



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektromagnetického pole

**Měření rádiových parametrů a aplikace softwarově
definovaného přijímače**

**Radio Parameters Measurement and Application
of Software Defined Radio Receiver**

Bakalářská práce

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika

Studijní odbor: Komunikační technika

Vedoucí práce: Ing. Karel Ulovec, Ph.D. (katedra radioelektroniky)

Student: **Tomáš Thúroczy**

Praha 2016

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra elektromagnetického pole

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Tomáš Thúrčzy**

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika
Obor: Komunikační technika

Název tématu: **Měření rádiových parametrů a aplikace softwarově definovaného přijímače**

Pokyny pro vypracování:

Stručně se zabývejte obecnou koncepcí přijímače s principem softwarově definovaného rádia (SDR). Seznamte se s SDR přijímačem založeným na obvodu RTL2832U, uveďte blokové schéma a jednotlivé části popište, udejte jeho dostupné parametry. Nalezněte vhodné softwarové vybavení pro využití přijímače a uveďte postup instalace. Ověřte možnost začlenění přijímače do matematického prostředí MATLAB a případně opět postup instalace uveďte.

Měřením ověřte důležité rádiové parametry, resp. charakteristiky (frekvenční rozsah, selektivitu, citlivost, dynamický rozsah). Zmiňte použité metody a potřebné aplikace pro měření. Změřené hodnoty parametrů, resp. charakteristik porovnejte s jinými přijímači.

Zabývejte se možnými aplikacemi a možnostmi číslicového zpracování digitalizovaného signálu získaného SDR přijímačem. Vyberte si libovolně aplikaci a realizujte ji, podrobněji popište zpracování signálu, ovládání aplikace, případně udejte limity dané použitým SDR zařízením a navrhněte možnosti nápravy.

Seznam odborné literatury:

- [1] Stewart R. W., Barlee K. W., Atkinson D. S. W., Crockett L. H.: Software Defined Radio using MATLAB & Simulink and the RTL-SDR. 1 ed. Strathclyde Academic Media, 2015. ISBN 9780992978716
- [2] Kolumbán G., Krébesz T., Lau F.C.M.: Theory and application of software defined electronics: Design concepts for the next generation of telecommunications and measurement systems. IEEE Circuits and Systems Magazine, vol. 12, 2012. DOI 10.1109/MCAS.2012.2193435
- [3] RTL-SDR.com: RTL-SDR (RTL2832U) and software defined radio news and projects [online]. [cit. 2016-02-03]. Dostupné z: <http://www.rtl-sdr.com/>
- [4] MathWorks Inc.: RTL-SDR Support from Communications System Toolbox [online]. [cit. 2016-02-03]. Dostupné z: www.mathworks.com/hardware-support/rtl-sdr.html

Vedoucí: Ing. Karel Ulovec, Ph.D.

Platnost zadání: LS 2016/2017

prof. Ing. Pavel Pechač, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 4. 2. 2016

Abstrakt

Bakalárska práca sa zaoberá problematikou softvérovo definovaných rádií a jej obsah je rozdelený do troch hlavných častí. V prvej časti je stručne popísaná história softvérových rádií, ich fungovanie a ich rôzne architektúry podľa umiestnenia AD prevodníku. Druhá časť sa venuje konkrétnemu softvérovému prijímaču známemu pod názvom RTL-SDR. Na začiatku je vysvetlená jeho konštrukcia, blokový diagram a možnosť jeho použitia pomocou osobného počítača. Vzhľadom k tomu, že v súčasnej dobe je k dispozícii málo kvalitatívnych meraní tohto prijímača, hlavnou témou tejto časti je meranie jeho základných rádiových parametrov (frekvenčné charakteristiky, dynamický rozsah, citlivosť, selektivita ...). Merania prebehli jednak softvérovo (odčítavaním hodnôt z PC) ale aj použitím osciloskopu pripojeného na kľúčové výstupy prijímača. Posledná, tretia časť sa zaoberá implementáciou prijímača do vývojového prostredia Matlab a popis naprogramovanej aplikácie – zobrazenie frekvenčného spektra v reálnom čase. Vysvetlené je matematické pozadie algoritmu DFT resp. FFT, práca s IQ dátami a štruktúra konečného programu v Matlabe.

Abstract

This bachelor thesis deals with the problematics of the software defined radios (SDR) and its content is divided into three main parts. The first part describes the history of SDRs, their operation and distinguishes main architectures based on the placement of the ADC. The second part is devoted to the particular receiver – the RTL-SDR. First, its construction, block diagram and utilisation with PC is explained. However, the leading topic of this part is a measurement of its basic radio parameters such as frequency characteristics, dynamic range, sensitivity, selectivity etc. These measurements were conducted in both software and hardware way. Software way includes usage of the SDR# software. In a hardware way we used an oscilloscope connected to the key outputs of the receiver. The last, third part demonstrates the integration of the RTL-SDR receiver into the Matlab computing environment and describes the programmed application – displaying the real time frequency spectrum. The mathematical background of the DFT/FFT algorithm, notion of IQ signals and the structure of the Matlab programme is explained.

Prohlášení: „Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.“

V Praze dne 23.5.2016

.....

Pod'akovanie: Rád by som poďakoval môjmu školiteľovi práce Ing. Karlovi Ulovcovi, Ph.D. z katedry rádioelektroniky FEL ČVUT za cenné rady a pripomienky.

Obsah

Abstrakt	5
Obsah.....	11
Zoznam použitých skratiek.....	13
1 Úvod	15
2 Softvérovo definované rádio.....	17
2.1 Úvod do problematiky.....	17
2.2 Architektúry SDR	18
3 RTL-SDR	21
3.1 Popis zariadenia.....	21
3.2 Konštrukcia a blokový diagram	21
3.3 Softvér SDR#.....	24
3.3.1 Popis a inštalácia	24
3.3.2 Funkcie.....	25
3.3.3 Alternatívy k SDR#	26
3.4 Alternatívy k RTL-SDR	26
4 Meranie rádiových parametrov.....	27
4.1 Zapojenie pracoviska a metodika merania.....	27
4.2 Frekvenčná deviácia	28
4.3 Frekvenčná závislosť vertikálnej osi SDR#.....	28
4.4 Linearita vertikálnej osi	29
4.5 Dynamický rozsah.....	30
4.6 Selektivita	31
4.7 Citlivosť.....	32
4.8 AGC.....	34
4.9 Nežiadúce signály	34
5 RTL-SDR a MATLAB.....	37
5.1 Začlenenie prijímača do prostredia Matlab	37
5.2 Prístup k prijímaču a konfigurácia parametrov	37
6 Aplikácia – zobrazenie frekvenčného spektra.....	39
6.1 Úvod do spracovania IQ dát	39
6.2 Diskrétna Fourierova Transformácia (DFT)	42
6.3 Okienkové funkcie	44
6.4 Realizácia v Matlabe.....	45

6.4.1	Štruktúra programu a vývojový diagram.....	45
6.4.2	Grafické užívateľské prostredie.....	46
6.4.3	Inicializácia prijímača.....	49
6.4.4	Výpočet FFT.....	49
7	Záver a zhodnotenie.....	51
	Bibliografia.....	53
	Zoznam obrázkov.....	55
	Zoznam tabuliek.....	56
	Prílohy.....	57

Zoznam použitých skratiek

ACARS – Aircraft Communications Addressing and Reporting System, dátový systém slúžiaci na prenos krátkych správ medzi lietadlami a pozemnými stanicami

AD – Analog to digital, analógovo digitálny

ADSB – Automatic Dependent Surveillance, dohľadový letecký systém vysielajúci aktuálnu polohu lietadla

AGC – Automatic Gain Control, obvod na automatické nastavovanie zisku

AM – Amplitúdová modulácia

ATT – Atenuátor (útlmový člen)

DA – Digital to analog, digitálne analógový

DAB – Digital Audio Broadcasting, digitálne vysielanie rozhlasových staníc

DARPA – The Defense Advanced Research Projects Agency

DC – Direct current, jednosmerný prúd

DDC – Digital down converter, digitálny frekvenčný konvertor

DFT – Discrete Fourier Transform, diskrétna Fourierova transformácia

DR – Dynamický rozsah

DSP – Digital Signal Processing, digitálne spracovanie signálu

DVB-T – Digital Video Broadcasting - Terrestrial, pozemné vysielanie digitálnej televízie

ENoB – Effective number of bits, efektívny počet bitov

FFT – Fast Fourier Transform, rýchla Fourierova transformácia

FM – Frekvenčná modulácia

GPS – Global Positioning System, družicový polohovací systém

GSM - Global System for Mobile Communications, komunikačný štandard pre mobilné telefóny

GUI – Graphical user interface, grafické užívateľské prostredie

I²C – Inter-Integrated Circuit, dvojvodičová sériová zbernica

IF – Intermediate frequency, medzifrekvencia

ISS – International Space Station, medzinárodná vesmírna stanica

LSB – Lower Side Band, nižšie postranné pásmo AM vysielania

MDS – Minimum detectable signal, minimálny detekovateľný signál

MSPS – Mega Samples Per Second, megavzoriek za sekundu

NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration, agentúra USA zameraná na oceány a atmosféru

OSC - Oscilátor

PPM – Parts per million, milióntina nejakého množstva/počtu

PSD – Power Spectral Density, spektrálna výkonová hustota

QAM – Quadrature Amplitude Modulation, kvadrátúrna amplitúdová modulácia

RBW – Resolution Bandwidth, rozlišovacia šírka pásma

RDS – Radio Data System, dátový systém prenášajúci doplnkové informácie v FM rozhlasovom vysielaní

RF – Radio frequency, vysokofrekvenčný

RMS – Root Mean Square, efektívna hodnota

RTL-SDR – Realtek Software Defined Radio

S/N – Signal to Noise, pomer signál/šum

SCL – Serial Clock Line, vodič taktovacieho signálu zbernice I²C

SDA – Serial Data Line, vodič dátového signálu zbernice I²C

SDR – Software Defined Radio, softvérovo definované rádio

USB - Upper Side Band, vyššie postranné pásmo AM vysielania

USB – Universal Serial Bus, univerzálna počítačová sériová zbernica

VCO – Voltage Controlled Oscillator, napätím riadený oscilátor

VON – Inverting Signal Output, invertujúci signálový výstup diferenciálneho vedenia

VOP – Noninverting Signal Output, neinvertujúci signálový výstup diferenciálneho vedenia

1 Úvod

Nosnou témou bakalárskej práce je problematika softvérovo definovaných rádii (SDR). V úvodnej časti práce je popísaný ich historický vývin a dôvod vzniku potreby takéhoto zariadenia. Priblížený je aj súvis medzi softvérovými a kognitívnymi rádiami. Na základe umiestnenia AD prevodníku je definovaných niekoľko základných architekúr SDR, ktorých stručný popis je takisto vysvetlený.

Najväčšia časť práce je venovaná konkrétnemu softvérovému rádioprijímaču, známemu pod skratkou RTL-SDR. Na základe dostupných informácií je objasnená jeho konštrukcia a princíp fungovania jednotlivých komponentov. Prijímač je obsluhovaný pomocou špeciálneho PC softvéru, ktorého funkcie a fungovanie sú vysvetlené. Vzhľadom k tomu, že v súčasnej dobe je k dispozícii málo kvalitatívnych meraní tohto prijímača, hlavnou témou tejto časti je meranie jeho základných rádiových parametrov. Sústredili sme sa najmä na frekvenčné charakteristiky (frekvenčný rozsah prijímača, frekvenčné závislosti rôznych parametrov a frekvenčná deviácia oscilátora), dynamický rozsah, citlivosť, selektivitu, (ne)linearitu, funkciu obvodov AGC a analýzu nežiadúcich signálov prenikajúcich do spektra momentálne navzorkovaného signálu.

Posledná časť práce sa venuje začleneniu prijímača do vývojového prostredia Matlab a popisu naprogramovanej aplikácie –zobrazenie frekvenčného spektra v reálnom čase. Možnosť implementovať prijímač do Matlabu je azda jeho najväčšou výhodou, keďže predstavuje lacný nástroj na výučbu digitálneho spracovania signálu. Vzhľadom k tomu, že výstupom prijímača do PC je komplexný resp. IQ signál, pred samotným popisom aplikácie je tento koncept (a jeho výhody) vysvetlený. Takisto je vysvetlená diskretná Fourierova transformácia – matematický aparát slúžiaci na zobrazenie spektra časovej postupnosti vzoriek signálu. Pri spektrálnej analýze signálov nesmieme vynechať popis okienkových funkcií slúžiacich na zvierohodnenie zobrazovaného amplitúdového spektra. Nakoniec sa práca venuje popisu samotnej aplikácie. Štruktúra aplikácie je znázornená pomocou vývojového diagramu. Jednotlivé časti aplikácie (grafické užívateľské prostredie, algoritmus FFT a prístup k prijímaču) sú detailne popísané v jednotlivých podkapitolách.

Koniec práce sa venuje zhrnutiu a zhodnoteniu problematiky. Sú spomenuté niektoré zaujímavé zistenia z kapitoly o meraní a nedokonalosti prijímača. Zhodnotenie Matlab aplikácie sa zameriava na limity programu, ktoré sú dané jednak použitým hardvérom ale aj softvérovým riešením aplikácie.

2 Softvérovo definované rádio

2.1 Úvod do problematiky

Softvérovo definované rádio (SDR, Software Defined Radio) je koncept, ktorý sa na rozdiel od klasických analógových rádii vyznačuje univerzálnosťou a širokým frekvenčným rozsahom. Bežné analógové rádiové prijímače/vysielače bývajú konštruované na jeden účel s malou alebo žiadnou mierou modifikovateľnosti. Hlavnou črtou softvérových rádii je možnosť zmeny ich účelu zmenou softvéru spracúvajúceho signál.

Je nutné poznamenať, že ako v temer každom odvetví techniky, aj v prípade softvérových rádii bol výskum a vývoj iniciovaný vojenskými potrebami. V roku 1991 vznikla požiadavka armády USA na univerzálne rádiové zariadenie schopné obsluhovať desať rôznych armádnych rádiových protokolov a pracovať v rozsahu frekvencií 2 MHz až 2 GHz. Vznikol projekt s názvom „SPEAKeasy“, pod ktorý sa podpísala Agentúra ministerstva obrany USA pre pokročilé výskumné projekty (DARPA, Defense Advanced Research Projects Agency). V roku 1994 bolo zariadenie úspešne dokončené. Vzhľadom k náročnosti na výpočtový výkon a k výkonu digitálnych signálových procesorov v tých časoch, SPEAKeasy obsahovalo niekoľko stoviek procesorov a zabralo veľkosť nákladného automobilu.

Prvý človek, ktorý sformuloval ucelenú koncepciu SDR bol Joe Mitola. Vo svojom článku [1] z konferencie IEEE z roku 1992 popísal koncept ideálneho SDR, problematiku AD/DA prevodníkov, digitálnych signálových procesorov a ich výpočtových výkonov a príklady systémov založených na SDR.

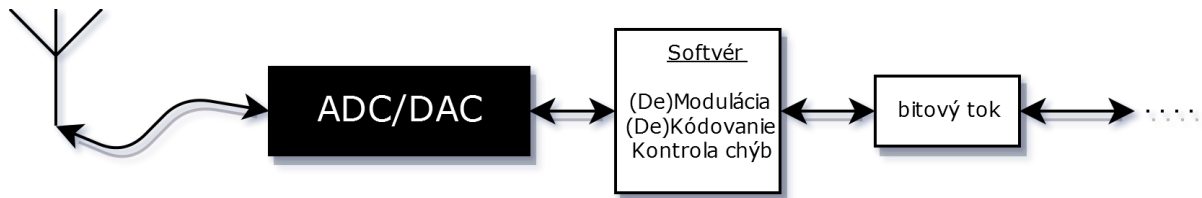
Porovnaním bežných analógových rádii so softvérovými dôjdeme k niekoľkým záverom. Jednoznačnou výhodou SDR je už spomínaná rekonfigurovateľnosť. Predstavme si situáciu, že máme nejakú službu (sieť), ku ktorej máme nakúpený príslušný hardvér a vybudovanú infraštruktúru. Ak postupom času dôjde k modernizácii komunikačného protokolu, modulácie alebo kódovania danej služby, jednoducho preprogramujeme softvér, ktorý danú službu v našich koncových staniách obsluhuje. Bez potreby modernizácie infraštruktúry, ktorá často predstavuje najväčšiu finančnú položku. Digitálne spracovanie signálu so sebou prináša požiadavku na určité množstvo výpočtového výkonu, ktorý je v priamej úmere s konečnou spotrebou zariadenia. Spotreba energie môže byť najmä v prenosných aplikáciách kľúčovou záležitosťou.

Rekonfigurovateľnosť je dôležitá aj v prípade konceptu tzv. kognitívnych rádii. Táto technológia detekuje aktuálnu obsadenosť rádiového spektra a dynamicky pristupuje k jeho využitiu. Výsledkom je efektívnejšie využitie rádiového spektra.

Existujú však stále služby, ktoré fungujú na rovnakom princípe už desaťročia a nahradenie ich analógových rádiových zariadení softvérovými by bolo zbytočnou investíciou. Príkladom by mohlo byť pásmo „airband“, čiže pásmo slúžiace na komunikáciu v leteckej prevádzke. Tá už dlhodobo funguje na jednoduchej amplitúdovej modulácii, ktorú hľavo zvládajú overené analógové konštrukcie.

2.2 Architektúry SDR

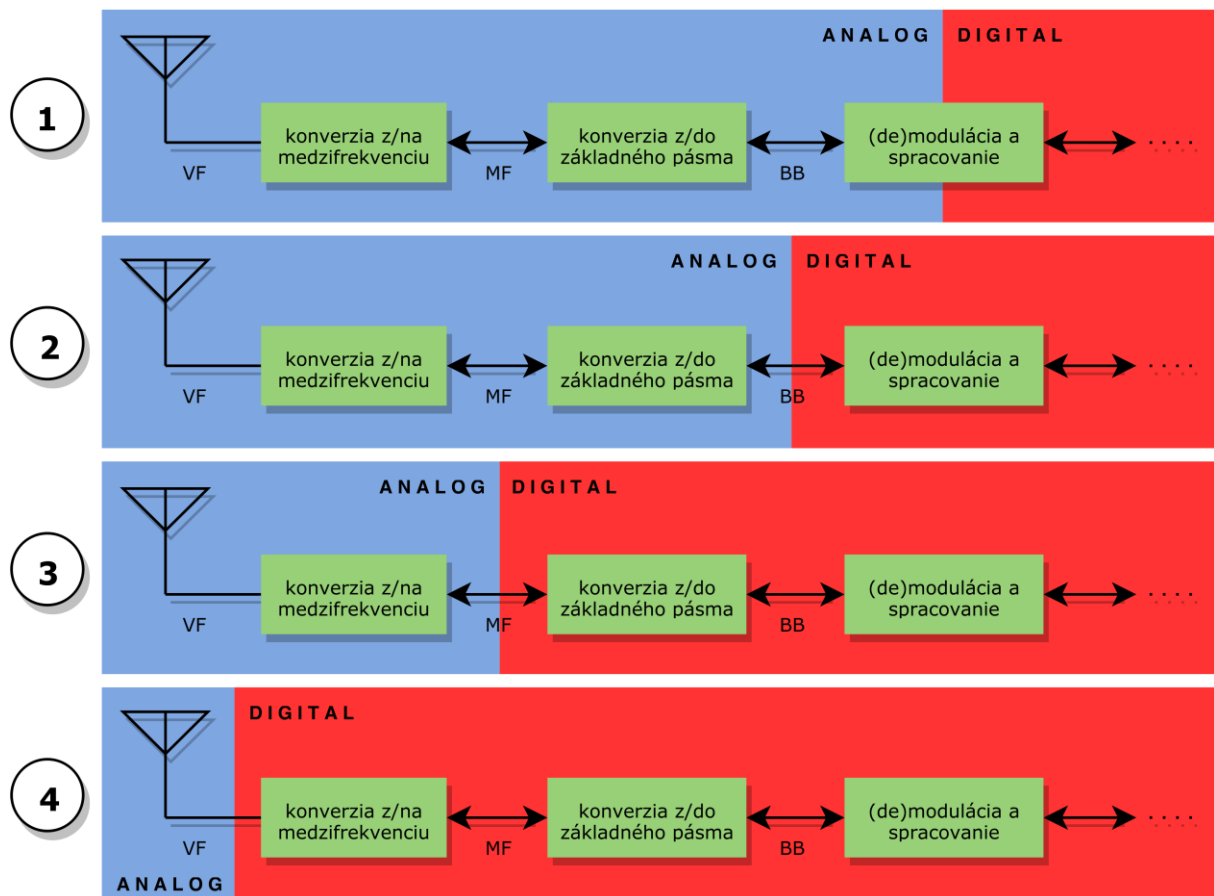
Základným komponentom, ktorý predstavuje prechod medzi analógovým a digitálnym svetom je AD prevodník. Najjednoduchším riešením by bolo umiestniť tento prevodník hneď za anténu (Obr. 1) čím by sme zachytili veľmi širokú oblasť elektromagnetického spektra. Potrebovali by sme však špeciálny AD prevodník s extrémne vysokou vzorkovacíou frekvenciou. S tým je spojený problém so spracovaním enormného objemu dát, ktorý by takýto prevodník generoval.



