

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Softwarově ovládané rádio pomocí přijímače DVB-T
Software Defined Radio via DVB-T Receiver

2014

Milan Trčka

Zadání bakalářské práce

Student: **Milan Trčka**
Studijní program: B2647 Informační a komunikační technologie
Studijní obor: 2612R059 Mobilní technologie
Téma: **Softwarově ovládané rádio pomocí přijímače DVB-T
Software Defined Radio via DVB-T Receiver**

Zásady pro vypracování:

Softwarové rádio (SDR) je moderní možností příjmu rádiových vln v poměrně širokém kmitočtovém spektru. Mimo k tomu určené hardwarové moduly lze SDR realizovat i pomocí modulu sloužící pro příjem DVB-T signálu. Tato práce si klade za cíl vytvořit přehled vhodných modulů a realizaci funkčního modelu takto upraveného SDR.

Vypracovaná práce bude splňovat následující body zadání:

1. Popište funkce softwarového rádia.
2. Vyhledejte na trhu dostupné moduly DVB-T vhodné pro SDR.
3. Realizujte SDR s vybraným modulem DVB-T.

Seznam doporučené odborné literatury:

Gregora, Pavel. *Digitální rozhlas na středních, dlouhých a krátkých vlnách*. Radiokomunikace 2004. stránky 177-191.

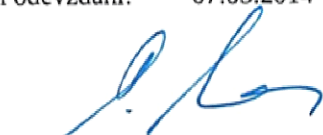
Žalud, Václav. *Moderní radioelektronika*. Praha : BEN, 2000. 80-86056-47-3

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Marek Dvorský, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2013

Datum odevzdání: 07.05.2014



doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.
vedoucí katedry

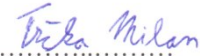


prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 28.4.2014


.....
podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Marku Dvorskému, Ph.D. za odbornou pomoc a konzultaci při vypracování této bakalářské práce.

Abstrakt

Tato práce se zabývá softwarově definovaným rádiem, jeho popisem funkce a základním rozdělením druhů SDR (Software Defined Radio). Dále se zaměřuje na využití DVB-T (Digital Video Broadcasting – Terrestrial) modulu pro příjem pozemního televizního digitálního vysílání jako přijímače SDR a uvedením parametrů, které tento konkrétní modul musí splňovat pro plnou funkčnost. Součástí práce je také samotná realizace s vybraným modulem pro příjem DVB-T tuner signálu a popis jednotlivých testovaných softwarů pro příjem SDR podporujících komunikaci s tímto přijímačem pod operačním systémem Linux.

Klíčová slova

AM; DVB-T; FFT; FM; mezifrekvence; modulace; rádiový přijímač; RTL-SDR; SDR; software; softwarově; definované rádio; tuner

Abstract

This thesis deals with the software defined radio (SDR). It's function is described and there are mentioned basic types of SDR. This thesis also focuses on using of DVB-T module for receiving terrestrial digital video broadcasting as a receiver of SDR. There is mentioned which parameters DVB-T receiver has to fulfil usage as SDR receiver. Part of thesis is realization of SDR receiver with DVB-T module. Individual types of software for SDR receiving under Linux operating system are described.

Key words

AM; DVB-T; FFT; FM; intermediate frequency; modulation; radio receiver; RTL-SDR; SDR; software; software defined radio; tuner

Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
a	-	Kmitočtová selektivita
DR	dB	Dynamický rozsah
f	Hz	Frekvence
F	dB	Šumové číslo
MDS	dBm	Minimální detekovatelný signál
P	W	Výkon
SFDR	dBm	Dynamický rozsah bez intermodulačního zkreslení
SNR	dBm	Poměr signál-šum
U	V	Napětí

Seznam použitých zkratek

Zkratka	Význam
ADC	Analog Digital Converter
AF	Audio Frequency
AGC	Automatic Gain Control
AM	Amplitude Modulation
ASIC	Application-Specified Integrated Circuits
ATSC	Advanced Television Systems Committee
COFDM	Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing
CR	Cognitive Radio
DAB	Digital Audio Broadcasting
DAC	Digital Analog Converter
DFS	Dynamic Frequency Selection
DMB-T	Digital Multimedia Broadcasting - Terrestrial
DSP	Digital Signal Processors
DVB-T	Digital Video Broadcasting – Terrestrial
FCR	Full Cognitive Radio
FEC	Forward Error Correction
FFT	Fast Fourier Transform
FM	Frequency Modulation
FM-N	Frequency Modulation-Narrow
FM-W	Frequency Modulation-Wide
FPGA	Field Programmable Gate Arrays
GPP	General Purpose Processors
I	In-Phase
IF	Intermediate Frequency
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
IPD	Interference Power Destiny
IRM	Image Reject Mixer

ISP	Intelligent Signal Processing
LO	Local Oscillator
MDS	Minimum Detectable Signal
PC	Personal Computer
Q	Quadrature-Phase
REM	Radio Environment Map
RF	Radio Frequency
RTL-SDR	Realtek-Software Defined Radio
Rx	Receiver
SDR	Software Defined Radio
SFDR	Spurious-Noise-Free Dynamic Range
SNR	Signal To Noise Ratio
SSB	Single Side Band
SSCR	Spectrum Sensing Cognitive Radio
TPC	Transmitter Power Control
Tx	Transmitter
USB	Universal Serial Bus

Obsah

Úvod.....	- 12 -
1 Softwarově definované rádio	- 13 -
1.1 Ideální softwarové rádio.....	- 13 -
1.2 Obecný model SDR.....	- 13 -
1.3 Základní druhy SDR.....	- 15 -
1.3.1 SDR s vysokou mezifrekvencí	- 15 -
1.3.2 SDR s nízkou mezifrekvencí	- 15 -
1.3.3 SDR s nulovou mezifrekvencí.....	- 16 -
1.3.4 SDR s vysokou první a velmi nízkou (nulovou) druhou mezifrekvencí -	16 -
1.4 Zpracování digitálního signálu z SDR softwarem.....	- 17 -
1.5 Parametry rádiového přijímače	- 18 -
1.5.1 Frekvenční rozsah.....	- 18 -
1.5.2 Šumový práh, šumové číslo.....	- 18 -
1.5.3 Citlivost	- 19 -
1.5.4 Selektivita.....	- 19 -
1.5.5 Zkreslení	- 19 -
1.5.6 Dynamický rozsah přijímače	- 21 -
1.5.7 Konkrétní parametry SDR přijímače	- 22 -
1.6 Porovnání SDR s klasickým přijímačem.....	- 23 -
1.7 Budoucí vývoj přijímačů	- 24 -
2 DVB-T modul jako SDR.....	- 26 -
2.1 Parametry DVB-T modulu pro použití jako SDR	- 26 -
2.1.1 Realtek RTL2832U	- 26 -
2.1.2 Tuner	- 26 -
2.1.3 Souhrn parametrů	- 28 -
2.2 Dostupné moduly na trhu	- 29 -
3 Realizace SDR.....	- 30 -
3.1 Parametry použitého DVB-T modulu	- 30 -
3.2 Dostupný software pro modul DVB-T	- 30 -

3.2.1	Knihovna librtlsdr.....	- 31 -
3.2.2	GNU Radio.....	- 33 -
3.2.3	GQRX.....	- 35 -
3.2.4	SDR#.....	- 36 -
3.2.5	Linrad.....	- 38 -
3.2.6	SDRangelove.....	- 39 -
3.2.7	Srovnání testovaných programů.....	- 40 -
4	Závěr.....	- 41 -
5	Použitá literatura.....	- 42 -
	Seznam příloh.....	- 43 -

Úvod

V současnosti do stále širšího spektra elektronických přístrojů pronikají digitální technologie. Signál, který se kdysi zpracovával analogově, se nyní upravuje číslicově a díky tomu se vyvíjí stále nové metody zpracování signálu. První zmínky o softwarově definovaném rádiu, nebo zkráceně SDR jsou z roku 1991. Svůj původ má však již od konce sedmdesátých let v oblasti obrany v USA i v Evropě. Například americký vojenský projekt SpeakEasy využíval programovatelné zpracování radiového signálu pomocí SDR pro emulaci více než 10 stávajících vojenských radiostanic, které pracují v kmitočtových pásmech v rozsahu 2 až 2 000 MHz. Dalším cílem bylo vytvořit taková rádia, která by dodatečně snadno začlenila nové přenosové protokoly a modulační standardy do budoucna, pro udržení kroku vojenských komunikací s novými trendy v kódování a modulaci.

U SDR se tedy jedná o moderní radiovou technologii, která má radiové komponenty realizovány hardwarově a následné zpracovávání signálu se děje pomocí softwaru. Díky tomu se software může měnit a různě upravovat.

V první části této práce je popsáno fungování obecného softwarově definovaného rádia.

V druhé části práce bude řešen USB (Universal Serial Bus) DVB-T a jeho alternativní využití jako přijímače SDR. Na začátku jsou popsány parametry, které musí USB DVB-T tuner splňovat, aby mohl být k tomuto účelu použit, a dále dostupnost USB DVB-T tunerů na trhu.

Ve třetí části je uveden popis testovaných dostupných softwarů pod operačním systémem Linux, které lze k tomuto účelu použít.

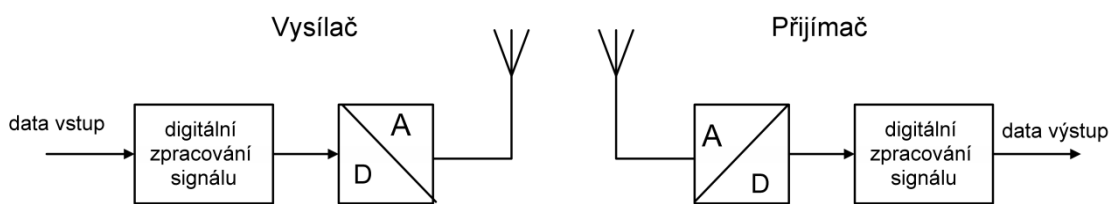
1 Softwarově definované rádio

Softwarově definované rádio (SDR) obsahuje rádiový vysílač Tx (Transmitter) a přijímač Rx (Receiver), jejichž frekvenční rozsah, typ modulace, výstupní výkon vysílače a případně i další pracovní parametry mohou být měněny prostřednictvím změn příslušného softwaru, bez jakýchkoliv změn v hardwarových komponentech, ovlivňujících rádiové vysílání. Převod signálu digitálně analogový DAC (Digital Analog Converter) resp. analogově digitální ADC (Analog Digital Converter) se zatím realizuje jak ve vysílači, tak v přijímači buď v základním pásmu, nebo v mezifrekvenci, tedy daleko od vysílací resp. přijímací antény [1].

Cílem je tedy nahradit analogové komponenty rádiového zařízení digitálními komponenty a tím umožnit snadné přeladění přes velký rozsah kmitočtů, dle požadavků daného komunikačního protokolu (typ modulace, šířka pásma, výkonové úrovně, atd.) a to pouhou změnou příslušného softwaru, což uživateli umožní změnu komunikačního systému bez nutnosti zakoupení nového zařízení či změny hardwarové konfigurace. Další motivací této evoluce směrem k SDR je využití výhod spojených s nanometrovou integrační technologií CMOS (Complementary Metal–Oxide–Semiconductor), jako je cena, hustota prvků na čipu, velikost čipu, nízká spotřeba energie, odolnost vůči šumu, vysoká komunikační rychlost, atd.[2].

1.1 Ideální softwarové rádio

U ideálního softwarového rádia (obr. 1.1) je jediným analogovým elementem anténa, před níž následuje ve vysílacím traktu převodník DAC v přijímacím traktu převodník ADC. To umožňuje realizovat veškeré zpracování signálu v digitálních procesorech. Tato koncepce softwarového rádia není zatím technicky dosažitelná, protože jsou zde kladeny vysoké nároky na ADC převodníky, po kterých je požadován velký dynamický rozsah nejméně 100dB při přijímaných signálech o frekvenci až v jednotkách GHz a pro takový rozsah v současné době nejsou převodníky ADC dimenzovány.



