{m-1}{M}). \tag{6}$$

Baseband signál

Jak bylo naznačeno v předchozí kapitole, signály zastupující jednotlivé symboly, tedy *bandpass* signály mohou být reprezentovány jinými - nízkofrekvenčními signály tzv. základního pásma (*angl.* baseband). Ten je složen ze symfázní složky (*angl* in-phase) $s_m^I(t)$ a kvadraturní složky (*angl.* quadrature) $s_m^Q(t)$ podle:

$$s_m^I(t) = h(t) \cdot \cos(2\pi\frac{m-1}{M}), \tag{7}$$

$$s_m^Q(t) = h(t) \cdot \sin(2\pi\frac{m-1}{M}). \tag{8}$$

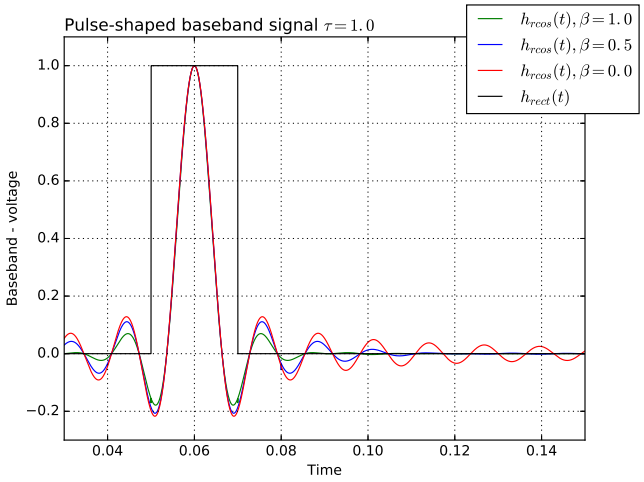
Transformace signálu základního pásma na signál VF je realizována pomocí kvadraturního modulátoru (*angl.* quadrature modulation), viz např. [2].

3.2 Tvarování impulzu

Každý ze symbolů posloupnosti $a(l)$ je vysílán po omezenou dobu. Po dobu trvání toho symbolu je vysílán patřičný signál s_m, který je v našem případě harmonický signál s příslušnou fází. V dalším textu budou tyto časové úseky nazývány v souladu s zaběhnutou terminologií impulzy.

Pokud je, jak jsme doposud uvažovali, hodnota $h(t)$ po dobu celého jednoho impulzu konstantní, je okamžitá úroveň signálu základního pásma (jeho I a Q složky) dána hodnotou m, viz rovnice (7) a (8). Pak mluvíme o obdélníkových impulzech (*angl* rectangular).

Z toho je zřejmé, že funkce $h(t)$ definuje tvar použitého impulzu. Jak bylo již zmíněno v úvodní části, není použití obdélníkových impulzů vždy výhodné vzhledem k jejich nekonečně širokému kmitočtovému spektru. Je běžnou praxí použít jiné – výhodnější – funkce



Obrázek 4: Raised-cosine impulzy s rozdílnou hodnotou roll-off faktoru β.

pro $h(t)$ než je konstanta, a to například funkci *raised–cosine*:

$$h(t) = \frac{\sin(\frac{\pi t}{T})}{\frac{\pi t}{T}} \cdot \frac{\cos(\pi\beta\frac{t}{T})}{1 - 4\beta^2(\frac{t}{T})^2}, \tag{9}$$

kde β, z intervalu $0 \leq \beta \leq 1$, je tzv. *roll-off* faktor. Detailněji viz [1] nebo [2]. Raised–cosine pulzy pro různé hodnoty β jsou znázorněny na obr. 4. Vězte, že pokud $\beta = 0$ potom $h(t)$ přechází na funkci $sinc(\pi t/T)$.