Obr. 1, Koncept ideálneho SDR

Kvôli týmto technickým komplikáciám je výhodnejšie pracovať so signálmi nižších frekvencií s menšou šírkou pásma, ktoré sú jednoduchšie spracovateľné bežnými AD prevodníkmi. Za anténou reálneho SDR prijímača preto musia byť dodatočné obvody plniace funkciu zosilnenia, preselektie a posunu signálu na nižšiu frekvenciu. Táto vstupná analógová časť softvérového prijímača je podobná klasickým prijímačom typu superheterodyn. Následne môže byť signál zdigitalizovaný.

Rozdeľme si náš žiadaný signál podľa jeho umiestnenia na frekvenčnej ose. Na anténu nám dopadá vysokofrekvenčný signál, umiestnený okolo nosnej frekvencie f_c . Následným zmiešaním signálu v zmiešavači posunieme signál na tzv. medzifrekvenciu f_{mf} . Ďalším posunom signálu smerom k nulovej frekvencii (zbavením sa nosného kmitočtu) dospejeme k signálu v základnom pásme f_{bb} (angl. baseband signal). To nám poskytuje 4 možné umiestnenia AD prevodníku [2] (Obr. 2):



Obr. 2, Rôzne architektúry SDR podľa umiestnenia AD prevodníku

1. V tomto prípade sa môže jednáť o prenos digitálneho informačného signálu, ktorému predchádza čisto analógová demodulácia a spracovanie bez použitia techník digitálneho spracovania signálu (DSP, Digital Signal Processing).
2. Vysokofrekvenčný a medzifrekvenčný signál sú spracovávané analógovo. Signál v základnom pásme (informačný signál) je už navzorkovaný, digitálny a spracovaný použitím techník DSP. Do tejto kategórie môžeme zaradiť aj prijímač RTL-SDR (Obr. 5).
3. Digitálna medzifrekvencia je často používaná voľba pri konštrukcii softvérových rádii. Výhodou je ušetrenie analógových komponentov ako filter a zmiešavač pri konverzii do základného pásma. Táto konverzia prebieha digitálne pomocou techniky DDC (Digital Down-Converter). DDC je takisto časťou, v ktorej prebieha prevod signálu z reálneho na komplexný. Viac o práci s komplexnými signálmi v kapitole 6.1.
4. Koncept ideálneho SDR. V súčasnej dobe už sú k dispozícii tzv. „RF-Sampling ADCs“, ktoré vzorkujú priamo vysokofrekvenčný signál bez konverzie na medzifrekvenciu. Napríklad 12 bitový prevodník ADC12D1800RF od firmy Texas Instruments [3] podporuje vzorkovaciu frekvenciu až 3.6 GSPS (gigavzorkov za sekundu). V prípade použitia takéhoto prevodníku je nutné zohľadniť potrebu výpočtového výkonu, ktorý by spracovával takéto množstvo dát, ideálne v reálnom čase.

3 RTL-SDR

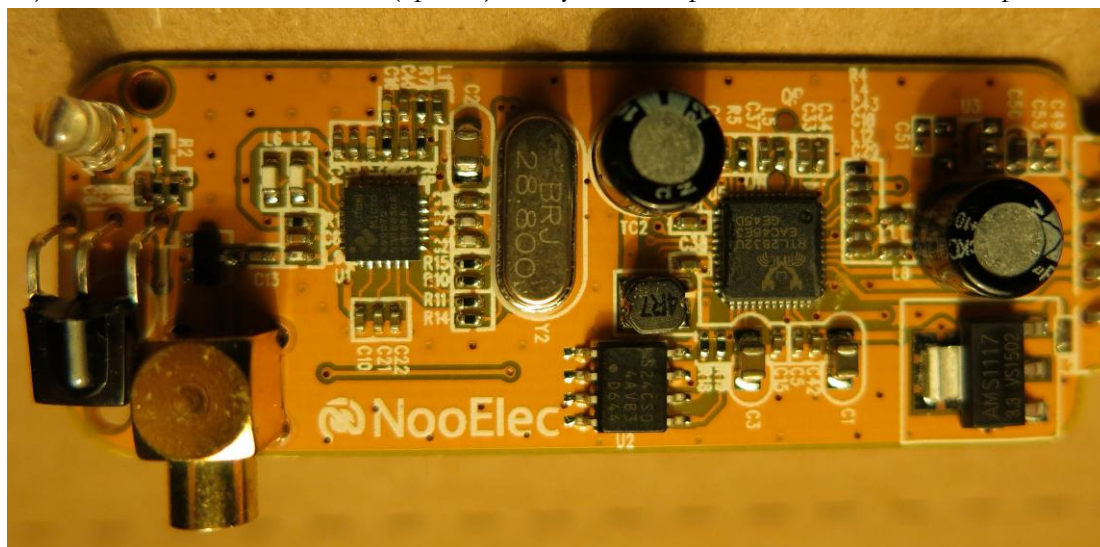
3.1 Popis zariadenia

RTL-SDR je názov softvérového rádioprijímača založeného na čipe Realtek RTL2832U. Pôvodným účelom zariadenia je príjem digitálnej pozemnej televízie (DVB-T). Za normálneho použitia vykonáva čip RTL2832U demoduláciu a dekódovanie signálu DVB-T. Následne sú video a zvuk poslané vo formáte transportného multiplexu cez USB zbernicu do počítača. V roku 2012 sa však fínskemu študentovi Anttimu Palosaariovi podarilo objaviť tzv. debug mód čipu RTL2832U, v ktorom je schopný poslať tzv. „raw“ (surové) navzorkované I&Q dáta v základnom pásme [4]. Okrem toho je samozrejme možné tento prijímač preladovať, nastavovať zisk, ovládať obvody AGC a iné. Preladiteľnosť záleží od použitého tuneru. Reálne však býva od 50 MHz až do cca 2 GHz. Najrozšírenejším tunerom je v súčasnosti Rafael Micro R820T [5]. Dnes je už k dispozícii množstvo programov, vytvorených najmä nadšencami, schopných spracovávať najrôznejšie druhy signálov použitím prijímača RTL-SDR a bežného PC. Prijímač takisto patrí medzi oficiálne podporovaný prídavný hardvér do vývojového prostredia MATLAB.

Možné aplikácie: poslech FM vysielania (vrátane dekódovania RDS), leteckého vysielania, dekódovanie leteckej služby ADSB alebo ACARS, príjem meteorologických snímok z NOAA satelitov, dekódovanie (ne)šifrovanej GSM prevádzky [6], príjem signálu GPS, príjem vysielania ISS, poslech digitálneho rozhlasu DAB a mnoho ďalších.

3.2 Konštrukcia a blokový diagram

Základom celého zariadenia (Obr. 3) sú dva, už vyššie spomenuté čipy. Tuner R820T2 (vľavo) a demodulátor RTL2832U (vpravo), ktorý zároveň plní funkciu riadiaceho čipu.



Obr. 3, Prijímač RTL-SDR

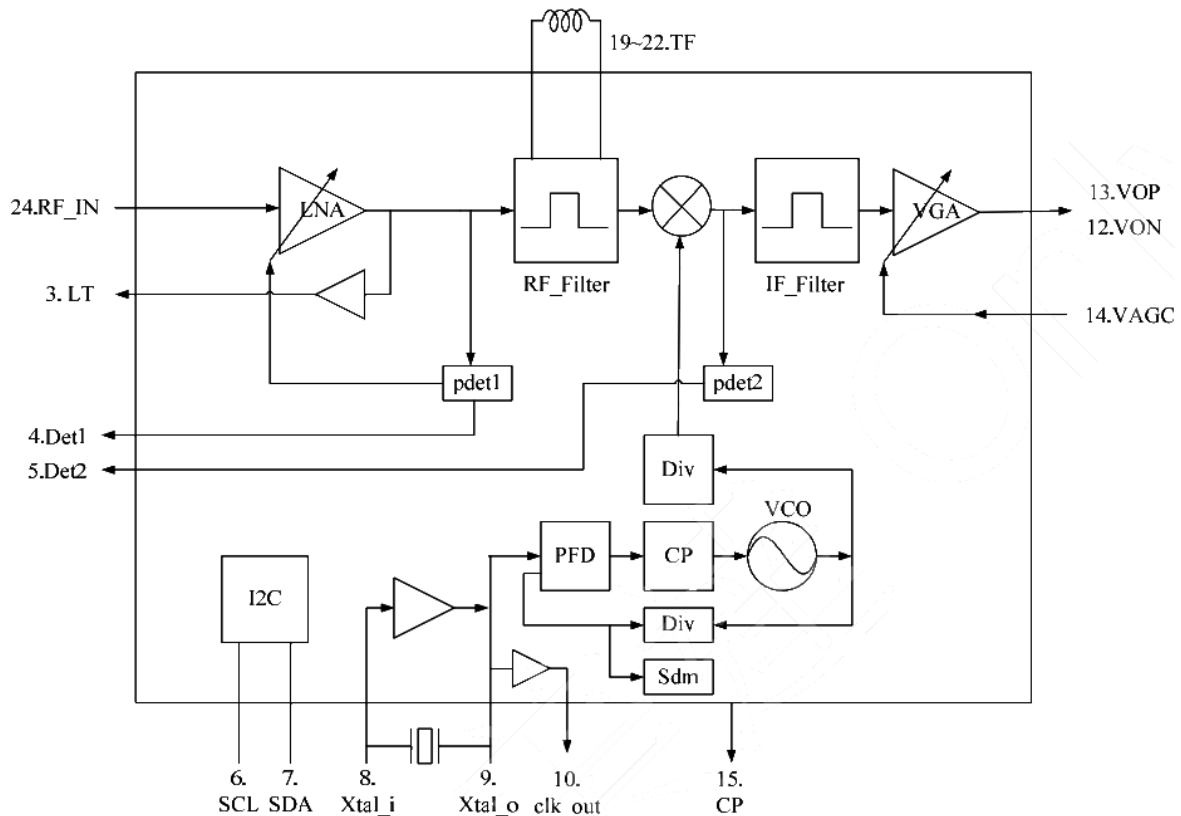
Vysokofrekvenčný signál z antény je privedený na čip R820T2 [5], ktorého blokový diagram vidíme na Obr. 4. Na vstupe (RF_IN) sa nachádza nízkošumový zosilňovač, ktorého zisk môžeme manuálne ovládať v príslušnom softvéri a filter na potlačenie zrkadlových kmitočtov. Nasleduje zmiešavač, ktorého výstupom je medzifrekvenčný signál. Referenčný signál je privedený z napätím riadeného oscilátora (VCO, Voltage Controlled Oscillator) zapojeného do spätnoväzobného

obvodu fázového závesu kvôli stabilizácii kmitočtu VCO. Keďže sa jedná o multiplikatívny zmiešavač, jeho výstupom je súčtová a rozdielová frekvenčná zložka.

Príklad: Chceme prijímať vysielanie na frekvencii 900 MHz. Medzifrekvenčný kmitočet je 3,57 MHz. To znamená, že VCO musíme naladiť na frekvenciu 896,43 MHz. Výstupom zmiešavača sú dva produkty, ktorých frekvencie sú dané rovnicou (2.1).

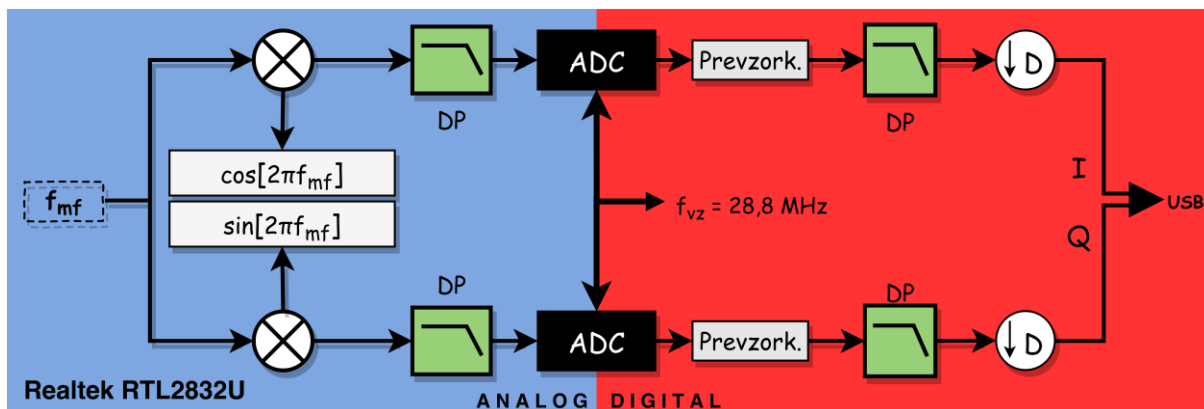
$$[\cos 2\pi(900e6) t]. [\cos 2\pi(896,43e6) t] = \frac{1}{2} [[\cos 2\pi(3,57e6)t + \cos 2\pi(1796,43e6)t]] \quad (2.1)$$

Zložka s vyššou frekvenciou je odstránená medzifrekvenčným filtrom (IF_Filter). Podľa katalógového listu [5] podporuje obvod niekoľko rôznych medzifrekvencií. Ak zariadenie pracuje v režime softvérového rádia, je zvolená hodnota medzifrekvencie 3,57 MHz a šírka pásma medzifrekvenčného signálu 6 MHz. Túto skutočnosť sme overili aj meraním (viac v podkapitole 4.6). Výstupom tunera je diferenciálny medzifrekvenčný signál vedený dvoma samostatnými cestami (VOP,VON). Jednotlivé konfigurácie čipu sú nastavované cez I²C zbernicu (SCL,SDA) riadiacim čipom RTL2832U.



Obr. 4, Blokové schéma čipu R820T [5]

Vzhľadom k tomu, že k čipu RTL2832U nie je k dispozícii oficiálny katalógový list od výrobcu, mnoho parametrov bolo len empiricky zistených alebo nameraných. Blokový diagram čipu je na Obr. 5 [7].



Obr. 5, Blokové schéma čipu RTL2832U [7]

Medzifrekvenčný signál na frekvencii 3,57 MHz a šírke cca 6 MHz je vedený do kvadrátneho zmiešavača, ktorého základom je dvojica oscilátorov na frekvencii 3,57 MHz vzájomne fázovo posunutých o $\frac{\pi}{2}$ rad. Výstupom je dvojica ortogonálnych signálov v základnom pásme, ktoré sú navzorkované frekvenciou 28,8 MSPS (Megsamples Per Second/Megavzoriek za sekundu). Výstupom je digitálny komplexný signál tvorený zložkami I (In-phase) a Q (Quadrature phase). Ako si ukážeme v kapitole 6.1, práca s komplexnými signálmi nám uľahčuje demoduláciu signálov, keďže každý typ modulácie je možné popísať dvojicou ortogonálnych signálov I a Q.

Oba signály ďalej prechádzajú procesom prevzorkovania (resampling), ktorý je kombináciou procesu interpolácie a decimácie. Interpolácia je proces, výsledkom ktorého je zvýšenie počtu vzorkov signálu P-krát. Decimácia je proces zníženia počtu vzorkov M-krát. V prípade, že chceme zmeniť vzorkovaciu frekvenciu o neceločíselný násobok, skombinujeme dva vyššie uvedené procesy. Výsledkom je signál s novou vzorkovaciu frekvenciou (2.2).

$$f_{vz2} = f_{vz1} \frac{P}{M} \text{ [Hz]} \quad (2.2)$$

Všetky softvéry, ktoré sú schopné pracovať so signálom z RTL-SDR majú možnosť nastavenia vzorkovacej frekvencie. Tá sa samozrejme odzrkadlí na počte vzoriek poslaných za sekundu a na výslednom dátovom toku. Z toho dôvodu je signál pred poslaním do PC ešte raz decimovaný. Po zvolení vzorkovacej frekvencie sa vnútorný register v RTL2832U nastaví tak, aby sa použil decimáčny faktor odpovedajúci danej vzorkovacej frekvencii.