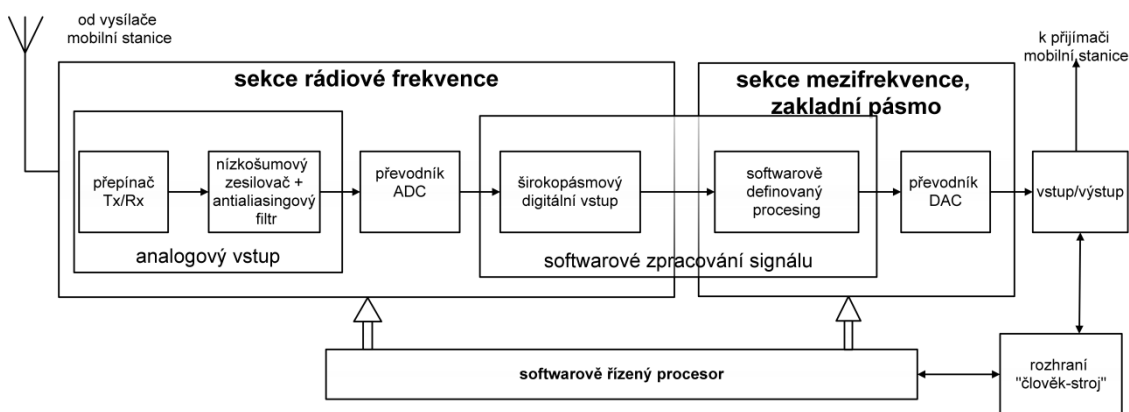
Obr. 1.1 : *Blokové schéma ideálního SDR [3].*

1.2 Obecný model SDR

Základními bloky SDR jsou převodníky ADC, DAC. Převodníky ADC používané v přijímači převádějí analogové signály do digitální podoby. Nejvýhodnější by bylo, kdyby tyto

převodníky byly umístěny přímo za přijímací anténou, ale kvůli omezeným možnostem ADC převodníků, které nedosahují velkých dynamických rozsahů, nejsou zatím prakticky realizovatelné. Proto požadavky velkého dynamického rozsahu se stále realizují „hybridními“ přijímači SDR, u nichž jsou vstupní přijímané signály nejprve převedeny klasickými analogovými postupy na (jedním i vícenásobným směřováním) na podstatně nižší frekvenci, nebo dokonce do základního pásma a teprve poté následuje převodník ADC, ten poté dosáhne potřebného dynamického rozsahu.

U obecného modelu SDR (obr. 1.2) lze vyzorovat, předávání softwaru pro získání požadovaných služeb od softwarového rádia. Softwarově řízený procesor zpracovává informace z infrastruktury mobilní sítě, využívá dostupná rádiová pásma, mění aktuální parametry rádiových kanálů, zpracovává požadavky uživatelů [4].



Obr. 1.2 : Obecný model SDR

Digitální zpracování signálu obsahuje:

- Digitální konverzi (převod) na vyšší a nižší vzorkovací frekvenci
- Frekvenční filtrace
- Prokládání
- Modulace
- Demodulace
- Kódování FEC (Forward Error Corection) - zvyšuje odolnost přenášených digitálních signálů vůči různým degradacím (pokles kvality, rušení) a chybám způsobených neideálními vlastnostmi přenosových kanálů
- Předzkreslení (Predistorze) - je elektronická úprava přenosové funkce obvodu tak, aby bylo možno při jeho syntéze brát v úvahu vliv ztrát v jednotlivých konstrukčních prvcích. Spočívá v upravení tvaru vstupního signálu výkonového zesilovače tak, aby systém, tvořený předzkreslovačem a výkonovým

zesilovačem dohromady tvořil lineární systém. Je to účinný proces, který lze použít k potlačení nelinearity výkonových zesilovačů [1].

K digitálnímu zpracování signálů v přijímači se využívají čtyři hardwarové komponenty:

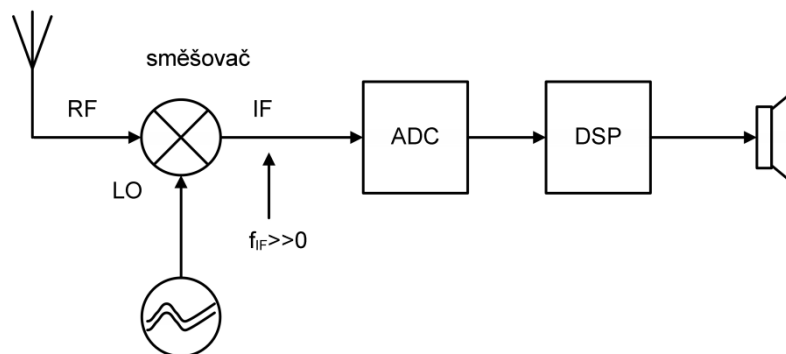
- Digitální signálové procesory DSP (Digital Signal Processors)
- Procesory pro obecné účely GPP (General Purpose Processors)
- Programovatelná hradlová pole FPGA (Field Programmable Gate Arrays)
- Integrované obvody pro specifická použití ASIC (Application - Specified Integrated Circuits)

Procesory DSP a GPP jsou snadno programovatelné, ale jejich výpočetní výkon je relativně malý, protože využívají sériové zpracování dat. Programovatelná pole FPGA využívají paralelní zpracování dat, proto je výkon podstatně vyšší, jsou programovatelné, ale výkonová spotřeba a cena jsou vysoké. Obvody ASIC musí být navrženy zvlášť pro každou konkrétní aplikaci, nejsou programovatelné, ale jejich výpočetní výkon je mimořádně vysoký.

1.3 Základní druhy SDR

1.3.1 SDR s vysokou mezifrekvencí

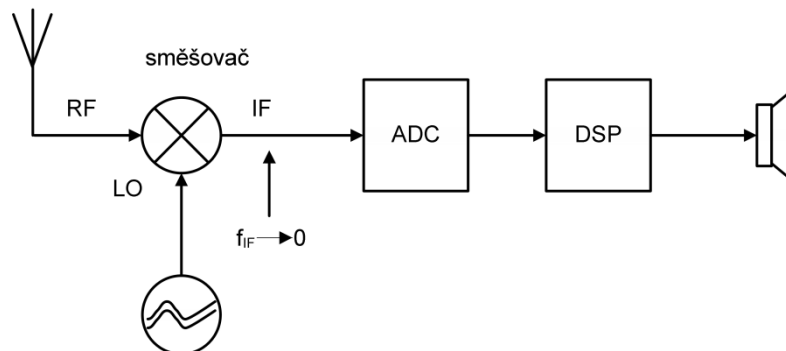
Mezifrekvenční signál IF (Intermediate Frequency) získaný v analogovém směšovači (obr. 1.3) ze vstupní rádiové frekvence RF (Radio Frequency) a lokálního oscilátoru LO (Local Oscillator) je v převodníku ADC metodou pásmového vzorkování digitalizován a dále zpracováván v digitálním procesoru DSP [1].



Obr. 1.3 : SDR s vysokou mezifrekvencí

1.3.2 SDR s nízkou mezifrekvencí

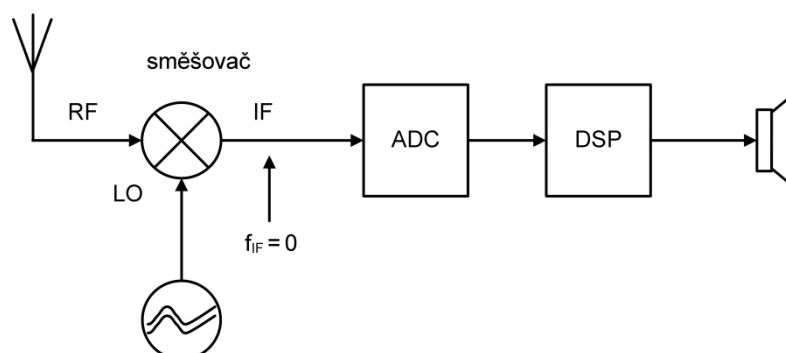
Vstupní signál se mění v analogovém směšovači na velmi nízkou frekvenci (obr. 1.4), kterou lze snadno v převodníku ADC digitalizovat. Kapacitní vazba za směšovačem zabraňuje šumu $1/f$ a stejnosměrnému offsetu vstupovat do ADC převodníku. Požadavky na stabilitu oscilátoru LO jsou u tohoto zapojení menší, než u přijímačů s nulovou mezifrekvencí [1].



Obr. 1.4 : SDR s nízkou mezifrekvencí

1.3.3 SDR s nulovou mezifrekvencí

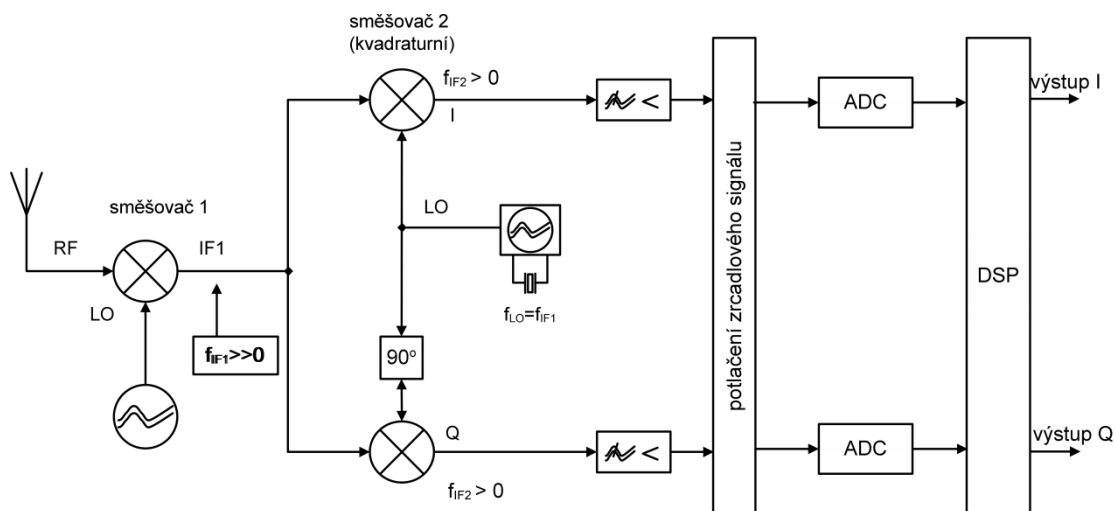
Vstupní signál je převáděn přímo v analogovém směšovači do základního pásma (obr. 1.5). Ve směšovači však vznikají problémy s jeho šumem $1/f$ a se stejnosměrným offsetem (nesymetrie) způsobeným hlavně vlastním směšováním a také intermodulačními produkty druhého řádu. U některých přenosových formátů jsou navíc kladeny vysoké nároky na stabilitu místního oscilátoru LO [1].



Obr. 1.5 : SDR s nulovou mezifrekvencí

1.3.4 SDR s vysokou první a velmi nízkou (nulovou) druhou mezifrekvencí

Na obr. 1.6 je vstupní signál v kvadrurním směšovači rozdělen za pomoci dvou složek signálu oscilátoru LO s fázemi 0° a 90° , na synfázní složku I (In-Phase) a na kvadrurní složku Q (Quadrature-Phase). Kvadrurní směšovač má schopnost samočinně potlačovat značné množství parazitních směšovacích produktů, odstraní zrcadlový signál a na výstupu zůstává jen jedno z postranních pásem. Kvadrurní směšovač lze realizovat jak v digitální, tak i analogové formě. Umožňuje aplikovat principy směšování se samočinným potlačením zrcadlového kmitočtu IRM (Image Reject Mixer). V obou větvích lze použít samostatné ADC převodníky s poloviční vzorkovací rychlostí a tedy se sníženou výkonovou spotřebou a zvýšeným dynamickým rozsahem [2, 5].