3.3 Popis časových souvislostí signálu s tvarovaným impulzem

Každý ze signálů $s_m(t)$ je vysílán po dobu trvání jednoho symbolu T_s (*angl.* symbol interval). Odtud také symbolová rychlost R_s (*angl.* symbol rate):

$$R_s = \frac{1}{T_s} \tag{10}$$

Potom T_s definuje délku trvání impulzu a každý ze signálů $s_m(t)$ je vysílán uvnitř příslušného symbolového intervalu T_s s patřičnou hodnotou parametru m. Tvarovací funkce

$h(t)$ z rovnice. (9) se tudíž mění na:

$$h(t - lT_s) = \frac{\sin(\frac{\pi(t-lT_s)}{T_s})}{\frac{\pi(t-lT_s)}{T_s}} \cdot \frac{\cos(\pi\beta\frac{(t-lT_s)}{T_s})}{1 - 4\beta^2(\frac{(t-lT_s)}{T_s})^2}, \tag{11}$$

kde l značí pořadové číslo aktuálního symbolu v rámci posloupnosti $a(l)$.

Impuls tohoto tvaru potom splňuje Nyquistovo kritérium, viz [2], a nedochází k mezi-symbolové interferenci (*angl* inter–symbol interference) a k nejednoznačnosti při detekci a identifikaci symbolu v přijímači.

Signál základního pásma pro příslušný l-tý symbol posloupnosti $a(l)$, potom z rovnice (3) je dán:

$$s^I_{m,l}(t) = h(t - lT_s) \cdot \cos(2\pi\frac{m_l - 1}{M}), \tag{12}$$

$$s^Q_{m,l}(t) = h(t - lT_s) \cdot \sin(2\pi\frac{m_l - 1}{M}). \tag{13}$$

4 Generátor rádiového signálu

Z úvodní části tohoto textu a z obrázku 1 je patrno několik stupňů – fází, ze kterých se celý proces generování rádiového signálu skládá. Uvažujme, že vstupem je posloupnost, viz rovnice (1). V první řadě jde o formování požadovaných n-tic bitů přenášené bitové posloupnosti $b(n)$, podle zvoleného počtu stavů modulace M. Každá z n-tic bitů definuje hodnotu patřičného symbolu. Hodnotu symbolu je potřeba "namapovat"na patřičnou podobu složek signálu základního pásma a poté složky I a Q, tedy $s_m^I(t)$ a $s_m^Q(t)$, podle rovnic (7) a (8) vygenerovat.

V digitálním rádiovém systému slouží blok "Up-Convertor"k transformaci připraveného signálu v základním pásmu (baseband) do kmitočtového pásma vhodného k rádiovému přenosu. řekněme, že daný krok lze nazvat i "modulací nosné". up-convertor

V tomto projektu bude vytvořen Up-convertor pro účely simulace. Ve vlastní hardwarové implementaci slouží k přeměně samotné rádio, čili fyzicky RF-frontend.

4.1 Realizace Up-convertoru - Python

Let's start with a time-domain first to derive the differential equation from a *free-body diagram*. We will use the second Newton's law, setting the mass $M = 0$. Rozbor

4.2 Způsob generování

4.2.1 Přímý generátor

4.2.2 Root raised – cosine filtr

4.3 Použití bloku USRP v GNU Radio

We are required to derive both natural and step response.

Listing 1: Mapování bitové posloupnosti

```
1
2 """
3
4     :return: Baseband signal
5 """
6     tup = 2  # number of bits in one tuple
7     n_d = tup - (np.size(data) % tup)
```

```
8       data = np.append(data, np.zeros(n_d))  # appends zero to get odd number
9       data_2s = data.reshape(-1, tup)  # reshaping the data vector into matri
10      data_2s = data_2s > 0
```

5 Simulace - popis vytvořených funkcí

Veškeré simulace byly vytvořeny v jazyce Python, variantě 3.5.2. s využitím nástrojů knihoven Matplotlib 1.5.3, NumPy 1.11.1 a SciPy 0.18.1, vše instalováno v rámci balíku Anaconda 4.2.0. Simulace byly napsány, vyzkoušeny a provozovány na počítači s operačním systémem Linux Ubuntu 16.04.

