

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA APLIKOVANÉ ELEKTRONIKY A TELEKOMUNIKACÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Aplikace softwarového rádia pro výuku a experimenty

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Bc. Miroslav KOTRCH
Osobní číslo: E12N0091P
Studijní program: N2612 Elektrotechnika a informatika
Studijní obor: Dopravní elektroinženýrství a autoelektronika
Název tématu: Aplikace softwarového rádia pro výuku a experimenty
Zadávací katedra: Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

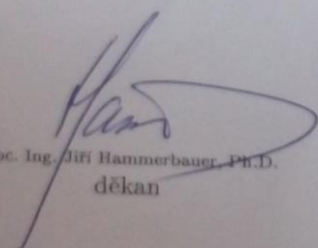
1. Seznamte se s principem funkce jednotky softwarově definovaného rádia ETTUS USRP N200.
2. Realizujte několik ukázkových zapojení přijímacího nebo vysílacího řetězce v grafickém prostředí GNU RADIO.
3. Vyzkoušejte některý z hotových modulačních řetězců pro rozhlasové vysílání FM/DRM/T-DAB.
4. Otestujte vlastnosti realizovaných přenosových řetězců pomocí měřicí techniky a běžně dostupných přijímačů.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:

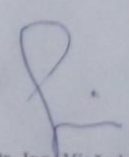
Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Richard Linhart, Ph.D.
Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

Datum zadání diplomové práce: 15. října 2014
Termín odevzdání diplomové práce: 11. května 2015


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

Anotace

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na softwarově definované rádio, modulační metodu OFDM a její implementaci v softwaru GNU Radio. Dokumentace bloků OFDM v softwaru GNU Radio. Na jednotce ETTUS USRP N200 je realizováno několik ukázkových příkladů.

Klíčová slova

Softwarově definované rádio, SDR, USRP, GNU Radio, GNU Radio Companion, Ortogonální frekvenční multiplex, OFDM, Cyklický prefix, QAM, modulace, modulátor, demodulátor

Abstract

This diploma thesis focuses on the software-defined radio, OFDM modulation method and its implementation in the GNU Radio software. Documentation OFDM blocks in GNU Radio software. The unit ETTUS USRP N200 is realized by several example programs.

Key words

Software defined radio, USRP, SDR, GNU Radio, GNU Radio Companion, Orthogonal frequency-division multiplexing, OFDM, Cyclic prefix, modulation, modulator, demodulator

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce. Dále prohlašuji, že veškerý software použitý při řešení této diplomové práce je legální.

V Plzni dne 10.5.2015

Miroslav Kotrch

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Richardu Linhartovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	10
1 DIGITÁLNÍ MODULACE	11
2 MODULACE MCM	12
3 MODULACE OFDM	13
3.1 VLASTNOSTI OFDM	13
3.2 MODULÁTOR A DEMODULÁTOR OFDM.....	15
3.2.1 <i>Modulátor OFDM</i>	15
3.2.2 <i>Demodulátor OFDM</i>	15
3.3 OCHRANNÝ INTERVAL A CYKlickÝ PREFIX	16
3.4 SYNCHRONIZACE	17
3.4.1 <i>Obnova referenční nosné vlny pomocí pilotního signálu</i>	18
3.4.2 <i>Metody obnovení referenční nosné vlny bez pilotního signálu</i>	18
3.4.3 <i>Časová synchronizace s využitím preamble</i>	19
3.4.4 <i>Obnova časování symbolů</i>	19
3.5 PŘENOSOVÝ ŘETĚZEC OFDM.....	19
4 SOFTWAREVĚ DEFINOVANÉ RÁDIO	21
4.1 ETTUS USRP-N200	22
4.2 UHD.....	23
5 GNU RADIO	23
5.1 GNU RADIO COMPANION.....	24
6 IMPLEMENTACE OFDM V GRC	25
6.1 OFDM MODULÁTOR.....	25
6.1.1 <i>OFDM Mapper</i>	26
6.1.2 <i>OFDM Insert Preamble</i>	27
6.1.3 <i>FFT, IFFT</i>	27
6.1.4 <i>OFDM cyclic prefix</i>	27
6.2 OFDM DEMODULÁTOR.....	27
6.2.1 <i>OFDM receiver</i>	28
6.2.2 <i>Channel filtr</i>	28
6.2.3 <i>OFDM symbol synchronization</i>	28
6.2.4 <i>Frequency Modulator</i>	29
6.2.5 <i>OFDM Sampler</i>	29
6.2.6 <i>FFT</i>	29
6.2.7 <i>Frame Acquisition</i>	29
6.2.8 <i>OFDM frame sink</i>	29
7 PROGRAMY V GNR	31
7.1 FM PŘIJÍMAČ S USRP.....	31
7.2 KOMUNIKAČNÍ SYSTÉM OFDM - SIMULACE	31
7.3 KOMUNIKAČNÍ SYSTÉM OFDM V REÁLNÉM ČASE.....	33
7.4 KOMUNIKAČNÍ SYSTÉM OFDM – MĚŘENÍ BER.....	33
ZÁVĚR	34

POUŽITÉ ZKRATKY	35
SEZNAM OBRÁZKŮ	36
POUŽITÁ LITERATURA.....	1

Úvod

V této práci jsem se zaměřil na softwarové rádio, které se v posledních letech velmi rychle rozšiřuje. Softwarově definované rádio nahrazuje hardwarové funkční bloky pro úpravu signálu univerzálním, softwarově řízeným digitálním obvodem. To umožňuje měnit parametry systému bez zásahu do hardwarové části. V této práci se zabývám SDR na bázi jednotek USRP a platformy GNU Radio se zaměřením na moderní modulační metodu OFDM. Postupně budou zdokumentovány a popsány bloky v softwaru GNU Radio Companion.

Práce je rozdělena do několika částí. První část je věnována digitální modulaci OFDM, principu, vysvětlení modulátoru a demodulátoru a synchronizace. V druhé části je popsán princip SDR a jednotka USRP, ve třetí části potom software GNU Radio a základní používané bloky v GNU Radio. V závěrečné části jsou zdokumentovány bloky OFDM a některé ukázkové programy vytvořené v GNU Radio Companion.

1 Digitální modulace

Digitální modulaci lze obecně označit jako nelineární proces, kdy je jeden nebo více parametrů (amplituda, kmitočet, fáze) nosného signálu modulován signálem diskretní modulace. Při digitální modulaci se parametry signálu – amplituda, kmitočet, fáze, mění skokově. U dvoustavových modulací se modulovaný parametr mění pouze mezi dvěma diskretními stavy. Jeden z nich odpovídá modulačnímu bitu 0 a druhý modulačnímu bitu 1. Tyto diskretní stavy se obecně označují jako symboly. Podle parametru nosného signálu, který je ovlivňován modulačním signálem, lze digitální modulace (klíčování) rozdělit do tří základních skupin. [1]

- **amplitudová modulace (ASK)** – amplituda signálu se mění podle hodnot amplitudy odpovídajícího průběhu modulačního signálu. Nejjednodušší digitální forma tzv. „on-off-keying“, signál se zapíná a vypíná podle maximální a nulové amplitudy v bitovém průběhu
- **kmitočtová modulace (FSK)** – kmitočet signálu se mění mezi diskretními hodnotami kmitočtu, které reprezentují průběh bitů
- **fázová modulace (PSK)** počáteční fáze signálu se mění mezi diskretními hodnotami fázových stavů, které reprezentují průběh bitů

Z těchto třech základních modulačních metod jsou odvozené další modulační metody. S počtem diskretních úrovní amplitudy, frekvence nebo fáze roste počet bitů, které mohou být přeneseny v jednom signálovém stavu. Digitální modulaci lze rozdělit na modulace dvoustavové a vícestavové (M -stavové). U dvoustavové modulace je v jednom symbolu přenášén jen 1 bit, který charakterizuje konkrétní stav nosného signálu. Modulovaný signál tedy dosahuje pouze dvou stavů. U vícestavové modulace je jeden signálový stav zastoupen skupinou bitů (symbolem) o délce n . Vyjádření vztahu mezi počtem stavů modulace M a délkou symbolu n :

$$M = 2^n \quad (1.1)$$

U M -stavové modulace je doba trvání jednoho symbolu označována jako symbolová perioda T_s , pro kterou platí:

$$T_s = n * T_b \quad (1.1)$$

kde n je počet bitů reprezentující daný symbol a T_b je bitová perioda (převrácená hodnota f_b). Ze vztahu (1.1) a (1.2) lze odvodit vztah pro symbolovou rychlost M -stavové modulace:

$$f_S = \frac{1}{T_S} = \frac{f_b}{n} = \frac{f_b}{\log_2 M} \text{ [baud]} \quad (1.3)$$

Ze vztahu 1.3 vyplývá, že použitím modulace s větším počtem stavů se zvýší přenosová rychlost. Kvůli výskytu rušení, interferencím a dalších nedokonalostí přenosového kanálu v reálných systémech není možné počet stavů zvyšovat donekonečna. Se zvyšováním počtu stavů modulace velmi roste náročnost správné detekce signálového stavu (nárůst bitových chyb na straně přijímače). [1] [2]

2 Modulace MCM

Běžně je k přenosu jediného modulačního signálu využita pouze jedna nosná frekvence v celém frekvenčním pásmu. Modulace MCM (Multi Carrier Modulation) využívají více nosných kmitočtů, kdy dělí datový tok do požadovaného počtu paralelních větví a každá větev je modulována na jiný nosný kmitočet. Ve vysílači je vstupní sériový modulační datový tok rozdělen do N pomalejších paralelních větví v sériově-paralelním převodníku. Jednotlivé větve jsou modulovány na N subnosných kmitočtů ($f_0, f_1 \dots f_{n-1}$) s vhodně zvolenými rozestupy Δf . Tento signál je přenášen přenosovým kanálem. V přijímači je signál demodulován a zpětně převeden paralelně-sériovým převodníkem, tím je získán opět rychlý sériový datový tok. [1]

První systémy vycházely z FDM (různé nosné přenášejí různé signály), kdy k rozdělení subkanálů byly použity běžné filtry. Jednotlivá pásma filtrů jsou od sebe oddělena bezpečnostními mezerami, aby nedocházelo k vzájemnému ovlivňování. Proto je také spektrální účinnost těchto systémů relativně malá. Spektrální účinnost lze zvýšit použitím modulace SQAM, kdy se sousední subkanály částečně překrývají.