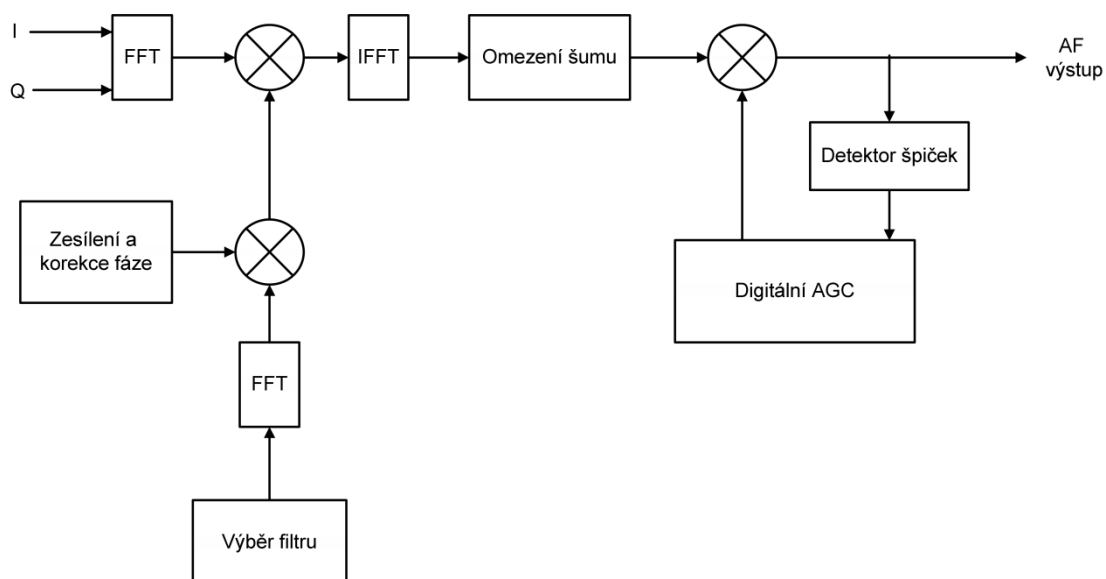


Obr. 1.6 : SDR s vysokou první a velmi nízkou (nulovou) druhou mezifrekvencí

Druhé směšování se provádí z důvodu snížení šumového čísla a tím zlepšení dynamického rozsahu. Výstup I odpovídá cosinové složce signálu, signál Q odpovídá sinové složce (obě složky jsou na sebe kolmé), je tedy k dispozici úplný vektor signálu a proto se může dekódovat jakýkoliv typ modulace.

1.4 Zpracování digitálního signálu z SDR softwarem

Pro zpracování signálu z hardwarové části přijímače je potřeba matematický výkon počítače, který v reálném čase zpracovává počítač s příslušným softwarem pro SDR (obr 1.7). Hardwarová část SDR posílá I/Q signál softwaru, který jej převede rychlou Fourierovou transformací FFT (Fast Fourier Transform) do frekvenční domény a následně provede filtraci vhodného jednoho postranního pásma SSB (Single Side Band) se zvoleným typem filtru. Demoduluje se posunem spektra do základního pásma. Dále se převádí zpět do časové domény inverzní Fourierovou transformací IFFT (Inverse Fast Fourier Transform), kde se získá demodulovaný signál v digitální formě. Zpracuje se šum, případně se potlačí určitá frekvence. Digitální AGC (Automatic Gain Control) udržuje stejnou hlasitost v poslechovém pásmu a potlačuje šum ve prospěch poslouchaného signálu AF (Audio Frequency).



Obr. 1.7 : Funkční bloky zpracování digitálního signálu v SDR software

1.5 Parametry rádiového přijímače

Rádiové přijímače s pracovním rozsahem v oblasti dlouhých, středních a krátkých vln pracují v poměrně přetížené oblasti elektromagnetického spektra. Jejich úkolem je vybrat slabý užitečný signál, vyskytující se jednak na pozadí šumu a zároveň mezi množstvím silných nežádoucích signálů. Aby bylo možné jednotlivé vlastnosti přijímačů mezi sebou srovnávat, musí se tyto parametry jednoznačně definovat a přesně definovat i postupy jejich měření.

1.5.1 Frekvenční rozsah

Frekvenční rozsah udává, v jakých hodnotách vlnových délek může rádiový přijímač pracovat. Vysokofrekvenční pásmo se rozděluje do jednotlivých skupin (tab. 1.1), které se od sebe liší různými vlastnostmi šíření.

Tab. 1.1: Rozdělení frekvencí

Název	Frekvence	Vlnová délka
Dlouhé vlny	30 kHz – 300 kHz	10 km – 1 km
Střední vlny	300 kHz – 3 MHz	1 km – 100 m
Krátké vlny	3 MHz – 30 MHz	100 m – 10 m
Velmi krátké vlny	30 MHz – 300 MHz	10 m – 1 m
Ultra krátké vlny	300 MHz – 3 GHz	1 m – 100 mm
Centimetrové vlny	3 GHz – 30 GHz	100 mm – 10 mm
Milimetrové vlny	30 GHz – 300 GHz	10 mm – 1 mm

1.5.2 Šumový práh, šumové číslo

Šumové číslo je podíl výstupního a vstupního signálu daného bloku. Je dáno vzorcem 1.1 udává se v [dB], kde F je šumové číslo, P_1 výkon signálu na vstupu přijímače, P_{1s} výkon šumu na vstupu přijímače, P_2 výkon signálu na výstupu přijímače, P_{2s} výkon šumu na výstupu

přijímače. Čím menší má přijímač šumové číslo, tím slabší signály jím lze při daných podmínkách přijímat. Šumové číslo ovlivňuje maximální dosažitelnou citlivost.

$$F = 10 \log \frac{\frac{P_1}{P_{1\delta}}}{\frac{P_2}{P_{2\delta}}} [dB] \quad (1.1)$$

Šumový práh je určen výkonem šumu vztaženým ke vstupu přijímače. Udává se v jednotkách hustoty výkonu [dBm/Hz], kdy není závislý na šířce pásma. Mnohdy se ale udává šumový práh pro určitou šumovou šířku pásma a v tomto případě jsou jednotky v [dBm] spolu s uvedením šumové šířky pásma.

Minimální detekovatelný signál MDS (Minimum Detectable Signal) je signál, který má v rámci pracovní šířky pásma přijímače požadovaný odstup od šumu, nejčastěji 0dB, udává se v [dBm].

Poměr signál-šum SNR (Signal To Noise Ratio) je poměr výkonu signálu k výkonu šumu v rámci aktuálně zpracovávané šířky pásma, udává se v [dBm]. [6]

1.5.3 Citlivost

Citlivost je dána výkonem minimálního detekovatelného užitečného signálu, přiváděného na vstup přijímače a měřeného při definovaném poměru signálu k šumu. Nejčastější hodnoty SNR, při kterých je citlivost uvedena, jsou 0dB, 3dB, 10dB v oblasti AM a 12dB, 14dB a 20dB pokud se pohybuje v oblasti úzkopásmových FM. Udává se v [dBm] se současným uvedením SNR.

Maximální citlivost udává takové signálové napětí na vstupu přijímače, které na standardní zátěži vyvolá standardní výstupní výkon 17dBm (50 mW). Pro některé speciální případy se užívá 7 dBm, nebo 27 dBm. AM signál musí být modulovaný kmitočtem 400 Hz s modulačním indexem $m = 30\%$ [6].

1.5.4 Selektivita

Selektivita je schopnost přijímače vybrat ze směsice signálů, užitečný, žádaný signál. Ostatní signály jsou rušivé.

Kmitočtová selektivita je schopnost přijímače vybrat z celého rádiového spektra kmitočtové pásmo, které zabírá jediný vysílač. Poměr selektivity a (vzorec 1.2) je dán poměrem U vstupního napětí signálu při určité kmitočtové odchylce Δf , potřebné pro dosažení téhož napětí a U_r napětí vstupního signálu při vyladění ($\Delta f = 0$) [6].

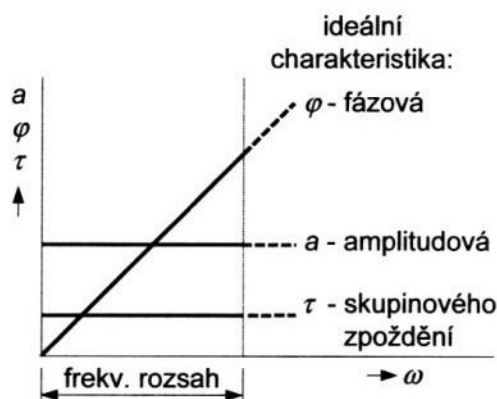
$$a = U / U_r \quad (1.2)$$

Závislostí poměru selektivity a na rozladění Δf vznikne křivka kmitočtové selektivity.

1.5.5 Zkreslení

Důležitými parametry při hodnocení parametrů rádiových přijímačů jsou různé druhy zkreslení. Ke zkreslení dochází tehdy, když se mění přenosové parametry s frekvencí, nebo

s okamžitou hodnotou přenášeného signálu. S tímto tvrzením se všechna zkreslení mohou dělit na frekvenční a nelineární zkreslení. Na obr. 1.8 jsou vyobrazeny ideální průběhy frekvenčních charakteristik [7].



Obr. 1.8 : *Ideální průběhy frekvenčních charakteristik [7].*

1.5.5.1 Frekvenční zkreslení

Frekvenční zkreslení někdy uváděno jako lineární zkreslení, je u reálných dvojbranů v závislosti na změny amplitudy a fáze na frekvenci obvykle odlišné od ideálních průběhů frekvenčních charakteristik zobrazených na obr. 1.8 a tím u nich dochází k určitým frekvenčním zkreslením.

Frekvenční zkreslení se v praxi dělí:

- **Amplitudové frekvenční zkreslení** se projevuje tak, že není v užitečném frekvenčním pásmu konstantní, ale závisí na frekvenci vstupního signálu.
- **Fázové frekvenční zkreslení** se projevuje tak, že fázový posuv mezi vstupním a výstupním napětí není v užitečném frekvenčním pásmu přímo úměrný frekvenci.
- **Frekvenční zkreslení zpožděním** je způsobeno tím, že skupinové zkreslení není konstantní v celém přenášeném frekvenčním pásmu. Vyjadřuje se ve vhodných časových jednotkách (např. v milisekundách) a udává rozdíl mezi skupinovým zpožděním při libovolné frekvenci a skupinovým zpožděním při zvolené referenční frekvenci [7].

1.5.5.2 Nelineární zkreslení

Nelineární zkreslení vznikají náhle a vlastnosti přijímače se mění s okamžitou hodnotou přenášeného signálu. Druhy nelineárních zkreslení:

- **Harmonické zkreslení** vzniká přítomností harmonických složek na výstupu při vstupním sinusovém napětí. Vyjadřuje se pomocí činitele harmonického zkreslení k_h (vzorec 1.3), který se udává poměrem efektivní hodnoty napětí souhrnu vyšších harmonických složek na výstupu k efektivní hodnotě celkového napětí.

$$k_h = \sqrt{\frac{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + \dots}{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + \dots}} \quad (1.3)$$

- **Intermodulační zkreslení** vzniká kombinací signálových složek na výstupu vlivem jeho nelinearity, je-li přivedeno na vstup více sinusových signálů o určitých amplitudách a frekvencích.
- **Amplitudové nelineární zkreslení** vzniká tak, že se s amplitudou mění poměr efektivního napětí (proudu nebo výkonu). V digitálních systémech se projevuje vznikem parazitní amplitudové modulace na výstupu při vstupních signálech s měnící se amplitudou.
- **Fázové nelineární zkreslení** je nežádoucí změna fázového rozdílu mezi základní sinusovou složkou výstupního signálu a odpovídajícími sinusovými vstupními signály, při změnách amplitudy vstupních signálů. V digitálních systémech se projevuje vznikem parazitní fázové modulace výstupního signálu při vstupních signálech s měnící se amplitudou.
- **Křížové zkreslení** je změna útlumu nebo zisku pro užitečný signál, způsobená současným přenosem dalšího signálu s jinou frekvencí.
- **Křížová modulace** je zkreslení, při kterém se amplitudová modulace rušivého signálu s frekvencí nosné vlny f_c a s amplitudou U_c , přenáší na nosnou vlnu požadovaného signálu o frekvenci $f_s \neq f_c$ a s amplitudou U_s , který může a nemusí být modulován [7].

1.5.6 Dynamický rozsah přijímače

Dynamický rozsah přijímače je dán rozsahem takových vstupních výkonových úrovní rádiového signálu, které rádiový přijímač akceptovatelným způsobem umí zpracovat, přičemž v oblasti nízkých zpracovávaných výkonů je dynamický rozsah omezen šumovým číslem, zatímco v oblasti velkých zpracovávaných výkonů je zpracování omezeno kompresí zkreslení.