Vytvořené funkce simulací jsou sdruženy do několika samostatných souborů s koncovkou `.py` a umístěné v podadresářích uvnitř samostatného adresáře `numpy`. Členění do podadresářů je podle logické a funkční příslušnosti. Dále hlavní adresář `numpy` obsahuje řadu příkladů použití simulačních funkcí.

Funkce ze souborů ve vnořených adresářích lze využít až poté, co jsou do skriptu hlavní úrovně importovány[7].

5.1 Generátory signálu

Funkce zde popsané jsou umístěny v podadresáři `siggens`. Patří k základním prostředkům modulací – generují signál požadovaného tvaru a parametrů a to jak v podobě základní (jediný, neopakující se impulz), tak i ve variantě opakujících se impulzů obsahujících kód.

5.1.1 Jednoduché impulzy

Funkce, které byly vytvořeny proto, aby generovaly jediný a neopakující se impulz jsou sdruženy v souboru `one_pulse.py`. Mohou sloužit jednak k prezentaci impulzu daného tvaru a jeho vlastností, zároveň jsou ale základem pro funkce, které spojují jednotlivé imulzy do jejich posloupností.

Funkce `rect_p` - obdélníkový impulz Funkce, viz. listing 2, generuje jednoduchý obdélníkový impulz. Vstupními parametry jsou t_{START} a t_{END}, tedy okamžik začátku a konce impulzu v rámci časové osy t. Výstupem funkce je vektor p vzorků impulzu odpovídajících vzorkovacím okmžikům definovaných vstupním vektorem t.

Listing 2: Generátor jednorázového obdélníkového impulzu

```
1 def rect_p( t,t_start,t_end ):
```

[7] Toto je pochopitelně dokumentovanou vlastností jazyka Python. Zde je tento fakt zmíněn pouze jako připomínka.

```
2       p = ((t>t_start) & (t<t_end)) *1
3       return (p)
```

Funkce `sinc_p` - $sinc(x)$ impulz Funkce, viz. listing 3, generuje jednoduchý sinc impulz. Vstupními parametry jsou t_0 a T_B, tedy střed impulzu v rámci časové osy t a šířka hlavního laloku T_B. Výstupem funkce je vektor p vzorků impulzu odpovídajících vzorkovacím okmžikům definovaných vstupním vektorem t.

Listing 3: Generátor jednorázového impulzu tvaru $\frac{\sin(x)}{x}$

```
1 def sinc_p( t,t0,Tb ):
2       p = np.sinc(np.pi*(t - t0)/Tb)
3       return (p)
```

Funkce `rcos_p` - Raised–cosine impulz Funkce, viz. listing 4, generuje jednoduchý raised–cosine impulz. Vstupními parametry jsou t_0 a T_B, tedy střed impulzu v rámci časové osy t a šířka hlavního laloku T_B. Výstupem funkce je vektor p vzorků impulzu odpovídajících vzorkovacím okmžikům definovaných vstupním vektorem t.

Listing 4: Generátor jednorázového impulzu tvaru raised-cosine

```
1 def rcos_p( t,t0,Tb,alpha ):
2       beta = alpha / Tb
3       damp = np.cos(np.pi*beta*(t - t0)) / (1 - 4*(beta*(t - t0))**2)
4       p = np.sinc(np.pi*(t - t0)/Tb) * damp
5       return (p)
```

5.1.2 Posloupnosti impulzů

Funkce, které byly vytvořeny proto, aby generovaly posloupnost impulzů různého tvaru jsou sdruženy v souboru `train_pulse.py`. Jsou napsány tak, aby jednak generovaly impulz požadovaného tvaru několikrát opakovaně v průběhu časové osy cané vektorem t. Dále mohou zahrnout i kódování - impulz je nebo není na daném časovém úseku přítomen, podle toho, je-li příslušný bit kódové posloupnosti roven logické jedničce nebo nule.