Největší spektrální účinnost dosahují systémy využívající ortogonality subnosných. Tyto subkanály/subnosné mají velmi malé rozestupy. Každá z nich je vždy na kmitočtu, kde spektra všech ostatních subnosných jsou nulová. Proto nedochází k vzájemnému ovlivňování mezi jednotlivými nosnými. Systémy využívající ortogonality signálů, jsou jednou z nejdůležitějších kategorií systémů MCM. [1]

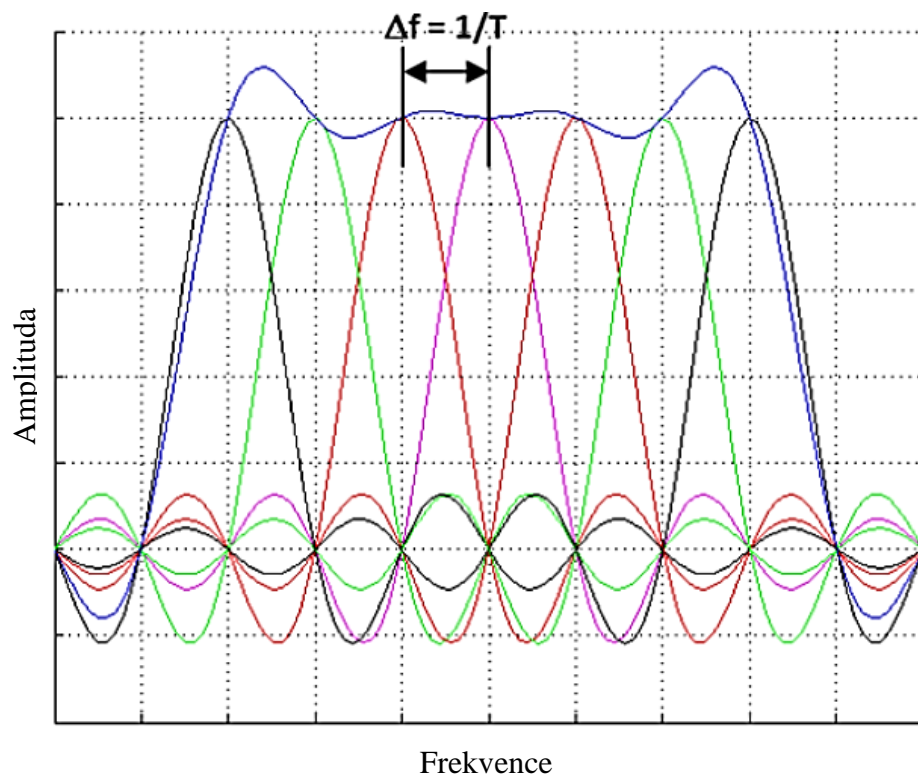
Rozšíření MCM přišlo až s rozvojem číslicové techniky. Především signálových procesorů DSP a hradlových polí FPGA. Jejich využitím je možné implementovat vhodné výpočetní algoritmy pro číslicové zpracování signálů. Jedná se především o algoritmy na výpočet dopředné a zpětné rychlé Fourierovy transformace (FFT, IFFT). [2]

3 Modulace OFDM

3.1 Vlastnosti OFDM

OFDM je zkratka pro ortogonální multiplex s frekvenčním dělením (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Modulační metoda OFDM využívá více nosných kmitočtů, které jsou navzájem ortogonální (jejich skalární součin je nulový). Celá šířka frekvenčního pásma B je rozložena do velkého počtu signálů zv. subnosných, které nezávisle na sobě přenáší části dat. [1]

Šířka jednoho subkanálu: $\Delta f = \frac{B}{N} = \frac{1}{T}$ T je délka symbolu.



Obr. 1 Spektrum OFDM signálu s pěti nosnými tóny

Subnosné jsou modulovány robustními modulacemi (QPSK, QAM). Nosné kmitočty jsou těsně vedle sebe, aby bylo maximálně využito dostupné frekvenční spektrum. Toto řešení má celou řadu výhod. V porovnání s klasickým FDM mají systémy využívající OFDM téměř dvakrát takovou spektrální účinnost. [2]

Spektrální účinnost je definována:

$$\rho = \frac{V_p}{B} \quad (1.4)$$

kde V_p je přenosová rychlost a B je šířka pásma.

Další velkou výhodou těchto systémů se projeví u pozemních rádiových kanálů s impulzními interferencemi, hlavně u disperzních kanálů s mnohacestným šířením vln. Impulzní interference u systémů s 1 nosnou vlnou mohou poškodit několik vzájemně sousedících symbolů. U systémů využívajících OFDM jsou tyto interference rozptýleny do mnoha paralelních subkanálů, kde jsou poškozeny jen malé úseky podstatně delších symbolů. Díky této vlastnosti stačí k rekonstrukci signálu jednodušší kanálové kódování. [2][1]

Systém OFDM je odolný vůči mnohacestnému šíření signálu. K mnohacestnému šíření signálu může dojít při odrazu vysílané vlny od objektů v prostoru, např. odrazem vln od budov nebo terénních překážek. Odražená vlna jde k přijímači po delší dráze než vlna přímá, čímž dochází k rozptylu doby šíření (δ), tj. rozptyl okamžiků příchodu vln. Tím je prodloužena impulzní odezva kanálu $h(t)$. Přijímač může přijmout kromě přímé vlny ještě řadu vln šířících se po různých drahách. V takovémto prostředí může docházet ke dvěma rušivým jevům.[1] [9]

- Mezisymbolovým interferencím ISI
- Interferencím mezi subnosnými vlnami ICI

Systém OFDM má vysokou odolnost vůči mezisymbolovým interferencím a to díky podstatně delším symbolovým periodám (je snížen počet symbolů ovlivňující tuto interferenci). Další způsob jak ještě více potlačit ISI, je použití ochranného intervalu OI (Guard interval). Ochranný interval je vkládán mezi po sobě jdoucí symboly. [1]

Vlivem mnohacestného šíření vln dochází k lineárnímu amplitudovému a fázovému zkreslení, které negativně ovlivňuje ortogonalitu vln. Energie jednotlivých subkanálů se potom navzájem mohou ovlivňovat a tím vznikají ICI interference. Interferenci ICI lze potlačit použitím cyklického prefixu CP místo ochranného intervalu OI, který eliminuje ISI a navíc potlačuje ICI. Cyklický prefix je kopie části užitečného signálu.

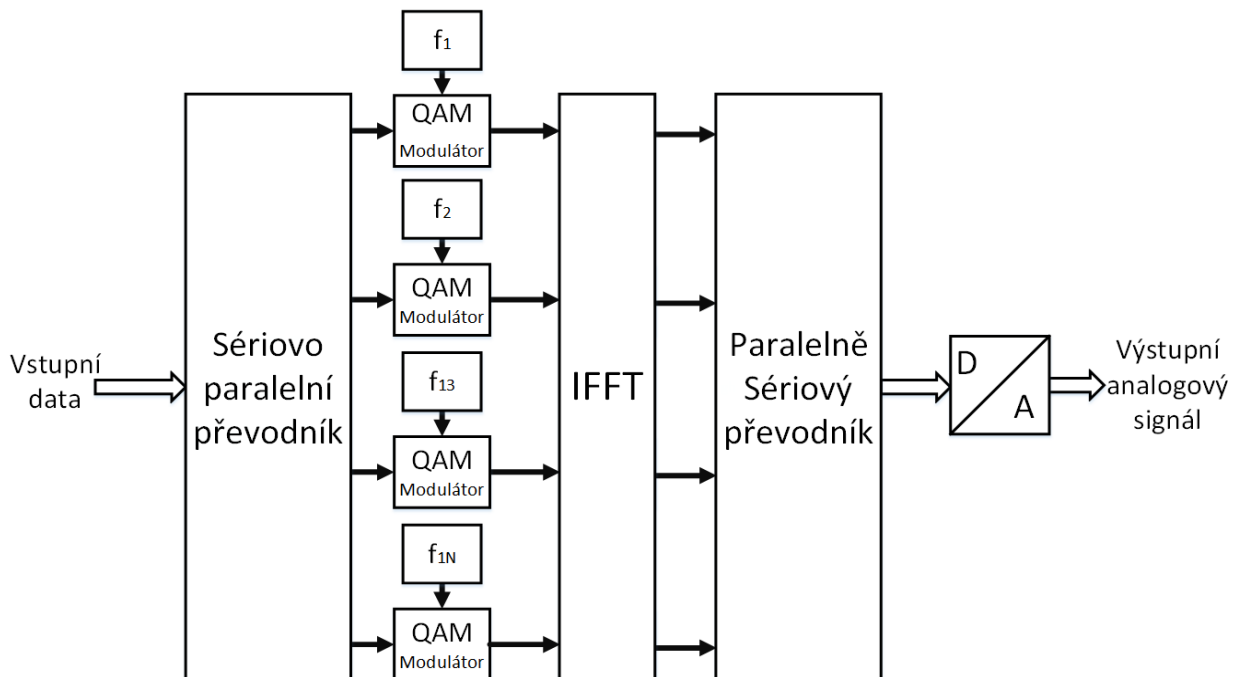
Systémy využívající OFDM jsou citlivé na kmitočtový ofset subnosných vln, které jsou blízko sebe. Protože signál OFDM nemá konstantní obálku, je zapotřebí zesilovat signál v lineárních výkonových zesilovačích. Tyto zesilovače jsou používány také proto, aby nedocházelo k narušení ortogonality subnosných vln. Signály OFDM se vyznačují vysokou

hodnotou poměru špičkového výkonu signálu ke střednímu výkonu signálu CF (Crest Factor). Díky této vlastnosti jsou nutné výkonné zesilovače a mnohabitové převodníky (AD, DA). Další nevýhodou je složitá synchronizace signálu v přijímači, kdy se musí obnovovat referenční nosná vlna CR (Carrier Recovery) a časování symbolů STR (Symbol Timing Recovery). Přes všechny tyto nedostatky je ortogonální multiplex OFDM vhodný pro použití v celé řadě aplikací jako např. vysílání digitální pozemní televize DVB-T, digitální rozhlasové vysílání DAB a bezdrátových sítích W-LAN. [1]

3.2 Modulátor a demodulátor OFDM

3.2.1 Modulátor OFDM

Modulátor je složen z několika funkčních bloků (Obr. 2). Na vstup modulátoru je přiveden sériový datový tok, který je převeden do N paralelních toků o n bitech. Následující bloky zajišťují mapování symbolů jednotlivých subkanálů. Následující blok pomocí IFFT převede signály z frekvenční do časové oblasti. Poslední částí modulátoru je paralelně sériový převodník, který sečte výstupy bloků IFFT. [2][4]