Dynamický rozsah vychází ze závislosti mezi užitečným výstupním výkonem P_o a vstupním výkonem P_i , měřené při buzení jediným sinusovým signálem o konstantní frekvenci (obr. 1.9). Tato charakteristika je při malých vstupních výkonech lineární, ale při zvyšování úrovně vstupního signálu se začíná zakřivovat, až se ustálí na hodnotě konstantního satureovaného výkonu P_{sat} . Jako horní hranice užitečného dynamického rozsahu se uvažuje výstupní výkon P_{-1} , což se označuje jako bod komprese zisku -1 dBm. Dolní hranice dynamického rozsahu je dána výstupním šumovým výkonem P_{so} , nebo také je za hranici uvažován minimální detekovatelný výstupní výkon MDS_0 , který se nachází 3 dB nad šumovým výkonem. Dynamický rozsah je tedy dán vztahem

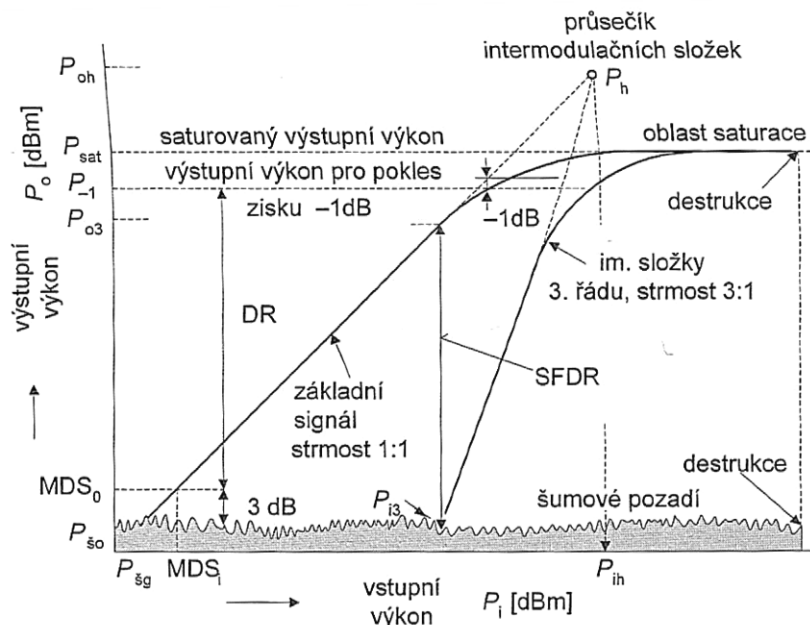
$$DR [dB] = P_{-1} [dBm] - P_{so} [dBm] \quad (1.4)$$

$$DR_d [dB] = P_{-1} [dBm] - MDS_0 [dBm] = DR [dB] - 3 dB \quad (1.5)$$

Důsledkem nelineárních převodních charakteristik, vznikají při dvou a více vstupních signálech intermodulační složky druhého, třetího a dalších řádů. Složky druhého řádu se dají potlačit pásmovou filtrací, avšak složky třetího řádu se potlačují obtížně, leží v těsné blízkosti

užitečného signálu a proto je dobré je do grafu určení dynamických rozsahů zakreslit. Zobrazí se jako přímka s trojnásobnou strmostí s průsečíkem v šumovém pozadí vstupního výkonu P_{i3} . Poté výkony P_{o3} a P_{so} vymezují dynamický rozsah bez intermodulačního zkreslení SFDR (Spurious-Noise-Free Dynamic Range) daný vzorcem 1.6 [7].

$$SFDR = \frac{1}{2}(P_{oh} - F)[dBm] \quad (1.6)$$



Obr. 1.9 : Graf k určení dynamických rozsahů [7].

1.5.7 Konkrétní parametry SDR přijímače

Pro názornou představu je zde uveden jeden zástupce originálního přijímače SDR s konkrétními parametry. Typ přijímače Winradio WR-G315e s následujícími vybranými parametry uvedených v tabulce 1.2 [8]. Všechny parametry jsou uvedeny v příloze B.

Tab. 1.2: Vybrané parametry Winradio WR-G315e

Frekvenční rozsah	9 kHz – 1 800 MHz
Krok ladění	1 Hz
SFDR	90 dB
MDS	-135 dBm
ADC	16 bit, 100 Msps
Zobrazení šířky pásma v reálném čase	Až 15 MHz
Módy s dodávaným softwarem	AM, AMS, LSB, USB, DSB, ISB, CW, FM
Cena	cca 30 000 Kč

1.6 Porovnání SDR s klasickým přijímačem

Při porovnávání SDR s klasickým přijímačem, které je uvedeno v tabulce 1.3 lze vyčíst, že u SDR lze jednodušeji dosáhnout lepších parametrů, než u klasického přijímače, který musí pro splnění lepších parametrů být sestaven z více nákladných částí [5].

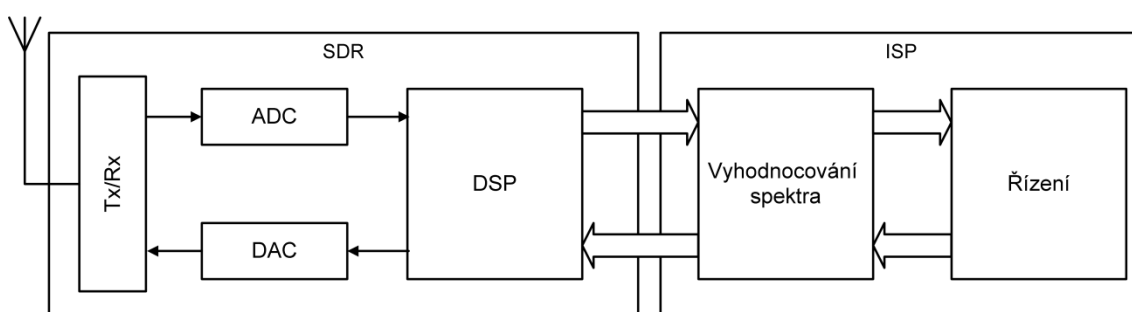
Tab. 1.3: Porovnání SDR s klasickým přijímačem

	SDR	Klasický přijímač
+	<ul style="list-style-type: none"> • Jednodušší topologie a hardware • Běžně dosahuje lepších parametrů • Trvalá a snadná inovace • Konektivita s okolními aplikacemi • Stabilita parametrů a kalibrace • Inovativní a účelné uživatelské rozhraní • Nové možnosti příjmu • Panoramatický adaptér s intuitivním laděním • Okamžitá optická analýza spektra=prehled co se děje na pásmu a kde (prehled ve splitu) • Bezkonkurenční filtry • AGC nového typu • Dobrý poměr cena / výkon • Rozsáhlé paměti frekvencí a provozních režimů 	<ul style="list-style-type: none"> • Větší rozšíření • Vše v jednom
-	<ul style="list-style-type: none"> • Vyšší nároky na uživatele • Nutnost řešit vztah SDR a počítače a jeho operačního systému • Náklady na PC • Údržba PC • Údržba software • Pro konektivitu nutnost instalace dalšího SW 	<ul style="list-style-type: none"> • Obtížná inovace ve zpracování signálové cesty, růst složitosti zařízení • Lepší parametry se dosahují s placenými doplňky (filtry, audiorecorder, ...) • Omezená konektivita s PC • Omezená konektivita s programovým vybavením PC • Absence panoramatického adaptéru • Složitost ovládání • Vyšší cena za kvalitu

1.7 Budoucí vývoj přijímačů

V nynější době, kdy požadavky na provozní kapacitu radiokomunikačních systémů se neustále zvyšují a vznikají systémy zcela nové, vzniká problém nedostatku volných frekvenčních pásem. Je to dáno tím, že v současné době je efektivita dosavadního pevného přidělování frekvenčních spekter velmi nízká. Přidělování frekvenčních spekter provádí obvykle národní regulační orgány a ty přidělí většinu spektra primárním, licencovaným uživatelům, jako je rozhlas, televize, radar, systémy pozemní mobilní komunikace a další. Využívání frekvenčního pásma není vždy po celou dobu stejné. Z toho důvodu se softwarově definované rádio vyvíjí. Je k němu přidán inteligentní signálový procesor a tomuto zapojení se říká kognitivní rádio, které se automaticky přeladuje do segmentu, který je aktuálně méně využívaný. To vede k rovnoměrnějšímu využití spektra.

Kognitivní rádio CR (Cognitive Radio) je původně definováno jako rádiový systém, využívaný sekundárními nelicencovanými uživateli, který automaticky spojitě skenuje rádiové spektrum primárních uživatelů. Zjistí-li, že určitý konkrétní segment tohoto spektra je právě volný nebo je alespoň podstatně méně využívaný než segment jím dosud obsazený, velmi rychle do něho „přeskočí“ a v případě potřeby ho opět opustí, tak aby nedocházelo k rušení primárních uživatelů. Tato varianta se označuje jako kognitivní rádio se snímáním spektra SSCR (Spectrum Sensing Cognitive Radio). Další fází vývoje je, že se začínají měnit i ostatní parametry, jako jsou typy modulace, kódování, techniky mnohonásobného přístupu, vysílací výkony a další. Této variantě se říká plně kognitivní rádio FCR (Full Cognitive Radio) [3].



Obr. 1.10 : *Originální definice kognitivního rádia*

Na obr. 1.10 je zobrazena originální definice kognitivního rádia podle Mitoly III. Jeho základem je softwarově definované rádio, které je doplněno o inteligentní signálový procesor ISP (Intelligent Signal Processing). Inteligentní složky jsou vyobrazeny blokem vyhodnocování spektra a blokem řízení.

Funkce kognitivního rádia:

- **Snímání frekvenčního spektra IPD (Interference Power Destiny).** Umožňuje nacházet volné nevyužívané části spektra, ve kterých mohou účastníci komunikovat. Plně kognitivní rádio potřebuje pro svou činnost ještě další informace, které jsou obsáhlé v mapě rádiového prostředí REM (Radio Environment Map). Zde jsou kromě profilu spektra také informace o současné

poloze a aktivitách konkrétních systémů kognitivního rádia, informace o spektrální situaci regulačními orgány a další.

- **Dynamická selekce frekvence DFS** (Dynamic Frequency Selection). Tato funkce přidělí účastníkovi systému konkrétní volný segment, v němž je výkon interferujících složek menší než detekční práh. Pokud je tento práh už překročen, musí nelicencovaný vysílač přerušit provoz a přejít na jiný neobsazený kanál.
- **Řízení vysílacích výkonů TPC** (Transmitter Power Control). Tato funkce reguluje vysílací výkon, aby byl zajištěn nerušený provoz a nebyl přesažen celkový horní limit výkonové úrovně [3].

V nadcházející době se kognitivní rádio bude rozšiřovat do řady aplikací a služeb jako jsou širokopásmové rádiové služby, aplikace ve vojenských a bezpečnostních složkách, buňkové systémy, dopravě, technologie přístupových sítí a dalších.

2 DVB-T modul jako SDR

DVB-T moduly připojitelné k počítači pomocí rozhraní USB, původně určeny pro televizní pozemní digitální vysílání, lze za určitých podmínek použít jako přijímače SDR. K hlavním výhodám tohoto užití patří hlavně cenový rozdíl originálního SDR přijímače a takového modulu DVB-T, který je dostupný na trhu v řádově stovkách korun. Při výběru DVB-T modulu, které se pro tento účel hodí, se musíme dívat na technické parametry, ve kterých je napsáno, jakou verzi čipsetu obsahuje a jaký je typ vnitřního tuneru pro příjem signálu [9].

2.1 Parametry DVB-T modulu pro použití jako SDR

Pro použití SDR přijímače je nutné, aby konkrétní DVB-T modul obsahoval tyto součásti. Čip pro demodulaci Realtek RTL2832U a následně jeden z níže uvedených tunerů pro příjem signálu.

2.1.1 Realtek RTL2832U

Čip RTL2832U je vysoce účinný DVB-T COFDM (Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing) demodulátor, který podporuje rozhraní USB 2.0. Byl navržen tak, aby jeho implementace byla kompaktní, levná, univerzálně použitelná a jednoduše softwarově rozšiřitelná. Obsahuje pouze širokopásmový zesilovač a ADC převodník. O frekvenční zpracování a dekódování se stará až ovladač uvnitř PC (Personal Computer).