Funkce `rect_tr` - obdélníkový impulz Funkce, viz. listing 5, generuje posloupnost obdélníkových impulzů. Vstupními parametry jsou délka impulzu t_p, délka mezery mezi

impulzy t_s, a zpoždění celé posloupnosti – mezera mezi začátkem časové osy t a začátkem prvního impulzu. Dále je vstupem vektor logických hodnot *code*. Ten určuje jednak kódovou posloupnost – tzn. přítomnost nebo nepřítomnost daného impulzu v rámci celé řady impulzů. Dále počet bitů posloupnosti *code* určuje počet impulzů výsledného signálu.

Výstupem funkce je vektor x vzorků impulzů odpovídajících vzorkovacím okmžikům definovaných vstupním vektorem t.

Listing 5: Generátor posloupnosti obdélníkových impulzů

```
1 def rect_tr( t,tp,ts,td,code ):
2     n = np.size(code)
3     x=np.zeros(np.shape(t)) > 1
4     for i1 in range (0,n):
5         p = pulse.rect_p( t,td + i1*(tp+ts),td + tp + i1*(tp+ts) )
6         x = (x | p & code[i1]) * 1
7     return (x)
```

Funkce `sinc_tr` - $sinc(x)$ impulz Funkce, viz. listing 6, generuje posloupnost impulzů $sinc(x)$. Vstupními parametry jsou délka impulzu t_p, délka mezery mezi impulzy t_s, a zpoždění celé posloupnosti – mezera mezi začátkem časové osy t a středem prvního impulzu. Dále je vstupem vektor logických hodnot *code*. Ten určuje jednak kódovou posloupnost – tzn. přítomnost nebo nepřítomnost daného impulzu v rámci celé řady impulzů. Dále počet bitů posloupnosti *code* určuje počet impulzů výsledného signálu.

Parametr *pw* je specifický pro tvar impulzu *sinc*. Určuje délku hlavního laloku funkce $sinc(x)$ uvnitř celého pulzu t_p. Jestliže parametr t_p můžeme nastavit podle bitové rychlosti *bitrate*, potom samotný $sinc(x)$ impulz může být v rámci jednoho bitu kratší - užší.

Výstupem funkce je vektor x vzorků impulzů odpovídajících vzorkovacím okmžikům definovaných vstupním vektorem t.

Listing 6: Generátor posloupnosti impulzů $\frac{\sin(x)}{x}$

```
1 def sinc_tr( t,ts,td,code,pw ):
2
3     #pw = 2e-3 # pulse width in ms
4     n = np.size(code)
5     x=np.zeros(np.shape(t))
6     for i1 in range (0,n):
7         p = pulse.sinc_p( t,td + i1*(ts),pw )
8         x = (x + p * code[i1])
9     return (x)
```

Funkce `rcos_tr` - Raised–cosine impulz Funkce, viz. listing 7, generuje posloupnost impulzů raised–cosine. Vstupními parametry jsou délka hlavního laloku impulzu t_p, délka mezery mezi impulzy t_s, a zpoždění celé posloupnosti – mezera mezi začátkem časové osy t a středem prvního impulzu. Dále je vstupem vektor logických hodnot *code*. Ten určuje jednak kódovou posloupnost – tzn. přítomnost nebo nepřítomnost daného impulzu v rámci celé řady impulzů. Dále počet bitů posloupnosti *code* určuje počet impulzů výsledného signálu.

Parametr *pw* je jako v případě *sinc* impulzu specifický pro tvar impulzu raised–cosine. Určuje délku hlavního laloku funkce $sinc(x)$ uvnitř celého pulzu t_p. Jestliže parametr t_p můžeme nastavit podle bitové rychlosti *bitrate*, potom samotný $sinc(x)$ impulz může být v rámci jednoho bitu kratší - užší.

Parametr *alpha* udává tzv. roll–off faktor funkce raised–cosine.