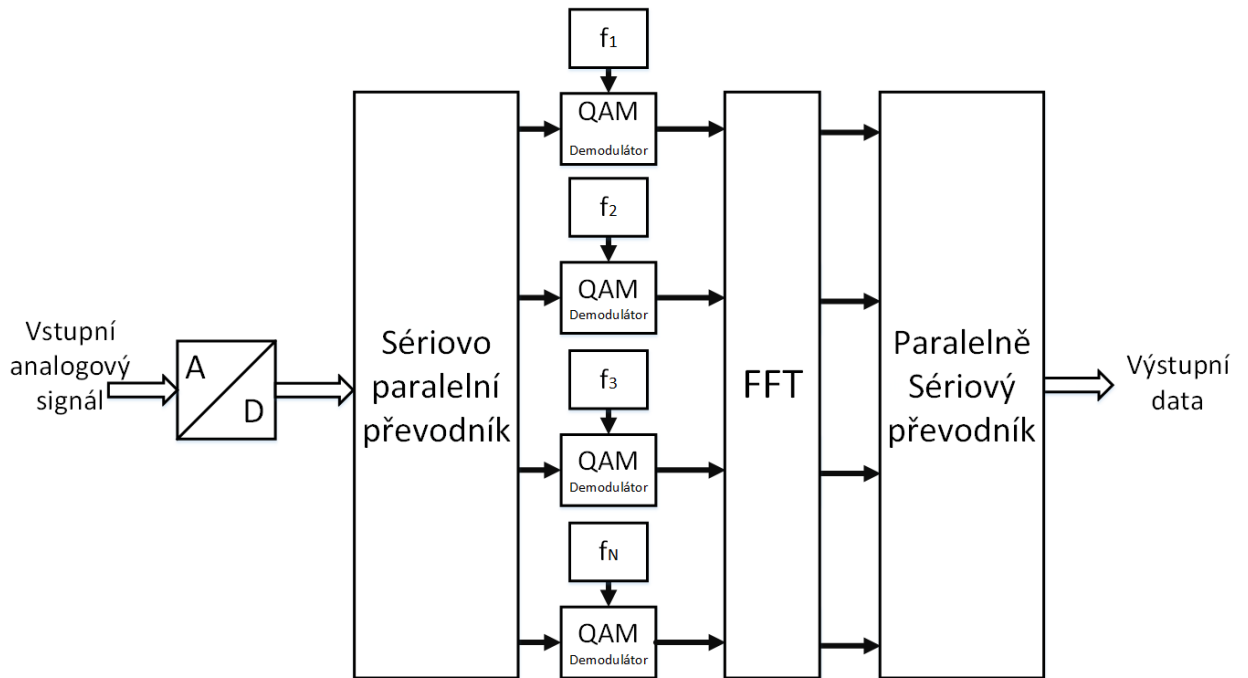


Obr. 2 OFDM modulátor

3.2.2 Demodulátor OFDM

Demodulátor pracuje na opačném principu (Obr. 3). Nejprve se signál rozdělí do N subkanálů v sérioparalelním převodníku, poté je signál převeden pomocí FFT z časové oblasti do frekvenční oblasti. V detektoru je jednotlivým symbolům přiřazena bitová kombinace.

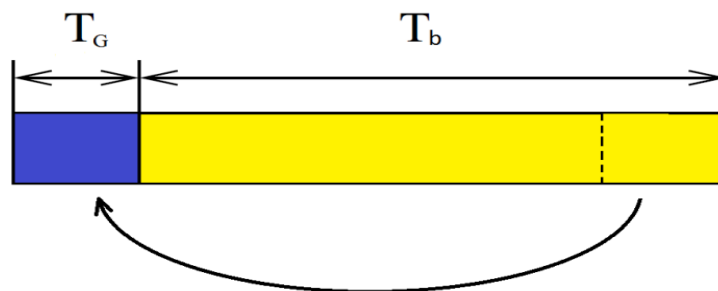
Potom je paralelní datový tok opět převeden na sériový datový tok. [4]



Obr. 3 OFDM demodulátor

3.3 Ochranný interval a cyklický prefix

Na následujícím obrázku je znázorněn OFDM symbol s CP v časové oblasti. Symbol se skládá ze dvou částí. Z části T_b , tedy doby, kdy jsou přenášena užitečná data (datová perioda FFT) a z ochranné doby T_G . Délka ochranné doby se volí podle parametrů přenosového kanálu.



Obr. 4 OFDM symbol v časové oblasti s ochranným intervalem

Ve frekvenční oblasti je symbol složen z tónů. Jejich počet závisí na použité velikosti FFT. OFDM symbol je definován čtyřmi parametry:

- Šířkou pásma
- Počtem nosných tónů

- Vzorkovacím činitelem
- Poměrem doby ochranného pásma T_G a užitečné doby symbolu T_b

Ochranný interval se používá pro oddělení jednotlivých symbolů, aby při zpoždění signálů způsobeném mnohacestným šířením, v přijímači nedocházelo k ovlivňování aktuálního symbolu symbolem předcházejícím – mezisymbolová interference ISI. Jedná se o krátký prázdný úsek, který je umístěn před každý OFDM symbol. Jeho délka se volí podle parametrů přenosového kanálu. [4]

Místo ochranného intervalu se často používá cyklický prefix CP. Mezi symboly dochází k interferenci, takže nelze přesně určit začátek symbolu. Protože je důležité bezpečně rozpoznat začátek symbolu, používá se cyklický prefix. Cyklický prefix (cyklická předpona) je postup, kdy se na začátek symbolu vloží určitá část konce tohoto symbolu (viz. Obr. 4). Délka CP se volí podle parametrů přenosového kanálu. Čím je délka CP větší tím je přenos odolnější vůči mnohacestnému šíření signálu, zároveň ale klesá velikost přenášených užitečných dat. Velikost ochranné doby je udávána jako poměr užitečné doby symbolu G . Např. $G=1/16$, tzn., že vezmeme poslední 1/16 užitečné doby symbolu a vložíme jí na začátek symbolu. CP vkládáme po provedení IFFT do složeného OFDM signálu. [4][1]

3.4 Synchronizace

Pro správnou činnost digitálních komunikačních systémů je velmi důležitá přesná synchronizace. U systémů OFDM se musí přesně obnovit nemodulovanou referenční nosnou vlnu. Ta je ale ve vysílači potlačena, protože nepřenáší žádnou užitečnou informaci a její přenos by zhoršoval energetickou bilanci. Proto jsou v přijímači obvody pro obnovení nosné vlny CR. Výstup demodulátoru musí být vzorkován v přesně daných okamžicích $tm = mTs + \tau$, kde $Ts = \frac{1}{f_s}$ je symbolová perioda a τ je nominální časové zpoždění signálu mezi vysílačem a přijímačem. K periodickému vzorkování je navíc třeba ještě taktovací signál, který je získán v obvodech obnovy časování symbolů STR. Ty musí poskytovat informaci o symbolovém kmitočtu f_s , s nímž je vzorkován výstup demodulátoru, ale musí se stanovit i přesné okamžiky vzorkování v rámci symbolových period. [1]

Proces synchronizace má obvykle dvě fáze. V první fázi dojde k tzv. zachycení (acquisition), při kterém jsou jen hrubě odhadnuty parametry synchronizace. V druhé fázi dochází k tzv. sledování (tracking), kdy má již přijímač hrubý odhad parametrů a synchronizace probíhá v menším rozsahu s větší přesností. [1][9]

Podle způsobu přenosu dat lze rozdělit systémy OFDM do dvou skupin. Systémy, které

vysílají nepřetržitě data po jednotlivých symbolech tzv. frame-based (např. DVB-T). U těchto systémů se provádí synchronizace každého symbolu, kvůli časově proměnnému kanálu. Druhou skupinou jsou tzv. packet-based systémy. Tyto systémy vysílají data ve formě paketů, které mají pevně danou strukturu dle, příslušného standartu (např. IEEE 802.11). Paket se skládá z preamble, záhlaví a užitečných dat. Preamble se skládá z několika stejných symbolů a slouží k synchronizaci přijímače. Záhlaví obsahuje informace pro přijímač (např. typ modulace, kódování atd.) U těchto systémů se synchronizace provádí hned po přijetí preamble. U těchto systémů je kladen důraz na rychlost synchronizace a kompenzaci synchronizačních chyb.[4]

3.4.1 Obnova referenční nosné vlny pomocí pilotního signálu

Existují dvě metody obnovení referenční nosné vlny pomocí pilotního signálu. Nejjednodušší metodou je nepřetržitě vysílání kromě vlastního modulovaného signálu ještě jednoho nebo více pomocných pilotních signálů. U modulací jejichž kmitočtové spektrum je ve středu přenášeného pásma nulové (např. BPSK), stačí jeden pilotní signál, který je umístěn právě do středu. Je-li střed pásma spektrem modulovaného signálu, je možné použít dva pilotní signály, které jsou umístěné symetricky vůči nosné na obou stranách spektra. Referenční kmitočet lze pak získat jednoduchou aritmetickou operací s pilotními signály. Pilotní signály potřebují určitou část vysílaného výkonu a tím nám snižují energetickou účinnost celého systému. Pilotní signály jsou většinou ovlivněny rušivými efekty stejně jako modulovaný signál. V radiových kanálech s mnohacestným šířením to může být výhoda, protože je zachována koherence referenční nosné vůči složkám spektra modulovaného signálu. To se pozitivně projeví na chybovosti systému. [1]

Druhou metodou je obnova nosné vlny s asistencí pilotního signálu. U této metody není přenášen spojitý pilotní signál, ale formou časového multiplexu se sdružují pilotní symboly s datovými symboly. Výhodou této metody je, že nedochází ke změnám spektra přenášeného signálu. Přenosem pilotních symbolů se ale snižuje maximální přenosová rychlost.