RTL2832U podporuje tunery na vysoké mezifrekvenci (36,125MHz), nízké mezifrekvenci (4,57MHz) nebo nulové mezifrekvenci na výstupu s 28,8MHz krystalem. Obsahuje podporu pro frekvenční modulaci FM (Frequency Modulation), DAB (Digital Audio Broadcasting), DAB+ rádio. Je založen na moderním, rychlém 8 bitovém ADC převodníku a dokáže přijímat signály s šířkou pásma kolem 2.8 MHz [10].

2.1.2 Tuner

Pro příjem signálu se využívá jeden z těchto tunerů uvedených v tabulce 2.1, které se od sebe liší v šířce frekvenčních rozsahů.

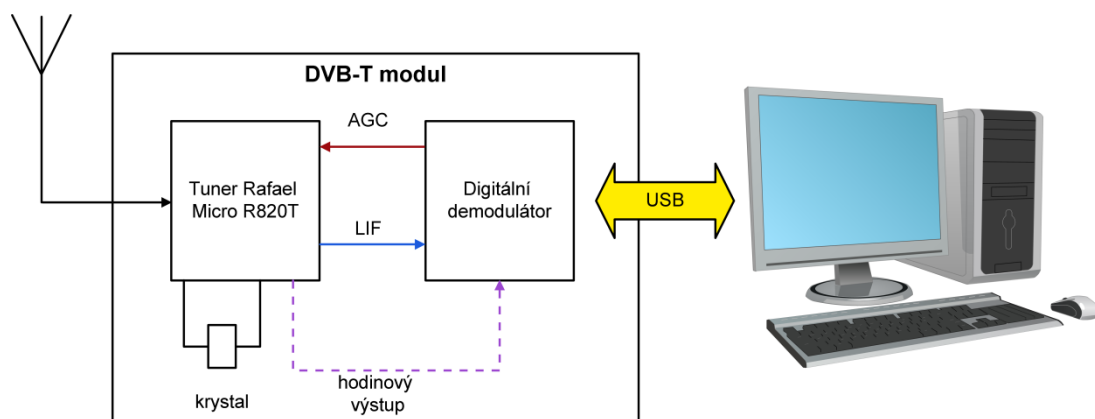
Tab. 2.1: Seznam tunerů

Typ tuneru	Frekvenční rozsah [MHz]
<i>Elonics E4000</i>	<i>52-1100 a 1250-2200</i>
<i>Rafael Micro R820T</i>	<i>25-1766</i>
<i>Rafael Micro R828D</i>	<i>24-1766</i>
<i>Fitipower FC0013</i>	<i>22-1100</i>
<i>Fitipower FC0012</i>	<i>22-948,6</i>
<i>FCI FC2580</i>	<i>146-308 a 438-924</i>

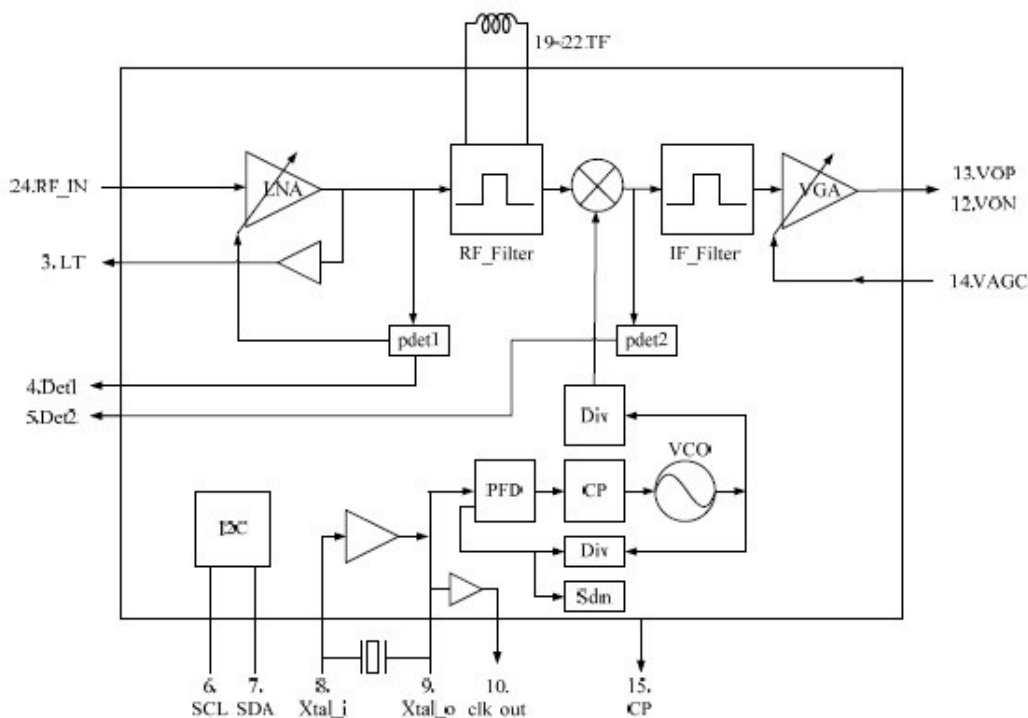
Nejvíce rozšířeným tunerem pro testování příjmu SDR je Elonics E4000, ale v nynější době je ho na trhu nedostatek, protože se už nevyrábí. V současné době je využíván hlavně tuner Rafael Micro R820T, který je srovnatelné výkonosti a také celkově levnější.

Tuner Rafael Micro R820T je primárně určen pro standardy digitálního televizního vysílání včetně DVB-T, pro vysílání ve vysokém rozlišení ve Spojených Státech Amerických ATSC (Advanced Television Systems Committee), pro televizní mobilní přístroje DMB-T (Digital Multimedia Broadcasting-Terrestrial) a proto je použit v různých aplikacích, jako jsou počítačové DVB-T karty, USB moduly, Set Top Boxy.

Na obrázku 2.1 je vidět příklad zapojení komunikace mezi modulem DVB-T a PC. Tuner Rafael Micro R820T přenáší data do demodulátoru pomocí I2C sběrnice. Demodulátor komunikuje přes USB rozhraní s PC. Na dalším obrázku 2.2 je zobrazeno blokové schéma tuneru Rafael Micro R820T [11].



Obr. 2.1 : *Komunikace mezi modulem DVB-T a PC*



Obr. 2.2 : Blokové schéma tuneru Rafael Micro R820T [6]

2.1.3 Souhrn parametrů

Pro praktické použití SDR je v následující tabulce (Tab. 2.2) vypsáno několik vybraných parametrů DVB-T modulu podporujícího příjem SDR. Ve srovnání s parametry originálního SDR přijímače uvedenými v první kapitole, jsou udávané údaje podstatně horší, což je dáno také hlavně rozdílem v použití ADC převodníků a poměrně výrazným cenovým rozdílem. Z tohoto důvodu nemohou být očekávány špičkové vlastnosti přijímače, ale pro testovací a amatérské účely mohou být dostačující.

Tab. 2.2: Vybrané parametry

<i>Frekvenční rozsah</i>	<i>V závislosti na tuneru cca 22MHz – 2200 MHz</i>
<i>Krok ladění</i>	<i>1 Hz</i>
<i>SDFR</i>	<i>48 dB</i>
<i>ADC</i>	<i>8 bit, 3,2 Msps</i>
<i>Zobrazení šířky pásma v reálném čase</i>	<i>cca 2,8 MHz</i>
<i>Módy s dodávaným softwarem</i>	<i>AM, CW, LSB, USB, FMN, FMW (stereo)</i>
<i>Cena</i>	<i>cca 500 Kč</i>

2.2 Dostupné moduly na trhu

Pro výběr USB DVB-T tunerů dostupných na trhu je velmi obtížné zjistit, jaké DVB-T moduly obsahují výše uváděný čip RTL2832U a jaký konkrétní tuner. Většina výrobců tyto informace k popisům výrobků ani neuvádí. Na našem trhu je dostupnost těchto USB DVB-T tunerů velmi omezený, proto jsou do seznamu DVB-T modulů (tab. 2.3) zahrnuty dostupné moduly i ze zahraničí.

Tab. 2.3: Seznam dostupných DVB-T modulů

<i>Název</i>	<i>Tuner</i>	<i>Prodejce</i>	<i>Cena k 20. 3. 2014</i>
<i>DVB-T USB TUNER S SDR,DAB+ a FM</i>	<i>R820T</i>	<i>GES-ELECTRONICS</i>	<i>519 Kč</i>
<i>LIFEVIEW NOT LV5T DELUXE USB</i>	<i>FC0012</i>	<i>www.stolnipoctace.cz</i>	<i>438 Kč</i>
<i>Sencor SDB 522RT</i>	<i>FC0013</i>	<i>www.czc.cz</i>	<i>449 Kč</i>
<i>Not Only TV DVB-T LV5T Deluxe</i>	<i>FC0012</i>	<i>www.k24.cz</i>	<i>335 Kč</i>
<i>Newsky TW28T</i>	<i>R820T</i>	<i>www.aliexpress.com</i>	<i>380 Kč</i>
<i>NooElec Brand RTL-SDR</i>	<i>R820T</i>	<i>www.amazon.com</i>	<i>439 Kč</i>
<i>MyGica T803</i>	<i>FC0012</i>	<i>www.techbuy.com</i>	<i>775 Kč</i>
<i>EZCAP EZTV688</i>	<i>E4000</i>	<i>www.ebay.com</i>	<i>512 Kč</i>

3 Realizace SDR

V následující části bude uvedena realizace přijímače SDR. Pro samotnou realizaci byl vybrán jeden konkrétní DVB-T modul, aby splňoval výše uvedené parametry. Tedy čip Realtek RTL2832U a jeden z uvedených tunerů v tomto konkrétním případě Rafaelo Micro R820T. Pro samotné testování dostupných softwarů podporujících komunikaci s modulem DVB-T bylo zadáno vyhledávat software pro operační systém Linux.

3.1 Parametry použitého DVB-T modulu

Pro praktickou realizaci byl vybrán modul DVB-T USB TUNER S SDR, DAB+ a FM. Byl zakoupen v prodejně GES-ELECTRONICS.

Funkce:

- Čipová sada Realtek RTL2832U
- Tuner Rafaelo Micro R820T
- Kmitočtový rozsah 25 – 1750 MHz
- Ziskovost signálu 50dB
- Pokrytí DVB-T signálu ve frekvenčním pásmu (6/7/8 MHz)
- Zabudovaný FM/DAB/DAB+ tuner (plná podpora v pásmu L-band)

Parametry:

- USB 2.0 rozhraní
- Rozměry: 90mm*26mm*10mm
- Váha: 45g

3.2 Dostupný software pro modul DVB-T

Pro softwarově definované rádio existuje několik volně šiřitelných programů, které podporují připojení DVB-T modulu s čipem RTL2832U. Pro tento způsob příjmu se používá zkratka RTL-SDR (Realtek-Software Defined Radio). Každý z programů nabízí ovládání pomocí příkazové řádky, nebo zobrazení s grafickou nadstavbou. Programy se od sebe liší různým způsobem ovládání, různou podporou SDR přijímačů a speciálními funkcemi. Je dostupný software pro operační systémy Windows tak i Linux. V rámci této práce je testován software pro operační systém Linux.

Konkrétní vybraná Linuxová distribuce Ubuntu, na které je níže popsán software testován:

- Distribuce: Ubuntu
- Verze: 12.10
- Jádro: 3.5.0-46
- Bitová verze: 64bit

3.2.1 Knihovna librtlsdr

Základní knihovna pro komunikaci mezi RTL2832U a PC je knihovna librtlsdr, se kterou pracuje většina softwaru umožňující RTL-SDR. Tato knihovna obsahuje základní kód a také několik základních nástrojů příkazové řádky, jako `rtl_test`, `rtl_sdr`, `rtl_tcp`, `rtl_power` a `rtl_fm`. Tyto nástroje se dají použít k testování existence DVB-T modulu s čipem RTL2832U a provádět základní funkce přenosu dat ze zařízení a logování síly signálu. Pro správnou komunikaci se zařízením RTL2832U, které je připojeno přes USB rozhraní, je zapotřebí ještě knihovna libusb [12].