Výstupem funkce je vektor x vzorků impulzů odpovídajících vzorkovacím okmžikům definovaných vstupním vektorem t.

Listing 7: Generátor posloupnosti raised–cosine impulzů

```
1  def rcos_tr( t,ts,td,code,pw,alpha ):
2
3      #pw = 2e-3 # pulse width in ms
4      #alpha = .5 # roll-off factor
5      n = np.size(code)
6      x=np.zeros(np.shape(t))
7      for i1 in range (0,n):
8          p = pulse.rcos_p( t,td + i1*(ts),pw,alpha )
9          x = (x + p * code[i1])
10     return (x)
```

Důležité: Parametr t_d znamená u posloupnosti obdélníkových impulzů zpoždění posloupnosti vzhledem k náběžné hraně prvního pulzu, u posloupností impulzů tvaru $sinc(x)$ a raised–cosine vzhledem je ke středu hlavního laloku. To je potřeba respektovat, pokud se posloupnosti umisťují na časové ose společně.

5.1.3 Generátory pseudonáhodných posloupností

Funkce, které byly vytvořeny proto, aby generovaly posloupnosti bitů — generátory kódových a pseudonáhodných posloupností — jsou sdruženy v souboru `PRN_bitstreams.py`. Tyto

funkce jsou vhodné jednak k testování digitálních rádiových systémů a potom k rozprostření kmitočtového spektra v systémech typu DSSS (z angl. *Direct Sequence Spread Spectrum*).

`tri_seq`: Tří–bitový SSRG. Funkce, viz. listing 8, generuje bitovou posloupnost pomocí posuvného registru se zavedenými několika zpětnými vazbami SSRG[8]. V tomto konkrétním případě je použit generátor ve Fibonacciho tvaru s tří–bitovým registrem. Prvním vstupem funkce je parametr `init_reg` logický vektor (3 bity), který určuje počáteční stav registru před startem procesu generování posloupnosti. Druhým vstupním parametrem je opět tříbitový logický vektor `fb_reg`, který definuje zpětné vazby posuvného registru. Logická "0"v tomto vektoru znamená, že zpětná vazba není z daného bitu posuvného registru odvadana. Naopak logická "1"indikuje přítomnost zpětné vazby z příslušného bitu registru.

Výstupem funkce je 10-ti bitový vektor logických hodnot - vygenerovaná bitová posloupnost.

Listing 8: Generátor jednoduché posloupnosti. 3-bitový SSRG, generována je posloupnost 10-ti bitů.

```
# 10-bits sequence outputting 3-bits SSRG in a Fibonacci form.
def tri_seq(init_reg,fb_reg):
    #  Output register
    x=np.zeros([10])
    #  Shift register
    shft_reg = init_reg
    #  Feedback registers - bit '1' means -> FB is connected
    #  defined as an input argument fb_reg
    for i1 in range (0,9):
        in1 = int(np.dot(shft_reg,fb_reg)%2)
        x[i1] = shft_reg[2]
        shft_reg = np.roll(shft_reg,1)
        shft_reg[0] = in1

    return (x.astype(bool))
```

`gold_seq`: Generátor Goldova kódu. Funkce, viz. listing 9, generuje Goldovu pseudonáhodnou bitovou posloupnost, tzv. Goldův kód. Jsou použity dva 10–bitové posuvné registry se zavedenými vlastními několika zpětnými vazbami a se dvěma vazbami *vzájemnými*. Vzájemné vazby zabezpečují navázání registrů a spojení dvou nezávislých posloupností do

[8] z angl. *Simple Shift Register Generator*

jedné výsledné. Rozmístění vlastních zpětných vazeb jednotlivých registrů, stejně jako jejich počáteční stavy, jsou v souladu se standardem družicového navigačního systému GPS tak, aby generované posloupnosti odpovídaly posloupnostem použitým v tomto systému.

