

UNIVERZITA PARDUBICE

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Metody zpracování signálu FM rozhlasu pro
potřeby bistatického radaru

Bc. Marek Jonáš

Diplomová práce

2010

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Akademický rok: 2009/2010

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Marek JONÁŠ**
Osobní číslo: **I070161**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komunikační a řídicí technologie**
Název tématu: **Metody zpracování singálu FM rozhlasu pro potřeby
bistatického radaru**
Zadávací katedra: **Katedra elektrotechniky**

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

V teoretické části popište funkci bistatického radaru a vlastnosti signálu FM rozhlasu. Dále uveďte schéma zpracování signálu a stručně popište funkci jednotlivých částí.

V praktické části ve spolupráci s dalším studentem , náplní jehož práce je studium vlastností FM rozhlasového signálu zaznamenejte signál FM rozhlasu s různou programovou náplní, převedte jej do MATLABu a upravte na komplexní obálku. Dále naprogramujte v prostředí MATLAB metodu lineární ekvalizace signálu v pracovním kanále. Na modelu přijatého signálu, který Vám dodá vedoucí práce prostudujte její vlastnosti, zejména závislost potlačení na parametrech signálu v referenčním kanálu a možnost lineární ekvalizace signálu po částech.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

- [1] Bezoušek P., Šedivý P.: Radarová technika, ČVUT Praha, 2007
- [2] Bezoušek, P., Schejbal, V.: Bistatic and multistatic radars, Radioengineering, 3, (2008), ISSN 1210-2512
- [3] Kolář R. Analýza signálu FM rozhlasu, bakalářská práce, Univerzita Pardubice, 2009
- [4] Griffiths H. D.: Bistatic and Multistatic Radar [online]
<http://www2.theiet.org/oncomms/pn/radar/Griffiths%20Shrivenham.pdf>

Vedoucí diplomové práce:

prof. Ing. Pavel Bezoušek, CSc.
Katedra elektrotechniky

Datum zadání diplomové práce: **15. ledna 2010**

Termín odevzdání diplomové práce: **21. května 2010**



prof. Ing. Simeon Karamazov, Dr.
děkan



Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 31. března 2010

Prohlášení autora

Prohlašuji:

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

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

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 18. 5. 2010

Marek Jonáš

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce, Prof. Ing. Pavlu Bezouškovi, CSc., za rady, připomínky a návrhy týkající se diplomové práce a za odborné vedení při práci se signály v prostředí MATLAB.

Anotace

Tato práce se zabývá bistatickým radarem, který ke své činnosti využívá FM rozhlasové vysílání. V teoretické části jsou popsány principy bistatického radaru a vlastnosti a zpracování FM radiového signálu. Praktická část se zabývá zachycením vzorku FM radiového signálu a jeho zpracováním v softwarovém prostředí MATLAB. Je zde naprogramována konverze signálu na komplexní obálku, převzorkování a ekvalizace signálu. V této práci je zejména vybraná metoda lineární ekvalizace testována v různých podmínkách.

Klíčová slova

bistatický radar, analýza signálu, zpracování signálu, Dopplerův posun, ekvalizace

Title

Signal processing methods for bistatic radar

Annotation

The work focuses on a bistatic radar, utilizing FM radio broadcasters. In the theoretical part the principles of the bistatic radar, FM radio signal properties and its processing methods are described. In the practical part, a FM radio signal was first recorded. Then signal processing algorithms in MATLAB including the complex envelope generation, signal resampling and equalization were programmed and tested with the recorded FM radio signals. In this work mainly the linear equalization method was examined and tested in various conditions.

Keywords

Bistatic radar, signal analysis, signal processing, Doppler shift, equalization,

Obsah

1	Bistatický radar	14
1.1	Úvod	14
1.2	Principy.....	15
1.3	Rovnice bistatického radaru	17
1.4	Dynamika přijímaných signálů.....	17
1.5	Zpracování signálu	18
2	Vysílání FM rozhlasu	21
3	Měření signálu	22
3.1	Zpracování signálu v prostředí MATLAB	23
3.1.1	Charakteristiky používaného vzorku FM signálu.....	23
3.1.2	Simulace referenčního a cílového kanálu.....	26
3.1.3	Popis systému lineární ekvalizace	26
3.1.4	Ekvalizační rovnice	26
4	Testování ekvalizační metody	29
4.1	Vliv úrovně šumu v referenčním kanálu na výsledky	29
4.1.1	Odstup signálu v referenčním kanálu od šumu 100 dB.....	29
4.1.2	Odstup signálu v referenčním kanálu od šumu 50 dB.....	31
4.1.3	Odstup signálu v referenčním kanálu od šumu 20 dB.....	32
4.1.4	Odstup signálu v referenčním kanálu od šumu 10 dB.....	33
4.1.5	Účinnost ekvalizace při různém odstupu signálu od šumu v referenčním kanálu	34
4.2	Vliv úrovně clutteru v referenčním kanálu na výsledky.....	35
4.2.1	Odstup signálu v referenčním kanálu od clutteru 50 dB	35
4.2.2	Odstup signálu v referenčním kanálu od clutteru 20 dB	37
4.2.3	Odstup signálu v referenčním kanálu od clutteru 10 dB	38
4.2.4	Účinnost ekvalizace při různém odstupu signálu od clutteru v referenčním kanálu	39
5	Rozdělení zpracovávaného signálu na více částí.....	41
5.2	Rozdělení signálu na dvě části.....	41
5.2.1	Výsledky vypočítané z první poloviny	41
5.2.2	Výsledky vypočítané z druhé poloviny	43
5.2.4	Porovnání výsledků pro obě části.....	44
5.3	Rozdělení signálu na čtyři části	45
5.3.1	První čtvrtina	45
5.3.2	Druhá čtvrtina	47
5.3.3	Třetí čtvrtina	49
5.3.4	Poslední čtvrtina	50
5.3.5	Porovnání výsledků ze všech částí signálu.....	52
5.4	Rozdělení signálu na osm částí.....	53

5.4.1	První osmina.....	53
5.4.2	Druhá osmina.....	55
5.4.3	Třetí osmina.....	57
5.4.4	Porovnání výsledků ze všech částí	58
5.5	Rozdělení signálu na šestnáct částí.....	59
5.5.1	První šestnáctina.....	59
5.5.2	Druhá šestnáctina.....	61
6	Ověření přítomnosti Dopplerovského signálu.....	63
7	Závěr.....	64

Seznam obrázků

Obr. 1 Princip bistatického radaru [3]	14
Obr. 2 Radarový systém na principu bistatického radaru, využívající několika vysílačů a jednoho přijímače [4].....	15
Obr. 3 Určení polohy cíle triangulací (stanovení průsečíku elips) [4]	16
Obr. 4 Porovnání úrovní signálů přijímaných přijímačem [4]	18
Obr. 5 Popis zpracování signálů v bistatickém radaru [4].....	19
Obr. 6 Spektrum zakódovaného stereofonního signálu (ZSS) [3].....	21
Obr. 7 Měřicí pracoviště	22
Obr. 8 Tříprvkový dipól pro příjem FM rádia	23
Obr. 9 Zaznamenaný signál	24
Obr. 10 Amplitudové spektrum zaznamenaného signálu	24
Obr. 11 Amplitudová frekvenční charakteristika filtru	25
Obr. 12 Absolutní hodnota komplexní obálky signálu.....	25
Obr. 13 Obecné schéma matice A	27
Obr. 14 Zobrazení prvních třech řádků matice A.....	27
Obr. 15 Zadané amplitudy replik přímého signálu v pracovním kanálu	29
Obr. 16 Vypočítané amplitudy replik přímého signálu v pracovním kanálu při odstupu signálu od šumu v referenčním kanálu 100 dB.....	30
Obr. 17 Porovnání úrovně signálu v pracovním kanálu s_p a zbytkového signálu z , při odstupu signálu od šumu v referenčním kanálu 100 dB.....	30
Obr. 18 Vypočítané amplitudy replik přímého signálu v pracovním kanálu při odstupu signálu od šumu v referenčním kanálu 50 dB.....	31
Obr. 19 Porovnání úrovně signálu v pracovním kanálu s_p a zbytkového signálu z , při odstupu signálu od šumu v referenčním kanálu 50 dB.....	31
Obr. 20 Vypočítané amplitudy replik přímého signálu v pracovním kanálu při odstupu signálu od šumu v referenčním kanálu 20 dB.....	32
Obr. 21 Porovnání úrovně signálu v pracovním kanálu s_p a zbytkového signálu z , při odstupu signálu od šumu v referenčním kanálu 20 dB.....	33
Obr. 22 Vypočítané amplitudy replik přímého signálu v pracovním kanálu při odstupu signálu od šumu v referenčním kanálu 10 dB.....	33
Obr. 23 Porovnání úrovně signálu v pracovním kanálu s_p a zbytkového signálu z , při odstupu signálu od šumu v referenčním kanálu 10 dB.....	34
Obr. 24 Vypočítané amplitudy replik přímého signálu v pracovním kanálu při odstupu signálu od clutteru v referenčním kanálu 50 dB	36
Obr. 25 Porovnání úrovně signálu v pracovním kanálu s_p a zbytkového signálu z , při odstupu signálu od clutteru v referenčním kanálu 50 dB.	36