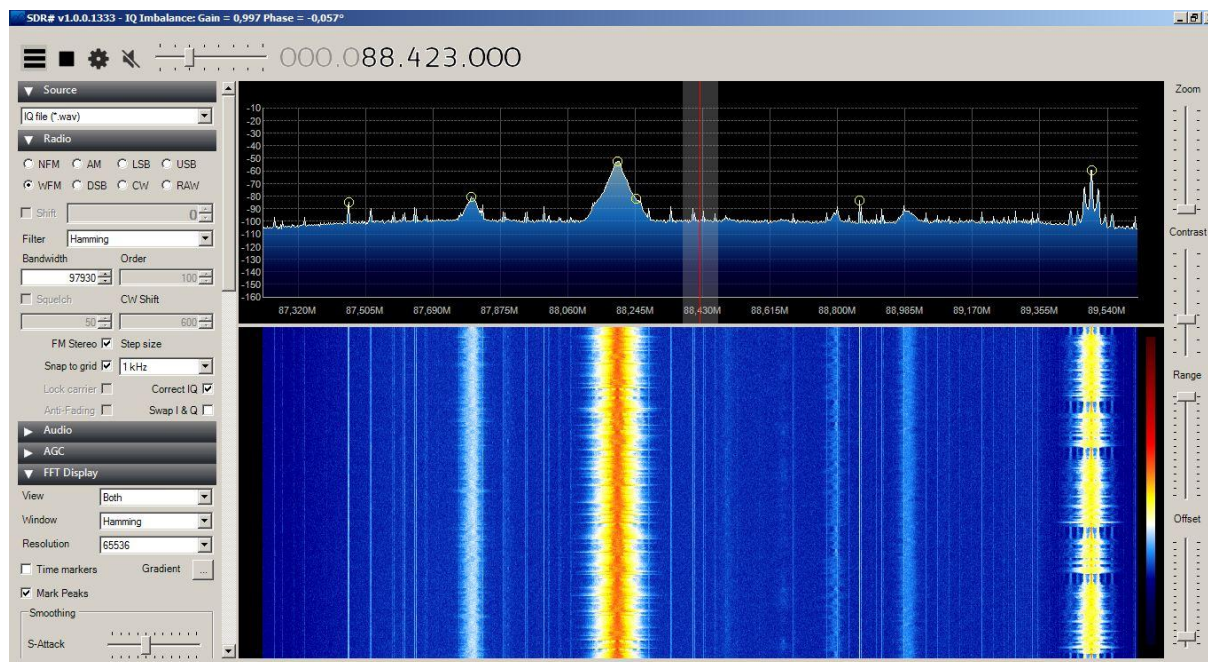
Následne sú vzorky signálov I a Q poslané po USB zbernici do PC. Jedna vzorka signálu je tvorená dvojicou 8 bitových čísel typu `int`. To znamená 16 bitov, čo sú 2 bajty. Výsledná prenosová rýchlosť s (2.3) po USB zbernici v megabajtoch za sekundu (MB/s) je teda rovná dvojnásobku vzorkovacej frekvencie v megavzorkách za sekundu (MSPS).

$$s = 2 * f_s \left[\frac{\text{byte}}{s} \right] \quad (2.3)$$

3.3 Softvér SDR#

3.3.1 Popis a inštalácia


SDR# je jeden z mnohých dostupných softvérov slúžiacich na obsluhu prijímača RTL-SDR pre operačný systém Windows. Jeho hlavnými devízami sú jednoduché a prehľadné ovládanie, množstvo doplnkových funkcií (merač výkonu, ukladanie surových dát, nahrávanie zvuku ...) a možnosť inštalácie doplnkových pluginov vytvorených užívateľmi. Okrem prijímača RTL-SDR podporuje aj viacero iných. Takisto je možné si uložiť navzorkované IQ dáta a neskôr s nimi opäť pracovať už bez prítomnosti prijímača. Podrobnejší popis funkcií sa nachádza v kapitole 3.3.2. Hlavné dialógové okno je na Obr. 6:

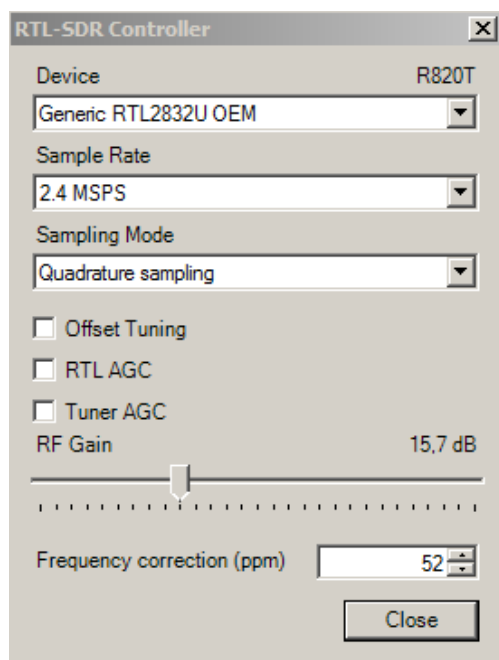


Obr. 6, Hlavné dialógové okno programu SDR#

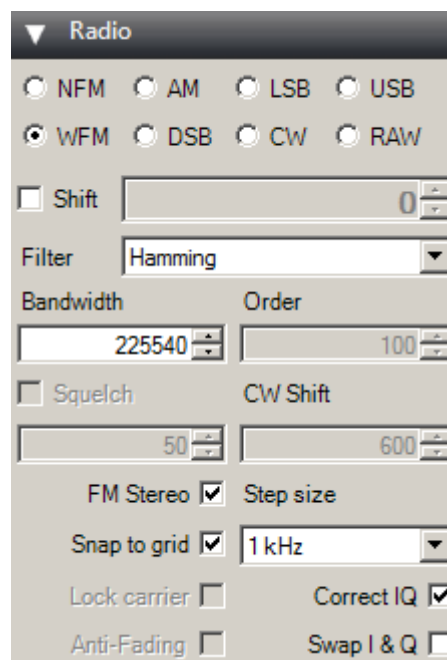
Na beh programu je najprv nutná inštalácia frameworku Microsoft .NET 4.6. Ďalej je potrebné stiahnuť archív s programom [8] a rozbaľiť ho. V archíve sa nachádza súbor „install-rtlsdr.bat“, ktorého spustením sa nainštalujú ovládače k RTL SDR. Po dokončení inštalácie už len stačí spustiť súbor „SDRSharp.exe“.

3.3.2 Funkcie

Po spustení programu je potrebné vybrať použitý SDR prijímač v ľavom paneli v prvej karte s názvom „Source“. Po výbere RTL-SDR prejdeme do nastavení rádia (Obr. 7) stlačením tlačítka .




Obr. 7, Nastavenia rádia

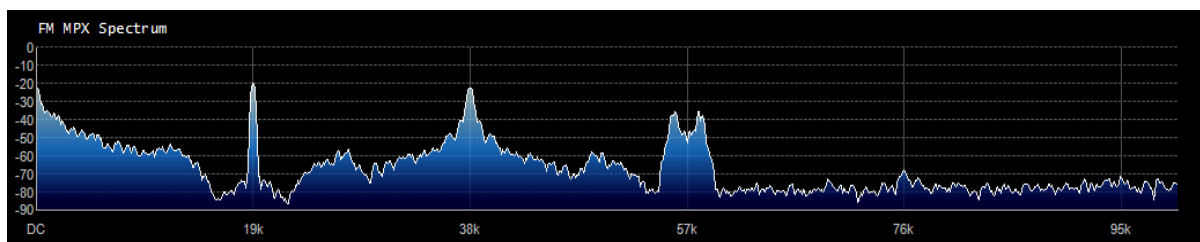


Obr. 8, Demodulačné algoritmy

Nastavením „Sample Rate“ určíme vzorkovaciu frekvenciu. Tá sa odzrkadlí na šírke okamžitého viditeľného spektra. Vyššie hodnoty sa odzrkadlia na širšom viditeľnom spektre a na vyššom požadovanom výpočtovom výkone z dôvodu nárastu dátového toku podľa rovnice (3). Funkcie obvodov RTL AGC a Tuner AGC (Automatic Gain Control), manuálneho nastavenia zisku a korekcie frekvencie sú popísané v kapitolách 4.8, 4.4 a 4.2.

Príjem spustíme stlačením tlačidla . Prijímač preladujeme na číselnom paneli v hornej časti okna. V zobrazenom spektre (Obr. 6) je viditeľná červená čiara, ktorej poloha v spektre korešponduje s momentálne naladenou frekvenciou. V okolí tejto čiary je sivý obdĺžnik znázorňujúci pásmový filter. Jeho šírka je rovná šírke priepustného pásma tohto filtru a mala by sa rovnať šírke pásma vysielaného signálu. Následne je vykonaná demodulácia signálu. Program obsahuje niekoľko základných analógových demodulačných algoritmov (Obr. 8) ako FM (frekvenčne modulované signály), AM (amplítúdovo modulované signály), LSB/USB (vysielanie s jedným postranným pásmom) ...

Program zobrazuje aj tzv. waterfall, kontinuálne sa posúvajúce spektrum, ktoré indikuje zmenu spektra v čase. V prípade posluchu FM rádiového vysielania sme schopní sledovať aj spektrum základného pásma FM signálu po demodulácii (Obr. 9) zaškrtnutím možnosti „Enable MPX“ v paneli „Zoom FFT“. Viditeľný je mono audio signál siahajúci od 0 Hz do približne 15 kHz, pilotná nosná na 19 kHz, dva stereo kanály od 23 kHz do 53 kHz a na konci vysielanie správ RDS na 57 kHz.



Obr. 9, Spektrum základného pásma FM vysielania

Ďalšími zaujímavými funkciami sú napríklad: export audia, export surových vzoriek signálu, zmena parametrov FFT displeja, digitálne potlačenie šumu, skener prednastavených pásiem ... Väčšina týchto funkcií je intuitívne nastaviteľných.

Doinštalovaním rôznych doplnkov (pluginov) [9] do SDR# je možné prijímať nielen analógovo ale aj digitálne modulované signály.

3.3.3 Alternatívy k SDR#

Ďalšími softvérmi na obsluhu prijímača RTL-SDR [10] sú: HDSDR, SDR-RADIO.COM, Linrad, CubicSDR alebo Studio1. Pre používateľov operačných systémov OS X a Linux je najviac podobný SDR# softvér GQRX. Dokonca sú už k dispozícii aj aplikácie ako SDR Touch, Wavesink Plus alebo RFAalyzer pre operačný systém Android.

3.4 Alternatívy k RTL-SDR

Ponuka softvérovo definovaných rádii je na trhu pomerne široká. RTL-SDR patrí k najjednoduchšej a najlacnejšej možnosti ako sa dostať k technológii SDR. Drahšie SDR prijímače sa vyznačujú najmä kvalitnejšími AD prevodníkmi (vyššia vzorkovacia frekvencia, väčší počet kvantovacích hladín), stabilnejšími oscilátormi, lepšou preselekciou signálov na vstupe (napr. banka filtrov). Tabuľka 1 ukazuje niekoľko možných alternatív k RTL-SDR.

SDR	Rozsah [MHz]	Šírka pásma [MHz]	Rozlíšenie ADC [bit]	RX/TX	Cena [USD]
RTL-SDR	50 - 1500	2,4	8	áno/nie	20
SDRPlay	430 - 2000	8	12	áno/nie	149
Airspy	24 - 1800	10	12	áno/nie	199
Funcube	410 - 2050	0,192	16	áno/nie	200
HackRF	30 - 6000	20	8	áno/áno	299
BladeRF	300 - 3800	40	12	áno/áno	650
USRP X310	DC - 6000	120	16	áno/áno	5600

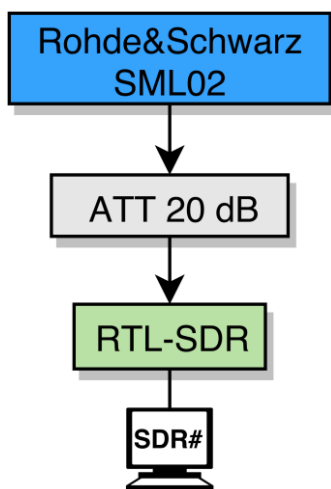
Tab. 1, Porovnanie rôznych typov SDR

4 Meranie rádiových parametrov

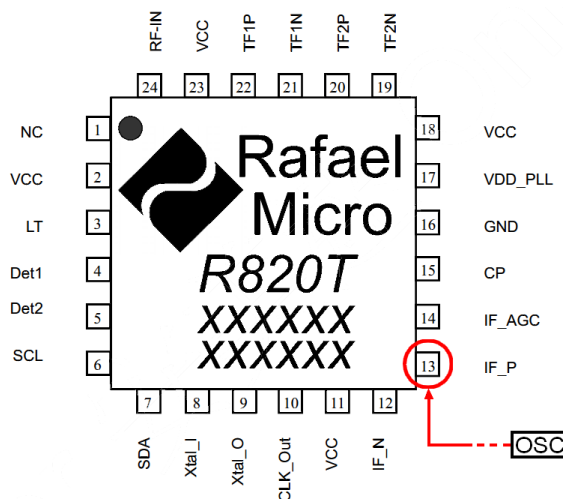
Vzhľadom k tomu, že prijímač RTL-SDR bol vyvinutý ako jednoúčelové zariadenie (príjem DVB-T) spadajúce do spotrebnej elektroniky, výrobca neudáva temer žiadne technické parametre. Ak však chceme využiť zariadenie ako univerzálny softvérový rádioprijímač, je žiadúce zistiť jeho základné rádiové parametre. Je dôležité zistiť obmedzenia a nedostatky zariadenia, ktoré potom môžeme v konkrétnej aplikácii aspoň čiastočne eliminovať. Pred rozborom nameraných hodnôt je dôležité upozorniť na základný nedostatok tohto prijímača, ktorým je absencia preselektie na vstupe (napr. banka filtrov). Na vstupný obvod R820T2 teda dopadajú signály širokého frekvenčného spektra.

4.1 Zapojenie pracoviska a metodika merania

Pri meraniach sme použili signálový generátor Rohde&Schwarz SML02 s frekvenčným rozsahom 9 kHz až 2,2 GHz a osciloskop Agilent DSO7032A. Medzi generátor a prijímač sme kvôli ochrane zapojili presný 20 dB atenuátor. Všetky namerané hodnoty zodpovedajú jeho prítomnosť. Merania prebehli v dvoch konfiguráciách. V prvom prípade (Obr. 10) sme namerané hodnoty odčítavané priamo zo spektra softvéru SDR#. Spektrum signálu je vypočítané a vykreslené algoritmom rýchlej Fourierovej transformácie (FFT, Fast Fourier Transform). Je preto vhodné pomenovať veličinu nachádzajúcu sa na vertikálnej osi, z ktorej hodnoty odčítavame. Jedná sa o spektrálnu výkonovú hustotu (PSD, Power Spectral Density), ktorá predstavuje výkon v šírke pásma 1 Hz. Jej jednotkou je dBm/Hz. Parametre FFT boli počas celého merania nastavené jednotne. Použitá bola okienková funkcia typu Hamming a rozlíšenie FFT bolo 65536 vzoriek.



Obr. 10, Zapojenie pracoviska č. 1



Obr. 11, Meranie na medzifrekvenčnom výstupe

Vertikálna a frekvenčná osa boli pred meraním skalibrované (kapitoly 4.3 a 4.2). V prípade parametrov ako selektivita alebo citlivosť sme pripojili k osciloskopu jeden z diferenciálnych medzifrekvenčných výstupov tunera R820T2 (Obr. 11) a merali efektívnu hodnotu napätia (U_{RMS}).

4.2 Frekvenčná deviácia

Prelaďovaním frekvencie v SDR# prelaďujeme napätím riadený oscilátor tuneru R820T2. Ten je podľa Obr. 4 zapojený do obvodu fázového závesu, ktorý používa kryštálový oscilátor ako zdroj referenčného kmitočtu. Keďže sa jedná o bežný oscilátor bez akejkoľvek kompenzácie (tepelná kompenzácia alebo vyhrievanie), bude existovať nejaká frekvenčná odchýlka od nominálnej hodnoty, ktorá sa vo výsledku prejaví na nepresnom ladení frekvencie. Frekvencia sa koriguje nastavením hodnoty „Frequency correction“ v nastaveniach rádia (Obr. 7). Korekcia je v jednotkách ppm (parts per million). Výslednú frekvenčnú odchýlku potom spočítame podľa rovnice (3.1).

$$\Delta_f = \frac{f_c * ppm}{10^6} [Hz] \quad (3.1)$$

Ku korekcii potrebujeme presný zdroj frekvencie. Tým je laboratórny zdroj Rohde&Schwarz SML02. Na vstup prijímača sme priviedli harmonický signál $f_c = 300$ MHz. V spektre softvéru SDR# sa však signál nenachádzal presne na frekvencii 300 MHz. V prípade nášho prijímača bola potrebná korekcia +51 ppm čo odpovedá posunu +15,3 kHz pri $f_c = 300$ MHz. V súčasnosti už je k dispozícii prijímač RTL-SDR s teplotne kompenzovaným kryštálovým oscilátorom, ktorého uvádzaná stabilita je približne 0,5 ppm.

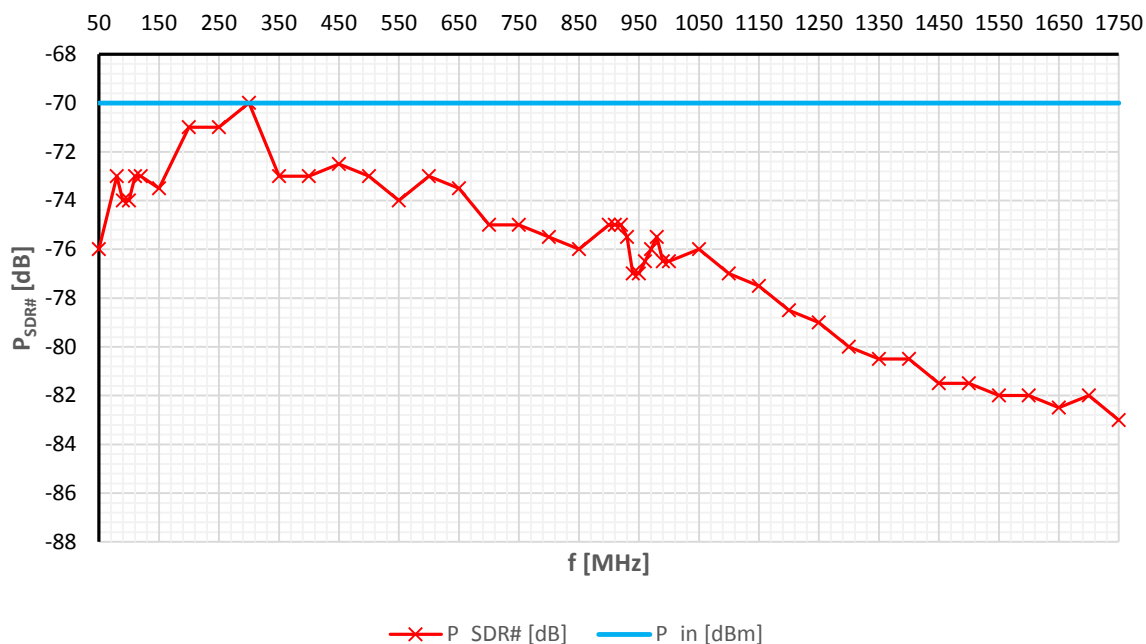
4.3 Frekvenčná závislosť vertikálnej osi SDR#

Výstupom prijímača je dvojica 8 bitových vzoriek I a Q. Prijímač ale nemá k dispozícii nejakú referenčnú hodnotu napätia/výkonu, ku ktorej by hodnotu týchto vzoriek škáloval. Tým pádom nemáme informáciu o absolútnych hodnotách spektrálnych výkonových hustôt (PSD), ktoré softvér SDR# na vertikálnu osu vynáša. Nie je známe k akej referenčnej hodnote sú tieto hodnoty vzťahované. Preto by bolo vhodné vykonať akúsi kalibráciu, ktorá by nám zabezpečila vierohodnú indikáciu PSD.

V zložke programu SDR# sa nachádza konfiguračný súbor s názvom „SDRSharp.exe.Config“, v ktorom môžeme meniť hodnotu parametra s názvom „fftOffset“. V praxi to znamená posuv vertikálnej osi o daný počet decibelov, na ktorom je naša kalibrácia založená.

Kalibráciu sme previedli na frekvencii 300 MHz čo je približný geometrický priemer frekvenčného rozsahu prijímača. Posuvník zisku prijímača (RF Gain) v nastaveniach sme manuálne nastavili na 0 dB. Obe obvody AGC boli vypnuté. Na vstup sme priviedli harmonický signál o výkone -70 dBm. Parameter fftOffset sme následne nastavili tak, aby vertikálna osa SDR# ukazovala v mieste výskytu signálu hodnotu -70 dB.