Pro instalaci knihovny librtlsdr je potřeba zadat tyto příkazy:

```
~$ git clone git://git.osmocom.org/rtl-sdr.git
~$ cd rtl-sdr/
~$ mkdir build
~$ cd build
~$ cmake ../
~$ make
~$ sudo make install
~$ sudo ldconfig
```

Sestavení s autonastavením:

```
~$ cd rtl-sdr/
~$ autoreconf -i
~$ ./configure
~$ make
~$ sudo make install
~$ sudo ldconfig
```

3.2.1.1 `rtl_test`

Pro zjištění zda modul DVB-T funguje, se využívá příkazu `rtl_test`, který vrací seznam podporovaných hodnot zisku, typ tuneru a případné chybové zprávy, které by pro správnou funkci neměly obsahovat.

```
Found 1 device(s):
```

```
0: Realtek, RTL2838UHIDIR, SN: 00000001
```

```
Using device 0: Generic RTL2832U OEM
```

```
Found Rafael Micro R820T tuner
```

Supported gain values (29): 0.0 0.9 1.4 2.7 3.7 7.7 8.7 12.5
14.4 15.7 16.6 19.7 20.7 22.9 25.4 28.0 29.7 32.8 33.8 36.4 37.2
38.6 40.2 42.1 43.4 43.9 44.5 48.0 49.6

Sampling at 2048000 S/s.

Info: This tool will continuously read from the device, and report if samples get lost. If you observe no further output, everything is fine.

3.2.1.2 *rtl_fm*

Základním nástrojem pro příjem FM signálu je program `rtl_fm`, který může inicializovat melodii na dané frekvenci a výstup směřovat do souboru nebo roury příkazového řádku audio přehrávače. Pro příklad poslechu FM radiového vysílání z nástroje příkazové řádky je uveden příkaz:

```
rtl_fm -f 89.1M -M fm -s 170k -A fast -r 32k -E deemp | play -r 32k
```

Kde jednotlivé přepínače znamenají

- `-f <freq>` frekvence pro naladění
- `-M <type>` výběr demodulace
 - `fm` frekvenční modulace
 - `wbfm` širokopásmová frekvenční modulace
 - `am` amplitudová modulace
 - `lsb` dolní postraní pásmo
 - `usb` horní postraní pásmo
- `-s <základní_rychlost>`
- `-A std|fast|lut` výběr zpracování polynomu aproximace
- `-r 32k` použití filtru dolní propusti nastaveného na 32kHz
- `-l 0` povolení hlasitosti

Další nástroje příkazové řádky, jako je `rtl_sdr` slouží pro nahrávání vzorků do souboru nebo předávání dat dále. Program `rtl_tcp` používá pro streamování I/Q data ze zařízení do sítě prostřednictvím TCP portu.

3.2.1.3 *rtl_power*

Příkaz `rtl_power` slouží pro logování síly signálu v jednotkách dBm v nastaveném frekvenčním rozmezí po určitém kroku a integruje sílu signálu po určitý čas. Po spuštění stačí do příkazového řádku zadat příkaz v tomto formátu `rtl_power -f minFrekvence:maxFrekvence:krok -i čas názevSouboru` jako například, že bude skenovat

frekvence od 602 MHz do 603 MHz a bude po kroku 1 MHz zapisovat sílu signálu do souboru a vzorky bude integrovat po dobu 10 sekund.

```
~$ rtl_power -f 602M:603M:1M -i 10 log.csv
```

Výsledný soubor je poté ve formátu

```
datum, čas, min[Hz], max[Hz], krok[Hz], vzorky, dBm, dBm, ...
```

Ukázka zapsaného logu do souboru

```
2014-03-25, 23:31:09, 602000000, 603000000, 1000000.00, 1192, 17.04, 17.04
2014-03-25, 23:31:19, 602000000, 603000000, 1000000.00, 1221, 17.02, 17.02
2014-03-25, 23:31:29, 602000000, 603000000, 1000000.00, 1221, 17.09, 17.09
```

3.2.2 GNU Radio

GNU Radio je open-source sada nástrojů software, která umožňuje stavbu softwarového definovaného rádia. Různé funkce jako je modulace, demodulace, filtrování, kódování, dekódování, zdrojové kódování, atd. jsou k dispozici jako softwarové kódy, které jsou tvořeny jako jednotlivé moduly a plní požadované funkce. Díky tomu je možné jednotlivé vlastnosti SDR snadno rekonfigurovat. GNU Radio nabízí grafické uživatelské rozhraní, kdy uživatel přidává do projektu jednotlivé bloky pro zpracování signálu napsaných v jazyku C++ a Python a propojuje je mezi sebou.

GNU Radio obsahuje softwarové řešení filtrů, kanálového kódování, synchronizační prvky, ekvalizéry, de/modulátory, vocodéry, de/kodéry a taky spoustu dalších prvků, které se v rádiových systémech vyskytují. Výhodou softwaru je práce s bloky – jednotlivými prvky, které je možné mezi sebou propojovat. Mezi bloky se pak mohou předávat data ať už v bitech, bajtech, vektorech, či složitějších datových typech.

Instalace softwaru GNU Radio je možná více způsoby. Nejjednodušším způsobem je využít návodu, který je uveden na internetových stránkách GNU Radia, použitím pre-kompilovaného balíčku pro Ubuntu a použitím příkazu `apt-get install gnuradio`. Problém je však v tom, že se nainstaluje verze GNU Radia – 3.2.2. Tato verze je však z roku 2009 a v nynější době je už k dispozici nově vyvinuta verze 3.6.2. Proto je lepší využít návodu z internetových stránek například sdr.osmocom.org, který už obsahuje i rozšířené komponenty pro využití RTL-SDR. Pro instalaci je tedy nutné zadat tyto příkazy:

```
~$ git clone git://git.osmocom.org/gr-osmosdr
```

```
~$ cd gr-osmosdr/
```

Pro verzi řady 3.6. se musí přenout na odkaz

```
~$ git checkout gr3.6
```

A pokračuje se

```
~$ mkdir build
```

Realizace SDR

```
~$ cd build/
```

```
~$ cmake ../
```

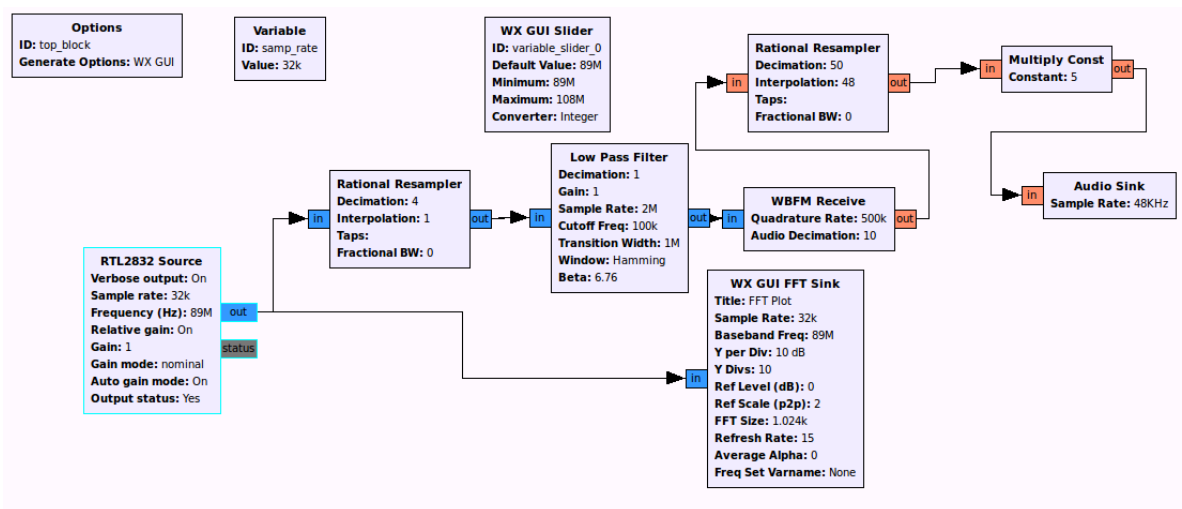
Nyní by měl příkaz `cmake` vytisknout souhrn povolených a zakázaných součástí. Je možno některé komponenty zakázat podle následujících pokynů uvedených v `cmake`. Měla by zde být uvedena součást, která je potřeba pro příjem SDR radia prostřednictvím DVB-T modulu a to je `Osmocom RTLSDR`. Poté se provedou následující příkazy:

```
~$ make
```

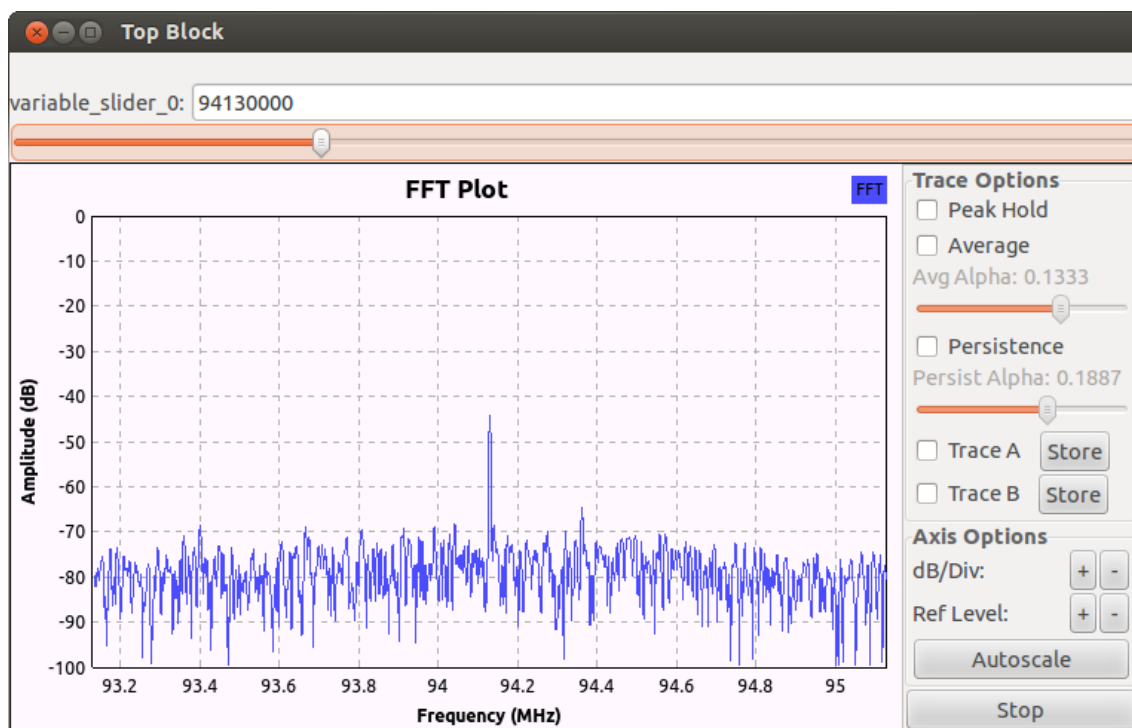
```
~$ sudo make install
```

```
~$ sudo ldconfig
```

Následně lze vybíráním jednotlivých funkčních komponent ze seznamu zdrojů sestavit jednoduchý řetězec pro příjem FM radia pomocí těchto jednotlivých modulů. Jako zdroj, který reprezentuje DVB-T modul, je na obrázku 3.1 uveden blok `RTL2832 Source`, následně z výstupu je veden na zobrazovací prvek rychlé Fourierovy transformace `WX GUI FFT Sink`, `RTL2832 Source` také vede výstup na převzorkování kmitočtu (`Rational Resampler`) dalším blokem, je filtr dolní propust (`Low Pass Filter`), frekvenční modulaci (`WBFM Receive`), převzorkování kmitočtu (`Rational Resampler`), násobičku (`Multiply Const`) a audio výstup (`Audio Sink`). Na obrázku 3.2 je znázorněn výsledný zobrazený signál blokem `WX GUI FFT Sink` [12].