Prvními dvěma vstupními parametry jsou umístění *vzájemných* vazeb `x1` a `x2`. Jedná se o celá čísla v rozsahu 0–9, která definují číslo bitu posuvného registru, z nějž je vazba odvedena[9]. Třetím vstupním parametrem je opět celé číslo `N_codes`, které určuje počet period kódu vygenerovaných na výstupu[10].

Výstupem funkce je vektor logických hodnot o délce ($N_{codes} \cdot 1023$) – vygenerovaných `N_codes` period Goldovy posloupnosti.

Listing 9: Generátor Goldovy posloupnosti.

```
# Gold sequence generator - two 10-bits SSRG
def gold_seq(x1,x2,N_codes):
    #  Output register
    x=np.zeros([N_codes*1023])
    # Maximum-length sequence generators:
    #  Shift registers
    shft_reg_1 = np.array ([1,1,1,1,1,1,1,1,1,1])
    shft_reg_2 = np.array ([1,1,1,1,1,1,1,1,1,1])
    #  Feedback registers - bit '1' means -> FB is connected
    fbck_reg_1 = np.array ([0,0,1,0,0,0,0,0,0,1])
    fbck_reg_2 = np.array ([0,1,1,0,0,1,0,1,1,1])

    for i1 in range (0,N_codes*1023):
        g1  = shft_reg_1 [9]
        g2  = ( shft_reg_1[x1] + shft_reg_2[x2] ) % 2
        in1 = np.dot(shft_reg_1,fbck_reg_1) % 2
        in2 = np.dot(shft_reg_2,fbck_reg_2) % 2
        x[i1] = ( g1 + g2 ) % 2
        shft_reg_1 = np.roll(shft_reg_1,1)
        shft_reg_1[0] = in1
        shft_reg_2 = np.roll(shft_reg_2,1)
        shft_reg_2[0] = in2

    return (x.astype(bool))
```

[9] Jednotlivé kombinace `x1` a `x2` produkují unikátní posloupnost. Standard popisující systém GPS precizně definuje konkrétní kombinace pro kódy petřící jednotlivým družicím a jiným typům vysílačů v systému (např. družice SBAS, pseudolity a jiné)

[10] Jedna perioda Goldovy posloupnosti obsahuje 1023 bitů.

5.2 Modulátory

V této části jsou popisovány funkce uskutečňující modulace signálu — tvarování komplexního signálu v základním pásmu a jeho transformaci do vyšších kmitočtů - konverzi do tzv., *passband*u. Funkce jsou umístěny v podadresáři `modulators`.

5.2.1 Tvarovače signálu v základním pásmu

V základním pásmu — *baseband*u — je potřeba vytvořit komplexní signál, složený ze symfázní (I) a kvadraturní (Q) složky. Aktuální úrovně těchto dvou složek definují okamžitou fázi a amplitudu signálu v *passband*u — tedy na výstupu *Up–Convertoru*, potažmo celého vysílače.

Zde jsou popisovány funkce, vytvořené k tvarování signálu základního pásma. Jsou sdruženy v souboru `constallation_mappers.py`. Na základě vstupní bitové posloupnosti – dat – je tvarován výstupní komplexní signál $I + jQ$ jednak podle požadované výsledné digitální modulace a také podle požadovanéhjo tvaru impulzu.

`rect_bpsk_map`: BPSK modulace s obdélníkovým impulzem. Funkce tvaruje komlexní signál základního pásma pro modulaci BPSK s obdélníkovým impulzem. Vstupem je časová osa `t`, bitová posloupnost (vektor logických hodnot) `data`, která bude namodulována, požadovaná bitová rychlost `b_rate` a volitelně parametry výstupního signálu:

- `tp` je hodnota t_p, šířka pulzu (bitu). Pokud není tento parametr explicitně definován při volání funkce, je přednastaveno $t_p = \frac{1}{b\_rate}$.
- `td` je hodnota t_d, zpoždění posloupnosti od počátku časové osy. Pokud není tento parametr explicitně definován při volání funkce, je přednastaveno $t_d = 0$.
- `ts` je hodnota t_s, mezera mezi impulzy. Pokud není tento parametr explicitně definován při volání funkce, je přednastaveno $t_s = 0$.