Obr. 26 Vypočítané amplitudy replik přímého signálu v pracovním kanálu při odstupu signálu od clutteru v referenčním kanálu 20 dB	37
Obr. 27 Porovnání úrovně signálu v pracovním kanálu <i>sp</i> a zbytkového signálu <i>z</i> , při odstupu signálu od clutteru v referenčním kanálu 20 dB	37
Obr. 28 Vypočítané amplitudy replik přímého signálu v pracovním kanálu při odstupu signálu od clutteru v referenčním kanálu 10 dB	38
Obr. 29 Porovnání úrovně signálu v pracovním kanálu <i>sp</i> a zbytkového signálu <i>z</i> , při odstupu signálu od clutteru v referenčním kanálu 20 dB	38
Obr. 30 Vypočítané amplitudy replik přímého signálu v pracovním kanálu pro první polovinu signálu	41
Obr. 31 Porovnání úrovně signálu v pracovním kanálu <i>sp</i> a zbytkového signálu <i>z</i> , pro první polovinu signálu.	42
Obr. 32 Porovnání úrovně signálu v pracovním kanálu <i>sp</i> a zbytkového signálu <i>z</i> , vypočítaného pomocí vektoru <i>f</i> z druhé části signálu.....	42
Obr. 33 Vypočítané amplitudy replik přímého signálu v pracovním kanálu pro druhou polovinu signálu	43
Obr. 34 Porovnání úrovně signálu v pracovním kanálu <i>sp</i> a zbytkového signálu <i>z</i> , pro první polovinu signálu.	43
Obr. 35 Porovnání úrovně signálu v pracovním kanálu <i>sp</i> a zbytkového signálu <i>z</i> , vypočítaného pomocí vektoru <i>f</i> z první části signálu.	44
Obr. 36 Vypočítané amplitudy replik přímého signálu v pracovním kanálu pro první čtvrtinu	46
Obr. 37 Porovnání úrovně signálu v pracovním kanálu <i>sp</i> a zbytkového signálu <i>z</i> , pro první čtvrtinu.	46
Obr. 38 Porovnání úrovně signálu v pracovním kanálu <i>sp</i> a zbytkového signálu <i>z</i> , vypočítaného pomocí vektoru <i>f</i> ze druhé čtvrtiny.	47
Obr. 39 Vypočítané amplitudy replik přímého signálu v pracovním kanálu pro druhou čtvrtinu.....	48
Obr. 40 Porovnání úrovně signálu v pracovním kanálu <i>sp</i> a zbytkového signálu <i>z</i> , pro druhou čtvrtinu.	48
Obr. 41 Vypočítané amplitudy replik přímého signálu v pracovním kanálu pro třetí čtvrtinu.....	49
Obr. 42 Porovnání úrovně signálu v pracovním kanálu <i>sp</i> a zbytkového signálu <i>z</i> , pro třetí čtvrtinu.	49
Obr. 43 Porovnání úrovně signálu v pracovním kanálu <i>sp</i> a zbytkového signálu <i>z</i> , vypočítaného pomocí vektoru <i>f</i> ze druhé čtvrtiny.	50
Obr. 44 Vypočítané amplitudy replik přímého signálu v pracovním kanálu pro poslední čtvrtinu	51
Obr. 45 Porovnání úrovně signálu v pracovním kanálu <i>sp</i> a zbytkového signálu <i>z</i> , pro poslední čtvrtinu.	51

Obr. 46 Porovnání úrovně signálu v pracovním kanálu sp a zbytkového signálu z , vypočítaného pomocí vektoru \mathbf{f} ze druhé čtvrtiny.	52
Obr. 47 Vypočítané amplitudy replik přímého signálu v pracovním kanálu pro první osminu	54
Obr. 48 Porovnání úrovně signálu v pracovním kanálu sp a zbytkového signálu z , pro první osminu	54
Obr. 49 Porovnání úrovně signálu v pracovním kanálu sp a zbytkového signálu z , vypočítaného pomocí vektoru \mathbf{f} ze druhé osminy.	55
Obr. 50 Vypočítané amplitudy replik přímého signálu v pracovním kanálu pro druhou osminu signálu.....	56
Obr. 51 Porovnání úrovně signálu v pracovním kanálu sp a zbytkového signálu z , pro druhou osminu signálu.....	56
Obr. 52 Vypočítané amplitudy replik přímého signálu v pracovním kanálu pro třetí osminu signálu	57
Obr. 53 Porovnání úrovně signálu v pracovním kanálu sp a zbytkového signálu z , pro třetí osminu signálu	57
Obr. 54 Porovnání úrovně signálu v pracovním kanálu sp a zbytkového signálu z , vypočítaného pomocí vektoru \mathbf{f} ze druhé osminy.	58
Obr. 55 Vypočítané amplitudy replik přímého signálu v pracovním kanálu pro první šestnáctinu	60
Obr. 56 Porovnání úrovně signálu v pracovním kanálu sp a zbytkového signálu z , pro první šestnáctinu	60
Obr. 57 Vypočítané amplitudy replik přímého signálu v pracovním kanálu pro třetí osminu.....	61
Obr. 58 Porovnání úrovně signálu v pracovním kanálu sp a zbytkového signálu z , pro druhou šestnáctinu	61
Obr. 59 Autokorelační funkce	63

Seznam tabulek:

Tab.1 Porovnání výkonů zbytkového signálu při různém odstupu signálu od šumu.....	36
Tab.2 Porovnání velikosti jednotlivých replik přímého signálu.....	35
Tab.3 Porovnání výkonů zbytkového signálu při různém odstupu signálu od šumu v referenčním kanálu.	39
Tab.4 Porovnání velikosti jednotlivých replik přímého signálu.....	40
Tab.5 Porovnání výkonů zbytkového signálu a signálu v pracovním kanálu při rozdělení signálu na dvě části.	45
Tab.6 Porovnání výkonů zbytkového signálu a signálu v pracovním kanálu při rozdělení signálu na čtyři části.	53
Tab.6 Porovnání výkonů zbytkového signálu a signálu v pracovním kanálu při rozdělení signálu na osm částí.	59

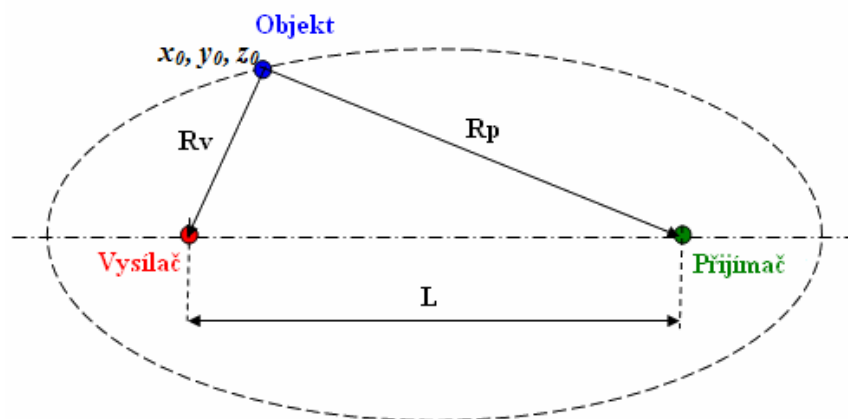
Seznam použitých symbolů

R_d	bistatická vzdálenost
R_v	vzdálenost od vysílače k odražejícímu objektu
R_p	vzdálenost od odražejícího objektu k přijímači
L	vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem
PCL	pasivní koherentní lokace
TDOA	časové zpoždění mezi přímým a odraženým signálem
ERP	efektivní vyzářený výkon
s_r	signál v referenčním kanálu
s_p	signál v pracovním kanálu
P_{sp}	výkon signálu v pracovním kanálu
P_z	výkon zbytkového signálu z
y	signál v pracovním kanálu (v maticových rovnicích)
f	vektor amplitud replik přímého signálu
z	zbytkový signál bez replik přímého signálu
A	matice s posouvaným signálem z referenčního kanálu
F_s	vzorkovací frekvence
U	napětí
t	čas
SNR	odstup signálu od šumu
PVR	potlačení výkonu replik
FM	frekvenční modulace
VKV	velmi krátké vlny
ZSS	zakódovaný stereofonní signál
RDS	systemy vysílání doplňkových informací s FM signálem
FIR	filtr s konečnou impulsní odezvou

1 Bistatický radar

1.1 Úvod

V posledních letech se vyvíjí stále více radarových systémů založených na bázi bistatického radaru. Jsou to takzvané pasivní radarové systémy, jelikož žádné signály samy nevysílají, ale pouze přijímají signály od dostupných nespolupracujících vysílačů a to signály přímé a odražené a ty poté vyhodnocují. Tyto systémy využívají například vysílače televizní, radiové, mobilní základnové stanice sítě GSM nebo satelitní vysílače. Signály z takovýchto vysílačů pokrývají svým signálem velké množství obydlených oblastí a jsou potenciálně vhodné k detekci objektů, pohybujících se ve vzdušném prostoru (např. letadel, ultralehkých letadel, vrtulníků, balónů a vzducholodí). Přijímač tzv. bistatického radaru vyhodnocuje zpoždění a Dopplerův posuv odražených signálů a z toho vyhodnocuje polohu a rychlost objektu (cíle). Vývoj metod zpracování signálu v bistatickém radaru je založen na podrobné znalosti vlastností těchto signálů. Základní princip je na obr.1. Přímý signál od vysílače urazí dráhu L a signál odražený urazí na cestě k přijímači dráhu $R_b = R_v + R_p$. Vzdálenost R_b je takzvaná bistatická vzdálenost a její velikost se dá určit pomocí časového zpoždění mezi přímým a odraženým signálem (TDOA). Přijímač přijímá přímé a odražené signály a porovnává je mezi sebou. [1,2,5,9,10,11]



Obr. 1 Princip bistatického radaru [3]

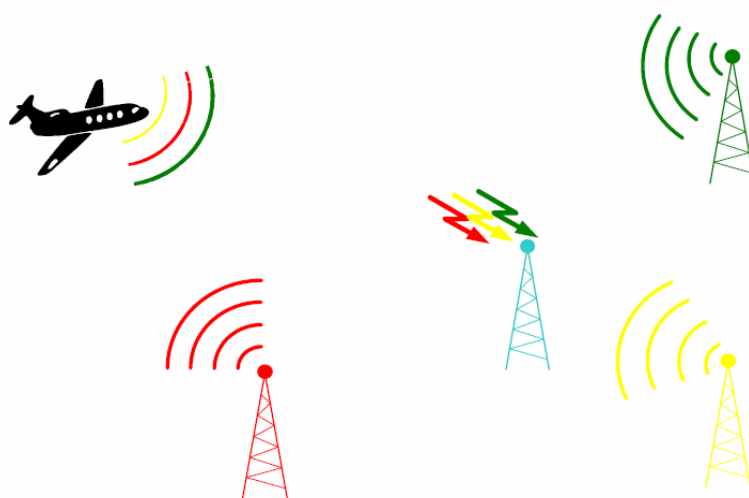
Pasivní radarové systémy používané pro detekci pozice a dráhy pohybujících se objektů mají v České republice dlouhou tradici. V poslední době se zvýšila aktivita ve vývoji těchto systémů v mnoha výzkumných centrech a na mnoha univerzitách v mnoha zemích.