Obr. 3.1 : Návrh jednotlivých bloků v software GNU Radio



Obr. 3.2 : Výsledný zobrazený signál získaný z DVB-T modulu

3.2.3 GQRX

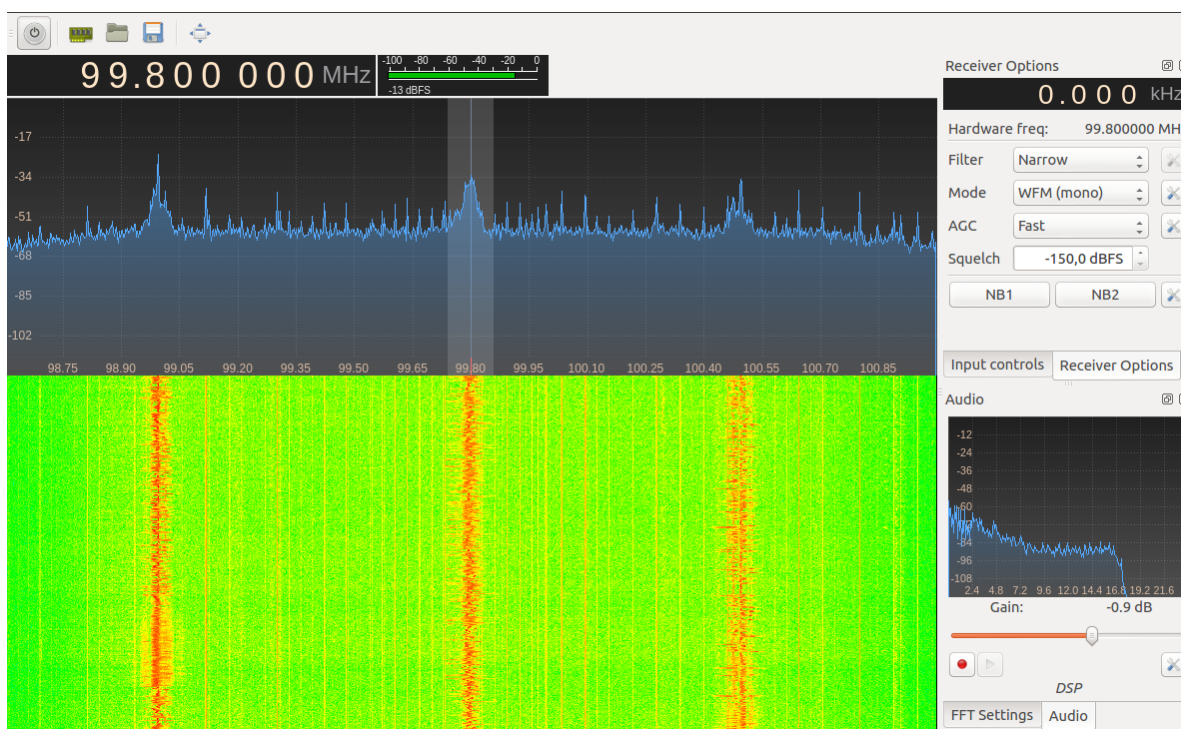
GQRX je software pro softwarové definované rádio (obr. 3.3), založený na GNU Radio a Qt grafickém nástroji. GQRX je volně šiřitelný software s otevřeným zdrojovým kódem, který umožňuje úpravy pro jakékoliv použití. Poslední stabilní verze GQRX je 2.2 a nabízí následující funkce:

- Zobrazí zařízení připojená k počítači
- Zpracovává složky I/Q z podporovaných zařízení
- Změna frekvence, zesílení
- Variabilní pásmová propust
- Demodulace AM, SSB, FM-N (Frequency Modulation-Narrow) a FM-W (Frequency Modulation-Wide) (mono, stereo)
- FFT graf a vodopádové zobrazení
- Záznam a přehrávání audia, ze souboru

Instalace softwaru GQRX vyžaduje už mít předem nainstalované GNU Radio a poté jej lze podle následujícího postupu nainstalovat. Před kompilací je nutné mít ještě nainstalováno Qt 4.7 (nebo novější), QMake a PulseAudio. Stáhne se nejnovější GQRX z GITu, přepne se do nově vytvořeného adresáře gqr, pomocí QMake vygeneruje Makefile a následně GQRX zkompiluje:

Realizace SDR

```
~$ git clone git://github.com/csete/gqrx.git
~$ cd gqrx
~$ qmake
~$ make
~$ sudo cp gqrx /usr/local/bin/
```



Obr. 3.3 : *Software GQRX*

3.2.4 SDR#

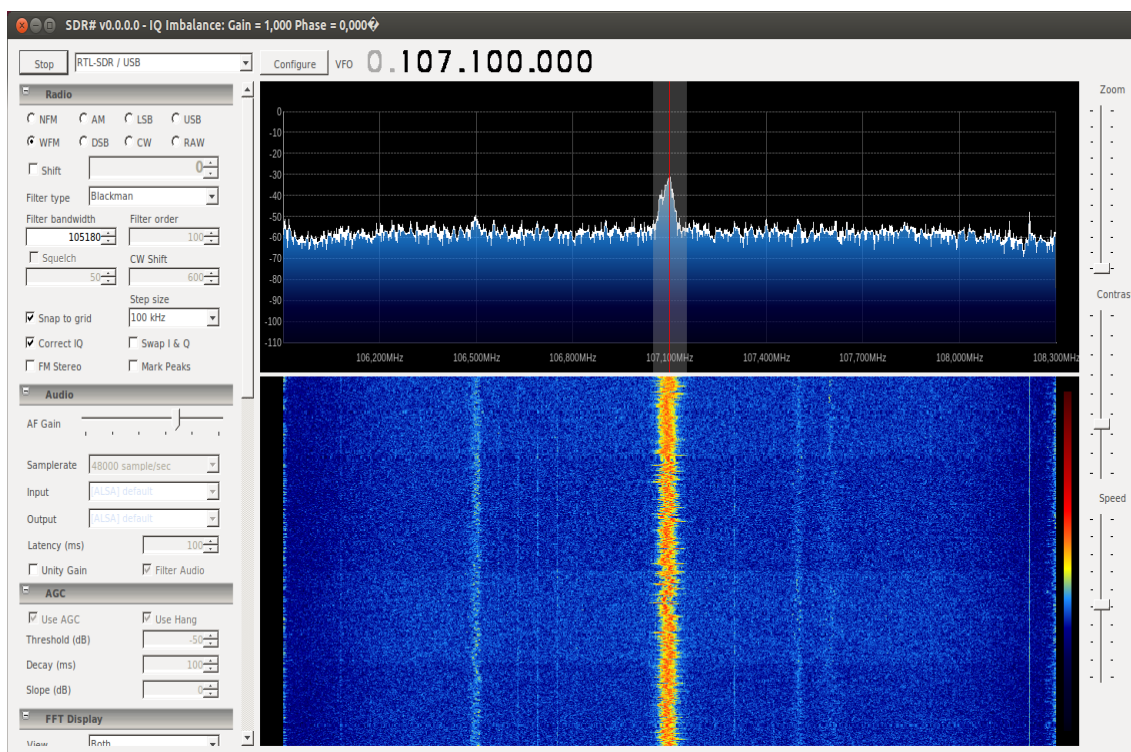
Software SDR# (obr. 3.4) je hodně rozšířený pro práci se softwarovým rádiem a pro použití s přijímačem DVB-T. Software má propracovaný FM-W demodulátor, nabízí podobné funkce jako software GQRX:

- Zobrazí zařízení připojená k počítači
- Zpracovává složky I/Q z podporovaných zařízení
- Změna frekvence, zesílení
- Variabilní pásmová propust
- Demodulace AM, SSB, FM-N a FM-W (mono, stereo)
- FFT graf a vodopádové zobrazení

Realizace SDR

Software lze rozšířit o další funkční bloky pomocí pluginů, které jsou volně dostupné, například o následující funkce:

- Skenování určité šířky pásma a zaznamenávání aktivní frekvence
- Automatické ladění signálů s nastavením určité úrovně signálu
- Záznam a audia
- Měření úrovně síly signálu



Obr. 3.4 : Software SDR#

Jelikož je SDR# naprogramován v jazyku C#, je jeho spuštění na operačním systému Linux trochu obtížnější. Na stránkách výrobce je podrobný návod pro jeho spuštění.

Musí se nejdříve nainstalovat Linux podpora pro Microsoft .NET

```
~$ sudo apt-get install mono-complete monodevelop
```

Stážení poslední verze zdrojového kódu SDR#

```
svn co https://subversion.assembla.com/svn/sdrsharp/trunk  
sdrsharp
```

V programu MonoDevelop se musí sestavit projekt stažené verze zdrojového kódu pod názvem sdrsharp.sln a nalinkovat v nové vytvořené složce po sestavení projektu tyto knihovny

```
ln -s /usr/local/lib/librtlsdr.so librtlsdr.dll
```

```
ln -s /usr/lib/x86_64-linux-gnu/libportaudio.so.2
libportaudio.so
```

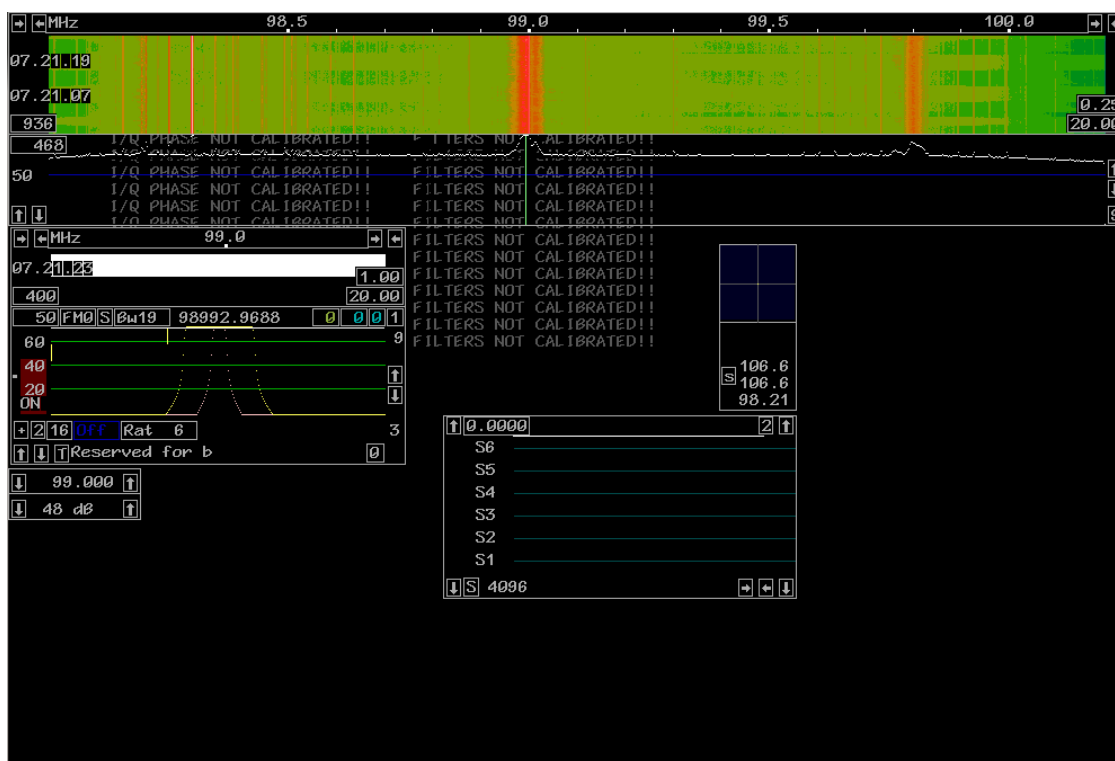
V konfiguračním souboru SDRDharp.exe.config odkomentovat jeden řádek kódu pro povolení podpory funkce RTL-SDR.

```
<add key="RTL-SDR / USB"
value="SDRSharp.RTLSDR.RtlSdrIO, SDRSharp.RTLSDR" />
```

Příkazem `mono SDRSharp.exe` lze program spustit.

3.2.5 Linrad

Software Linrad (obr 3.5) ve verzi 4.00 je volně šiřitelný program, který dokáže zpracovávat mnoho druhů přijímačů SDR a také DVB-T moduly s čipem RTL2832U. Podporuje různé druhy demodulací, jako je AM, SSB, FM a pokročilé funkce, jako například mód pro příjem slabých signálů. Zobrazuje FFT graf a vodopádové zobrazení. Lze zaznamenávat audio do souboru. Pracuje jako konzolová aplikace, kde ovládání je řešeno pomocí klávesových zkratk a proto je práce s tímto programem oproti aplikacím s grafickým rozhraním o něco náročnější na ovládání.