V případě BPSK je kvadraturní signál konstantní, roven nule; symfázní signál nabývá hodnoty 1 při aktuální hodnotě `data` rovné logické 1 a hodnoty -1, pokud je daný bit vektoru `data` roven logické 0.

`rect_qpsk_map`**: QPSK modulace s obdélníkovým impulzem.** Funkce tvaruje komlexní signál základního pásma pro modulaci QPSK s obdélníkovým impulzem. Vstupem je časová osa `t`, bitová posloupnost (vektor logických hodnot) `data`, která bude namodulována, požadovaná symbolová rychlost `s_rate` a volitelně parametry výstupního signálu:

- `tp` je hodnota t_p, šířka pulzu (symbolu). Pokud není tento parametr explicitně definován při volání funkce, je přednastaveno $t_p = \frac{1}{s\_rate}$.
- `td` je hodnota t_d, zpoždění posloupnosti od počátku časové osy. Pokud není tento parametr explicitně definován při volání funkce, je přednastaveno $t_d = 0$.
- `ts` je hodnota t_s, mezera mezi impulzy. Pokud není tento parametr explicitně definován při volání funkce, je přednastaveno $t_s = 0$.

Modulace QPSK přenáší v jednom symbolu dva datové bity. Proto je datová posloupnost nejprve rozdělena na dvojice (data jsou přeskupeny do matice `data_2s` o dvou sloupcích). Pokud počet bitů v původním vstupním vektoru `data` není sudý, je doplněna nula. *Baseband* signál modulace QPSK je následně tvrován tak, že symfázní signál nabývá hodnoty 1, resp. -1 pro aktuální hodnoty logické 1, resp. 0 prvního bitu aktuální dvojice vstupních bitů (rozuměj aktuálního řádku matice `data_2s`). Obdobně je tvarován i kvadraturní signál, ten ovšem vychází z druhého bitu daného řádku matice `data_2s`.

`sinc_bpsk_map`**: BPSK modulace s impulzem tvaru** $sinc(x)$**.** Funkce tvaruje komlexní signál základního pásma pro modulaci BPSK s obdélníkovým impulzem. Vstupem je časová osa `t`, bitová posloupnost (vektor logických hodnot) `data`, která bude namodulována, požadovaná bitová rychlost `b_rate` a volitelně parametry výstupního signálu:

- `tp` je hodnota t_p, šířka pulzu (bitu). Pokud není tento parametr explicitně definován při volání funkce, je přednastaveno $t_p = \frac{1}{b\_rate}$.
- `td` je hodnota t_d, zpoždění posloupnosti od počátku časové osy. Pokud není tento parametr explicitně definován při volání funkce, je přednastaveno $t_d = 0$.
- `ts` je hodnota t_s, mezera mezi impulzy. Pokud není tento parametr explicitně definován při volání funkce, je přednastaveno $t_s = 0$.

V případě BPSK je kvadraturní signál konstantní, roven nule; symfázní signál nabývá hodnoty 1 při aktuální hodnotě `data` rovné logické 1 a hodnoty -1, pokud je daný bit vektoru `data` roven logické 0.

`sinc_qpsk_map`: QPSK modulace s obdélníkovým impulzem. Funkce tvaruje komlexní signál základního pásma pro modulaci QPSK s obdélníkovým impulzem. Vstupem je časová osa `t`, bitová posloupnost (vektor logických hodnot) `data`, která bude namodulována, požadovaná symbolová rychlost `s_rate` a volitelně parametry výstupního signálu:

- `tp` je hodnota t_p, šířka pulzu (symbolu). Pokud není tento parametr explicitně definován při volání funkce, je přednastaveno $t_p = \frac{1}{s\_rate}$.
- `td` je hodnota t_d, zpoždění posloupnosti od počátku časové osy. Pokud není tento parametr explicitně definován při volání funkce, je přednastaveno $t_d = 0$.
- `ts` je hodnota t_s, mezera mezi impulzy. Pokud není tento parametr explicitně definován při volání funkce, je přednastaveno $t_s = 0$.