U bistatického radaru jsou na rozdíl od radaru monostatického vysílač a přijímač od sebe odděleny. Vzdálenost, která je mezi nimi je srovnatelná se vzdáleností, v jaké se nachází cíl od přijímače nebo vysílače. První systémy založené na bázi bistatického radaru

byly konstruovány v období před druhou světovou válkou. V dalším období ale převažoval vývoj radarových systémů založených na klasické koncepci (monostatický aktivní radar) kde je vysílač i přijímač na jednom místě. A to především kvůli výhodám, jakými jsou: snadná synchronizace, méně problémů s koherencí vysílače a přijímače, a lepší využití vysílaného výkonu. Ale přesto čas od času se nějaké systémy založené na bázi bistatického radaru objevily. Oživení zájmu o oblast bistatických radarů v posledních letech určitě zapříčinily snadno přístupné výkonné digitální technologie, husté pokrytí povrchu Země různými druhy signálů reprezentovaných elektromagnetickým vlněním, které jsou potenciálně těmito systémy využitelné.[2,5,6,8]

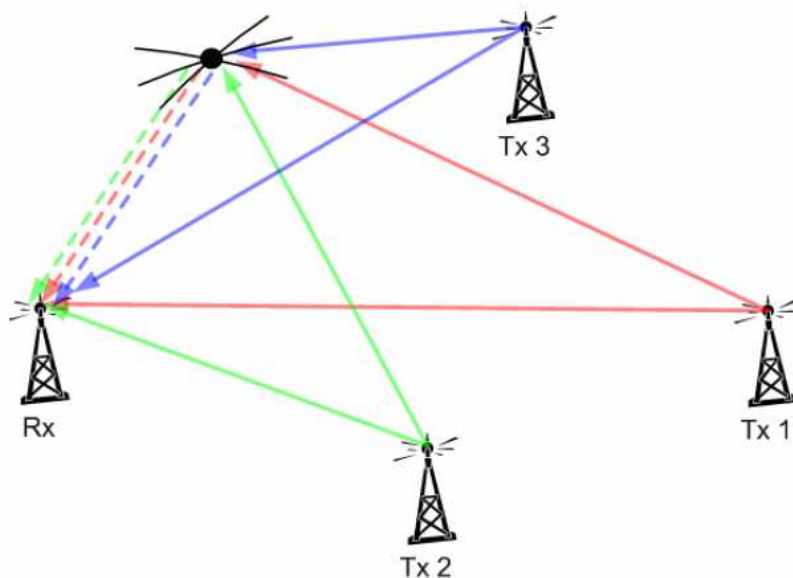
Pro tento druh radarových systémů se též používá název pasivní koherentní lokace (PCL). Tyto systémy jsou založeny na využití různých vysílačů (FM radio, digitální nebo analogová televize, GSM základnové stanice, atd.). Vysílače pokrývají svým signálem sledovanou oblast a PCL systémy přijímají a sbírají signály přímé (vysílač-přijímač) a signály odražené od okolních objektů (vysílač-objekt-přijímač). Porovnáním přímého a odražených signálů je možné zjistit pozici a rychlost objektů od kterých se signály odrazily. Pro implementaci takových radarových systémů stačí pouze jednoduchý přijímač, celá obtížnost těchto systémů vězí v digitálním zpracování signálů. Neustále se objevují nové metody zpracování signálů a dat které také přispívají k velkému rozvoji těchto systémů. Nevýhodou je, že signál nespolečných komerčních vysílačů, které tyto systémy využívají, nemá z hlediska určování polohy vhodnou kvalitu. A také je diskutabilní využití těchto systémů v aplikacích, které musí být bezpečné (možné výpadky využívaných vysílačů), ale takovéto systémy mohou být jednoduše vylepšeny přidáním vlastního vysílače. [2,5,6,8]

1.2 Principy



Obr. 2 Radarový systém na principu bistatického radaru, využívající několika vysílačů a jednoho přijímače [4]

Radarové systémy na bázi bistatického radaru obsahují obvykle několik vysílačů a několik přijímačů, které jsou umístěny jednotlivě ve velkých vzdálenostech, jak je vidět na obr. 2. Systém pak může být použit ke sledování objektů nad celou oblastí, kterou svými signály vysílače pokrývají. Mezi jednotlivými vysílači a mezi vysílači a přijímači není potřeba žádná synchronizace. Každý přijímač přijímá signály šířící se od vysílače přímou cestou a signály odražené. Signály mohou být odražené od statických objektů, jako např. od budov, od terénních nerovností, stromů a různých dalších překážek (v angličtině se pro tyto nepohyblivé se překážky používá název clutter) nebo mohou být odražené od pohyblivých objektů, jako např. letadla, vzducholodě, atd.. Všechny možné pozice cíle pro jednu konkrétní bistatickou vzdálenost (tedy pro jedno konkrétní časové zpoždění TDOA), se nacházejí na elipse, která má jedno ohnisko v místě vysílače a druhé v místě přijímače jak je vidět na obr.1. Rozlišení pohyblivých a nepohyblivých cílů se provádí pomocí Dopplerova frekvenčního posunu, pokud je tento posun nulový, jedná se o nepohyblivý cíl, pokud má nenulovou hodnotu, jedná se o pohyblivý cíl. Dopplerův posun souvisí s vektorovými elementy rychlosti pohybujícího se cíle. Pro určení přesné polohy pohybujícího se cíle jsou potřeba minimálně dva vysílače, kdy polohu nalezneme na průsečisku dvou elips příslušejícím jednotlivým dvojicím vysílač1-přijímač a vysílač2-přijímač. Na obr. 3 je zobrazen systém, skládající se ze tří vysílačů. [2,5,6,8]



Obr. 3 Určení polohy cíle triangulací (stanovení průsečíku elips) [4]

Ovšem v případě kdy je přítomno více než jeden cíl nastává problém s eliminací falešných cílů. Každý cíl generuje právě jednu elipsu pro každou jednotlivou dvojici vysílač-přijímač. Když je k dispozici N dvojic vysílač-přijímač a M cílů, vznikne $2M^N$ průsečíků elips, ale pouze M průsečíků odpovídá pozicím reálných cílů. Musí se tedy eliminovat všechny falešné cíle.[2]

1.3 Rovnice bistatického radaru

Radarová rovnice (1.1) je v případě bistatického radaru komplikovanější než pro radar monostatický. Radarová rovnice je vlastně vztah mezi vyslaným a přijatým výkonem. Vyjadřuje energetickou bilanci u radaru, napomáhá pochopení souvislostí mezi základními parametry radaru jako jsou dosah, výkon, rychlost prohledávání prostoru apod. Rovnice bistatického radaru má tvar:

$$P_R = P_T G_T G_R \frac{f_T^2(\Phi, \Theta) f_R^2(\Phi, \Theta) \lambda^2 \sigma_B}{(4\pi)^3 R_T^2 R_R^2 L_{TR}} \quad (1.1)$$

P_T je vyslaný výkon

P_R je přijatý výkon

G_T je zisk vysílací antény

G_R je zisk přijímací antény

$f_T^2(\Phi, \Theta)$ je výkonová charakteristika vysílací antény

$f_R^2(\Phi, \Theta)$ je výkonová charakteristika přijímací antény

λ je vlnová délka vysílaného signálu

σ_B je efektivní odrazová plocha cíle

L_{TR} jsou ztráty signálu na cestě od vysílače k přijímači

R_T je vzdálenost od cíle k vysílači

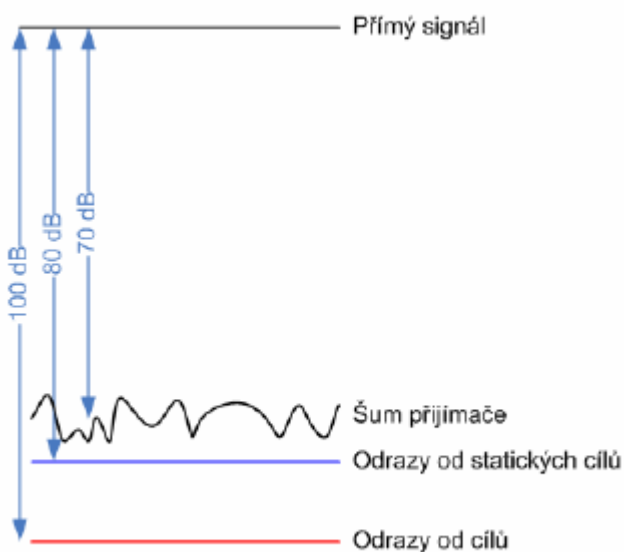
R_R je vzdálenost od cíle k přijímači

V případě bistatického radaru je většinou vysílací anténa všesměrová, tudíž může být z rovnice vypuštěna výkonová charakteristika vysílací antény $f_T^2(\Phi, \Theta)$. V některých případech bývá součin $P_T G_T$ nahrazen efektivním vyzářeným výkonem ERP. [2]

1.4 Dynamika přijímaných signálů

Pasivní radar vyhodnocuje signály odražené od povrchu cíle. Radarový systém analyzuje přijaté odražené signály a s využitím referenčního signálu přijatého přímou cestou od zdroje určuje polohu cíle. Jeden z hlavních problémů technické realizace takového radarového systému je velká dynamika přijímaných signálů (současný příjem

slabého odraženého a silného přímého signálu). Porovnání úrovní přijímaných signálů je na obr. 4.