Obr. 3.5 : Software Linrad

3.2.6 SDRangelove

Software SDRangelove (obr. 3.6) je volně šiřitelný software založený na GNU Radio a QT grafickém nástroji. Podporuje FM-N modulaci, zobrazuje FFT graf a vodopádové zobrazení. Pro instalaci tohoto softwaru je potřeba mít nainstalováno GNU Radio, které je popsáno výše a nástroj Qt 5.0 (nebo novější). Poté lze software stáhnout z webu příkazem:

```
~$ git clone git://git.osmocom.org/sdrangelove.git
```

Následně provést sestavení níže uvedenými kroky, kde se u příkazu cmake zadává cesta ke konkrétnímu souboru cmake v Qt:

```
~$ cd sdrangelove/
```

```
~$ mkdir build
```

```
~$ cd build
```

```
~$ cmake ../ -DCMAKE_PREFIX_PATH=/opt/Qt/5.2.0/gcc_64/lib/cmake/
```

```
~$ make
```

Poté je vše sestaveno a software se spouští z vytvořené složky build příkazem `./sdrangelove`



Obr. 3.6 : Software SDRangelove

3.2.7 Srovnání testovaných programů

Při testování dostupných softwarů, bylo zjištěno, že pro přijímání slabších signálů je lepší vypnout automatickou kontrolu zisku AGC, protože když se v přijímaném spektru objeví nějaký silný signál, okolní slabé signály digitální AGC silně potlačí. Proto je vhodné jej měnit manuálně.

V následující tabulce 3.1 jsou shrnuty jednotlivé softwary z hlediska náročnosti jejich instalace a ovládání pro uživatele. Také jsou v tabulce vypsány jednotlivé funkce, které programy poskytují.

Tab. 3.1: Porovnání softwaru

<i>Název programu</i>	<i>Uživatelské rozhraní</i>	<i>Složitost instalace</i>	<i>Funkce</i>	<i>Náročnost ovládání</i>	<i>Požadovaný software před samotnou instalací</i>
GNU Radio	<i>Grafické uživatelské rozhraní</i>	<i>snadná</i>	<i>FFT graf, AM, FM, SSB, dekodéry</i>	<i>náročnější</i>	<i>librtlsdr</i>
GQRX	<i>Grafické uživatelské rozhraní</i>	<i>snadná</i>	<i>FFT graf, vodopádové zobrazení, AM, SSB, FM-N a FM-W</i>	<i>snadná</i>	<i>librtlsdr, GNU Radio, QT 4.7 a novější, QMake</i>
SDR#	<i>Grafické uživatelské rozhraní</i>	<i>náročnější</i>	<i>FFT graf, vodopádové zobrazení, AM, SSB, FM-N a FM-W, síla signálu,</i>	<i>snadná</i>	<i>librtlsdr, MonoDevelop</i>
Linrad	<i>Konzolová aplikace</i>	<i>náročnější</i>	<i>FFT graf, vodopádové zobrazení, AM, SSB, FM</i>	<i>náročnější</i>	<i>librtlsdr</i>
SDRangelove	<i>Grafické uživatelské rozhraní</i>	<i>náročnější</i>	<i>FFT graf, vodopádové zobrazení, FM</i>	<i>snadná</i>	<i>librtlsdr, GNU Radio, Qt 5.0 a novější</i>
Knihovna librtlsdr	<i>Nástroje příkazové řádky</i>	<i>snadná</i>	<i>FM, otestování komunikace, logování síly signálu do souboru</i>	<i>náročnější</i>	<i>-</i>

4 Závěr

Cílem této práce bylo seznámit se s funkcemi softwarově definovaného rádia, které je moderní možností příjmu rádiových vln, a vyhledání dostupných modulů DVB-T využitelných také jako přijímač SDR. Práce byla zaměřena i na samotnou realizaci s vybraným DVB-T modulem, proto je zde uveden a prakticky odzkoušen software umožňující komunikaci s tímto DVB-T.

Jednou z hlavních částí práce bylo vyhledání dostupných modulů použitelných jako přijímač SDR. Pro tento účel bylo zjištěno, že vhodné jsou moduly obsahující jednu konkrétní čipovou sadu RTL2832U a jeden z výše vypsanych šesti tunerů, lišící se od sebe v šířce podporovaného frekvenčního pásma. Vyhledávání konkrétních modulů bylo docela obtížné, jelikož výrobce většinou přímo neuvádí konkrétní potřebné parametry pro využití jako přijímače SDR.

Další hlavní částí práce byla praktická realizace zakoupeného DVB-T modulu s dostupným softwarem. Ten podporuje komunikaci mezi tímto modulem a PC pod operačním systémem Linux s konkrétní vybranou linuxovou distribucí Ubuntu. Bylo vyhledáno a prakticky otestováno několik dostupných softwarů s tímto DVB-T modulem. Pro další využití v praxi byl nalezen nástroj příkazové řádky `rtl_power` z knihovny `librtlsdr`, jež lze využít pro ukládání síly signálu do souboru. Z těchto zaznamenaných dat s časovým údajem následně vyhodnocovat, jak se mění úroveň určitého signálu s ubíhajícím časem. Nejvíce uživatelsky přívětivé jsou softwary `GQRX`, `SDR#`, `SDRangelove`, které mají grafické uživatelské rozhraní a práce je s nimi snadná. Pro náročného uživatele se znalostmi jak v oboru radiokomunikací, tak v oblasti programování, je vhodný software `GNU Radio`, u kterého je možné si vytvořit SDR jednotlivými bloky obsaženými v programu nebo si naprogramovat bloky vlastní, a tím pádem je možné v určité míře demodulovat, rozkódovat jakýkoliv přijímaný signál.

Při porovnání takto realizovaného SDR s profesionálním přijímačem SDR je patrné, že DVB-T modul nedosahuje takových parametrů jako originální řešení SDR. Je to dáno hlavně velkým cenovým rozdílem, kdy DVB-T modul, vhodný pro tento účel, se dá pořídit řádově za stokoruny, oproti tomu cena profesionálního přijímače SDR, složeného ze špičkových součástí, se pohybuje řádově v desítkách tisících korun. Toto řešení lze proto využít pro různé testovací a amatérské účely, kde bude s těmito parametry dostačující.

5 Použitá literatura

- [1] Sehnaľ, Jiří. *Softwarové rádio* [online]. [cit. 2014-03-25] Dostupné z: <http://coptel.coptkm.cz/?action=2&doc=10645&docGroup=147&cmd=0&instance=1>
- [2] *Softwarové definované rádio* [online]. [cit. 2014-03-05]. Dostupné z: http://www.urel.feec.vutbr.cz/MTRK/?Softwarov%E9%2C_kognitivn%ED_a_kooperativn%ED_r%EDio:Softwarov%E9_a_softwarov%EC_definovan%E9_r%EDio
- [3] ŽALUD, Václav. *SDR a CR* [online]. Praha: ČVUT [cit. 2013-12-01]. Dostupné z: <http://radio.feld.cvut.cz/courses/X37ZRD/materialy.php?akce=dlf&zdroj=vpm&fkey=27&xtgt=2f686f6d652f53657276696365732f777772f68746d6c2f6564755f6465706f742f5833375a52445f7075626c6963>
- [4] ŽALUD, Václav. *Moderní radioelektronika*. 1. vyd. Praha: BEN, 2000, 656 s. ISBN 80-86056-47-3.
- [5] *Softwarově Definované Rádio v provozních souvislostech* [online]. [cit. 2013-12-01]. Dostupné z: http://www.crk.cz/FILES/SDR_V_PROVOZNICH_SOUVISLOSTECH.PDF
- [6] DANĚK, Karel. *Moderní rádiový přijímač kniha o jeho návrhu*. 1. vyd. Praha: BEN, 2005, 216 s. ISBN 80-7300-142-X
- [7] DOBEŠ, Josef a Václav ŽALUD. *Moderní radiotechnika*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006, 767 s. ISBN 80-730-0132-2.
- [8] WR-G315e Specifications. [online]. [cit. 2014-04-23]. Dostupné z: <http://www.winradio.com/home/g315e-s.htm>
- [9] SDR. [online]. [cit. 2014-04-23]. Dostupné z: <http://sdr.ipip.cz/rtl-sdr>
- [10] RTL2832U. [online]. [cit. 2014-04-23]. Dostupné z: <http://www.realtek.com.tw/products/productsView.aspx?Langid=1&PFid=35&Level=4&Conn=3&ProdID=257>
- [11] *R820T High Performance Low Power Advanced Digital TV Silicon Tuner Datasheet* [online]. [cit. 2014-03-25] Dostupné z: http://superkuh.com/gnuradio/R820T_datasheet-Non_R-20111130_unlocked.pdf
- [12] OsmocomSDR. [online]. [cit. 2014-04-23]. Dostupné z: <http://sdr.osmocom.org/trac/wiki/rtl-sdr>

Seznam příloh

Příloha A: Modul DVB-T USB TUNER S SDR, DAB+ a FM..... I

Příloha B: Technická specifikace profesionálního přijímače SDR WR-G315e II

Příloha A: *Modul DVB-T USB TUNER S SDR, DAB+ a FM*



Příloha B: *Technická specifikace profesionálního přijímače SDR WR-G315e*

<i>Receiver type</i>	<i>DSP-based SDR with DDS-based dual-conversion superheterodyne front end</i>		
<i>Frequency range</i>	<i>9 kHz - 1800 MHz (3500 or 8599 MHz with optional AMFE unit) (except cellular radiotelephone frequencies where required by law)</i>		
<i>Tuning resolution</i>	<i>1 Hz</i>		
<i>Mode</i>	<i>AM, AMS, LSB, USB, DSB, ISB, CW, FM (wide-FM with optional WFM demodulator)</i>		
<i>Image Rejection</i>	<i>2-100 MHz: 60 dB typ. 100-1000 MHz: 50 dB typ.</i>		
<i>IP3</i>	<i>0 dBm @ 20kHz</i>		
<i>Spurious-free dynamic range</i>	<i>90 dB</i>		
<i>MDS</i>	<i>-135 dBm</i>		
<i>Phase noise</i>	<i>-148 dBc/Hz @ 100 kHz</i>		
<i>Internal spurious</i>	<i>Typically less than equivalent antenna input of -105 dBm</i>		
<i>RSSI accuracy</i>	<i>2 dB typ.</i>		
<i>RSSI sensitivity</i>	<i>-137 dBm</i>		
<i>Bandwidth</i>	<i>50 - 15000 Hz (adjustable in 1 Hz steps) 230 kHz (WFM option only)</i>		
<i>Scanning speed</i>	<i>50 channels/s</i>		
<i>Sensitivity (AM/SSB/CW 10dB S/N) (FM 12dB SINAD)</i>	<i>Mode</i>	<i>0.15-500 MHz</i>	<i>500-1800 MHz</i>
	<i>AM, AMS (30% modulation)</i>	<i>-108dBm (0.89µV)</i>	<i>-104dBm (1.4µV)</i>
	<i>AM, AMS (80% modulation)</i>	<i>-116dBm (0.35µV)</i>	<i>-112dBm (0.56µV)</i>
	<i>LSB, USB, ISB, DSB</i>	<i>-119dBm (0.25µV)</i>	<i>-115dBm (0.40µV)</i>
	<i>CW</i>	<i>-126dBm (0.11µV)</i>	<i>-122dBm (0.18µV)</i>
	<i>FM</i>	<i>-113dBm (0.50µV)</i>	<i>-109dBm (0.80µV)</i>
	<i>WFM (WFM option only)</i>	<i>-104dBm (1.40µV)</i>	<i>-102dBm (1.78µV)</i>
<i>Intermediate frequencies</i>	<i>IF1: 109.65 MHz IF2: 16 kHz</i>		

<i>Roofing filter</i>	<i>2 x 4-pole 20 kHz crystal filter</i>
<i>Tuning accuracy</i>	<i>1 ppm (25°C ±2°C)</i>
<i>Frequency stability</i>	<i>0.5 ppm (0 to 60° C)</i>
<i>Antenna input</i>	<i>50 ohm (SMA connector)</i>
<i>Maximum input level</i>	<i>+18 dBm</i>
<i>Output</i>	<i>Digitized IF and audio signal over USB interface</i>
<i>Interface</i>	<i>USB (1.0 and 2.0 compatible)</i>
<i>Dimensions</i>	<i>Length: 166 mm (6.5") Width: 97 mm (3.8") Height: 41 mm (1.6")</i>
<i>Weight</i>	<i>430 g (15.1 oz)</i>