Bohužiaľ je pri prelaďovaní prijímača prítomná silná frekvenčná závislosť indikovaného PSD. S rastúcou frekvenciou klesá indikovaná hodnota PSD. Priebeh závislosti je v grafe na obrázku 12. S touto frekvenčnou závislosťou súvisí aj frekvenčný rozsah samotného prijímača. Naš prijímač indikoval prítomnosť signálu od frekvencie 50 MHz do približne 1750 MHz. Môžeme povedať, že prijímač je použiteľný v celom tomto intervale avšak za cenu možného zníženia citlivosti pri vyšších kmitočtoch.



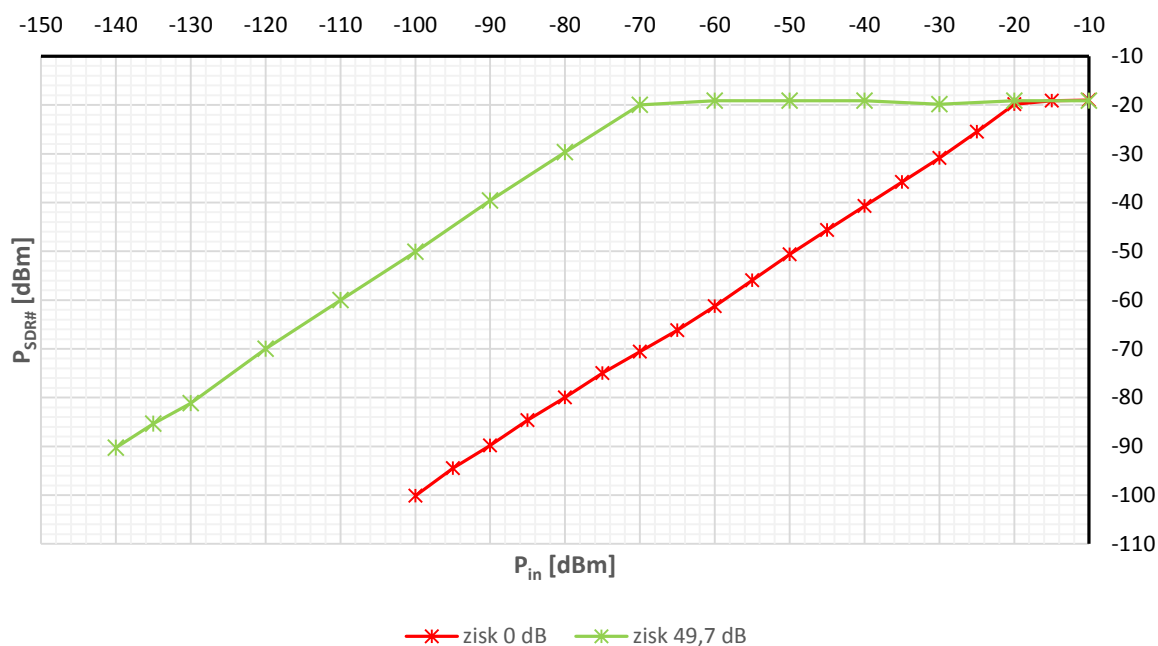
Obr. 12, Frekvenčná závislosť vertikálnej osi

Kvôli tejto závislosti nie je prijímač vhodný na presné merania PSD. Jednou z možností ako zvierohodniť indikované hodnoty by bolo rozdeliť frekvenčné pásmo do jednotlivých intervalov, v každom intervale zistiť odchýlku reálnej hodnoty od indikovanej a implementovať automatickú korekciu konštanty `fftOffset` v závislosti na aktuálnej frekvencii.

4.4 Linearita vertikálnej osi

Ďalšou dôležitou charakteristikou je odozva prijímača na relatívne zmeny výkonov. To znamená, či je odozva výkonovej osi na zmenu výkonu vstupného signálu lineárna. Meranie bolo prevedené pri vypnutých obvodoch AGC, dvoch manuálne nastavených úrovniach zisku (0 dB a 49,7 dB) a pri frekvencií vstupného harmonického signálu $f_c = 300$ MHz. Výsledok merania je v grafe na obrázku 13.

Z priebehu vyplýva, že závislosť vstupného výkonu na indikovanom je lineárna až do momentu presýtenia AD prevodníka. V prípade maximálneho zisku nastáva presýtenie od úrovne -70 dBm a v prípade minimálneho zisku od úrovne -20 dBm. Indikáciu relatívnych zmien výkonov teda prijímač zvláda uspokojivo.



Obr. 13, Linearita vertikálnej osi

4.5 Dynamický rozsah

V prípade znalosti rozlíšenia AD prevodníka dokážeme teoreticky určiť jeho dynamický rozsah (pomer medzi najmenšou a najväčšou úrovňou signálu, ktorú je prevodník schopný rozoznať) z rovnice (3.2), kde N je počet bitov AD prevodníka.

$$DR = 20 * \log_{10}(2^N) [dB] \quad (3.2)$$

Čip RTL2832U obsahuje 8 bitový AD prevodník. Jeho dynamický rozsah by teda mal byť približne 48 dB. Na obrázku 13 z predchádzajúcej kapitoly vidíme, že v oboch limitných prípadoch nastavenia zisku, bol softvér SDR# schopný rozoznať signály v rozsahu väčšom ako 48 dB. Nezabúdajme však, že posudzovaný bol harmonický signál na jednej frekvencii. Ak by sme na vstup priviedli signál s väčšou šírkou pásma (napr. AM/FM/digitálne modulovaný), prah jeho detekovateľnosti nad hladinou šumu by bol vyšší.

Pri posudzovaní dynamického rozsahu je teda dôležitý jednak celkový výkon šumu a celkový výkon posudzovaného signálu. V prípade, že máme nakalibrovanú osu spektrálnej výkonovej hustoty (PSD) v softvéri SDR#, môžeme stanoviť celkový výkon šumu v danej šírke pásma. Na jeho zistenie potrebujeme vedieť parametre FFT a vzorkovaciu frekvenciu resp. šírku pásma, v ktorej výkon šumu posudzujeme. Tým vypočítame rozlíšenie FFT (3.3), čiže šírku pásma jedného FFT dielu (angl. FFT bin).

$$df = \frac{f_s}{N} \quad (3.3)$$

Parameter f_s je nastavený vzorkovací kmitočet (Obr. 7) a N je počet „spektrálnych čiar“ (dielov/binov). Pri $f_s = 2,4$ MHz a $N = 65536$ nám vychádza rozlíšenie FFT približne 36,6 Hz na jeden diel. Odčítaním spektrálnej výkonovej hustoty pripadajúcej na jeden diel spektra zistíme výkon šumového signálu v šírke pásma 36,6 Hz. Vynásobením tohto výkonu počtom dielov získame celkový výkon šumového signálu (3.4) v šírke pásma 2,4 MHz.

$$P = \int PSD df \quad (3.4)$$

Pri vyššie uvedenom nastavení FFT a pri zisku prijímača 0 dB pripadá na jeden diel (36,6 Hz) výkon šumu približne -102 dBm. Vynásobením počtom dielov (65536) dostaneme celkový výkon šumu v šírke pásma 2,4 MHz približne -53,8 dBm. Často je udávaný aj výkon šumu na šírku pásma 1 Hz. Ten vychádza približne -117 dBm/Hz.

Z grafu na obrázku 13 vidíme, že k nasýteniu AD prevodníka došlo od hodnoty vstupného výkonu harmonického signálu -20 dBm. Celkový výkon šumu v šírke pásma 2,4 MHz je -53,8 dBm. Rozdielom celkového výkonu šumu v 2,4 MHz a maximálnym výkonom ešte neskresleného harmonického signálu získame dynamický rozsah približne 33,8 dB. Vidíme, že je dosť vzdialený teoretickej hodnote 48 dB. V súvislosti s počtom bitov AD prevodníku sa zavádza veličina efektívny počet bitov (ENoB, Effective Number of Bits). Tá zohľadňuje šumové vlastnosti AD prevodníku a kvantizačné chyby. V dôsledku týchto nežiadúcich vlastností AD prevodníku je efektívny počet bitov vždy menší ako udávaný. Ak by sme posudzovali dynamický rozsah výkonom šumu v jednom diele FFT (-102 dBm/36,6 Hz) a maximálnym výkonom ešte neskresleného harmonického signálu, ktorý spadá do jedného dielu FFT, získame dynamický rozsah 82 dB.

4.6 Selektivita

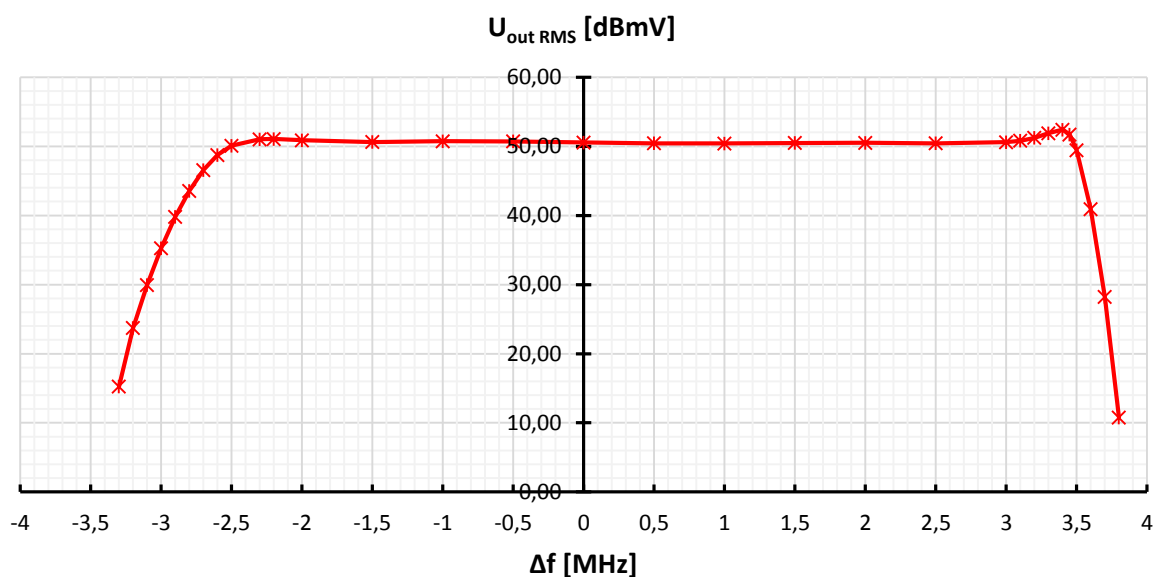
Selektivita prijímača je definovaná ako schopnosť vybrať z množstva signálov len žiaduce a tie ostatné čo najviac potlačiť. Daná je najmä vstupným obvodom (tunerom) R820T2. Ten prevádza vstupný vysokofrekvenčný signál na medzifrekvenciu. Podľa katalógového listu [5] dokáže tuner prevádzať signál na niekoľko rôznych medzifrekvencií. V prípade, že zariadenie používame ako univerzálny softvérový prijímač, vysokofrekvenčný signál je prevedený na medzifrekvenciu 3,57 MHz so šírkou pásma 6 MHz. Tento medzifrekvenčný signál sme pozorovali pripojením sondy osciloskopu na medzifrekvenčný výstup tunera a aktivovaním funkcie FFT (Obr. 12). Oranžové kurzory na osciloskope vymedzujú pásmo široké približne 6 MHz.



Obr. 14, Pohľad na spektrum medzifrekvenčného výstupu tunera R820T2

Krivku selektivity sme merali nasledovným spôsobom – prijímač sme naladili na frekvenciu 300 MHz a na vstup prijímača sme priviedli harmonický signál o výkone -65 dBm. Následne sme na medzifrekvenčnom výstupe merali osciloskopom napätie (U_{RMS}) výstupného signálu. Generátor

sme postupne prelaďovali v okolí kmitočtu f_c a sledovali zmenu napätia výstupného signálu na medzifrekvenčnom výstupe. Nameraná závislosť sa nazýva krivka selektivity (Obr. 15). Vidíme, že priepustné pásmo je približne 6 MHz široké a potlačenie v nepriepustnom pásme je približne 35 dB.



Obr. 15, Krivka selektivity z medzifrekvenčného výstupu

4.7 Citlivosť

Ak berieme do úvahy šumové vlastnosti prijímača, ktoré sú podstatné pri spracovaní slabých signálov, hovoríme o citlivosti obmedzenej šumom (užitočná citlivosť). Je to minimálna úroveň vstupného signálu, dávajúca štandardný výstupný výkon 50 mW pri zvolenej hodnote $S/N = 30$ dB. Meranie prebehlo pri frekvenčnej modulácii s modulačnou frekvenciou 1 kHz a frekvenčným zdvihom 22,5 kHz.

Metodika merania bola nasledovná – pre rôzne úrovne vstupného výkonu sme merali osciloskopom, na kanále so striedavou väzbou, úroveň šumu a úroveň užitočného signálu z výstupu zvukovej karty PC. Úroveň šumu sme merali pri prijíme nedomulovaného FM signálu (len nosná) a úroveň užitočného signálu pri prijíme modulovaného FM signálu. Nizkofrekvenčný výstup bol pripojený na záťaž $15\ \Omega$. Pomery S/N pre prijímač RTL-SDR pre jednotlivé úrovne vstupného výkonu sú nasledovné:

P_{in} [dBm]	-115	-110	-105	-100	-95	-90	-85	-80	-75	-70	-65	-60	-55	-50
S/N [dB]	17,27	26,79	36,75	41,74	46,84	50,59	54,81	59,62	63,33	65,27	66,02	66,85	66,85	66,85

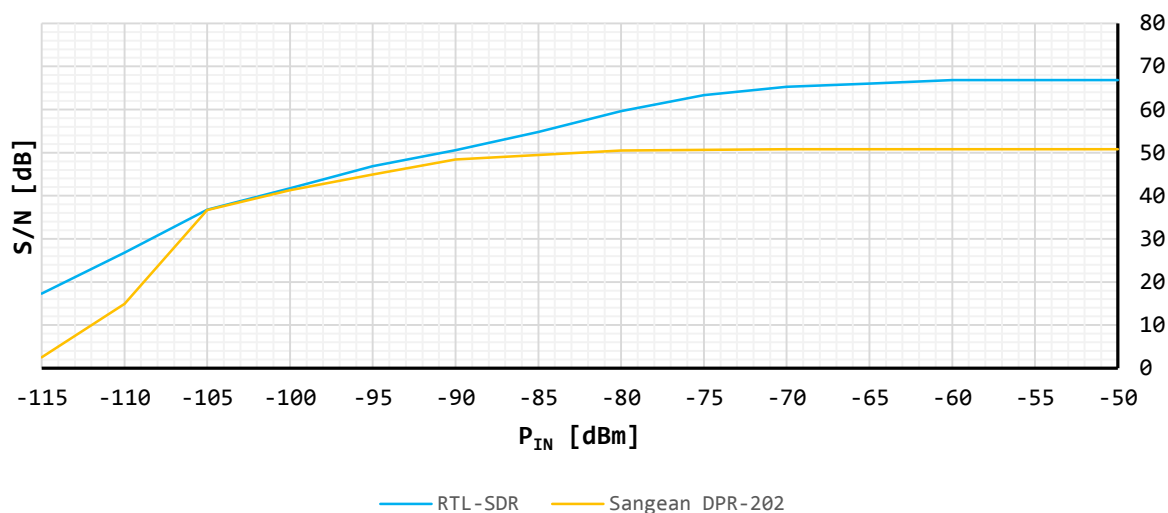
Tab. 2, Závislosť S/N na P_{IN} pre prijímač RTL-SDR

Meranie sme takisto previedli na bežnom FM prijímači Sangean DPR-202. Pomery pre tento prijímač sú nasledovné:

P_{in} [dBm]	-115	-110	-105	-100	-95	-90	-80	-70	-50
S/N [dB]	2,54	14,92	36,69	41,29	44,93	48,38	50,50	50,81	50,81

Tab. 3, Závislosť S/N na P_{IN} pre prijímač DPR-202

Grafické znázornenie závislosti odstupov signál/šum na vstupných výkonoch je v grafe na obrázku 16. Hodnota citlivosti obmedzenej šumom pre S/N 30 dB je pre prijímač RTL-SDR približne -108,5 dBm a pre prijímač DPR-202 približne -106,5 dBm. Pre túto hodnotu odstupov S/N vykazuje prijímač RTL-SDR o 2 dB lepšiu citlivosť ako prijímač DPR-202.



Obr. 16, Porovnanie závislostí odstupov S/N na vstupnom výkone prijímačov RTL-SDR a DPR-202

Citlivosť prijímača bude veľmi záležať na šumových vlastnostiach tuneru R820T2. Preto sme meranie citlivosti uskutočnili aj na medzifrekvenčnom diferenciálnom výstupe. Pri diferenciálnom vedení je ten istý signál vedený dvoma vodičmi (označovanými ako + a -), pričom v jednom z vodičov je signál v protifázi oproti druhému vodiču (má opačnú „polaritu“). V koncovom zariadení sú tieto signály od seba odčítané, čím získame signál s dvojnásobnou amplitúdou. Výhodou tohto vedenia je, že v prípade naindukovania rušivých signálov na oba vodiče (signály sú naindukované s rovnakou fázou) sú tieto signály v koncovom zariadení od seba odčítané. Meranie diferenciálneho vedenia osciloskopom prebieha buď použitím špeciálnej diferenciálnej sondy alebo použitím viackanálového osciloskopu, pričom jeden kanál by meral kladný pól vedenia a druhý kanál záporný pól vedenia. Následne sa signály na týchto kanáloch od seba odčítajú a z výsledného signálu odčítavame namerané hodnoty.

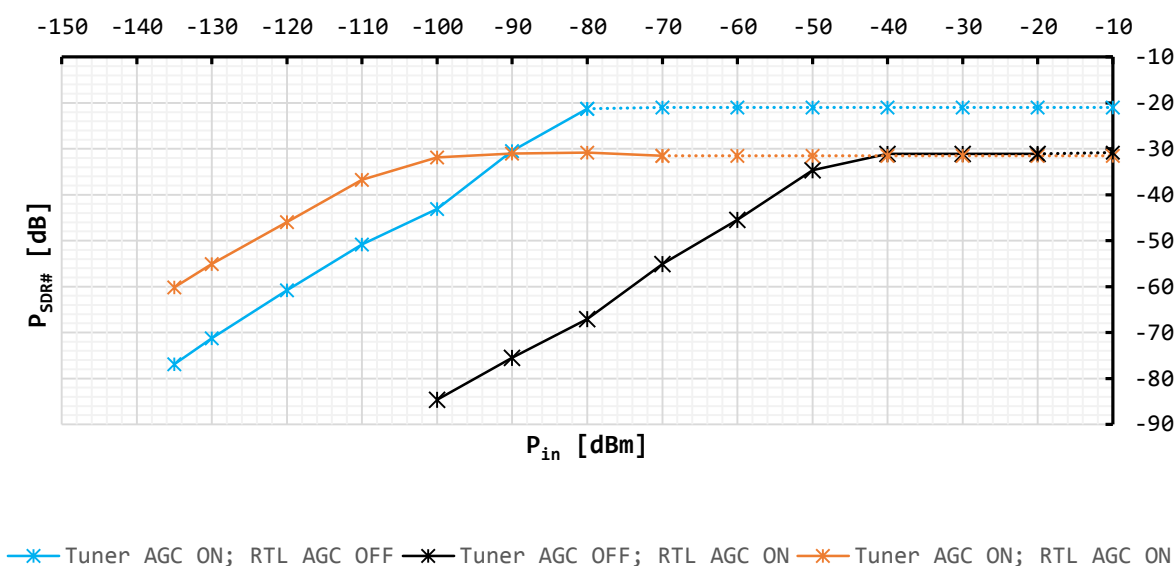
Citlivosť sme zistovali meraním hodnoty minimálne detekovateľného signálu (MDS, Minimum Detectable Signal). Jedná sa o výkon vstupného signálu, pri ktorom je úroveň signálu na MF výstupe tunera o 3 dB väčšia ako úroveň šumu tunera (bez prítomnosti vstupného signálu). Namerané hodnoty citlivostí P_{IN} pre rôzne nastavenia ziskov sú v tabuľke 4.

f = 300 MHz	U _{šum} (RMS) [mV]	U _{3 dB} (RMS) [mV]	P _{IN} [dBm]
zisk 0 dB	2,2	3,1	-62,5
zisk 49,7 dB	11,2	15,8	-100,5
AGC	39	55	-100,4

Tab. 4, Hodnoty minimálneho detekovateľného signálu (P_{IN}) pre rôzne nastavenia ziskov

4.8 AGC

Obvody automatického nastavenia zisku (AGC, Automatic Gain Control) slúžia k úprave zisku prijímača na základe veľkosti výkonu vstupného signálu. V ideálnom prípade by mali v prítomnosti silného signálu zisk ubrať aby nedochádzalo k preťažovaniu a presycovaniu obvodov a v prítomnosti slabého signálu zisk zvýšiť za účelom jeho zosilnenia. V prijímači RTL-SDR je možné zapnúť dva obvody AGC. Tuner AGC a RTL AGC. Cieľom merania bolo zistiť reakciu výkonovej osi na zmenu výkonu vstupného signálu ($f_c = 300$ MHz) pri zapnutých/vypnutých obvodoch AGC. Výsledná závislosť je v grafe na obrázku 17.