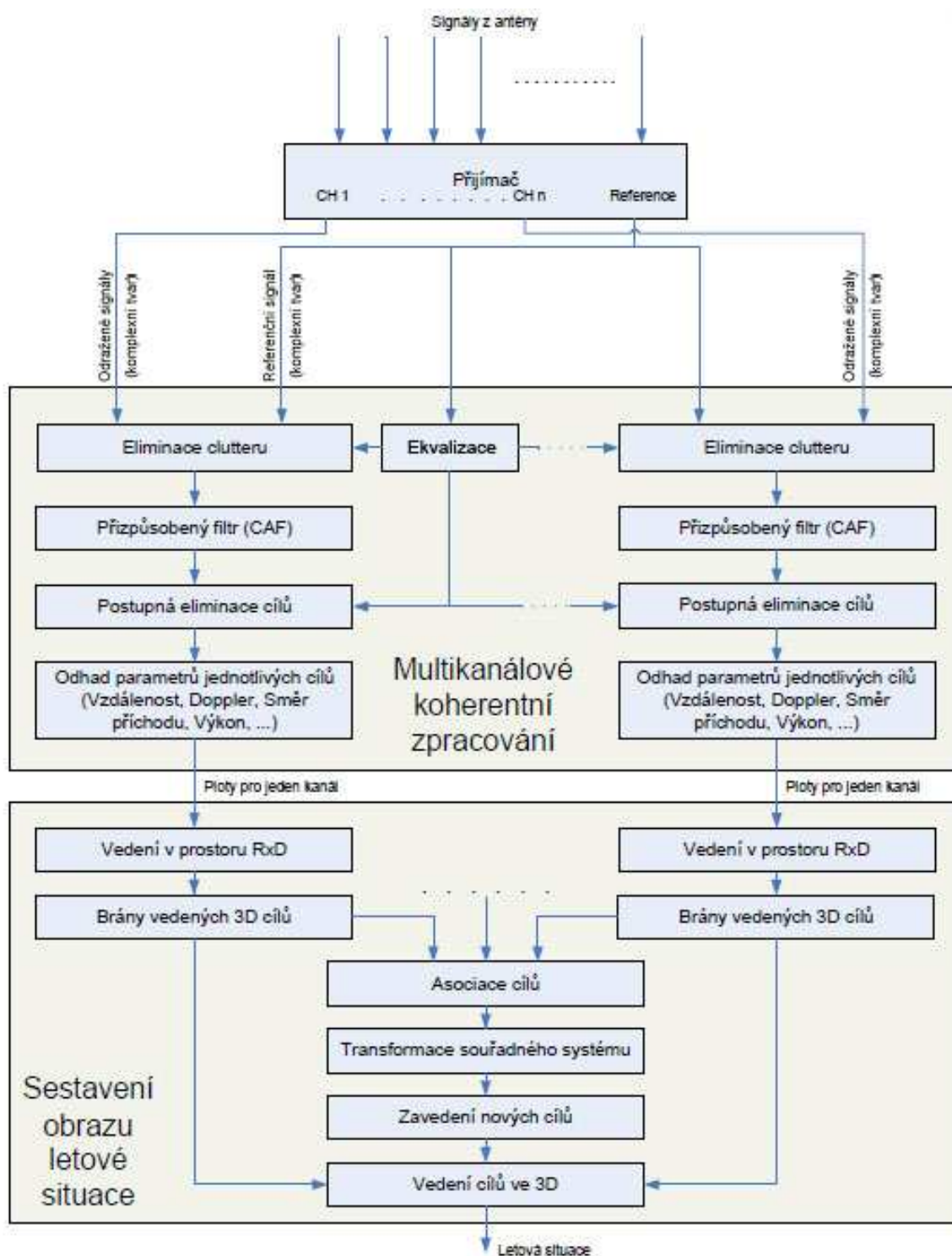
Obr. 4 Porovnání úrovní signálů přijímaných přijímačem [4]

Úroveň signálů odražených od pohyblivých objektů (cílů) je přibližně o 20-40 dB menší než úroveň signálů odražených od nepohyblivých objektů (clutter), A až o 100 dB menší než úroveň signálu přijatého přímou cestou od vysílače. V přijatém signálu je také elektromagnetické rušení, jehož úroveň je přibližně o 30 dB vyšší, než úroveň signálu odražených od pohyblivých objektů a také tepelný šum jehož úroveň je přibližně 8 dB nad užitečným signálem. Aby bylo možné detekovat pohyblivé cíle, je potřeba aby úroveň rušivých signálů byla alespoň o 15 dB menší než úroveň signálů odražených od pohyblivých objektů. Signály tedy nemohou být přijímány pouze jednou anténou, ale jsou zapotřebí minimálně dvě antény (dva kanály). Jeden kanál se nazývá referenční a používá se k získání přímého signálu od vysílače, druhý kanál se nazývá pracovní (cílový), u tohoto kanálu je potlačen příjem v přímém směru k vysílači. Zde se provádí také potlačení šumu, například integrací. [2,5]

1.5 Zpracování signálu

Schéma zpracování signálu v bistatickém radaru je na obr. 5. Ve vstupní části jsou přijímané signály z každého anténního elementu digitalizovány a převedeny na komplexní obálku. Počet pracovních kanálů CH1 - CHn v systému, je dán počtem využívaných vysílačů. Referenční signál je signál, který přišel od vysílače přímou cestou. Signály od každého vysílače jsou zpracovávány odděleně. Ve všech kanálech systému (zpracování signálu od jednoho vysílače) je prováděna eliminace clutteru (odraz od nepohyblivých

objektů), je počítána vzájemná funkce neurčitosti a dále je prováděno rozpoznávání jednotlivých pohyblivých cílů. [2,5,6]

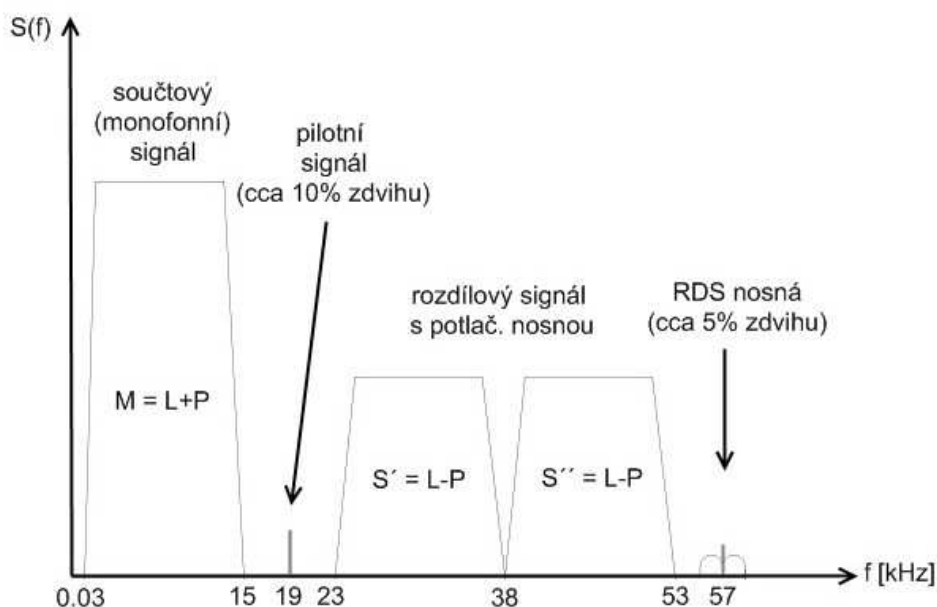


Obr. 5 Popis zpracování signálů v bistatickém radaru [4]

K detekci objektů na principu bistatického radaru se dá použít mnoho druhů signálů, např. signály televizního a rozhlasového vysílání na různých kmitočtech. Obsahem této práce je implementace lineární ekvalizace při použití zaznamenaných vzorků signálu FM rozhlasu.

2 Vysílání FM rozhlasu

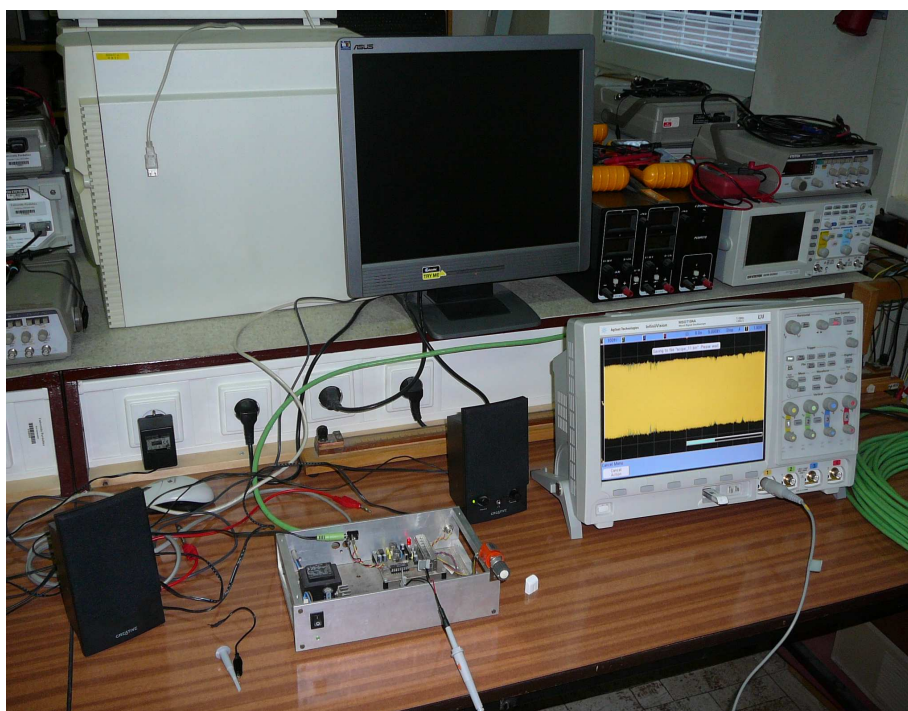
Frekvenční modulace signálu se provádí tak, že se mění kmitočet nosné vlny podle průběhu modulačního signálu. FM rozhlas se vysílá v pásmu velmi krátkých vln (VKV) to je od 30 MHz do 300 MHz. FM rozhlasem se vysílá stereofonní rozhlasové vysílání. Šíří se dva nezávislé kanály levý $u_L(t)$ a pravý $u_P(t)$. Každý v rozsahu 30 Hz až 15 kHz. Spektrum zakódovaného stereofonního FM signálu, které je na obr. 6, obsahuje pilotní signál $f_p = 19$ kHz. Tento signál slouží pro synchronizaci demodulátoru rozdílového kanálu (obnova subnosné 38 kHz). Doplnkové informace: dopravní informace, informace o programech, automatické ladění (RDS) mají subnosnou 57 kHz. [3]



Obr. 6 Spektrum zakódovaného stereofonního signálu (ZSS) [3]

3 Měření signálu

Samotné zachycení signálu FM rozhlasu probíhalo ve školní laboratoři. K dispozici byl školní přípravek, přijímač TES 25S pro příjem FM rádia a digitální osciloskop Agilent MS07104A, který je vybaven konektorem USB pro připojení vnější paměti, na kterou se dá zaznamenaný signál uložit a následně přenést do počítače. Měřící pracoviště je na obr. 7.