3.4.2 Metody obnovení referenční nosné vlny bez pilotního signálu

U signálů s oběma postranními pásmy a potlačenou nosnou vlnou (modulace M-PSK, M-QAM) stačí k obnovení nosné vlny vhodný algoritmus využívající užitečný signál. Tím se zvýší energetická účinnost systému, protože odpadnou ztráty způsobené vysíláním pilotních signálů. Obnovené nosné touto metodou však vykazují určitou nejistotu, a proto nemůže být

využita přímo jako reference. Tento problém lze odstranit přenosem malého vzorku nosné vlny, nebo využitím redundance vkládané do přenášeného signálu za účelem rámcové synchronizace. Další možnost je použití Millerova kódování, které je částečně imunní vůči nejistotám, nebo lze obnovu nosné vlny zcela odstranit použitím diferenciálního kódování datového signálu před modulátorem vysílače a diferenciálního dekódování v přijímači. [1][2]

3.4.3 Časová synchronizace s využitím preamble

Další způsob časové synchronizace je vysílání synchronizační sekvence, která je vysílána zpravidla na začátku každého rámce. Synchronizační preamble využívá např. standart IEEE 802.11a. Preamble je zde složena ze dvou částí. V první části jsou 2 OFDM symboly, které slouží k časové synchronizaci rámce. V druhé části preamble je jeden dvojnásobně dlouhý symbol, který se používá k odhadu kanálu. Je-li v přijímači synchronizační sekvence známá, je nejjednodušší možnost, jak najít začátek rámce, výpočet vzájemné korelace přijitého signálu se synchronizační sekvencí. [1]

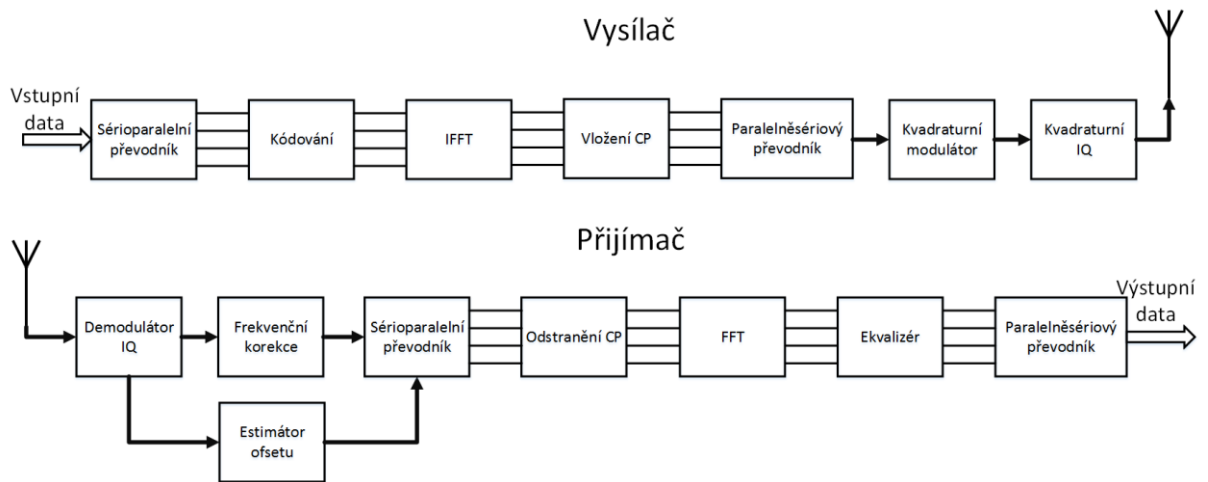
3.4.4 Obnova časování symbolů

Nejjednodušší způsob obnovy časování symbolů je použití multiplexního vysílání časovacího signálu současně s přenosem užitečného signálu. V přijímači je časovací signál vyčleněn vhodnou filtrací modulovaného signálu. Další možností je využití užitečného demodulovaného signálu. Tato metoda je ale energeticky neefektivní. Další možnost je využití známé struktury OFDM signálu, kdy každý symbol má CP. [1]

3.5 Přenosový řetězec OFDM

Na obr. 5 je znázorněna koncepce vysílače OFDM. Vstupní data jdou nejprve do sériově paralelního převodníku, kde je převeden sériový datový tok na N paralelních skupin o n bitech. Každá skupina je kódována (mapována) do komplexního datového symbolu. Ten odpovídá zvolenému modulačnímu formátu (např. QAM). Vstupní data bývají navíc ještě kódována, např. konvolučním kóděrem, aby se zvýšila pravděpodobnost bezchybného příjmu. Kódovaná data jdou do procesoru IFFT, kde je realizován proces ekvivalentní modulaci N subnosných vln využitím inverzní Fourierovi transformace. Takto upravené diskrétní symboly jsou doplněny ochranným intervalem nebo cyklickým prefixem a v paralelně sériovém převodníku jsou data opět převedena do sériové podoby.[1] Výsledný symbol je v DA převodníku vzorkován kmitočtem f_s , který je dvojnásobný vůči šířce pásma B , a převeden na komplexní signál. Jednotlivé vzorky jsou dále přeloženy do požadovaného kmitočtového

pásma a vysílány. V praxi bývá často v jediném integrovaném obvodu VLSI realizováno několik dílčích bloků. [1][9]



Obr. 5 Koncepte OFDM vysílače a přijímače

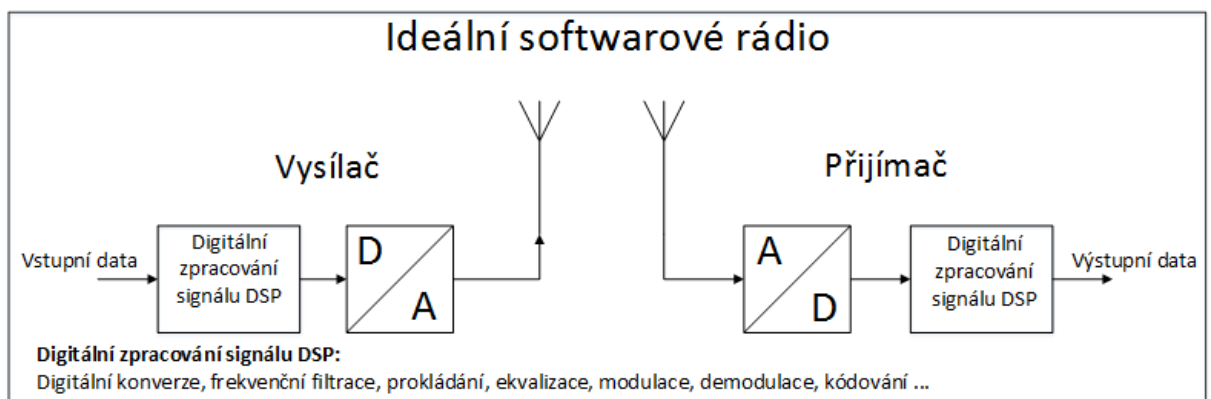
Na obr. 5 je znázorněná zjednodušená koncepce OFDM přijímače. Za analogovým vstupním dílem, následuje demodulátor I/Q. Za demodulátorem je převodník ADC, kde je demodulovaný signál vzorkován kmitočtem f_s . Vzorkovací kmitočet se může lišit od správného vzorkovacího kmitočtu DAC převodníku vysílače.[1] Díky tomu vzniká časový ofset vzorkování. Tím se přímo zvětší chybovost a může docházet i ke změně doby trvání OFDM symbolů v přijímači, proto musí být nějakým způsobem kompenzován. Pro dokonalou demodulaci signálu je nutné znát přesný začátek každého symbolu. Jedna z možností korekce je použití estimátoru (systém generující odhad) kmitočtového a časového offsetu. K tomu je zapotřebí pomocné pilotní symboly, které jsou mezi datovými symboly, nebo pilotní referenční tóny, které jsou namodulovány na vybraných subnosných. [2]

V sériově paralelním převodníku je signál převeden do N paralelních skupin o n bitech, je odstraněn ochranný interval OI a v procesoru FFT je signál převeden z časové do frekvenční oblasti. V ekvalizéru se koriguje kmitočtové zkreslení přenosového kanálu.[1]

4 Softwarově definované rádio

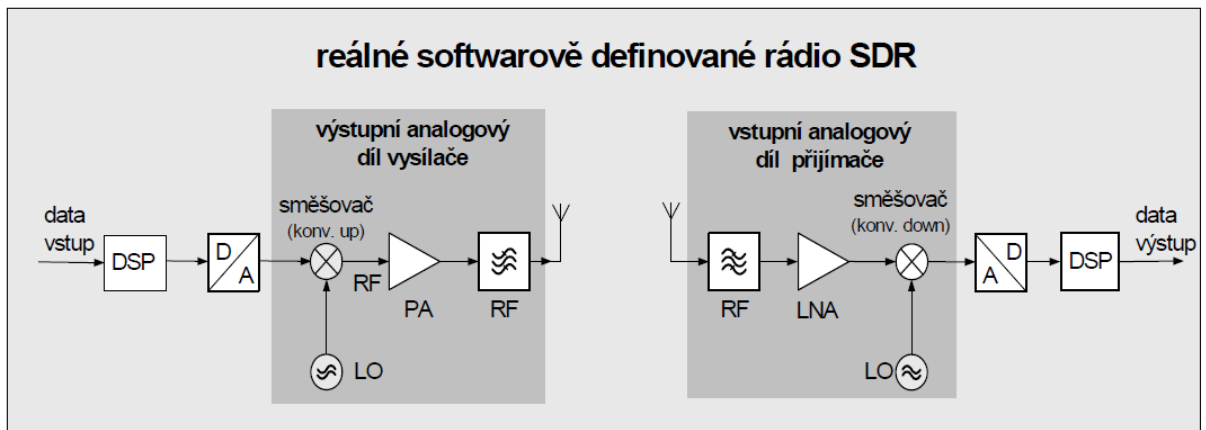
Softwarově definované rádio (SDR) je systém, který umožňuje nahradit klasické hardwarové funkční bloky pro úpravu signálu (filtry, směšovače, zesilovače, oscilátory atd.) univerzálním, softwarově řízeným digitálním obvodem. To znamená, že funkce obvodu lze měnit bez zásahu do hardwaru nebo fyzického zapojení. Tento obvod umožňuje číslicové zpracování signálu v reálném čase, a proto dnes nachází uplatnění v radiokomunikačních systémech. Systém SDR je obvykle řízen digitálním signálovým procesorem (DSP), obvodem typu FPGA, případně kombinací obou prvků. Pro použití v analogových obvodech je systém SDR vybaven ADC a DAC převodníky.[1]

U ideálního softwarového rádia SR, znázorněného na Obr. 6, je jediným analogovým elementem anténa, za ní následuje ve vysílacím traktu DAC převodník a v přijímacím traktu převodník ADC. To potom umožňuje realizovat veškeré zpracování signálu kompletně v softwarové oblasti. Tato ideální koncepce SR, není zatím technicky dosažitelná. [13]



Obr. 6 Ideální (Mitolovo) softwarové rádio[13]

V praxi je realizovatelná verze, označovaná jako softwarově definované rádio, která je znázorněna na obr. 7. Ta používá na přijímacím vstupu selektivní filtry, nízkošumový zesilovač a směšovač, který transponuje přijímané frekvenční pásmo do oblastí nižších frekvencí, kde už lze snadno realizovat konverzi ADC. Analogická koncepce s frekvenční konverzí nahoru se potom aplikuje i ve vysílací části. [13]



Obr. 7 Realizovatelné softwarově definované rádio SDR [13]

Základními funkčními bloky softwarového rádia jsou převodníky ADC a DAC. Převodníky ADC používané v přijímači převádějí přijímané analogové signály do digitální podoby. Pokud by mělo být v maximální míře využito všech výhod digitálního zpracování, bylo by ideální uskutečnit převod hned za přijímací anténou, tedy přímo na vstupu přijímače. Převodník ADC zde zařazený by ovšem musel mít dynamický rozsah nejméně okolo 100 dB, a to při frekvencích přijímaného signálu řádu až několika GHz (UMTS 2GHz, WLAN 5GHz). Díky omezeným možnostem ADC převodníků, ale zatím není tato koncepce realizovatelná. [1][13]