Obr. 17, Porovnanie jednotlivých funkcií obvodov AGC

Bodkované oblasti sú miesta, v ktorých už dochádzalo k nežiadúcim intermodulačným produktom t.j. signál bol príliš zosilnený. Tieto intermodulácie vznikajú v každej možnej kombinácii režimov AGC. Ďalším viditeľným efektom je nelinearita riadenia zisku pred stavom nasýtenia viditeľná v prípade zapnutého RTL AGC a v prípade zapnutého Tuner AGC. Takisto je zrejmé, že pri zapnutých obvodoch AGC je rozdiel vstupného signálu a indikovaného väčší ako 49,7 dB, čo je maximálny možný ručne nastaviteľný zisk tunera. Tieto obvody teda zrejme umožňujú ešte väčšie zosilnenie.

V režime Tuner AGC ON, RTL AGC ON v intervale od -100 dBm do -70 dBm je charakteristika z hľadiska princípu funkčnosti obvodu AGC najideálnejšia. T.j., bezohľadu na vstupný výkon udržuje AGC na výstupe konštantný signál. V možnosti „Tuner AGC OFF, RTL AGC ON“ bol signál o výkone menšom než -100 dBm stratený v šume. Kombinácia Tuner AGC ON, RTL AGC OFF nevykazuje podobnosť s chovaním obvodu AGC.

4.9 Nežiadúce signály

Pri sledovaní spektra si môžeme všimnúť, že signál, ktorý je v skutočnosti vysielaný na frekvencii mimo momentálne viditeľné („naladené“) spektrum sa nám môže objaviť v aktuálnom spektre akoby tam reálne existoval. Nejedná sa o skutočný signál, ale o akúsi nežiadúcu kópiu. Výkonovú charakteristiku a výskyt týchto signálov sme odmerali nasledujúcim spôsobom. Vzorkovací kmitočet sme nastavili na $f_s = 2,4$ MHz (t.j. viditeľné spektrum je 2,4 MHz) a spektrum softvéru SDR# sme vycentrovali na 300 MHz. Na vstup sme priviedli harmonický signál o výkone -30 dBm. Postupne sme ho preladžovali o $\pm f$ a sledovali pohyb jeho spektra.

Pohyb resp. výskyt nežiadúceho signálu je možné popísať rovnicami, kde f_{NE} je poloha nežiadúceho signálu v spektre, f_{REAL} je skutočná frekvencia signálu, f_C je naladený kmitočet RTL-SDR a f_S je nastavený vzorkovací kmitočet v nastaveniach rádia (Obr. 7).

Ak platí, že frekvencia skutočného signálu f_{REAL} sa nachádza v intervale

$$f_{REAL} \in \left\langle f_C - \frac{f_S}{2} \mid f_C + \frac{f_S}{2} \right\rangle \quad (3.5)$$

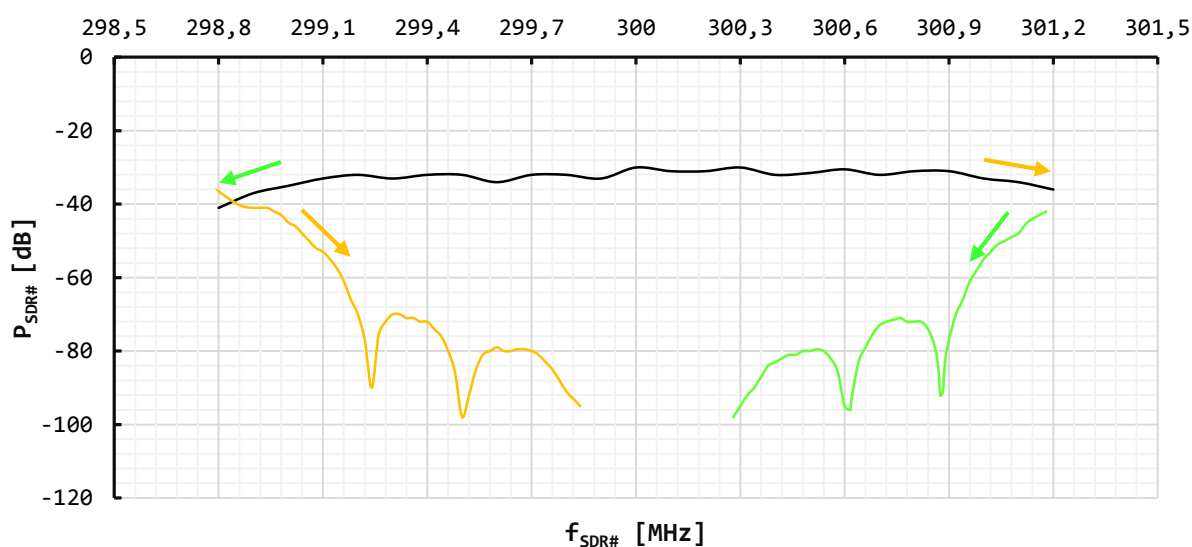
tak nežiadúci signál nie je prítomný. Aby sa do spektra nepremietla žiadna nežiadúca kópia, tak v prípade nášho nastavenia sa signál musí vyskytovať v oblasti $f_C \pm 1,2$ MHz. Ak na vstup prijímača dopadá signál, ktorého frekvencia nerešpektuje interval (3.5), objaví sa v spektre jeho nežiadúca kópia, aj keď sa tam v reále nenachádza.

Poloha nežiadúceho signálu vo viditeľnom spektre závisí na jeho skutočnej frekvencii a môžeme ju popísať rovnicami (3.6) a (3.7).

$$f_{REAL} < f_C - \frac{f_S}{2} \Rightarrow f_{NE} = f_{REAL} + f_S \quad \text{—} \quad (3.6)$$

$$f_{REAL} > f_C + \frac{f_S}{2} \Rightarrow f_{NE} = f_{REAL} - f_S \quad \text{—} \quad (3.7)$$

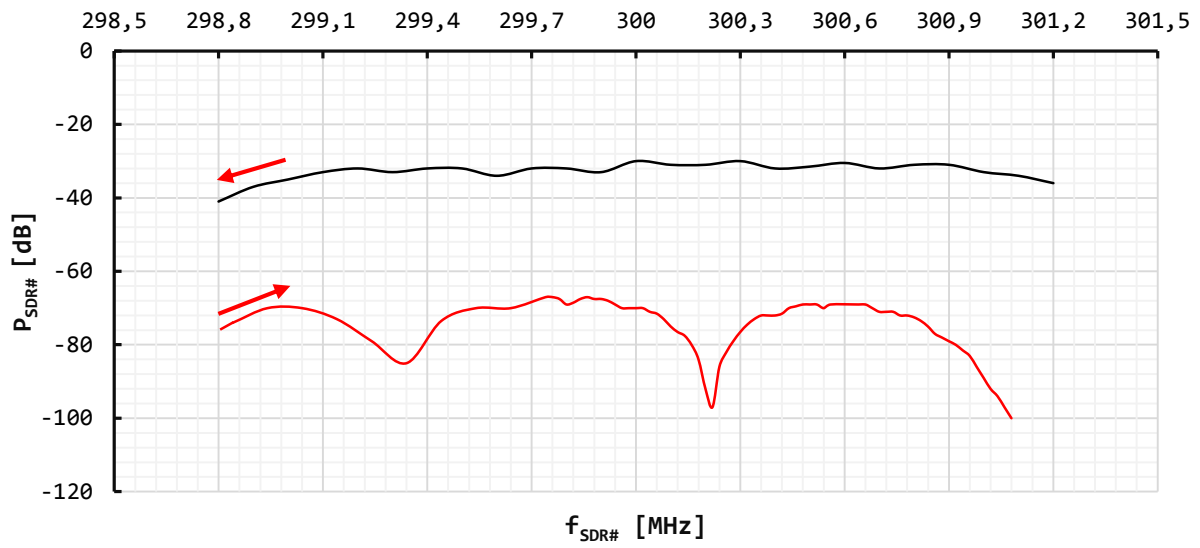
Teoreticky by sa teda do viditeľného spektra mali kopírovať úplne všetky signály, keďže f_{REAL} môže nadobúdať ľubovoľnú hodnotu. V skutočnosti sú signály vzdialenejších kmitočtov dostatočne potlačené a v spektre sa neobjavujú. Priebeh výkonov nežiadúcich signálov je v grafe na obrázku 18. Farebné šípky vyznačujú smer, v ktorom sa signál objaví po preladení mimo viditeľné spektrum. Napríklad: ak sa vyskytne signál na frekvencii 301,5 MHz, objaví sa jeho kópia v ľavej časti viditeľného spektra.



Obr. 18, Vývoj výkonov nežiadúcich signálov (žltý a zelený)

Okrem nežiadúcich signálov z obrázku 18, ktorých amplitúdy klesajú relatívne rýchlo, sme zaznamenali ešte jeden nežiadúci signál. Ten sa objaví v spektre v prípade, že jeho reálna frekvencia rešpektuje nerovnicu (3.8). To znamená, že signál sa musí nachádzať za ľavým okrajom viditeľného spektra. Polohu jeho výkonovo potlačenej kópie f_{NE} popisuje rovnica (3.8). Priebeh výkonu nežiadúceho signálu je na obrázku 19.

$$f_{REAL} < f_C - \frac{f_S}{2} \Rightarrow f_{NE} = 2f_C - f_S - f_{REAL} \quad (3.8)$$



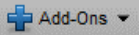

Obr. 19, Vývoj výkonu nežiadúceho signálu

Opäť vzhľadom k tomu, že vnútorné fungovanie čipu nie je známe, pôvod týchto signálov je otázny. Teoreticky by výskyt týchto signálov mohli spôsobovať decimálne filtre, ktoré majú v nepriepustnom pásme nedostatočné potlačenie.

5 RTL-SDR a MATLAB

Vďaka nízkej cene a dostupnosti prijímača RTL-SDR došlo v posledných troch rokoch k jeho rozšíreniu medzi záujemcov o bezdrôtové technológie a digitálne spracovanie signálu. Spoločnosť MathWorks, vyvíjajúca populárny program Matlab, sa od verzie 2013b rozhodla umožniť začlenenie prijímača RTL-SDR do tohto vývojového prostredia. Prijímač patrí medzi podporovaný hardvér v rámci tzv. Communications System Toolbox. Jedná sa o doplnok k základnej inštalácii Matlabu, ktorý nám dovoľuje testovať, simulovať a vyvíjať komunikačné systémy.

5.1 Začlenenie prijímača do prostredia Matlab

Na inštaláciu prijímača je potrebné vlastniť softvér Matlab verzie 2013b alebo novšej a mať nainštalovaný Communications System Toolbox. Po spustení Matlabu prejdeme na hlavnú kartu „HOME“ a nájdeme kolónku s názvom „Resources“. V nej klikneme na tlačítko  a vyberieme položku  Get Hardware Support Packages. Následne sa nám zobrazí dialógové okno, v ktorom vyberieme možnosť „Install from Internet“. Po vyhľadání dostupných doplnkov nájdeme položku „RTL-SDR Radio“ a klikneme na tlačítko „Next“. V ďalších krokoch už len postupujeme podľa pokynov a čakáme na nainštalovanie. Po úspešnom ukončení inštalácie je Matlab pripravený pracovať s prijímačom RTL-SDR.

5.2 Prístup k prijímaču a konfigurácia parametrov

K prijímaču môžeme pristupovať dvoma spôsobmi. V prípade, že chceme použiť prijímač v rámci nejakej aplikácie v simulačnom prostredí Simulink, stačí v knižnici Simulink nájsť položku „RTL-SDR Receiver“ a umiestniť ju na pracovnú plochu Simulinku. Ďalej s prijímačom pracujeme ako s akýmkoľvek iným blokom. Po dvojkliku na blok prijímača sa zobrazí dialógové okno, v ktorom môžeme ručne zadať základné parametre prijímača, obdobné ako v softvéri SDR#.

V prípade návrhu komplexnejšej aplikácie, častokrát aj s grafickým užívateľským prostredím, potrebujeme prístup a nastavovanie prijímača vo forme kódu. Všetky dostupné nastavenia rádia sú k dispozícii v dokumentácii Matlabu pod názvom „comm.SDRRTLReceiver class“. V komplexnejších programoch je výhodné si zdefinovať funkciu, ktorá nám bude slúžiť na počiatočnú inicializáciu prijímača a nastavenie jeho parametrov. Príklad takejto funkcie je na obrázku 20.

```

function [rtlsdr,fs,fc,f_min,f_max,nfft] = rtl_init...
(SamplesPerFrame,SampleRate,CenterFrequency,EnableTunerAGC,TunerGain,OutputDataType)
% INPUT EXAMPLE rtl_init(32768,2.4e6,88423000,0,8.7)
rtlsdr = comm.SDRRTLReceiver;
rtlsdr.SamplesPerFrame = SamplesPerFrame;
rtlsdr.SampleRate = SampleRate;
rtlsdr.CenterFrequency = CenterFrequency;
rtlsdr.EnableTunerAGC = EnableTunerAGC;
rtlsdr.TunerGain = TunerGain;
rtlsdr.OutputDataType = OutputDataType;

fs = rtlsdr.SampleRate;
fc = rtlsdr.CenterFrequency;
f_min = fc - fs/2;
f_max = fc + fs/2;

nfft = SamplesPerFrame;
end

```

Obr. 20, Funkcia na inicializáciu prijímača RTL-SDR

Na úplnom začiatku funkcie je potrebné si zadať objekt, ktorý bude reprezentovať náš prijímač. Objektu s názvom `rtlsdr` sme priradili prijímač, ktorý je prístupný cez príkaz `comm.SDRRTLReceiver`. Nastavenia konkrétnych parametrov vykonáme príkazom `rtlsdr.NazovParametru = Hodnota`.

Základnými nastaviteľnými parametrami sú:

- CenterFrequency – volenie aktuálnej frekvencie
- EnableTunerAGC – aktivácia obvodu AGC
- TunerGain – nastavenie zisku
- SampleRate – veľkosť vzorkovacieho kmitočtu
- OutputDataType – číselný formát dátového výstupu: single, double alebo int16
- SamplesPerFrame – vzorky dát sú posielané v tzv. rámcoch (frames), možnosť nastavenia počtu vzoriek v jednom rámci
- FrequencyCorrection – nastavenie veľkosti frekvenčnej korekcie v jednotkách ppm, prednastavená hodnota je 0 ppm

Po zavolaní funkcie na inicializáciu prijímača môžeme prísť ku vzorkám dát pomocou príkazu `step(rtlsdr)`. Ak priradíme k nejakej premennej tento príkaz, do tejto premennej sa budú ukladať navzorkované dáta. Výstupom prijímača RTL-SDR sú IQ dáta. To znamená, že jedna vzorka je reprezentovaná dvoma číslami (I a Q). Vzorky dát sa ukládajú do premennej vo forme komplexného čísla $R+jQ$, kde R reprezentuje súfázovú zložku a Q reprezentuje kvadratúrnú zložku. Práci s komplexnými signálmi je venovaná kapitola č. 6.1.

6 Aplikácia – zobrazenie frekvenčného spektra

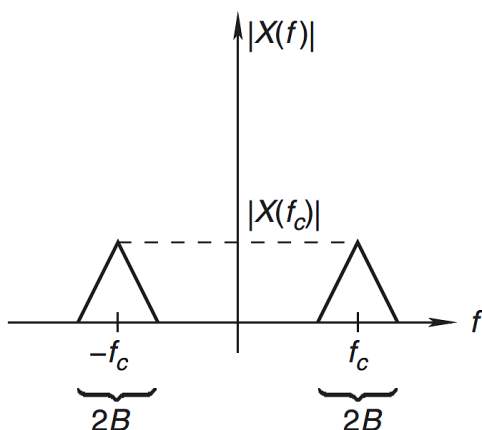
Ako už bolo spomenuté v kapitole 3.1, možnosti aplikácie prijímača RTL-SDR sú veľmi široké. Aj napriek nedokonalostiam prijímača, ktoré sme ukázali v kapitole o meraní, je prijímač schopný úspešne spracovávať široké spektrum ako analógovo tak aj digitálne modulovaných signálov.

V mojej bakalárskej práci som sa rozhodol pre aplikáciu zobrazenia frekvenčného spektra v reálnom čase. Aplikácia bola naprogramovaná vo vývojovom prostredí Matlab. Okrem samotného zobrazenia spektra obsahuje aplikácia aj doplnkové funkcie, slúžiace na ovládanie prijímača alebo zmenu parametrov algoritmu FFT.

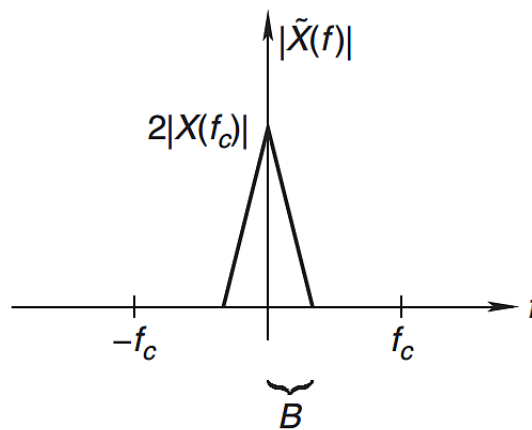
6.1 Úvod do spracovania IQ dát

Pred samotným rozborom aplikácie je vhodné popísať prácu s tzv. IQ dátami resp. komplexnou obálkou signálu [11] [12].

Predstavme si reálny pásmový signál (angl. bandpass signal), ktorého spektrum $|X(f)|$ je sústredené okolo nosného kmitočtu f_c (Obr. 21). Týmto signálom môže byť prenášaný nejaký druh informácie, ako napríklad zvuk, dáta a podobne.