Obr. 7 Měřící pracoviště

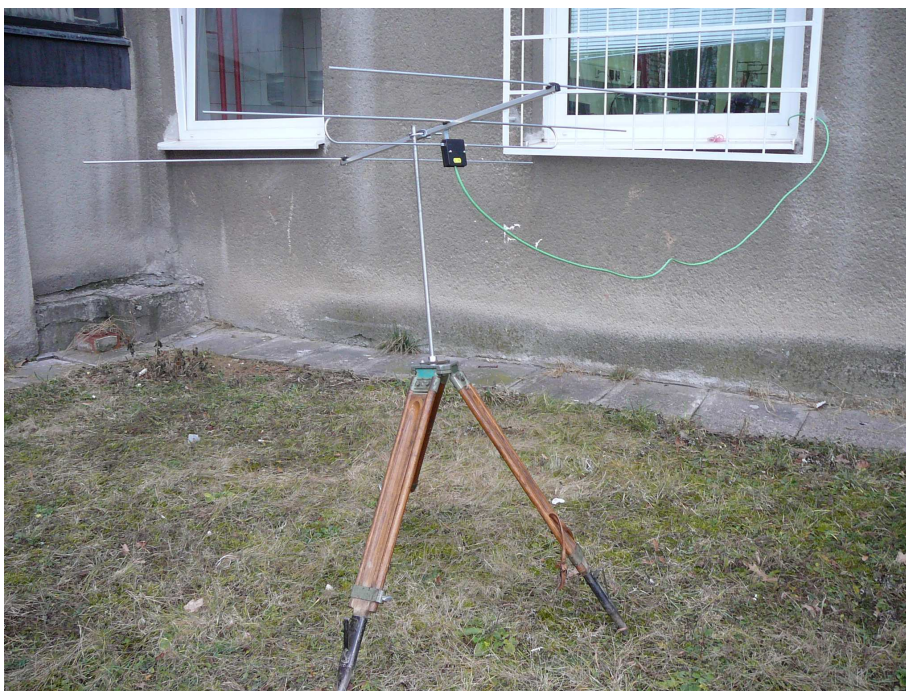
Na přijímači byl naladěný signál rádia Profil na frekvenci 96,9 MHz, který je vysílán z telekomunikační věže v centru Pardubic a vysílací výkon vysílače je 1 kW. Osciloskopem byl snímán mezifrekvenční signál, který je v tomto přijímači 10,7 MHz. Vzorkovací frekvence byla 160 MHz. Takto byl zaznamenaný signál o délce: kde: $F_s = 160$ MHz je vzorkovací kmitočet

$$t = \frac{\text{poč. vzorků}}{F_s} = \frac{8 \cdot 10^6}{160 \cdot 10^6} = 50 \text{ ms} \quad (3.1)$$

kde: $F_s = 160$ MHz je vzorkovací kmitočet

Po prvotním vyhodnocení kvality signálu, byla k přípravku připojena ještě anténa a to tříprvkový dipól pro příjem FM rádia se ziskem 4,5 dB, který je na obr. 8. Byly zaznamenány signály pro různé druhy obsahu, např. hudba – různé typy, mluvené slovo atd. A byl vybrán vzorek s nejlepšími vlastnostmi pro použití pro detekci objektů

pohybujících se ve vzduchu, což bylo obsahem jiné práce (bakalářská práce [3]). S tímto vzorkem byla dále prováděna v prostředí MATLAB lineární ekvalizace.



Obr. 8 Tříprvkový dipól pro příjem FM rádia

3.1 Zpracování signálu v prostředí MATLAB

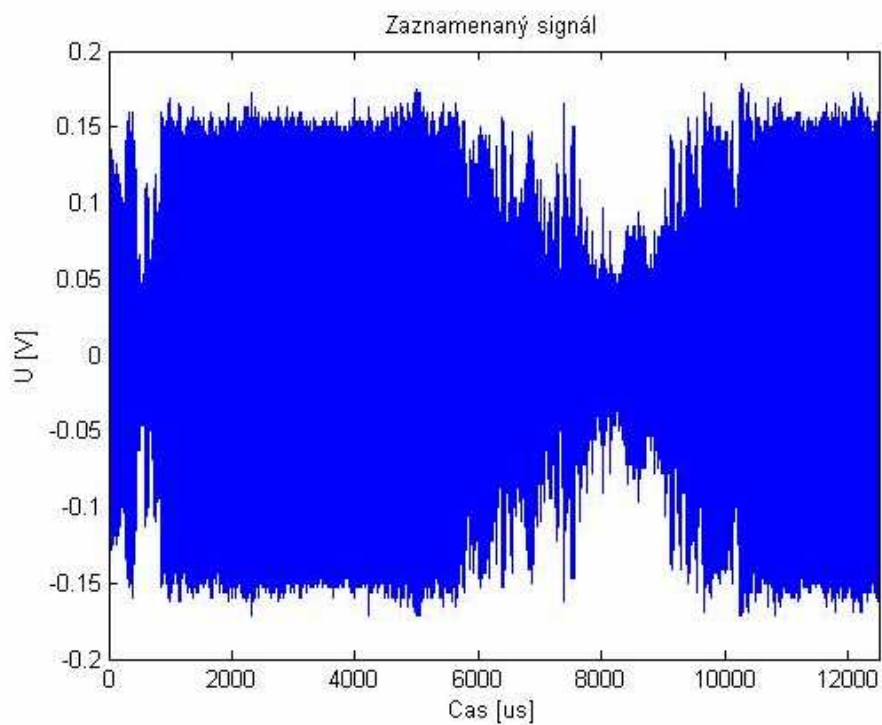
Původní zaznamenaný úsek signálu (8 mil. vzorků) byl zkrácen na 2 mil. vzorků, protože při vyšším počtu vzorků nebyl MATLAB schopen kvůli problémům s pamětí požadované vztahy vypočítat. Délka zpracovávaného signálu v čase je tedy:

$$t = \frac{\text{poč. vzorků}}{F_s} = \frac{2 \cdot 10^6}{160 \cdot 10^6} = 12,5 \text{ ms} \quad (3.2)$$

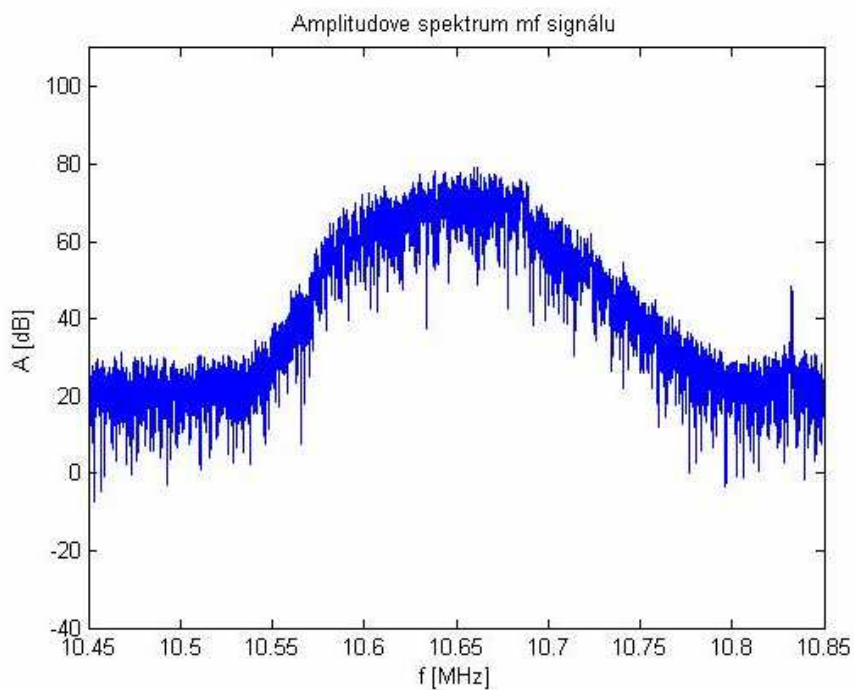
V programu bylo potřeba převést signál na komplexní obálku, protože byl zaznamenan signál na mezifrekvenci FM přijímače TES 25S, která je přibližně 10,7 MHz. Bylo tedy prováděno směřování s mezifrekvenčním kmitočtem a následná filtrace.

3.1.1 Charakteristiky používaného vzorku FM signálu

Zde jsou uvedeny některé charakteristiky použitého vzorku FM signálu. Na obr. 9 je graf zaznamenaného signálu v časové oblasti, jedná se o mezifrekvenční signál přijímače TES 25S.