4.1 Ettus USRP-N200

USRP neboli Universal Software Radio Peripheral je zařízení určené pro vývoj a testování SDR aplikací a je koncipováno jako periferie k počítači. Jedná se o modulární zařízení. Základní deska obsahuje obvody pro práci v základním pásmu (FPGA, A/D, D/A převodníky apod.), ke kterým je možné připojit desky směřující signál do radiofrekvenčních pásem (vysílací, přijímací, případně kombinované).[6]

Základní parametry Ettus USRP-N200:

- možnosti zpracování signálu od DC do 6 GHz
- dvoukanálový 100 MS/s 14-bitový A/D převodník
- dvoukanálový 400 MS/s 16-bitový D/A převodník
- DDC/DDU (přímá konverze nahoru/dolů) s rozlišením 25 mHz
- streamování přes Gigabit Ethernet do PC rychlostí až 50 MS/s
- 2 Gbps rozhraní pro rozšíření
- FPGA Xilinx Spartan 3A-DSP 1800

- 1 MB vysokorychlostní RAM
- 2,5 ppm TCXO frekvenční reference

4.2 UHD

Jako rozhraní pro komunikaci se zařízením USRP se používají ovladače UHD (Universal software radio peripheral Hardware Driver). Jedná se o ovladač a zároveň i API pro produkty firmy Ettus. Lze ho použít přímo (např. ve Visual C++, Pythonu) nebo s aplikacemi třetích stran – GNU Radio, LabVIEW, Simulink a dalšími. Obsahuje všechny funkce pro komunikaci a přenos signálu i pro ladění kanálů apod.[5]

5 GNU Radio

GNU Radio je open-source softwarové řešení poskytující signálové procesní bloky pro softwarové rádia. GNU Radio obsahuje softwarové řešení prvků vyskytujících se v radiových systémech jako filtrů, kanálového kódování, modulátorů, demodulátorů, synchronizačních prvků, ekvalizérů, kodérů, dekodérů a spoustu dalších. [5]

Výpočetně náročné části GNU Radia jsou realizovány v jazyce C++. To umožňuje pracovat v reálném čase. Organizace, řízení a komunikace mezi bloky je implementována v jazyce Python. V GNU Radiu už jsou předdefinované různé bloky, které dokáží zpracovávat signály jako např. UHD FFT, který funguje jako spektrální analyzátor. Výhodou softwaru je práce s bloky. Jednotlivé bloky je možné mezi sebou propojovat. Tím že jsou jednotlivé prvky realizovány jako samostatné bloky, lze je samostatně upravovat bez zásahu do komunikačního řetězce. Také je možné vytvářet své vlastní bloky. Mezi bloky se mohou předávat data různých datových typů. Bloky v GRC můžeme rozdělit do několika základních skupin.[3]

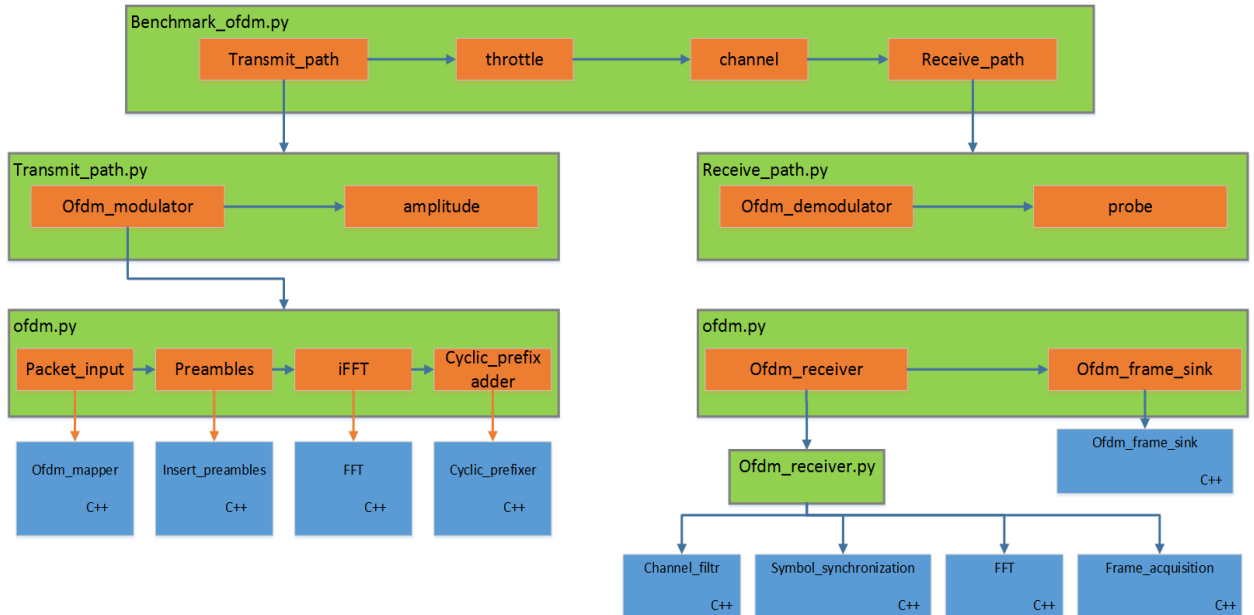
- **Zdroje** (Source) generují signál na základě vstupních parametrů.
- **Výstupní bloky** (Sink) generují výstupní signál.
- **Provozní bloky** mají nastavitelný počet vstupů s nastavitelným datovým typem. Podle vstupních parametrů bloku dojde k provedení určité operace (modulace, filtrace, synchronizace, kódování, atd.)
- **Bloky pro vizualizaci** mohou být také výstupní bloky (Sink), které generují grafický výstup vstupního signálu a to jak v časové oblasti, frekvenční oblasti nebo jako FFT.

5.1 GNU Radio Companion

GNU Radio Companion (GRC) je grafický nástroj, který poskytuje uživatelské rozhraní, jež umožňuje vytvářet grafy signálových toků, bez nutnosti psaní kódu v Pythonu. Všechny bloky GNU jsou přístupné i v GRC. Grafické prostředí je implementována v jazyce XML. GRC umožňuje pomocí grafických bloků nastavit vstupní parametry, které jsou převzaty zdrojovým kódem bloků, aby bylo možné generovat tok signálu a zobrazit ho. [14]

6 Implementace OFDM v GRC

V GNU Radiu je definována celá skupina bloků pro práci s OFDM. Nejdůležitějšími bloky jsou modulátor a demodulátor OFDM, které slučují několik bloků dohromady.

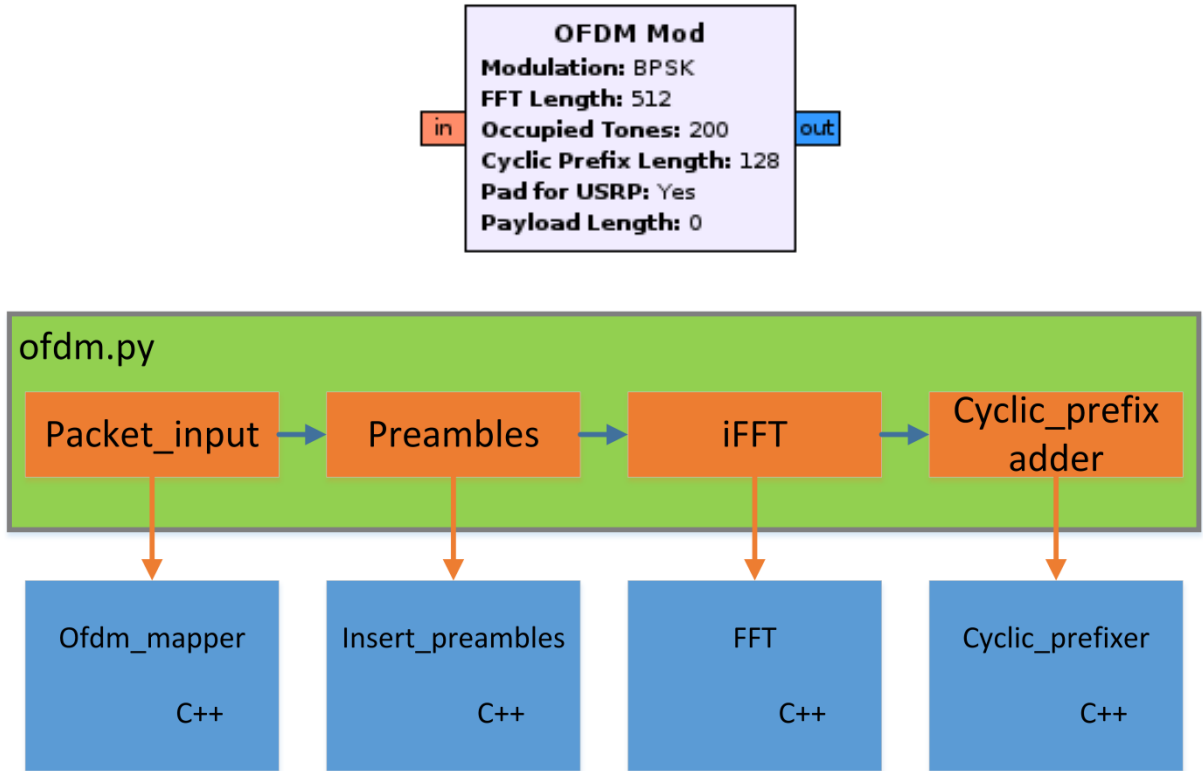


Obr. 8 Implementace OFDM bloků v GNU Radio[5]

6.1 OFDM modulátor

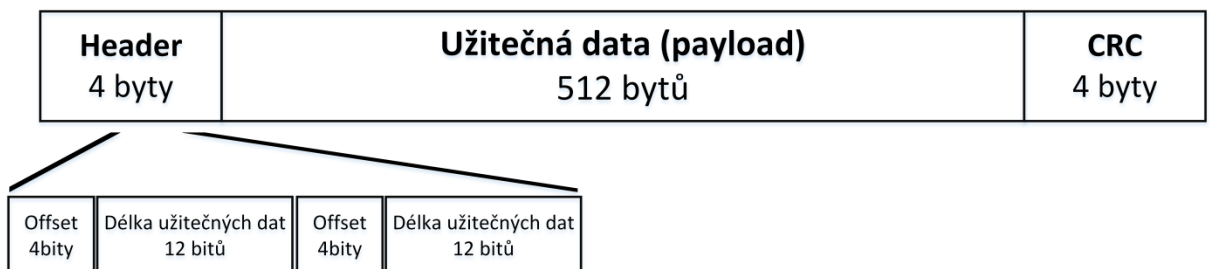
Bloky OFDM modulátor a demodulátor jsou napsány v programovacím jazyce Python a oba dva bloky jsou uloženy v knihovně *ofdm.py*. Na obr. 9 jsou bloky využívané pro funkci OFDM modulátoru. Výpočetní bloky jsou realizované v C++. Organizace, řízení a komunikace mezi bloky je implementována v jazyce Python. Modulátor moduluje datový tok na základě vstupních parametrů bloku a to v délce FFT, počtu tónů, délky CP a zvolenou modulací (zde BPSK), vytváří OFDM symboly. Skládá se ze čtyř základních bloků. [5]

- OFDM Mapper
- OFDM insert preambles
- FFT
- OFDM cyclic prefix



Obr. 9 Blok OFDM modulátoru v GRC, b) Vnitřní hierarchie OFDM modulátoru

Modulátor obsahuje funkci odesílání, která pracuje s parametrem délky užitečných dat – payload. Vstupní data posílá do prvního bloku modulátoru *ofdm_mapper*. Užitečná data jsou převedena do paketu. Struktura paketu je znázorněna na obr. 10. Skládá se z hlavičky, která má dvě stejná pole o velikosti 2 byty. Ty obsahují ofset, délku užitečných dat a délku Cyklického redundantního součtu CRC. CRC je hašovací funkce, která se používá k detekci chyb během přenosu dat. Dvě pole o stejné délce se používají pro identifikaci paketu v přijímači.