Obr. 21, Spektrum pásmového signálu [11]

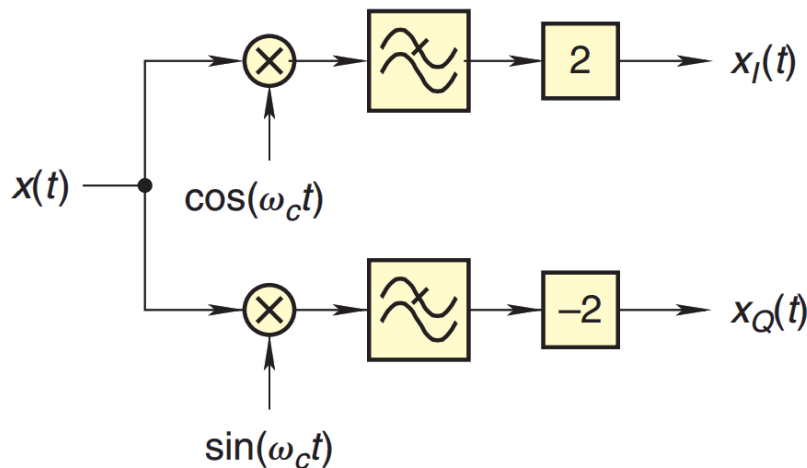


Obr. 22, Spektrum komplexnej obálky [11]

Spracovávať signál umiestnený na vysokej frekvencii by bolo neúčinné a náročné. Preto by bolo vhodné tento signál frekvenčne posunúť. Naším cieľom je vytvoriť z vysokofrekvenčného pásmového signálu akýsi nízkofrekvenčný komplexný ekvivalent. Takýto ekvivalent sa nazýva komplexná obálka. Po dekompozícii vysokofrekvenčného pásmového signálu do komplexnej obálky získame dva ortogonálne signály I a Q resp. súfázovú a kvadratúrnu zložku. Ako uvidíme ďalej, dekompozícia reálneho pásmového signálu do komplexného ekvivalentu prináša z hľadiska spracovania signálu mnoho výhod. Matematicky môžeme komplexnú obálku $\tilde{x}(t)$ popísať pomocou rovnice (5.1).

$$\tilde{x}(t) = i(t) + jq(t) \quad (5.1)$$

Komplexnú obálku môžeme z pásmového signálu vytvoriť pomocou troch základných stavebných blokov – kvadratúrneho zmiešavača, 2 dolnopriepustných filtrov a 2 zosilňovačov (Obr. 23).



Obr. 23, Blokové schéma generátoru komplexnej obálky [11]

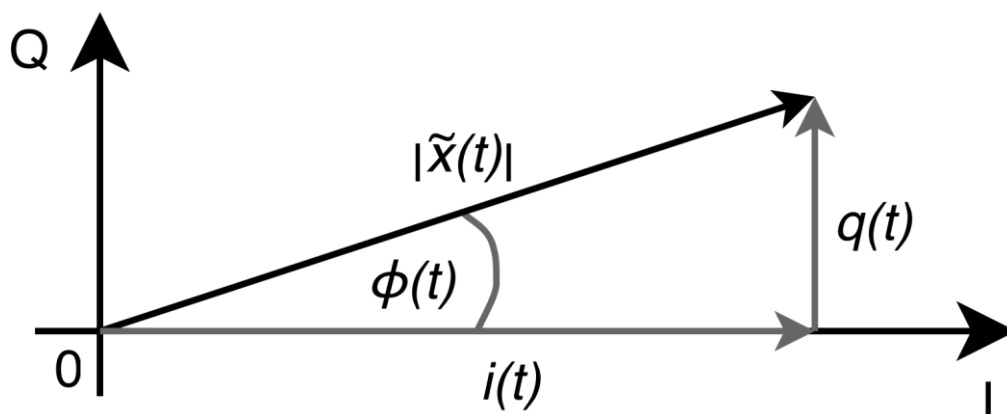
Z matematického hľadiska reprezentuje komplexná obálka komplexný signál. Z praktického hľadiska sú výstupom generátora (Obr. 23) dva samostatné reálne signály, ktoré sú ďalej spracovávané (navzorkovanie, DSP ...).

Základné charakteristiky komplexnej obálky:

- o komplexná obálka obsahuje tie isté informácie o signále ako vysokofrekvenčný pásmový signál, okrem nosného kmitočtu f_c
- o vysokofrekvenčný pásmový signál môže byť z komplexnej obálky následne opäť zrekonštruovaný bez akejkoľvek straty informácie
- o z komplexnej obálky môžeme jednoducho odvodiť aktuálnu fázu a amplitúdu signálu

Po vytvorení komplexnej obálky je signál často ďalej digitalizovaný použitím dvoch AD prevodníkov. Jeden pre súfázový signál a druhý pre kvadratúrny signál. Jednou z najväčších výhod takejto reprezentácie signálu je zníženie potrebnej vzorkovacej frekvencie. Ak máme pásmový signál so šírkou pásma $2B$ (Obr. 21), po prevedení do komplexnej obálky ho musíme vzorkovať minimálne dvojnásobkom polovice šírky pásma. T.j. v našom prípade $f_s \geq 2B$ [13].

Keďže z matematického hľadiska je IQ signál komplexným číslom, môžeme ho znázorniť v Gaussovej rovine (Obr. 24).



Obr. 24, Znázornenie IQ signálu v Gaussovej rovine

Mnohé analógové aj digitálne modulácie sú založené na prenášaní informácie pomocou zmeny amplitúdy, fázy alebo ich kombináciou. Keďže IQ signál si môžeme predstaviť ako komplexné číslo, zistenie jeho aktuálnej fázy alebo amplitúdy je jednoduché.

V prípade amplitúdovej modulácie (AM) je modulačný signál namodulovaný na nosný kmitočet, čo sa prejaví zmenou obálky signálu. Frekvencia nosného kmitočtu aj diferenciacia fázy sú nemenné. V Gaussovej rovine si to môžeme predstaviť ako vektor rotujúci konštantnou rýchlosťou, ktorého absolútna hodnota sa mení v závislosti na zmene obálky AM signálu. Obálku $a(t)$ amplitúdovo modulovaného signálu získame (5.2).

$$a(t) = |\tilde{x}(t)| = \sqrt{i^2(t) + q^2(t)} \quad (5.2)$$

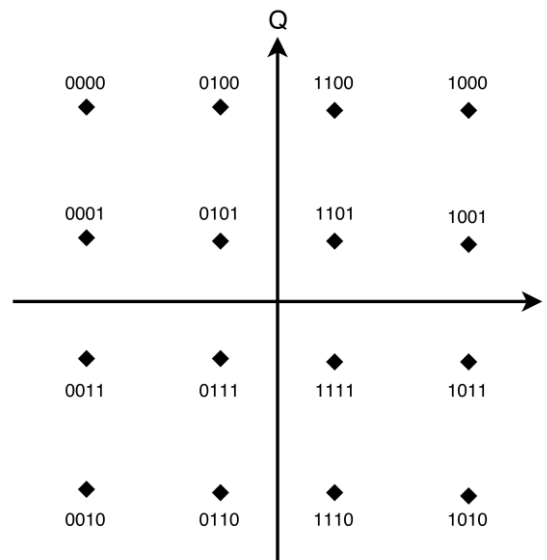
Okamžitú fázu signálu (5.3) potrebujeme vedieť napríklad pri fázovej modulácii.

$$\phi(t) = \arctan \left[\frac{q(t)}{i(t)} \right] \text{ [rad]} \quad (5.3)$$

Pri frekvenčnej modulácii (FM) sa mení frekvencia nosného kmitočtu v závislosti na modulačnom signále. Okamžitý kmitočet môžeme zistiť pomocou zmeny fázy (5.4).

$$\frac{d\phi(t)}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\arctan \left[\frac{q(t)}{i(t)} \right] \right) \quad (5.4)$$

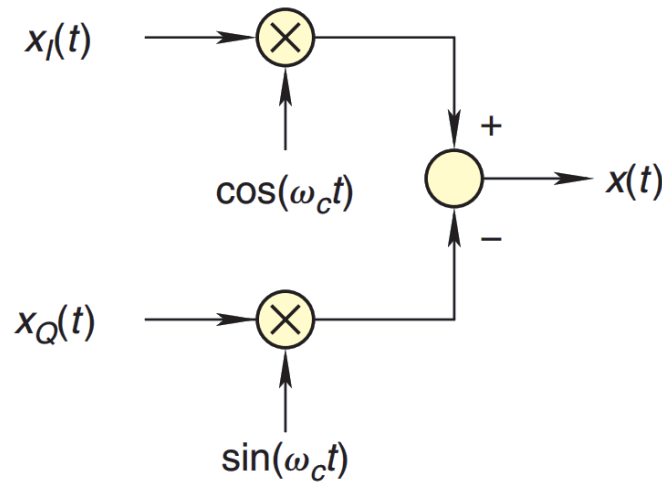
V prípade dátových prenosov sú najčastejšie používané modulácie typu QAM. Jedná sa o kombináciu amplitúdovej a fázovej modulácie, kde každej dvojici čísel I a Q odpovedá nejaký konkrétny symbol. Napríklad v prípade modulácie typu 16-QAM (Obr. 25) máme 16 dvojíc čísel I a Q a každá dvojica reprezentuje 4 bity informácie. V prípade modulácií sa zobrazenie IQ roviny nazýva aj konštelčný diagram (Obr. 25).



Obr. 25, Konštelčný diagram modulácie 16-QAM

Ako už bolo spomenuté, vysokofrekvenčný pásmový signál $x(t)$ môže byť z komplexnej obálky následne opäť zrekonštruovaný bez akejkoľvek straty informácie. Proces tejto rekonštrukcie je znázornený na obrázku 26. Matematicky to môžeme vyjadriť rovnicou (5.5).

$$x(t) = i(t) \cos(\omega_c t) - q(t) \sin(\omega_c t) \quad (5.5)$$



Obr. 26, Rekonštrukcia vysokofrekvenčného pásmového signálu z komplexnej obálky [11]

6.2 Diskrétna Fourierova Transformácia (DFT)

Aplikácia zobrazenia frekvenčného spektra je založená na spracovaní navzorkovaných signálov Diskrétnou Fourierovou Transformáciou (DFT). Je to matematický nástroj slúžiaci na prevod signálu z časovej oblasti do oblasti frekvenčnej. DFT je odvodenou verziou Fourierovej Transformácie (FT) (5.6), ktorej účel je rovnaký ale pracuje so spojitým vstupným signálom $x(t)$.

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (5.6)$$

Keďže pracujeme s navzorkovaným diskrétnym signálom, namiesto FT používame DFT. Rovnica (5.7) zobrazuje dva možné zápisy vzťahu na výpočet koeficientov $X(m)$ (spektrálnych komponentov) [13]

$$X(m) = \sum_{n=0}^{N-1} x[n]e^{-j2\pi nm/N} = \sum_{n=0}^{N-1} x[n][\cos(2\pi nm/N) - j\sin(2\pi nm/N)] \quad (5.7)$$

Kde sú:

$X(m)$ – m -tý výstupný komponent DFT, $X(0), X(1), X(2) \dots, X(N-1)$,

m – index výstupu DFT vo frekvenčnej oblasti, $m = 0, 1, 2, 3, \dots, N-1$,

$x[n]$ – sekvencia vzoriek vstupného signálu, $x[0], x[1], x[2] \dots, x[N-1]$,

n – poradie vzorky vstupného signálu, $n = 0, 1, 2, 3, \dots, N-1$,

j – imaginárna jednotka,

N – počet vzoriek na vstupe a počet frekvenčných bodov vo výstupe DFT.

Po aplikovaní algoritmu DFT na vstupný signál zistíme frekvenčné zloženie vstupného signálu. To znamená, z akých frekvencií harmonických signálov (sin, cos) sa signál skladá a aké sú amplitúdy a počiatkové fáze týchto harmonických signálov. Keďže výstupom DFT sú diskrétny

hodnoty $X(1, 2, 3, \dots)$, výsledné spektrum bude tiež diskrétné. Preto je dôležité zdefinovať tzv. fundamentálnu frekvenciu f_r (5.8), od ktorej sa odvíja rozlíšenie výsledného spektra.

$$f_f = \frac{mf_s}{N} \quad (5.8)$$

Veľkosť fundamentálnej frekvencie závisí na vzorkovacej frekvencii f_s a počte vzoriek N vstupného signálu. Rozlíšiteľnými frekvenciami v spektre sú teda len m násobky fundamentálnej frekvencie f_r . Voľba správnej fundamentálnej frekvencie je dôležitá pri spektrálnej analýze signálov, ktorých frekvencie sú si veľmi blízke.

Výstupom DFT sú spektrálne komponenty $X(m)$ (sínové a kosínové zložky), ktoré sú obecné komplexným číslom (5.9).

$$X(m) = X_{real} + jX_{imag} \quad (5.9)$$

Vypočítaním amplitúdy (5.10) a fáze (5.11) zistíme amplitúdu daného (m -tého) komponentu a jeho počiatočnú fázu.

$$|X_m| = \sqrt{X_{real}(m)^2 + X_{imag}(m)^2} \quad (5.10)$$

$$\phi = \arctan\left(\frac{X_{imag}(m)}{X_{real}(m)}\right) [rad] \quad (5.11)$$

Výkon $X_p(m)$ spektrálneho komponentu $X(m)$ získame (5.12)

$$X_p(m) = |X_m|^2 = X_{real}(m)^2 + X_{imag}(m)^2 \quad (5.12)$$

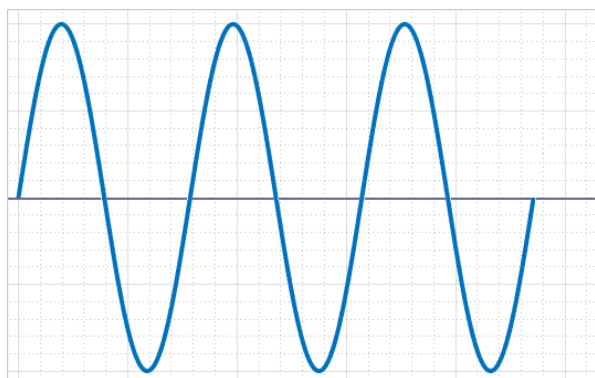
Po vypočítaní všetkých koeficientov $X(m)$ je výsledok väčšinou zobrazený graficky, pričom v prípade amplitúdového spektra sú na ose y amplitúdy jednotlivých spektrálnych komponentov (5.10) a na osi x príslušné frekvencie. V prípade fázového spektra sú na osi y fázy jednotlivých spektrálnych komponentov (5.11). Frekvenčná osa x obsahuje diskkrétne hodnoty frekvencií zodpovedajúce rovnici (5.8).

V prípade, že vstupný signál $x[n]$ je reálny, platí tzv. symetria DFT. To znamená, že spektrálny komponent m bude mať rovnakú amplitúdu ako spektrálny komponent $N-m$. Vo fázovom spektre má komponent m opačnú fázu ako komponent $N-m$. V prípade, že je vstupom $x[n]$ komplexný signál, táto symetria platiť nemusí. V mojej aplikácii zobrazenia spektra je vstupom IQ signál (komplexný). Na rozdiel od reálneho signálu je spektrum komplexného signálu obecné nesymetrické okolo nulového kmitočtu.

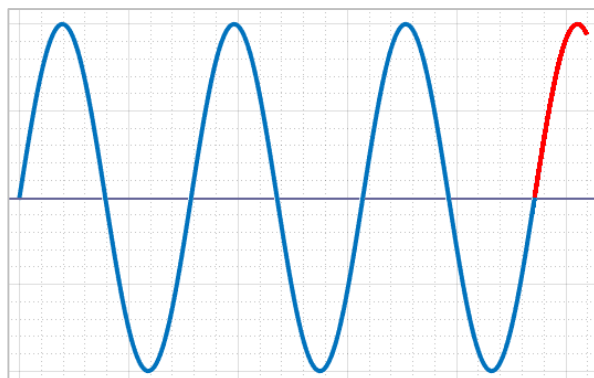
Aj v prípade použitia výpočtovej techniky by bol algoritmus DFT výpočtovo zložitý a zdĺhavý. V roku 1965 bol Jamesom Cooleym a Johnom Tukeym odvodený algoritmus (Cooley-Tukey algorithm) rýchlej fourierovej transformácie (**FFT**, Fast Fourier Transform). Algoritmus FFT je založený na komplexnej diskkrétnej Fourierovej transformácii (5.7). Oproti algoritmu DFT je efektívnejší a oveľa rýchlejší. V podstate sa jedná o zrýchlenú verziu DFT. Z toho dôvodu nájdeme vo väčšine programovacích jazykoch namiesto funkcie DFT funkciu FFT.

6.3 Okienkové funkcie

Algoritmy DFT resp. FFT pracujú s konečným počtom vzoriek vstupného signálu (parameter N v rovnici 5.8). Ak privedieme na vstup signál, ktorého N vzoriek vytvorí periodický harmonický signál s celistvým počtom periód (Obr. 27), v spektre sa objaví jedna spektrálna čiara umiestnená na frekvencii zodpovedajúcej frekvencii vstupného signálu. To znamená, že parametre algoritmu FFT môžeme „nastaviť“ tak, aby korektné zobrazoval spektrum signálov s frekvenciami vyhovujúcimi rovnici (5.8). V prípade, že N vzoriek signálu nevytvorí signál s celistvým počtom periód (Obr. 28), v spektre sa okrem základnej frekvencie zobrazia falošné vysokofrekvenčné produkty, ktoré sa v skutočnom signále vôbec nenachádzajú (angl. spectral leakage).