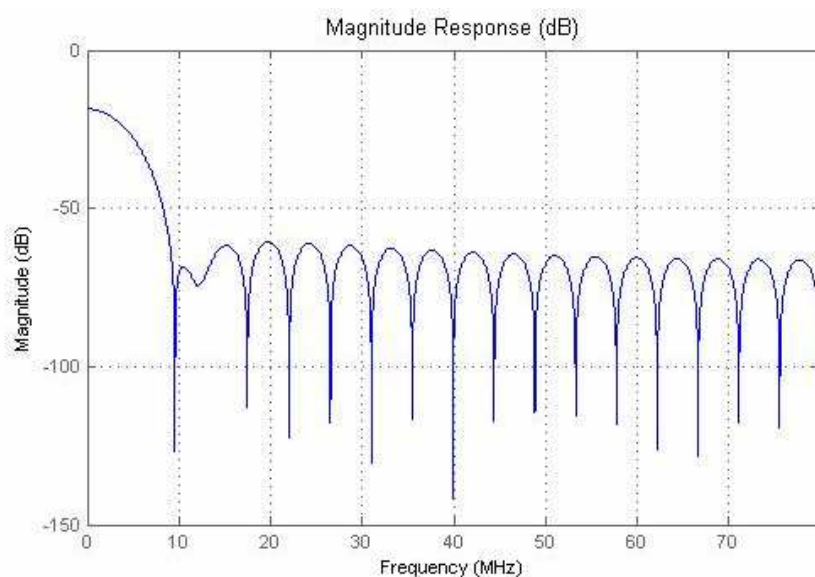
Obr. 9 Zaznamenaný signál



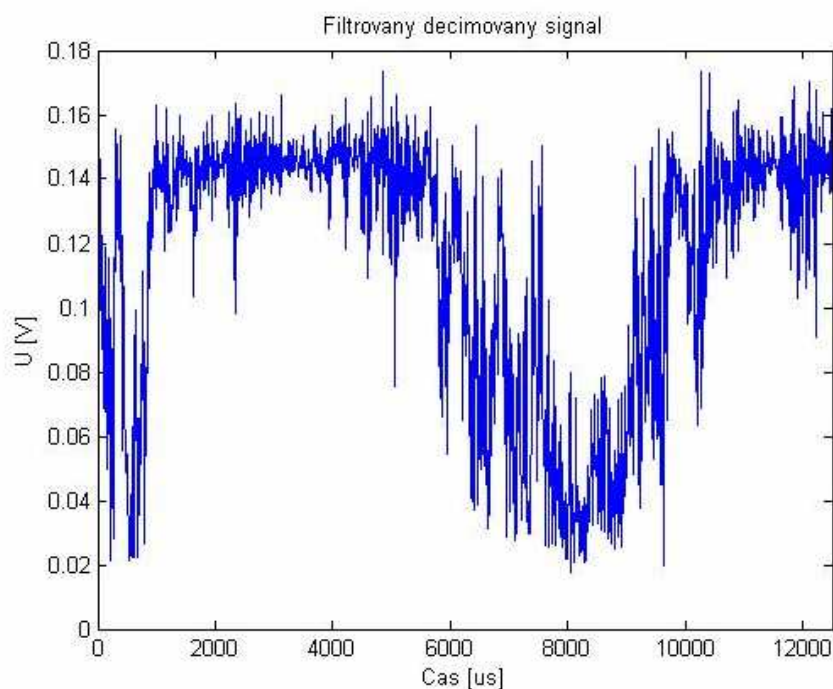
Obr. 10 Amplitudové spektrum zaznamenaného signálu

Na obr. 10 je amplitudové spektrum tohoto signálu, z grafu je patrné, že maximum spektra není přesně na frekvenci 10,7 MHz, ale přibližně 10,66 MHz. Signál byl tedy pro získání komplexní obálky násoben komplexní exponenciálou na frekvenci 10,65 MHz a následně filtrován. Filtrování bylo prováděno filtrem FIR s Hammingovým tvarem okna,

řád filtru byl 35, frekvenční přenos filtru je na obr. 11. Tento filtr byl navržen pomocí nástroje fda tool v MATLABU.



Obr. 11 Amplitudová frekvenční charakteristika filtru



Obr. 12 Absolutní hodnota komplexní obálky signálu

Šířka spektra mf signálu je menší než 100 kHz, nejvyšší frekvence obsažená v komplexní obálce je tedy menší, než 50 kHz takže je možné komplexní obálku vzorkovat frekvencí 100 kHz a bude dodrženo kritérium, že vzorkovací frekvence musí být minimálně dvakrát vyšší, než je nejvyšší frekvence obsažená v signálu. Signál komplexní obálky byl poté decimován 1600x, takže vzorkovací frekvence byla snížena ze 160 MHz

na 100 kHz počet vzorků se ze 2 milionů snížil na 1250 a čas mezi jednotlivými vzorky se při časové délce signálu 12, 5ms zvětšil z 6,25 ns na 10 μ s. Na obr. 12 je absolutní hodnota komplexní obálky původního zaznamenaného signálu po směšování s mezifrekvenčí po filtrování dolní propustí a po decimaci.

3.1.2 Simulace referenčního a cílového kanálu

Vzhledem k tomu, že nebylo k dispozici pracoviště pro získání signálů referenčního a pracovního (cílového) kanálu, bylo nutné tyto signály nasimulovat v softwarovém prostředí MATLAB. Toto provádí skript `biclutter.m`, který jsem získal od vedoucího práce. Tento skript tedy pomocí naměřeného FM signálu simuluje signál přijatý bistatickým radarem v referenčním kanálu (sr) a v pracovním kanálu (sp). U jednotlivých signálů je možné nastavit odstup užitečného signálu od šumu a také odstup užitečného signálu od clutteru. Toho jsem využíval při testování ekvalizační metody v různých podmínkách, kde jsem nastavoval různé hodnoty odstupu užitečného signálu od šumu a od clutteru v referenčním kanálu.

3.1.3 Popis systému lineární ekvalizace

Celý systém je tvořen dvěma skripty: `obalka.m`, a `zpracovani.m`, tyto skripty jsou uvedeny v příloze. Skript `biclutter.m` načte zaznamenaný MF signál a vytvoří z něj model signálu zkresleného vícecestným šířením. Generuje signály referenčního (sr) a pracovního (sp) kanálu. V referenčním kanálu, který simuluje kanál pomocí kterého se získává přímý signál z vysílače v co nejlepší kvalitě, jsou nastaveny větší odstupy užitečného signálu od šumu a od clutteru. Naopak v pracovním kanále je vliv clutteru a šumu významný. Dále je prováděno vyhodnocování výsledků ekvalizace v závislosti na nastavených různých úrovních odstupu signálu od šumu v referenčním kanále. Výstupem z ekvalizačních rovnic jsou vektory \mathbf{f} a \mathbf{z} . Vektor \mathbf{f} je vektorem amplitud replik přímého signálu a vektor \mathbf{z} je zbytkový signál, který zůstane po odstranění replik přímého signálu z pracovního kanálu.

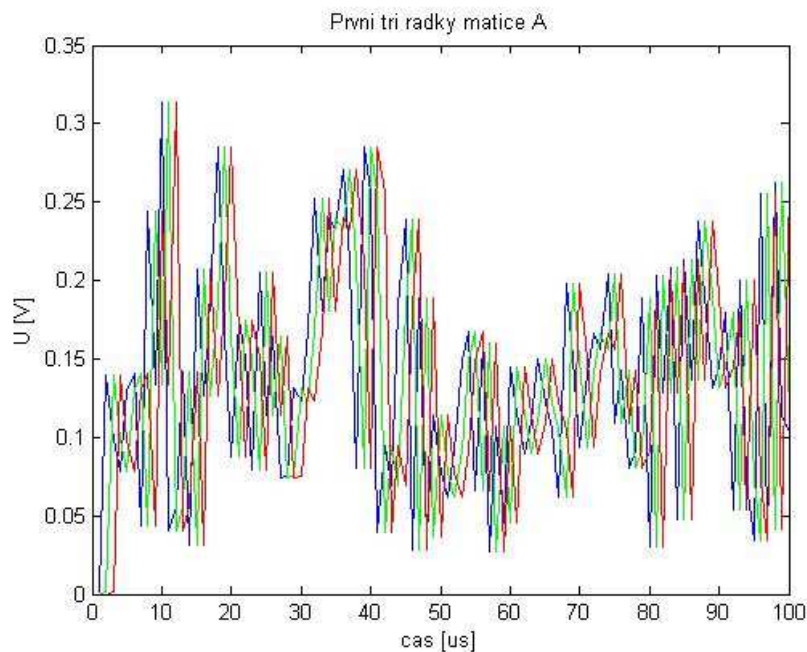
3.1.4 Ekvalizační rovnice

Hlavním cílem je odstranění replik přímého signálu z pracovního kanálu. Mimo již zmíněných vektorů \mathbf{f} a \mathbf{z} , rovnice obsahují ještě vektor \mathbf{y} a matici \mathbf{A} . Vektor \mathbf{y} představuje přijatý signál v pracovním kanálu obsahující repliky přímého signálu (sp). Výsledný vektor \mathbf{z} , vypočítaný z vektoru \mathbf{y} , je očištěný od replik přímého signálu a obsahuje už pouze šum a případný frekvenčně posunutý (Dopplerovský) signál, odražený od pohybujících se objektů. K výpočtu signálu \mathbf{z} , očištěného od replik přímého signálu z přijatého signálu \mathbf{y} se využívá matice \mathbf{A} která je vytvořena ze signálu z referenčního kanálu (sr) tak, že v jednotlivých řádcích matice je tento signál vždy posunutý o jeden vzorek. Počet sloupců matice \mathbf{A} odpovídá délce signálu sr po decimaci, matice \mathbf{A} má tedy 1250 sloupců. Počet řádků byl zvolen 70. Obecné schéma matice \mathbf{A} je na obr.13, kde jednotlivé vzorky $x_{(1)}, x_{(2)} \dots x_{(n)}$ jsou vzorky signálu v referenčním kanálu (sr).

$$\mathbf{A} = \begin{vmatrix} x_{(1)} & x_{(2)} & \dots & x_{(n)} \\ 0 & x_{(1)} & x_{(2)} & \dots & x_{(n-1)} \\ 0 & 0 & x_{(1)} & x_{(2)} & \dots & x_{(n-2)} \\ & & & \vdots & & \end{vmatrix}$$

Obr. 13 Obecné schéma matice A

Na obrázku 14 jsou na ukázkou v grafu zobrazeny první tři řádky matice A (úseky posunutých signálů s_r , pro větší názornost je zde zkrácený časový úsek 100 μs)



Obr. 14 Zobrazení prvních třech řádků matice A

Výpočet vektoru \mathbf{f} :

$$\text{Základní rovnice: } \mathbf{y} = \mathbf{f} \cdot \mathbf{A} + \mathbf{z} \quad (3.3)$$

Nejprve vyjádříme vektor \mathbf{f} z rovnice $\mathbf{y} = \mathbf{f} \cdot \mathbf{A}$ tak, že obě strany rovnice vynásobíme zprava výrazem $\mathbf{A}^H \cdot (\mathbf{A} \cdot \mathbf{A}^H)^{-1}$

$$\mathbf{y} \cdot \mathbf{A}^H \cdot (\mathbf{A} \cdot \mathbf{A}^H)^{-1} = \mathbf{f} \cdot (\mathbf{A} \cdot \mathbf{A}^H) \cdot (\mathbf{A} \cdot \mathbf{A}^H)^{-1}$$

Protože platí: $(\mathbf{A} \cdot \mathbf{A}^H) \cdot (\mathbf{A} \cdot \mathbf{A}^H)^{-1} = \mathbf{1} (\mathbf{I})$, tak:

$$\mathbf{f} = \mathbf{y} \cdot \mathbf{A}^H \cdot (\mathbf{A} \cdot \mathbf{A}^H)^{-1} \quad (3.4)$$