Obr. 10 Struktura OFDM paketu

6.1.1 OFDM Mapper

Definováno v souboru *digital_ofdm_mapper_bcv.cc*. Mapper (mapovací kódér) má za úkol mapovat příchozí data (zprávy) do OFDM symbolů. Má dva výstupy. Na prvním jsou mapované symboly OFDM, zatímco na druhém je pole znaků, z nichž každý označuje začátek

symbolu. U modulace BPSK by symboly obsahovali jen 1 bit, ale kdybychom použili modulaci 16-QAM, každý symbol by obsahoval 4 bity, tím by vzrostla přenosová rychlost. Když jsou užitečná data kratší, než je maximální délka, jsou doplněny nulami z obou stran. Tím je snížena efektivita datového přenosu, protože doplněné nuly, nepřenášejí užitečná data a FFT musí stejně projít celý paket.

6.1.2 OFDM Insert Preamble

Definováno v souboru *gr_ofdm_insert_preambles.cc*. Preamble se vkládá kvůli synchronizaci demodulátoru. Vkládá se před každá užitečná data.

6.1.3 FFT, IFFT

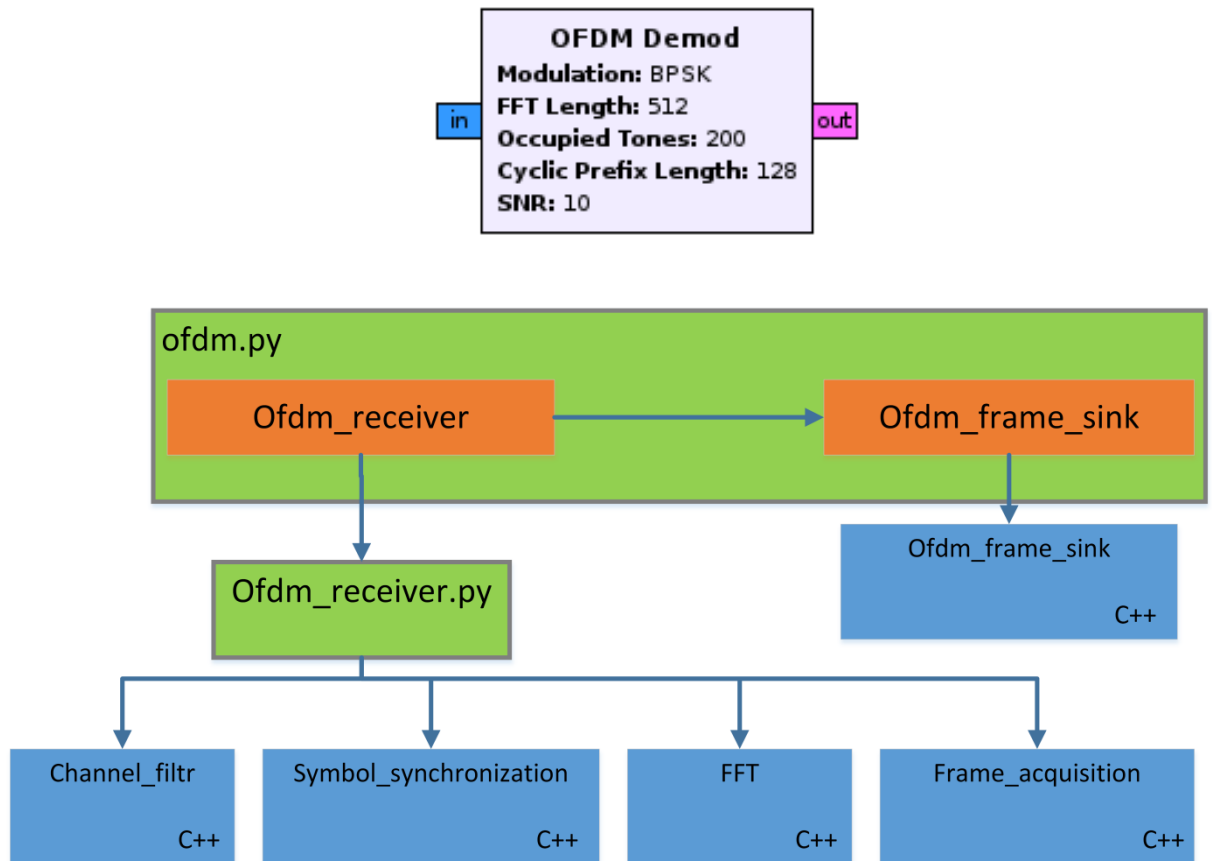
Definováno v souboru *gr_fft_vcc.cc*. V tomto bloku se počítá IFFT vytvořených symbolů s preambli. Tento blok je použit jak pro výpočet FFT, tak i pro výpočet IFFT, záleží na vstupních parametrech.

6.1.4 OFDM cyclic prefix

Definováno v souboru *gr_ofdm_cyclic_prefixer.cc*. Tento blok přidává na začátek OFDM symbolů cyklickou předponu.

6.2 OFDM demodulátor

Na obr. 11 je znázorněn demodulátor OFDM. Stejně jako u modulátoru i zde jsou výpočetní bloky v C++ a jejich řízení, organizaci a komunikaci řídí na nejvyšší vrstvě funkce na v Pythonu. Stejně jako modulátor je i demodulátor definován v souboru *ofdm.py*. Vnitřní struktura demodulátoru je složena ze dvou modulů, kterým odpovídají dva bloky. Ty jsou definovány v *ofdm.py*. První z nich je *ofdm_receiver*, který se stará o synchronizaci a vyrovnání signálu CRC. Druhý modul je "*ofdm_frame_sink*", který demapuje symboly na bity, kontroluje platnost a správnost synchronizovaných rámců a odesílá je na vyšší vrstvy do fronty přijatých datových paketů. [11]



Obr. 11 Blok OFDM modulátoru v GRC- Vnitřní hierarchie OFDM modulátoru[11]

6.2.1 OFDM receiver

Tento blok je definován v souboru *ofdm_receiver.py*. Tento blok zahrnuje čtyři hlavní moduly viz obr. 11. Kanálový filtr, OFDM symbolovou synchronizaci, FFT a Frame Acquisition. Na vstup přijímače je přiveden komplexní modulovaný signál v základním pásmu. Výstupem přijímače jsou synchronizované pakety, které jsou poslány zpět do demodulátoru. Přijímač je synchronizován OFDM symboly. [5]

6.2.2 Channel filtr

Definováno v souboru *gr_fft_filter_ccc.cc*. První modul přijímače je jednoduchá Fourierova dolní propust pro vstupní signál přicházející z antény. Šířka pásma filtru odpovídá počtu nosných, které obsahují data. [5]

$$\text{Šířka pásma: } B = \frac{\text{počet obsazených tónů}}{\text{velikost FFT}} \cdot f_s \quad \text{kde } f_s \text{ je vzorkovací frekvence.}$$

6.2.3 OFDM symbol synchronization

Tento blok je definován v souboru *ofdm_sync_pn.py*. Signál je filtrován a poté přiveden

do synchronizačního bloku. Výstupy tohoto bloku jsou dva - jemná frekvenční korekce a časovaný signál korelace. Tento blok je velmi důležitý protože dělá korekci synchronizace. Je několik způsobů detekce začátku symbolu (viz. 3.4 Synchronizace):

- Cyclic prefix correlator (Van de Beeks)
- Preamble correlator (Schmidl a Cox)
- Modifikovaný korelátor s autokorelací

6.2.4 Frequency Modulator

Definován v souboru C++ *gr_frequency_modulator_fc.cc*. Vstup tohoto bloku je hodnota korekce frekvence z výstupu synchronizačního bloku. Tento blok generuje frekvenční offset odpovídající každému vzorku.[11]

6.2.5 OFDM Sampler

Definován v souboru *digital_ofdm_sampler.cc*. Tento blok používá frekvenční offset vzorku signálu, který přichází přímo z kanálu. Výstupem je signál vzorku ve vektorech, odpovídající velikosti FFT. [11][5]

6.2.6 FFT

Definován v souboru *gr_fft_vcc.cc*. Pracuje s vektorem komplexních hodnot z bloku Sampleru.