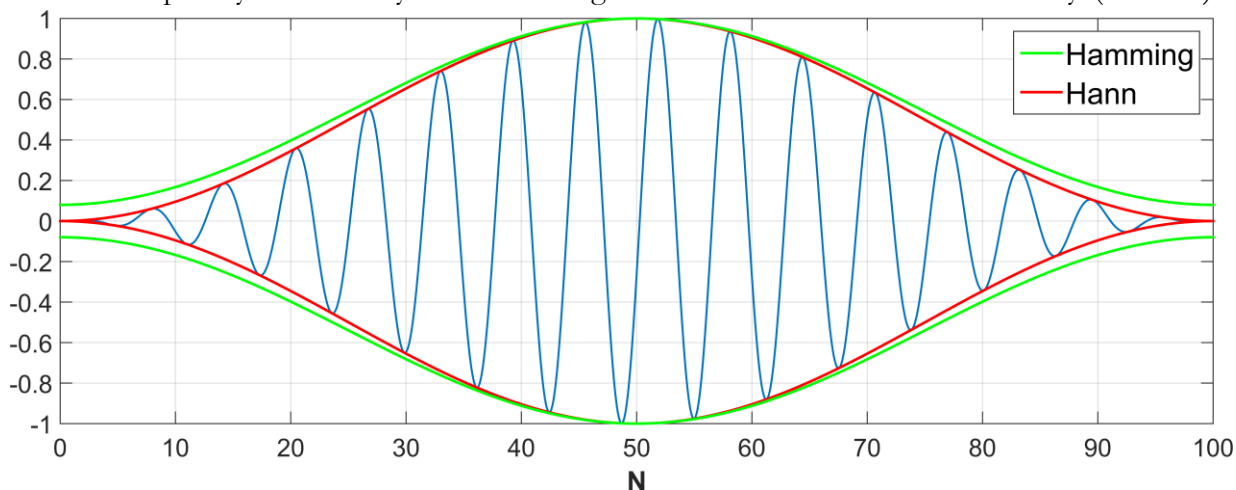


Obr. 27, Signál s celistvým počtom periód



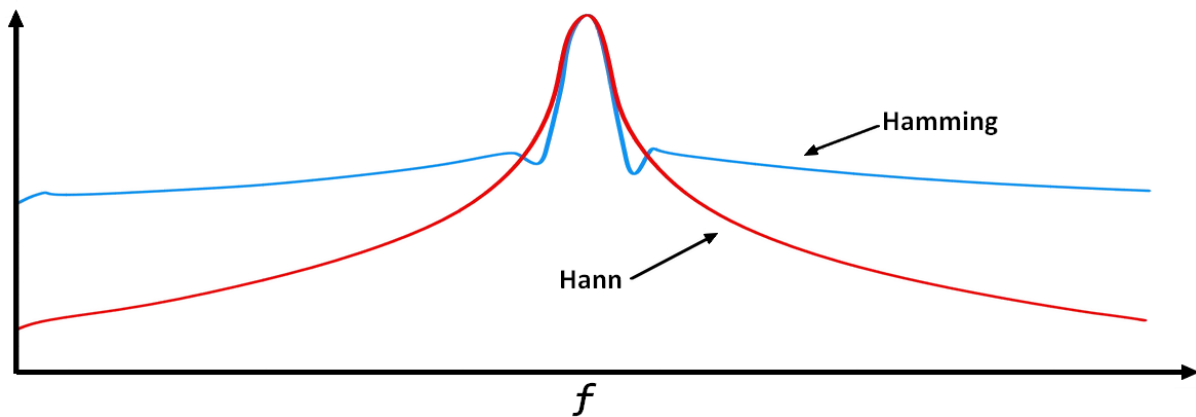
Obr. 28, Signál s necelstvým počtom periód

Potrebujeme teda nejakým spôsobom zvierohodniť zobrazované spektrum signálu, ktorého frekvencia „nezapadá“ do rovnice (5.8). Riešením by samozrejme bolo nastaviť parameter f_f (5.8) čo najmenší. To by sa ale odzrkadlilo na dlhšie trvajúcim výpočte a navýšení potrebného výpočtového výkonu. Ďalšou možnosťou je použiť tzv. okienkovú funkciu (angl. Window function). Okienkové funkcie sa aplikujú na časovú postupnosť N vzorkov signálu. Ich úlohou je zmenšiť amplitúdy na koncových miestach signálu kde môžu vzniknúť diskontinuity (Obr. 29).



Obr. 29, Vplyv okienkových funkcií Hamming a Hann na signál v časovej oblasti

Vo výslednom spektre sa to prejaví zmenšením amplitúd falošných vysokofrekvenčných produktov (Obr. 30). Existuje niekoľko rôznych druhov okienkových funkcií, ktoré sa líšia najmä mierou potlačenia nežiadúcich frekvencií, presnosťou amplitúdy skutočného produktu a presnosťou frekvenčného umiestnenia skutočného produktu.



Obr. 30, Vplyv okienkových funkcií na spektrum signálu [14]

Najznámejšie a najuniverzálnejšie sú okná typu Hamming a Hann. Okno typu Hamming má väčšie potlačenie v tesnej blízkosti základného produktu ale horšie potlačenie vzdialenejších. Na druhej strane má okno Hann väčšie potlačenie vzdialenejších produktov. Obecne môžeme povedať, že okno typu Hann je vhodné v 95% prípadov. Má dobrú frekvenčnú presnosť a dobré potlačenie vzdialených produktov.

Niekoľko základných okienkových funkcií a ich charakteristiky:

Hann – univerzálne okno vhodné pre neznáme, úzkopásmové a harmonické signály

Hamming – vhodné pre znázornenie frekvenčne veľmi blízkych signálov

Kaiser-Bessel – vhodné pre frekvenčne blízke signály s veľmi rozdielnymi amplitúdami

Blackman-Harris – podobné ako Hamming a Hann ale ešte s väčším potlačením

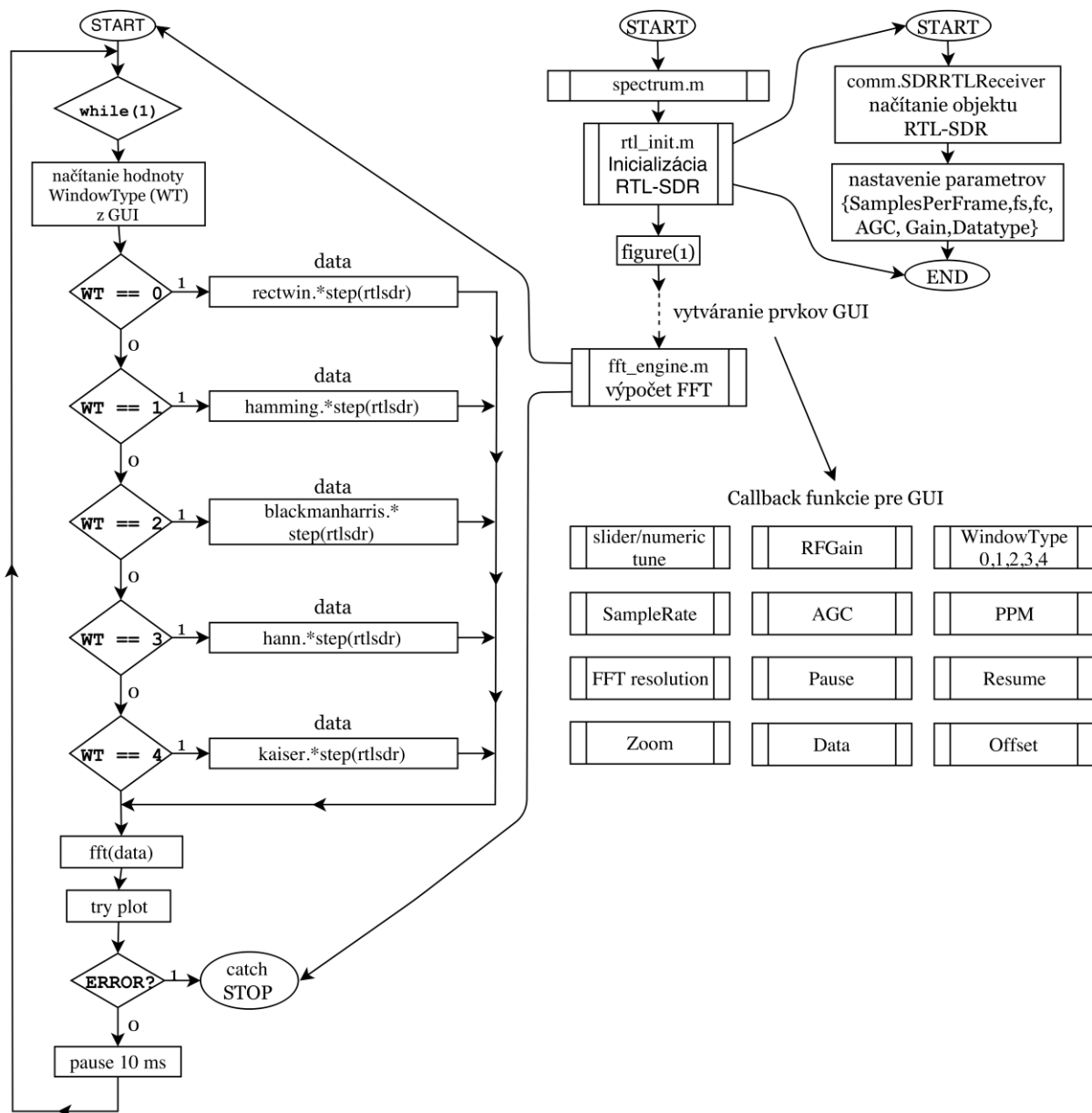
Rectangular – názov pre „žiadne okno“ (obdĺžnikové)

Problematika okienkových funkcií a ich teoretické pozadie je komplexnou záležitosťou, ktorá je nad rámec tejto bakalárskej práce. Teoretický podklad k okienkovým funkciám nájdeme napríklad v publikácii [15].

6.4 Realizácia v Matlabe

6.4.1 Štruktúra programu a vývojový diagram

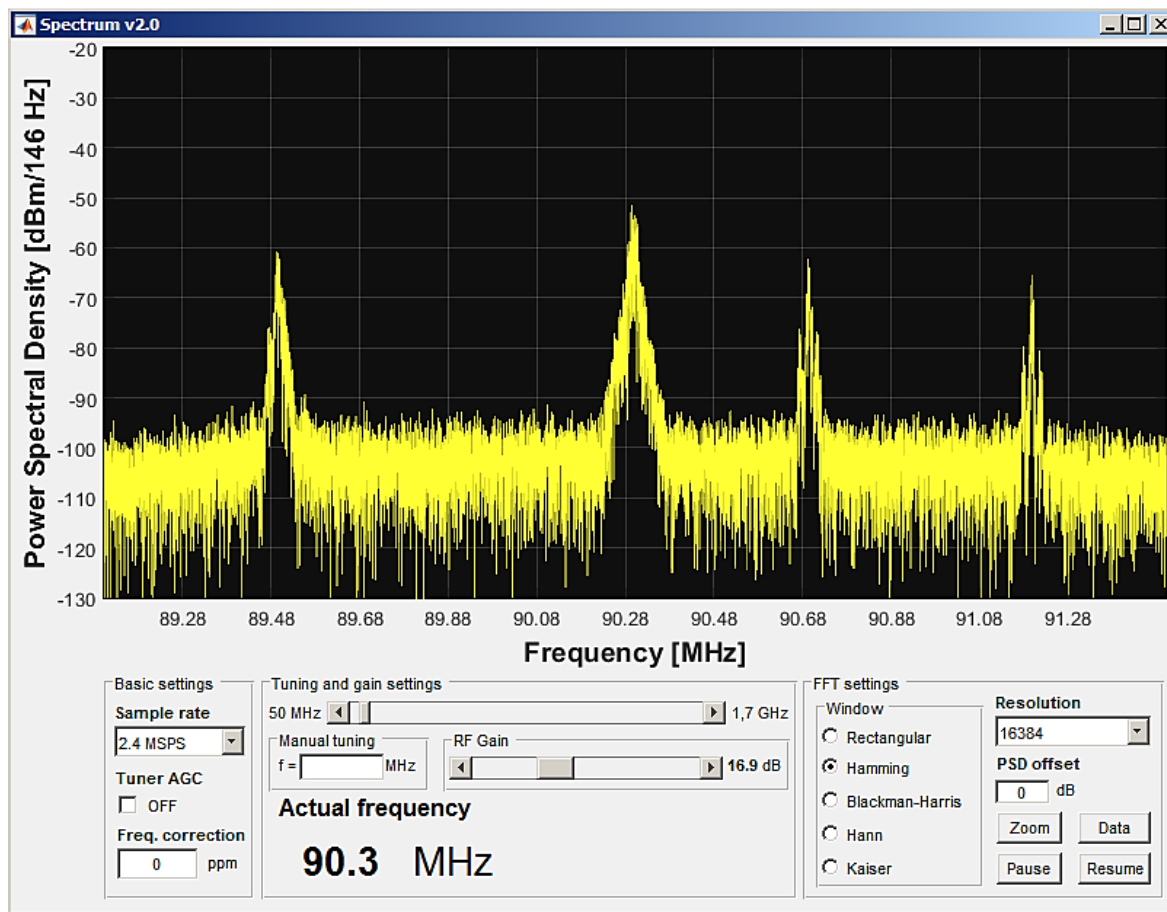
Vzhľadom k prítomnosti grafického užívateľského prostredia (angl. GUI, Graphical User Interface) musel byť program z dôvodu prehľadnosti rozdelený do troch častí resp. troch hlavných funkcií. Základnou je funkcia `spectrum.m` obsahujúca najmä zdrojový kód pre GUI. Z tejto funkcie sú ďalej volané ďalšie dve a to funkcia `rtl_init.m` slúžiaca na inicializáciu prijímača a funkcia `fft_engine.m` slúžiaca na samotný výpočet FFT. Funkcie budú detailne popísané v ďalších kapitolách. Zjednodušený vývojový diagram programu je na obrázku 31. Zdrojový kód programu je k dispozícii ako elektronická príloha k bakalárskej práci.



Obr. 31, Zjednodušený vývojový diagram programu zobrazenia spektra

6.4.2 Grafické užívateľské prostredie

Grafické užívateľské prostredie (GUI) programu (Obr. 32) je obsiahnuté vo funkcii `spectrum.m`. Je to zároveň aj „základná funkcia“ programu, z ktorej sú ďalej volané ďalšie funkcie. Keďže obecné používaným jazykom v technickej praxi je angličtina a väčšina skratiek je anglického pôvodu (AGC, FFT, PSD, ppm ...), rozhodol som sa popisky k jednotlivým prvkom programu napísať v angličtine.



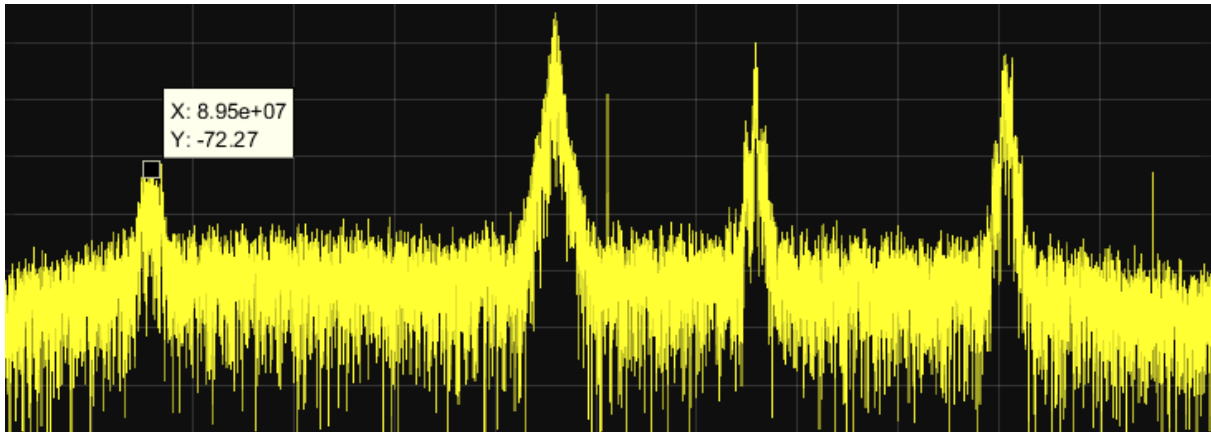
Obr. 32, Grafické užívateľské prostredie programu na zobrazenie spektra

Väčšinu obrazovky zaplňa samotné zobrazované spektrum čiže závislosť spektrálnej výkonovej hustoty (angl. PSD, Power Spectral Density) na frekvencii (viac v kapitole 6.4.4). V dolnej časti sa nachádzajú panely slúžiace na základnú obsluhu prijímača a zobrazovaného spektra.

Z vývojového diagramu (Obr. 31) vidíme, že po spustení funkcie `spectrum.m` a inicializácii prijímača sú vytvárané jednotlivé prvky GUI. Pod prvkami rozumieme tlačidlá, posúvniky, dynamické textové polia, polia na zadávanie hodnôt a iné. Každý prvok je zároveň viazaný na nejakú callback funkciu. Callback je funkcia, ktorá je zavolaná a spustená po zmene stavu prvku. Tým sa vykoná nejaké nastavenie/prestavenie prijímača alebo zobrazovaného spektra. Jednotlivé prvky GUI sú rozdelené do troch panelov. V paneli „Basic settings“ je možné nastaviť základné parametre prijímača ako vzorkovacia frekvencia (Sample Rate), aktivácia obvodu AGC (Tuner AGC) a frekvenčná korekcia (Freq. correction). Význam funkcií je analogický s významom v softvéri SDR# z kapitoly 3.3. Panel „Tuning and gain settings“ slúži na nastavenie frekvencie jednak posúvnikom alebo manuálne. Manuálne nastavenie frekvencie je ošetrené zobrazením výstražného dialógového okna v prípade nenumerického vstupu. Povolený rozsah frekvencií je 50 MHz až 1750 MHz. Posúvnikom „RF Gain“ nastavujeme zisk prijímača v decibeloch. Maximálna možná hodnota je 50 dB. V prípade, že je aktivovaná funkcia Tuner AGC, zmena zisku posúvnikom RF Gain je nefunkčná.

Panel „FFT settings“ slúži na nastavenie parametrov algoritmu FFT. V ľavej časti je možný výber z piatich okienkových funkcií, ktorých význam bol stručne popísaný v kapitole 6.3. Vo vývojovom diagrame (Obr. 31) vo funkcii `fft_engine.m` vidíme, že v závislosti na vybranej okienkovej funkcii je postupnosť vzoriek vynásobená danou okienkovou funkciou (napr.

hann.*step(rtlsdr), kde step(rtlsdr) predstavuje postupnosť vzoriek). Viac v kapitole 6.4.4. Ďalej môžeme nastaviť rozlíšenie FFT (Resolution) resp. počet frekvenčných bodov vo výstupe FFT. Položka „PSD offset“ slúži na vertikálny posuv osi spektrálnej výkonovej hustoty v prípade kalibrácie (kapitola 4.3). Tlačidlo „Pause“ slúži na pozastavenie vykresľovania spektra. Obnoviť ho môžeme tlačidlom „Resume“. Aktivovaním funkcie „Zoom“ nastavíme kurzor myši do režimu možného priblíženia vykresľovaného spektra. V prípade funkcie „Data“ môžeme vybrať kurzorom myši ľubovoľné miesto vo vykresľovanom spektre, pri ktorom sa následne zobrazí značka (Obr. 33) s jeho presnými hodnotami (frekvencia a PSD).



Obr. 33, Znáozornenie funkcie „Data“ v programe na zobrazenie spektra

Ako už bolo spomenuté, vertikálna os programu vynáša spektrálnu výkonovú hustotu (PSD). Hodnoty sú vynášané v dBm na šírku pásma jedného FFT binu ($\frac{dBm}{f_s/N}$). Šírka pásma jedného FFT binu závisí na vzorkovacej frekvencii a rozlíšení FFT (rovnicu (5.8)). V prípade nastavenia z obrázku 32 má jeden FFT bin šírku pásma približne 146 Hz. Odčítavame teda výkon v dBm v šírke pásma 146 Hz. Zmenou vzorkovacej frekvencie alebo rozlíšenia FFT sa uvádzaná hodnota šírky jedného binu automaticky prepočítava a mení.

Zmena vzorkovacej frekvencie alebo rozlíšenia FFT má najväčší vplyv na hladinu šumu. Predpokladajme, že pri konštantnej vzorkovacej frekvencii a konštantom nastavení zisku je v danej šírke pásma šum s konštantným výkonom. Pri zväčšení rozlíšenia FFT by sa teda celkový šum mal „rozložiť“ do viacerých binov (spektrálnych čiar). To znamená, že čím je rozlíšenie FFT väčšie, tým menej šumu prípadne na jeden bin. V dôsledku by sa zväčšenie rozlíšenia FFT malo odzrkadliť poklesom šumovej hladiny a naopak zmenšenie rozlíšenia nárastom. Avšak v softvéri SDR# po zväčšení rozlíšenia FFT hladina šumu stúpa a po zmenšení klesá. Z hľadiska zmeny šumovej hladiny vykazuje moja aplikácia oproti SDR# korektné správanie. Navyše, ak je prítomný len harmonický signál, ktorý pri väčšine nastavení f_s/N zaberá len jeden bin, zmenou rozlíšenia FFT by sa jeho hodnota výkonu nemala meniť. Správanie mojej aplikácie potvrdzuje aj tento predpoklad.