Modulace QPSK přenáší v jednom symbolu dva datové bity. Proto je datová posloupnost nejprve rozdělena na dvojice (data jsou přeskupeny do matice `data_2s` o dvou sloupcích). Pokud počet bitů v původním vstupním vektoru `data` není sudý, je doplněna nula. *Baseband* signál modulace QPSK je následně tvrován tak, že symfázní signál nabývá hodnoty 1, resp. -1 pro aktuální hodnoty logické 1, resp. 0 prvního bitu aktuální dvojice vstupních bitů (rozuměj aktuálního řádku matice `data_2s`). Obdobně je tvarován i kvadraturní signál, ten ovšem vychází z druhého bitu daného řádku matice `data_2s`.

5.2.2 Up – Converter

5.3 Pomocné funkce

5.4 Filtry

5.4.1 Tvarovače impulzu

6 Implementace - popis vytvořených programů

Implementace algoritmů do SDR byly vytvořeny v jazyce Python, variantě 2.7. s využitím nástrojů balíku GNU Radio verze 3.7.10.1, dále knihoven NumPy 1.11.1 a SciPy 0.18.1. Simulace byly napsány, vyzkoušeny a provozovány na počítači s operačním systémem Linux Ubuntu 16.04.

Dále pro přímou kompilaci algoritmů napsaných v jazyce C++ a využívajících API funkcí dodaných s ovladačem UHD výrobce rádia Ettus E310 bylo použito kompilátoru GNU C++ verze 4.9.2. Verze ovladače UHD 003.009.002.

Vytvořené příklady implementací jsou umístěné v podadresářích uvnitř samostatného adresáře `srcpy`

`hwimpl`, resp. `srcc`. Členění do podadresářů je podle logické a funkční příslušnosti.

Funkce ze souborů ve vnořených adresářích lze využít až poté, co jsou do skriptu hlavní úrovně importovány[11].

6.1 Implementace vysílače pomocí GNURadio v jazyce Python

Funkce zde popsané jsou umístěny v podadresáři `siggens`. Patří k základním prostředkům modulací – generují signál požadovaného tvaru a parametrů a to jak v podobě základní (jediný, neopakující se impulz), tak i ve variantě opakujících se impulzů obsahujících kód.

6.2 Implementace vysílače pomocí API funkcí UHD v jazyce C++

Programy, které byly vytvořeny proto, aby demonstrovaly možnosti použití API funkcí dodaných výrobcem rádia spolu s ovladači UHD jsou uloženy v adresáři `srcc`.

Jsou napsány jako zdrojové soubory jazyka c++ v souborech s koncovkou `.cpp`. Definice použitých tříd jsou potom přidány v podobě hlavičkových souborů s koncovkou `.hpp`.

Pro to, aby bylo možno programy spustit na cílové platformě, je potřeba je tam i zkompilovat. Spolu s API funkcemi výrobce dodává i vlastní sadu příkladů použití a dále vzorový příklad kompilace. Ten byl po nezbytných úpravách uložen v adresáři `src`

`UHD_compile`. Postup je popsán v přiloženém souboru `README`.

[11] Toto je pochopitelně dokumentovanou vlastností jazyka Python. Zde je tento fakt zmíněn pouze jako připomínka.

Reference

[1] B. Lathi and Z. Ding, *Modern Digital and Analog Communication Systems*, ser. Oxford series in electrical and computer engineering. Oxford University Press, 2009. [Online]. Available: https://books.google.cz/books?id=dltNPwAACAAJ

[2] Proakis, *Digital Communications 5th Edition*. McGraw Hill, 2007.