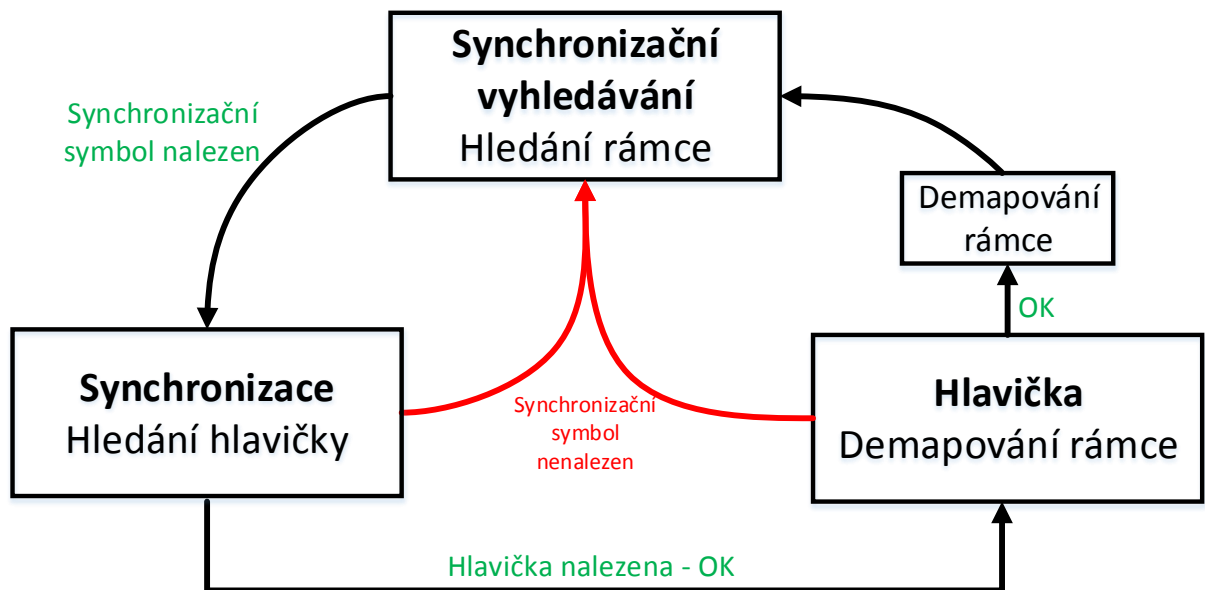
6.2.7 Frame Acquisition

Definován v souboru *digital_ofdm_frame_acquisition.c*. Pracuje s vektorem komplexních hodnot signálu ve frekvenční oblasti, která je výstupem FFT přijatého symbolu. Na základě dvou známých symbolů zjistí začátek rámce. Pracuje s tím, že jemný frekvenční posun již byl opraven a vzorky spadají přímo do středu jednoho z FFT zásobníku. Jeden ze známých symbolů je použit pro odhad odezvy kanálu pro všechny subnosné a vyrovnává ji na všech subnosných. Tím opravuje deformace fáze a amplitudy.[5]

6.2.8 OFDM frame sink

Definován v souboru *digital_ofdm_frame_sink.cc*. Tento modul de-mapuje symboly na bity, kontroluje platnost synchronizovaných vzorků (z *ofdm_receiver*) a odešle je do fronty přijatých datových paketů. Tento blok je podobný stavovému automatu. Má tři základní stavy.[5][9]

- 1) **Synchronizační vyhledávání** – hledá se synchronizační bod (preamble) označující začátek rámce
- 2) **Synchronizováno** – hledá a kontroluje se hlavička paketu
- 3) **Hlavička nalezena** – de-mapování symbolů a kontrola hlavičky dat. Je-li hlavička v pořádku, de-mapuje se i zbytek rámce.

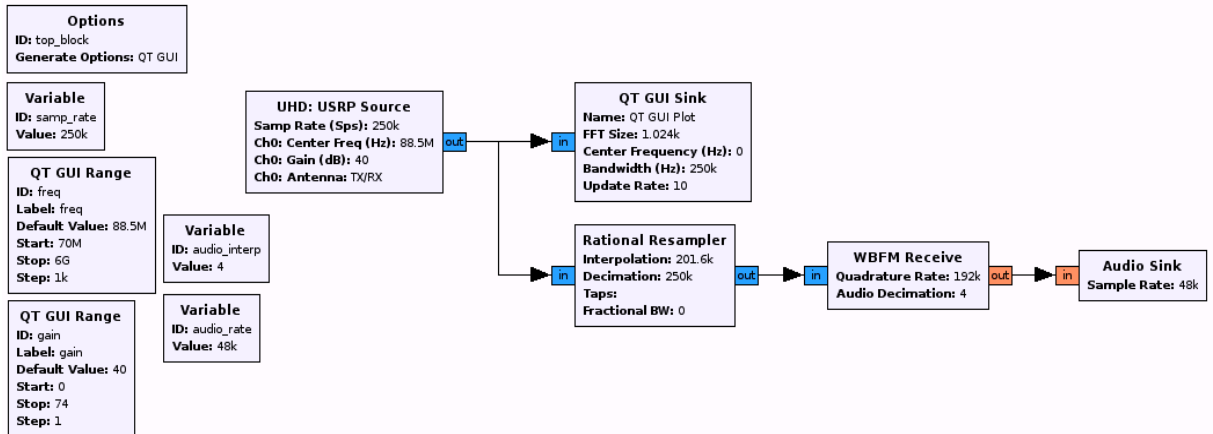


Obr. 12 Stavový automat reprezentující blok OFDM frame sink

7 Programy v GNR

7.1 FM přijímač s USRP

Na obrázku je jedna z mnoha variant jak pomocí SDR a USRP realizovat FM přijímač. Blok UHD USRP zpracovává data z jednotky ETTUS USRP N200. Blok Rational Resampler umožňuje nastavit rychlost datového toku.



Obr. 13 FM přijímač

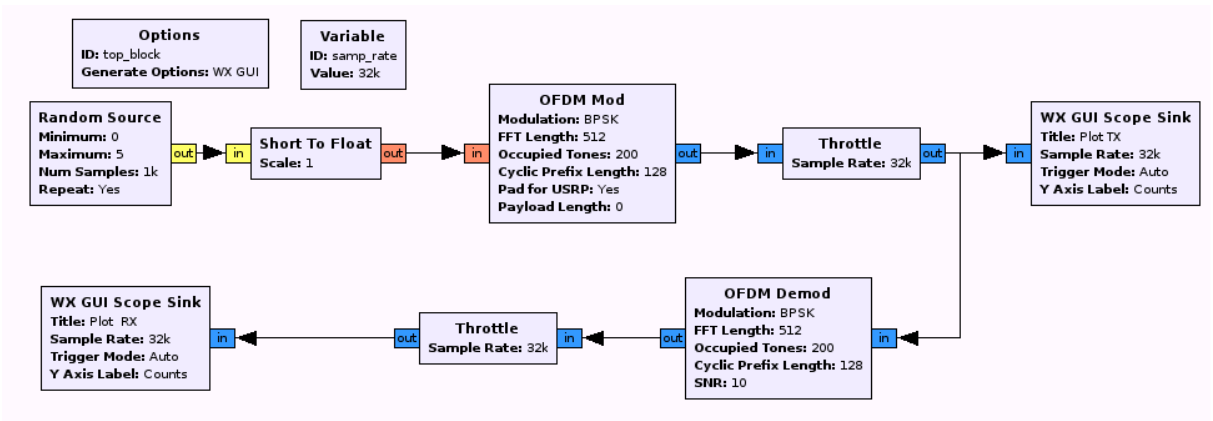
7.2 Komunikační systém OFDM - simulace

Náhodně generovaná data z bloku Random Source, prochází OFDM modulátorem a demodulátorem. OFDM modulátor má následující vstupní parametry:

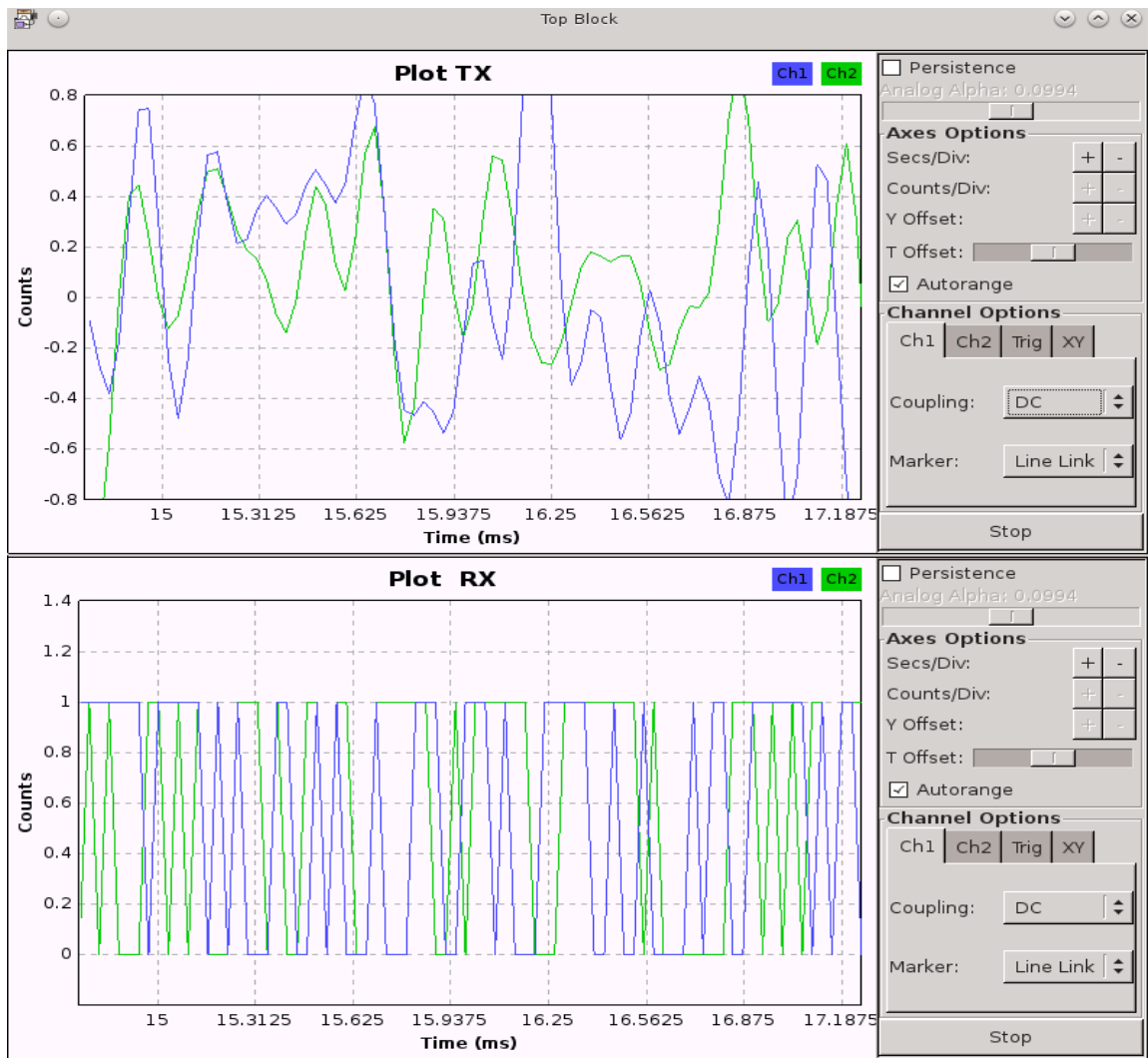
Modulace: BPSK

Délka FFT = 512

Délka CP = 128



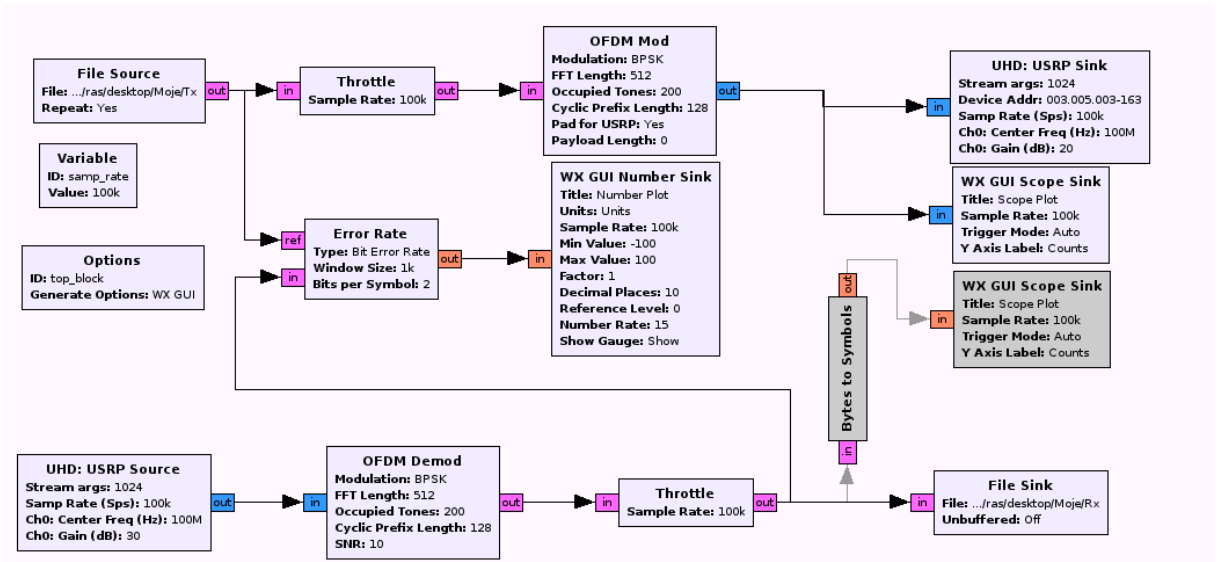
Obr. 14 Komunikační systém OFDM



Obr. 15 Komunikační systém OFDM modulovaná data vysílače TX, demodulovaná data vysílače RX

7.3 Komunikační systém OFDM v reálném čase

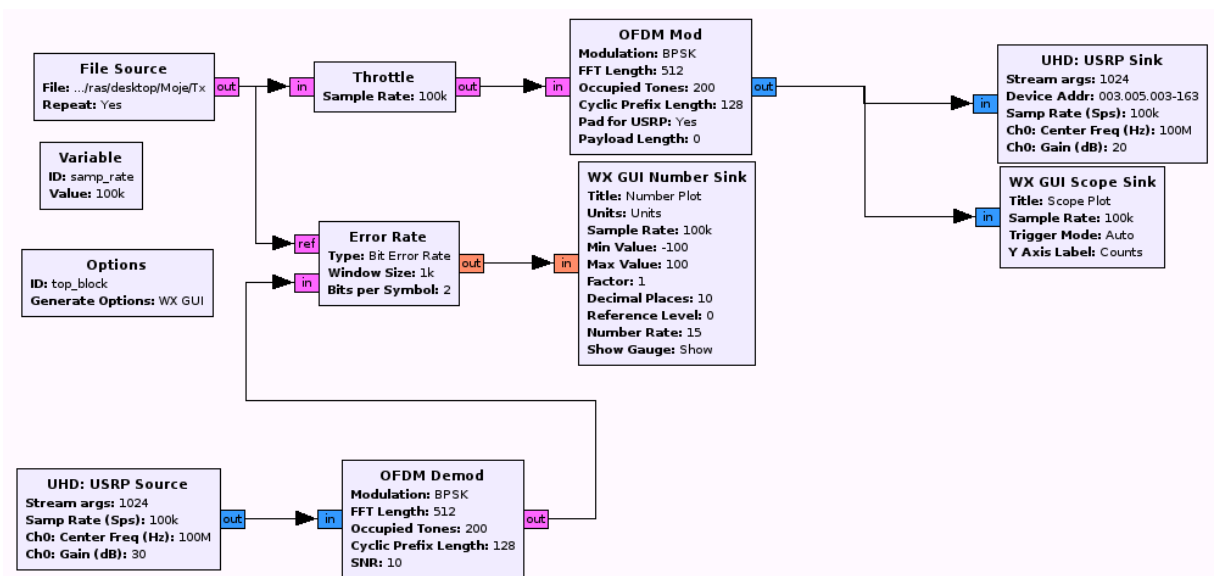
V tomto zapojení posíláme a zároveň přijímáme textový soubor na jediném USRP v reálném čase. Vstupní zdroj dat (File Source) posílá opakovaně stejná data. Na výstupu (File Sink) jsou data zapisována do souboru.



Obr. 16: Komunikační systém OFDM v reálném čase-přenos souboru

7.4 Komunikační systém OFDM – měření BER

Zapojení je podobné předchozímu jen s tím rozdílem, že pro měření BER, je lepší použít zdroj náhodného signálu Random Source. V tomto zapojení lze měřit závislost BER a SNR. V bloku demodulátoru můžeme nastavit hodnotu SNR.



Obr.17 Komunikační systém OFDM v reálném čase-přenos souboru

Závěr

V úvodu diplomové práce jsem probral základy digitálních modulací. Zaměřil jsem se na modulaci OFDM. Popsal jsem princip činnosti a základní vlastnosti této modulace. Dále jsem vysvětlil princip SDR, USRP a představil software GNU Radio.

V další části už jsem se zabýval popisem bloků v GNU Radio Companion. Zmínil jsem některé základní bloky a zapojení, které jsem použil. Hlavní část práce spočívala v popisu bloků OFDM. Vybral jsem dva základní bloky ze skupiny OFDM - modulátor a demodulátor. Nejedná se ale jen o dva bloky. Bloky modulátoru a demodulátoru OFDM, sdružují celou řadu dalších bloků. Byla popsána jejich hierarchie a funkce. Na závěr jsem sestavil několik ukázkových přenosových řetězců.

Použité zkratky

AD	Analogově digitální převodník
ASK	Amplitude-shift Keying
API	Application Programming Interface
BPSK	Binary phase-shift Keying
CE	Cyclic Extension, cyklické rozšíření
CP	Cyclic prefix, cyklický prefix
CRC	Cyclic Redundancy Check
DAB	Digital Audio Broadcasting
DA	Digitálně analogový převodník
DSP	Digital Signal Processor, digitální signálový procesor
DVB-T	Digital Video Broadcasting – Terrestrial
FFT	Fast Fourier Transform, rychlá Fourierova transformace
FSK	Frequency-shift Keying
FDM	Frequency-division multiplex, multiplex s kmitočtovým dělením
GI	Guard Interval, ochranný interval
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IF	Intermediate Frequency, mezifrekvenční kmitočet
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform, inverzní rychlá Fourierova transformace
ICI	Inter-Carrier Interference, interference mezi nosnými
ISI	Intersymbol Interference, mezisymbolová interference
MCM	Multi Carrier Modulation, modulace s více nosnými
OFDM	Orthogonal Frequency-division Multiplex
OI	Ochranný interval
PSK	Phase-shift Keying
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QPSK	Quadrature Phase-shift Keying
SDR	Software Defined Radio
STR	Symbol Timing Recovery
UHD	Universal software radio peripheral Hardware Driver
WLAN	Wireless local area network

Seznam obrázků

- Obr. 1 Spektrum OFDM signálu s pěti nosnými tóny
- Obr. 2 OFDM modulátor
- Obr. 3 OFDM demodulátor
- Obr. 4 OFDM symbol v časové oblasti s ochranným intervalem
- Obr. 5 Koncepce OFDM vysílače a přijímač
- Obr. 6 Ideální (Mitolovo) softwarové rádio[13]
- Obr. 7 Realizovatelné softwarově definované rádio SDR[13]
- Obr. 8 Implementace OFDM bloků v GNU Radio[5]
- Obr. 9 Blok OFDM modulátoru v GRC, Vnitřní hierarchie OFDM modulátoru
- Obr. 10 Struktura OFDM paketu
- Obr. 11 Blok OFDM modulátoru v GRC- Vnitřní hierarchie OFDM modulátoru[11]
- Obr. 12 Stavový automat reprezentující blok OFDM frame sink
- Obr. 13 FM přijímač
- Obr. 14 Komunikační systém OFDM
- Obr. 15 Komunikační systém OFDM modulovaná data vysílače TX, demodulovaná data vysílače RX
- Obr. 16 Komunikační systém OFDM v reálném čase-přenos souboru
- Obr. 17 Komunikační systém OFDM v reálném čase-přenos souboru

Použitá literatura

- [1] ŽALUD, Václav. *Moderní radioelektronika*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2000, 653 s. ISBN 80-86056-47-3.
- [2] JAREŠ, Petr. *Moderní modulační metody a jejich aplikace*. In: . České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, s. 46.
- [3] CHIUEH, Tzi-Dar a Pei-Yun TSAI. *OFDM baseband receiver design for wireless communications*. Hoboken, NJ: John Wiley and Sons (Asia), c2007, xiii, 258 p. ISBN 0470822341.
- [4] HANUS, S. *Rádiové a mobilní komunikace*. Brno: VUT, 2002. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [5] *GNURadio: Wiki* [online]. [cit. 2014-12-11]. Dostupné z: <https://gnuradio.org/redmine/projects/gnuradio/wiki/>
- [6] USRP. *Datasheet for the transceiver daughterboards, the X CVR2450 and RFX-series*[online]. Dostupné na www: <http://www.ettus.com/downloads/er_ds_transceiver_dbrds_v5b.pdf>.
- [7] LI, Y., STÜBBER, G. L. *Orthogonal Frequency Division Multiplexing for Wireless Communications*. New York: Springer Science+Business Media, Inc., 2006.
- [8] CHIUEH, T. D., TSAI, P. Y. *OFDM Baseband Receiver Design for Wireless Communications*. Singapore: John Wiley & Sons Asia, 2007.
- [9] TERRY, a Juha HEISKALA. 1992. *Základy radioelektroniky: a theoretical and practical guide*. Indianapolis, Ind.: Praha: ČVUT. ISBN 06-723-2157-2.
- [10] *GNURadio* [online]. do 2012, 14.8.2012 [cit. 2014-12-11]. Web a příslušná dokumentace v odkazech. Dostupné z: <http://opensource.telkomspeedy.com/wiki/index.php/GNURadio>
- [11] *GNURadio: WikiStart* [online]. [cit. 2015-03-21]. Dostupné z: <https://wush.net/trac/rangepublic/wiki>
- [12] SLANINA, M., ŘIČNY, V. Reed-Solomonovy kody v časové a ve frekvenční oblasti. *Elektrorevue* [online]., [cit. 2015-04-14]. Dostupné z WWW: <<http://www.elektrorevue.cz/clanky/06011>>
- [13] ŽALUD, Václav. *Softwarové a kognitivní rádio*. *Softwarové a kognitivní rádio*. ČVUT FEL, Praha [cit. 2014-05-11].
- [14] Eric Blossom et al. *Welcome to GNU Radio*. 2006, Dostupné z: <http://gnuradio.org/redmine/projects/gnuradio/wiki>