6.4.3 Inicializácia prijímača

Ešte pred načítaním prvkov GUI je zavolaná funkcia `rtl_init.m` (viď Obr. 31) slúžiaca na inicializáciu prijímača. Jedná sa o funkciu z obrázku 20 z kapitoly 5.2. Vstupom funkcie sú parametre:

- TunerGain
- SampleRate
- CenterFrequency
- EnableTunerAGC
- OutputDataType
- SamplesPerFrame

Hodnoty týchto parametrov slúžia na počiatočné nastavenie prijímača. Výstupom funkcie `rtl_init.m` je objekt prijímača a jeho základné nastavené parametre (f_c , f_s , f_{min} , f_{max} a $nfft$). Tie slúžia v ďalších častiach kódu na správne počiatočné nastavenie rozsahov zobrazovaných osí. Po spustení programu sú počiatočné nastavenia prijímača nasledovné – naladená je frekvencia 100 MHz, vzorkovacia frekvencia je nastavená na 2,4 MHz, počet frekvenčných bodov FFT je 16 384, počiatočný zisk je 8,7 dB a predvolenou okienkovou funkciou je Hamming.

6.4.4 Výpočet FFT

Na výpočet spektra vstupného signálu slúži funkcia `fft_engine.m` (viď Obr. 31). Pred samotným výpočtom je najprv vytvorený objekt „plot“, ktorý reprezentuje zobrazený priebeh spektra. Nastavené sú parametre ako rozmery a umiestnenie priebehu, farba pozadia a zobrazeného spektra, menovky osí a počiatočné rozsahy osí (tie sa ďalej menia pri preladení).

Následne začína nekonečný cyklus, na ktorého začiatku je z GUI najprv načítaný typ aktuálne zvolenej okienkovej funkcie. Ďalej nasleduje načítanie samotných vzoriek komplexného IQ signálu (počet závisí od rozlíšenia FFT) a ich úprava v závislosti na zvolenej okienkovej funkcii (prenásobenie okienkovou funkciou). Na upravené vzorky signálu je aplikovaná funkcia FFT, ktorá vypočíta jednotlivé koeficienty spektra. Na tie je ďalej aplikovaná funkcia „fftshift“, ktorá posunie spektrálny komponent s nulovou frekvenciou (DC) do stredu spektra. Keďže sa jedná o výpočet spektra komplexného signálu tak naľavo od nulovej frekvencie sa nachádzajú „záporné“ frekvencie a napravo kladné. Podľa aktuálne zvolenej centrálnej frekvencie a vzorkovacej frekvencie je vytvorená frekvenčná osa, ktorej body zodpovedajú reálnemu umiestneniu spektrálnych produktov. Jednotlivé koeficienty spektra sú zatiaľ komplexným číslom. Keďže chceme zobrazit' amplitúdové spektrum tak vypočítame modul týchto koeficientov. Nakoniec vykreslíme vypočítané moduly jednotlivých spektrálnych koeficientov v závislosti na frekvencii (vo vývojovom diagrame príkaz „try plot“). Samotné načítanie vzoriek signálu a výpočet ich spektra prebieha veľmi rýchlo. Ak by sme tento cyklus nechali voľne prebiehať tak by Matlab nestíhal tak rýchlo prekresľovať spektrum. Preto je cyklus na konci „přibrzdený“ desiatimi milisekundami, ktoré zabezpečia plynulé vykresľovanie spektra.

Týmito desiatimi milisekundami sa dostávame k otázke, či program skutočne vykresľuje spektrum v reálnom čase. Napríklad: pri prednastavenej vzorkovacej frekvencii 2,4 MSPS a počte naraz spracovávaných vzoriek 16384 má tento súbor vzoriek trvanie približne 0,0068 sekundy. Meraním dĺžok jednotlivých častí kódu sme zistili nasledovné: samotné spracovanie vzoriek Matlabom (načítanie vzoriek z rádia, úprava podľa zvolenej okienkovej funkcie, výpočet koeficientov FFT a vykreslenie) trvá približne 0,007 sekundy. Přibrzdením každej iterácie cyklu 10 milisekundami dostávame celkové trvanie spracovania jedného balíčku dát 0,017 sekundy. To znamená, že ak by sa počas desiatich milisekúnd „nečinnosti“ vyskytol v spektre nejaký krátkotrvajúci impulzný signál, náš program by ho nezachytil a nevykreslil. Avšak vzhľadom k plánovanému poslianiu programu (jednoduché prezeranie frekvenčného spektra, demonštrácia

algoritmu FFT, ukážka vplyvu okienkových funkcií ...) považujem túto chybu za marginálnu. Je otázne, či by sme vôbec boli schopní očami zachytiť výskyt krátko trvajúcich signálov v spektre. Hodnota 10 ms bola v Matlabe zvolená zámerne, keďže funkcia `pause` nedokáže program pozastaviť na kratšiu dobu. Možným riešením do budúcnosti by bolo použitie časovačov (timers), ktorých implementácia je však zložitejšia, ale mali by umožňovať pozastavenia kratších časov.

Funkcia `fft_engine.m` je okrem prvého spustenia programu znovu volaná pri každej zmene naladenej frekvencie, vzorkovacej frekvencie alebo rozlíšenia FFT. Samozrejme s inými hodnotami vstupných parametrov.

7 Záver a zhodnotenie

Obsah bakalárskej práce bol rozdelený do troch hlavných častí. Prvá sa venovala obecnému úvodu do oblasti softvérových rádii a ich rôznymi architektúrami (kapitola 2). Z dostupných informácií sme identifikovali základné architektúry SDR podľa umiestnenia AD prevodníku. Z dôvodu vysokých cien prevodníkov s veľmi veľkou vzorkovacou frekvenciou, ich väčšou spotrebou energie a nutnosťou disponovať veľkým výpočtovým výkonom je masové nasadenie ideálnych softvérových rádii zrejme stále v nedohľadne. Kvôli týmto obmedzeniam budeme ešte stále nútení najprv siahať po analógových formách spracovania signálu, akou je napríklad frekvenčná konverzia zmiešavaním, a až následne digitalizovať signál už nižšej frekvencie.

V druhej časti sme sa venovali konkrétnemu softvérovému prijímaču známemu pod názvom RTL-SDR. Vykonali sme sériu základných meraní za účelom zistenia jeho základných rádiových parametrov (kapitola 4). Ukázalo sa, že najväčším nedostatkom tohto prijímača je prienik nežiadúcich signálov do spektra momentálne navzorkovaného signálu. To nám zabraňuje jednoznačne identifikovať, ktorý signál sa na danej frekvencii skutočne nachádza a ktorý je len nežiadúcou kópiou. Výkon týchto nežiadúcich signálov je však potlačený o rádovo 30-40 dB. To znamená, že v prípade prekryvu reálneho signálu nežiadúcim, by v určitých aplikáciách mohlo byť toto potlačenie dostačujúce. Z meraní takisto vyplýva frekvenčná závislosť indikovaného výkonu signálu. Kvôli týmto javom nemôže zariadenie v žiadnom prípade nahradiť presné, niekoľkonásobne drahšie meracie zariadenia. To však nikdy nebolo ani jeho účelom, keďže pôvodným poslaním zariadenia je príjem pozemnej digitálnej televízie. Takisto je potrebné zobrať do úvahy aj nízku cenu zariadenia – približne 20 EUR. Aj napriek zisteným nedostatkom (kapitola 4) je prijímač vďaka jeho širokému frekvenčnému rozsahu schopný prijímať a demodulovať široké spektrum rádiových služieb (kapitola 3.1). Porovnanie s inými rádioprijímačmi prebehlo len v kapitole o meraní citlivosti a to s jedným analógovým prijímačom. Meraním sme zistili, že prijímač RTL-SDR preukázal v konkrétnej aplikácii, príjem FM signálu, o 2 dB lepšiu citlivosť oproti bežnému analógovému prijímaču. Viac v kapitole 4.7. Porovnať RTL-SDR s inými softvérovými prijímačmi na základe nameraných dát je z dôvodu nedostupnosti meraní podobného formátu obtiažne. Navyše, drahšie a dokonalejšie SDR zariadenia majú určite zložitejšiu architektúru a viacero analógových členov na predspracovanie signálu. Keďže takéto zariadenia sú už od počiatku zamýšľané ako širokopásmové SDR prijímače, môžeme od nich určite očakávať kvalitnejšie riešené vstupné obvody a filtre, ktoré sa v dôsledku prejavujú na „čistejšom“ výstupnom spektre. Takisto majú AD prevodníky s väčším rozlíšením a vyššou vzorkovacou frekvenciou. Stručný prehľad základných parametrov rôznych SDR zariadení vystihuje tabuľka 1 na strane 19.

Posledná časť sa venovala možnosti začlenenia prijímača do prostredia Matlab a popisu aplikácie – zobrazenie frekvenčného spektra v reálnom čase (kapitoly 5 a 6). Prijímač je vďaka svojej nízkej cene a jednoduchej integrácii do Matlabu vhodným nástrojom na učenie digitálneho spracovania signálu. Keďže výstupom prijímača je komplexný IQ signál, na začiatku bol tento koncept vysvetlený. Ďalej sa práca venuje popisu diskkrétnej Fourierovej transformácie, ktorá predstavuje matematický aparát použitý pri zobrazovaní spektra. V krátkosti bola spomenutá aj problematika okienkových funkcií, ktoré sú pri spektrálnej analýze signálov veľmi dôležité, keďže nám zvierohodňujú zobrazované spektrum. Nakoniec som sa venoval samotnému popisu naprogramovanej aplikácie – štruktúre kódu, grafickému užívateľskému prostrediu a samotnému algoritmu na výpočet spektra. Naprogramovaním aplikácie som získal hlbšie pochopenie

spektrálnej analýzy digitálnych signálov a nové skúsenosti s programovaním v Matlabe. Program je vhodný na rýchle a jednoduché prezeranie frekvenčného spektra, demonštráciu fungovania algoritmu FFT (chovanie sa spektra pri zmene parametrov FFT) alebo na ukážku vplyvu okienkových funkcií na výsledné spektrum signálu. Funkčnosť programu bola overená porovnaním zobrazovaného spektra signálov, ktoré sme generovali generátorom, so spektrom programu SDR#. V porovnaní so softvérom SDR# vykazuje môj program korektné chovanie priebehu výkonu šumového pozadia so zmenou parametrov FFT. Ak by sme prijímač a program porovnali s profesionálnym zariadením – spektrálnym analyzátorom (SpA), došli by sme k radu limitácií a nedostatkov programu. Architektúra reálnych SpA je oveľa zložitejšia a dokonalejšia a ich cena je v porovnaní s našim zariadením obvykle tisícnásobne vyššia. Reálne SpA obsahujú na medzifrekvencii sadu meniteľných RBW filtrov (Resolution Bandwidth filter), ktorých voľba má veľký vplyv na hladinu šumu, dynamický rozsah a výslednú citlivosť prijímača. Softvérové vybavenie SpA je v porovnaní s našim programom oveľa bohatšie a rozsiahlejšie. To je samozrejme dané najmä základným poslaním SpA – presné meracie účely.

Bibliografia

- [1] Mitola, J.: *Software radios-survey, critical evaluation and future directions*, Telesystems Conference, 1992. NTC-92., National, Washington, DC, 1992, str. 13/15-13/23.
- [2] Eged, B., Babják, B.: *Universal Software Defined Radio Development Platform*. Dynamic Communications Management, Meeting Proceedings RTO-MP-IST-062, str. 11-4. [online]. [cit. 12-04-2016].
Dostupné z <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a478777.pdf>.
- [3] Texas Instruments: *ADC12D1800RF, 12-Bit, 1.8/3.6 GSPS RF sampling ADC* [online]. [cit. 11-04-2016].
Dostupné z <http://www.ti.com/product/ADC12D1800RF>.
- [4] Palosaari, A.: *SDR FM demodulation* [online]. Február 2012. [cit. 05-04-2016].
Dostupné z <http://comments.gmane.org/gmane.linux.drivers.video-input-infrastructure/44461>.
- [5] Rafael Micro: *Katalógový list tuneru R820T* [online]. [cit. 06-04-2016].
Dostupný z http://superkuh.com/gnuradio/R820T_datasheet-Non_R-20111130_unlocked.pdf.
- [6] RTL-SDR.com: *Analyzing GSM with Airprobe/GR-GSM and Wireshark* [online]. Máj 2013. [cit. 15-04-2016]. Dostupné z <http://www.rtl-sdr.com/rtl-sdr-tutorial-analyzing-gsm-with-airprobe-and-wireshark/>.
- [7] Stewart R. W., Barlee K. W., Atkinson D. S. W., Crockett L. H.: *Software Defined Radio using MATLAB & Simulink and the RTL-SDR*. 1 ed. Strathclyde Academic Media, 2015. ISBN 9780992978716.
- [8] *Softvér SDR#* [online]. [cit. 02-04-2016]. Dostupný z <http://airspy.com/download/>.
- [9] RTL-SDR.com: *List of SDRSharp Plugins*. Máj 2013 [online]. [cit. 09-04-2016].
Dostupné z <http://www.rtl-sdr.com/sdrsharp-plugins/>.
- [10] RTL-SDR.com: *The BIG List of RTL-SDR Supported Software* [online]. Február 2014. [cit. 06-04-2016]. Dostupné z <http://www.rtl-sdr.com/big-list-rtl-sdr-supported-software/>.
- [11] Kolumbán G., Krébesz T., Lau F.C.M.: *Theory and application of software defined electronics: Design concepts for the next generation of telecommunications and measurement systems*. IEEE Circuits and Systems Magazine, vol. 12, 2012. DOI 10.1109/MCAS.2012.21.
- [12] Kačmařík, P.: *Pásmové signály, komplexní obálka*. Študiijný text k predmetu Signály a soustavy (FEL ČVUT).

- [13] Lyons, Richard G.: *Understanding digital signal processing*. Reading: Addison-Wesley, 1997. ISBN 0-201-63467-8.
- [14] National Instruments: *Understanding FFTs and Windowing* [online]. Apríl 2015. [cit. 22-04-2016]. Dostupné z <http://www.ni.com/white-paper/4844/en/>.
- [15] Frederick J. Harris: *On the Use of Windows for Harmonic Analysis with the Discrete Fourier Transform*. Proceedings of the IEEE, vol 66, str. 51-83, Január 1978.
- [16] Fette, Bruce Alan.: *RF & wireless technologies*. Burlington: Newnes/Elsevier, c2008. ISBN 978-0-7506-8581-8.
- [17] MathWorks Inc.: *RTL-SDR Support from Communications System Toolbox* [online]. [cit. 2016-02-03], dostupné na www.mathworks.com/hardware-support/rtl-sdr.html.
- [18] Retzler, A.: *Software Defined Radio Receiver Application with Web-based Interface*. Budapest, 2014. Bakalárska práca. Budapest University of Technology and Economics, Department of Broadband Infocommunications and Electromagnetic Theory.
- [19] Kester, W.: *ADC Input Noise: The Good, The Bad, and The Ugly. Is No Noise Good Noise?* [online]. [cit. 20-04-2016]. Dostupné z http://www.analog.com/library/analogDialogue/archives/40-02/adc_noise.html.
- [20] *A short history of software-defined radio (SDR) technology* [online]. [cit. 09-04-2016]. Dostupné z <http://www.nutaq.com/blog/short-history-software-defined-radio-sdr-technology>.
- [21] Franco Contadini, M.: *Oversampling with averaging to increase ADC resolution* [online]. Marec 2010. [cit. 20-04-2016]. Dostupné z <http://www.embedded.com/design/mcus-processors-and-socs/4008894/Oversampling-with-averaging-to-increase-ADC-resolution>.
- [22] RTL-SDR.com: *RTL-SDR (RTL2832U) and software defined radio news and projects* [online]. [cit. 2016-02-03]. Dostupné z <http://www.rtl-sdr.com/>.

Zoznam obrázkov

- Obr. 1, Koncept ideálneho SDR
- Obr. 2, Rôzne architektúry SDR podľa umiestnenia AD prevodníku
- Obr. 3, Prijímač RTL-SDR
- Obr. 4, Blokové schéma čipu R820T [5]
- Obr. 5, Blokové schéma čipu RTL2832U [7]
- Obr. 6, Hlavné dialógové okno programu SDR#
- Obr. 7, Nastavenia rádia
- Obr. 8, Demodulačné algoritmy
- Obr. 9, Spektrum základného pásma FM vysielania
- Obr. 10, Zapojenie pracoviska č. 1
- Obr. 11, Meranie na medzifrekvenčnom výstupe
- Obr. 12, Frekvenčná závislosť vertikálnej osi
- Obr. 13, Linearita vertikálnej osi
- Obr. 14, Pohľad na spektrum medzifrekvenčného výstupu tunera R820T2
- Obr. 15, Krivka selektivity z medzifrekvenčného výstupu
- Obr. 16, Porovnanie závislostí odstupov S/N na vstupnom výkone prijímačov RTL-SDR a DPR-202
- Obr. 17, Porovnanie jednotlivých funkcií obvodov AGC
- Obr. 18, Vývoj výkonov nežiadúcich signálov (žltý a zelený)
- Obr. 19, Vývoj výkonu nežiadúceho signálu
- Obr. 20, Funkcia na inicializáciu prijímača RTL-SDR
- Obr. 21, Spektrum pásmového signálu [11]
- Obr. 22, Spektrum komplexnej obálky [11]
- Obr. 23, Blokové schéma generátoru komplexnej obálky [11]
- Obr. 24, Znázornenie IQ signálu v Gaussovej rovine
- Obr. 25, Konštelačný diagram modulácie 16-QAM
- Obr. 26, Rekonštrukcia vysokofrekvenčného pásmového signálu z komplexnej obálky [11]
- Obr. 27, Signál s celistvým počtom periód
- Obr. 28, Signál s necelistvým počtom periód
- Obr. 29, Vplyv okienkových funkcií Hamming a Hann na signál v časovej oblasti
- Obr. 30, Vplyv okienkových funkcií na spektrum signálu [14]
- Obr. 31, Zjednodušený vývojový diagram programu zobrazenia spektra
- Obr. 32, Grafické užívateľské prostredie programu na zobrazenie spektra
- Obr. 33, Znázornenie funkcie „Data“ v programe na zobrazenie spektra

Zoznam tabuliek

Tab. 1, Porovnanie rôznych typov SDR

Tab. 2, Závislosť S/N na PIN pre prijímač RTL-SDR

Tab. 3, Závislosť S/N na PIN pre prijímač DPR-202

Tab. 4, Hodnoty minimálneho detekovateľného signálu (PIN) pre rôzne nastavenia ziskov

Prílohy

Prílohou bakalárskej práce je CD obsahujúce:

- bakalársku prácu vo formáte PDF [BP_thurom.pdf]
- namerané hodnoty a grafy [meranie.xlsx]
- zdrojové kódy naprogramovanej aplikácie:
 - [spectrum.m] – základná funkcia obsahujúca GUI programu
 - [rtl_init.m] – funkcia slúžiaca na inicializáciu prijímača
 - [fft_engine.m] – algoritmus výpočtu koeficientov FFT