Výpočet vektoru \mathbf{z} :

Do rovnice (3.3) dosadíme za \mathbf{f} podle vztahu (3.4), dostáváme tedy :

$$\mathbf{y} = (\mathbf{y} \cdot \mathbf{A}^H \cdot (\mathbf{A} \cdot \mathbf{A}^H)^{-1}) \cdot \mathbf{A} + \mathbf{z}$$

Z toho vyplývá:

$$\mathbf{y} = \mathbf{y} \cdot \mathbf{A}^H \cdot (\mathbf{A} \cdot \mathbf{A}^H)^{-1} \cdot \mathbf{A} + \mathbf{z}$$

$$\mathbf{z} = \mathbf{y} - \mathbf{y} \cdot \mathbf{A}^H \cdot (\mathbf{A} \cdot \mathbf{A}^H)^{-1} \cdot \mathbf{A}$$

$$\mathbf{z} = \mathbf{y} \cdot (\mathbf{I} - \mathbf{A}^H \cdot (\mathbf{A} \cdot \mathbf{A}^H)^{-1} \cdot \mathbf{A}) \quad (3.5)$$

Zbytkový signál \mathbf{z} se dá také vypočítat pomocí vektoru \mathbf{f} , jak je naznačeno v následující rovnici. Při rozdělování signálu na více částí (jak je uvedeno dále), byla testována možnost výpočtu vektoru \mathbf{z} z vektoru \mathbf{f} , vypočítaného z jiné části signálu (aby se nemusel vektor \mathbf{f} počítat pro každou část signálu znovu). Byly tedy porovnávány výsledky při počítání vektoru \mathbf{f} v každé části signálu znovu, s výsledky při použití vektoru \mathbf{f} , vypočítaného většinou z druhé části i na všechny ostatní části signálu. Vektor \mathbf{f} se tedy vypočítá podle vztahu (3.4). A to v našem případě ze druhé části signálu (vektor \mathbf{y} představuje vždy druhou část rozděleného signálu, a to při rozdělení na čtvrtiny, osminy i šestnáctiny). V dalším výpočtu se pak používá stále tento vektor \mathbf{f} pro všechny ostatní části signálu. Zbytkový signál \mathbf{z} se v tomto případě vypočítá tak, že se vyjádří ze vztahu (3.3), platí tedy:

$$\mathbf{z} = \mathbf{f} \cdot \mathbf{A} - \mathbf{y} \quad (3.6)$$

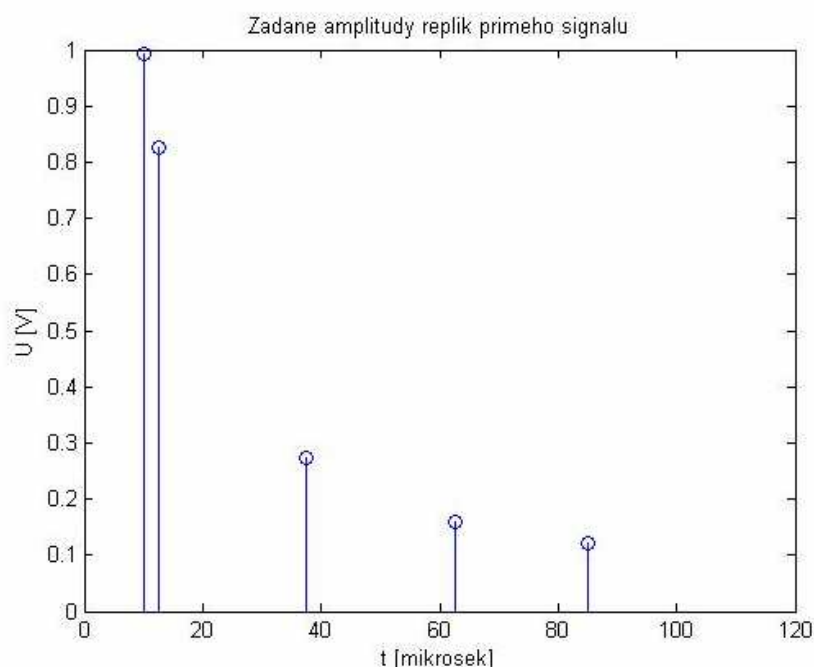
Ve kterém se pro jednotlivé části dosazuje daný vektor \mathbf{y} , vektor \mathbf{f} se již pro jednotlivé části nepře počítává a zůstává stejný.

4 Testování ekvalizační metody

Ekvalizační metoda byla testována v různých podmínkách. Pro různou úroveň šumu v referenčním kanálu, pro různou úroveň clutteru v referenčním kanálu a pro různou délku zpracovávaného signálu. Pro tyto účely byl zpracovávaný signál rozdělen na poloviny, čtvrtiny, osminy a šestnáctiny.

4.1 Vliv úrovně šumu v referenčním kanálu na výsledky

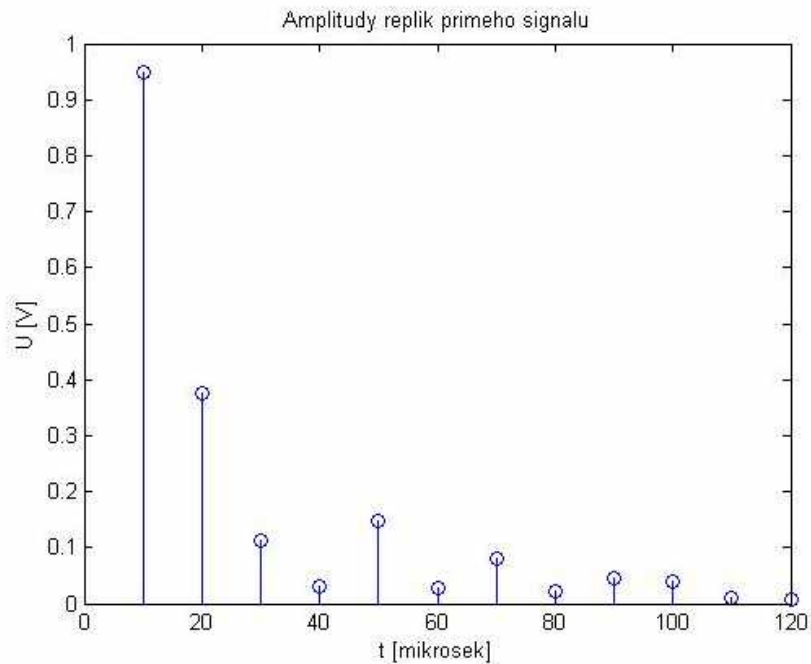
4.1.1 Odstup signálu v referenčním kanálu od šumu 100 dB



Obr. 15 Zadané amplitudy replik přímého signálu v pracovním kanálu

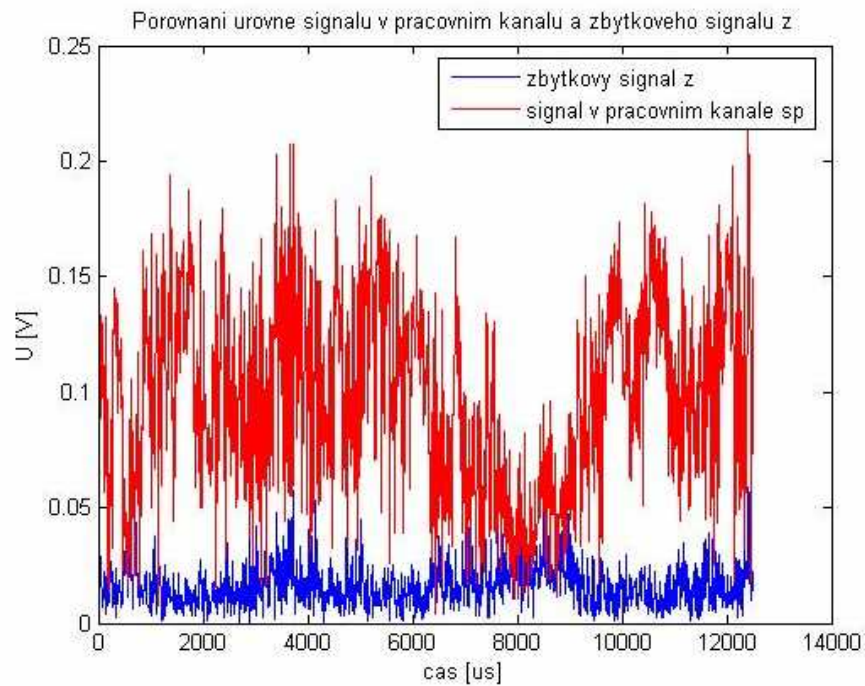
Na obr. 15 je graf se zadanými amplitudami replik přímého signálu, tak jak byly naprogramovány ve skriptu biclutter.m, podle tohoto grafu můžeme porovnávat správnost vypočtených amplitud replik přímého signálu a tedy funkčnost ekvalizace v různých podmínkách. Na obr. 16 je vektor \mathbf{f} , který obsahuje vypočítané amplitudy jednotlivých replik přímého signálu. Je vidět, že vypočítané amplitudy mají stejný klesající trend, jejich velikost se zmenšila a jsou mírně posunuty v čase. Na obr. 17 Je vidět porovnání úrovní signálu v pracovním kanále a zbytkového signálu \mathbf{z} . Výkon signálu P_{sp} se počítá podle vztahu (4.1) a výkon signálu \mathbf{z} podle vztahu (4.2).

$$P_{sp} = \frac{\text{sum}((\text{abs}(sp))^2)}{N} \quad (4.1)$$



Obr. 16 Vypočítané amplitudy replik přímého signálu v pracovním kanálu při odstupu signálu od šumu v referenčním kanálu 100 dB

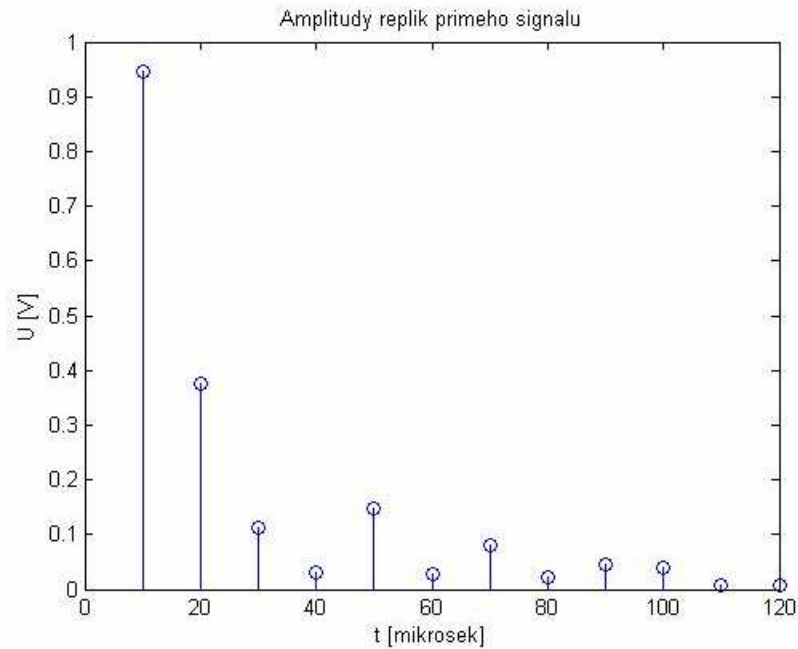
$$P_z = \frac{\text{sum}((\text{abs}(z))^2)}{N} \quad (4.2)$$



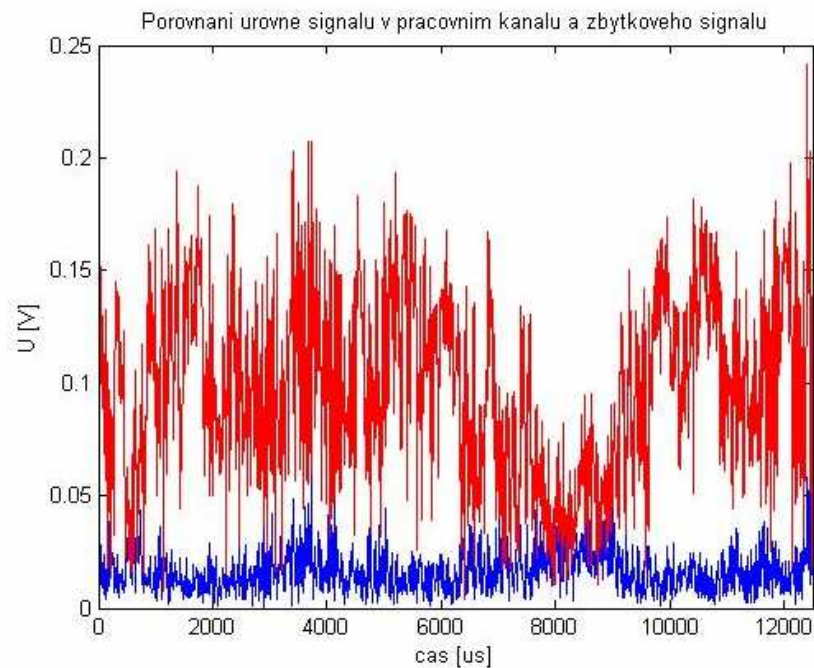
Obr. 17 Porovnání úrovně signálu v pracovním kanálu sp a zbytkového signálu z , při odstupu signálu od šumu v referenčním kanálu 100 dB.

Výkon signálu v pracovním kanálu $P_{sp} = 11,3 \cdot 10^{-3} \text{ W}$ a výkon zbytkového signálu $P_z = 3,651 \cdot 10^{-4} \text{ W}$.

4.1.2 Odstup signálu v referenčním kanálu od šumu 50 dB



Obr. 18 Vypočítané amplitudy replik přímého signálu v pracovním kanálu při odstupu signálu od šumu v referenčním kanálu 50 dB

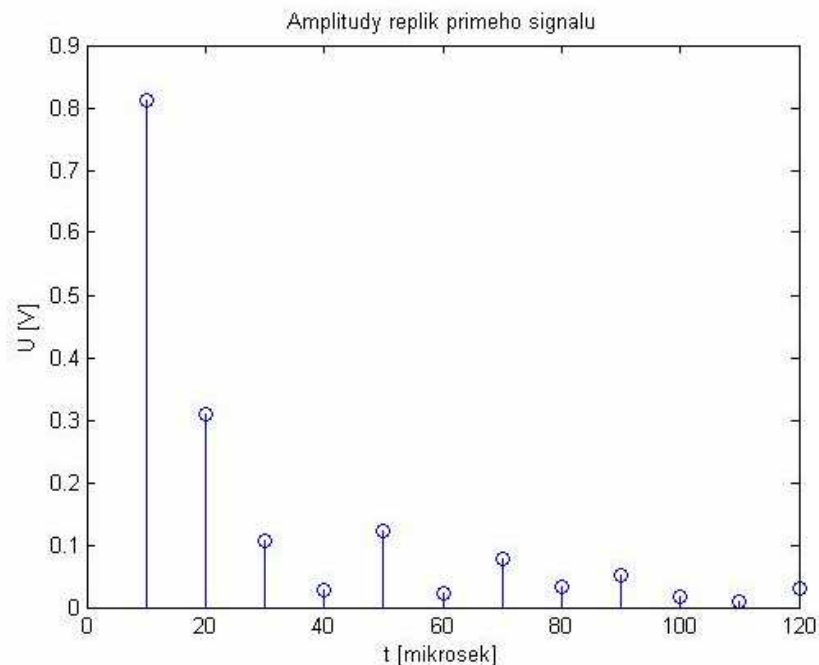


Obr. 19 Porovnání úrovně signálu v pracovním kanálu s_p a zbytkového signálu z , při odstupu signálu od šumu v referenčním kanálu 50 dB.

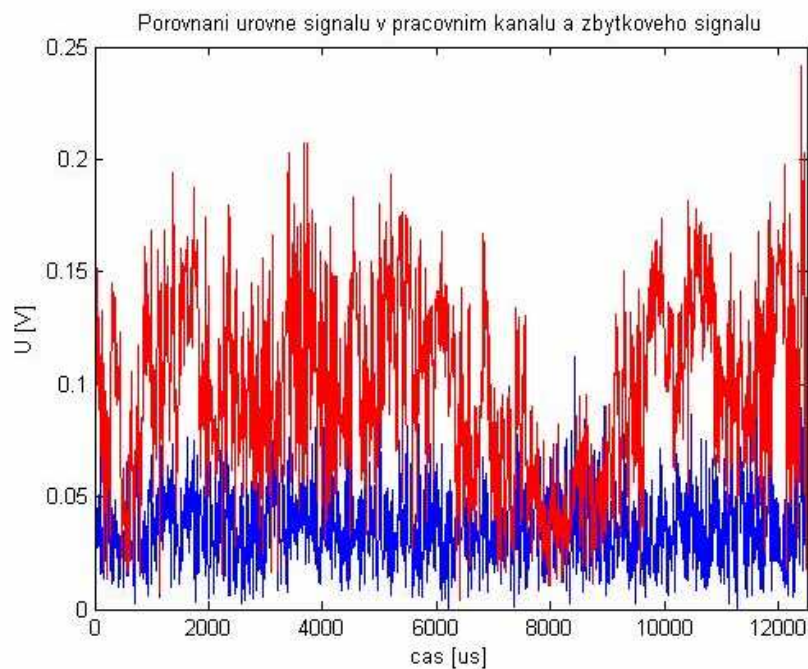
Výkon signálu v pracovním kanálu $P_{sp} = 11,3 \cdot 10^{-3} \text{ W}$ a výkon zbytkového signálu $P_z = 3,6769 \cdot 10^{-4} \text{ W}$. Na obr.18 je vektor replik přímého signálu jejichž velikosti jsou podobné jako při odstupu signálu od šumu 100 dB. Na obr.19 jsou signály sp a z , výkon signálu z je téměř stejný jako v předcházejícím případě.

4.1.3 Odstup signálu v referenčním kanálu od šumu 20 dB

Výkon signálu v pracovním kanálu $P_{sp} = 11,3 \cdot 10^{-3} \text{ W}$ a výkon zbytkového signálu $P_z = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ W}$. Na obr. 20 je vidět, že velikosti vypočítaných replik přímého signálu jsou menší než v předcházejících případech. Na obr. 21 jsou signály sp a z , výkon signálu z se proti předcházejícím případům zvětšil.



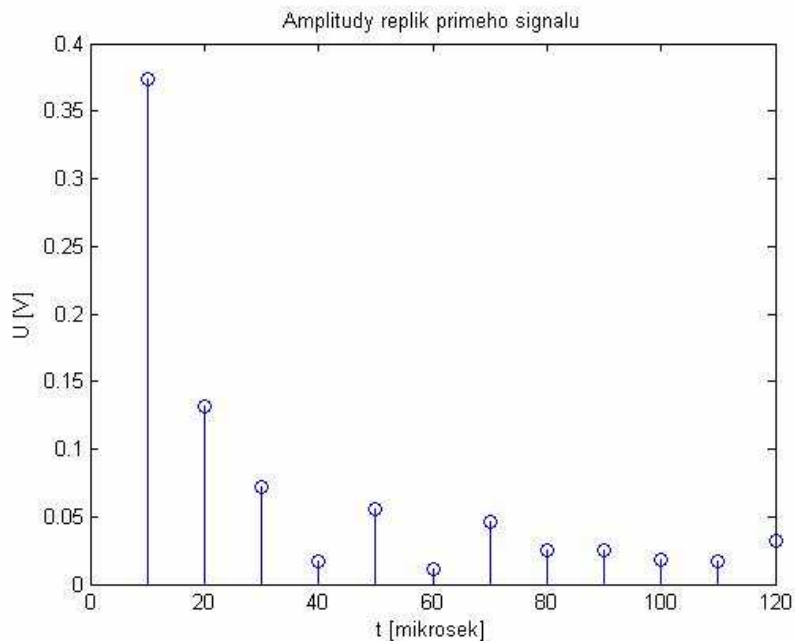
Obr. 20 Vypočítané amplitudy replik přímého signálu v pracovním kanálu při odstupu signálu od šumu v referenčním kanálu 20 dB



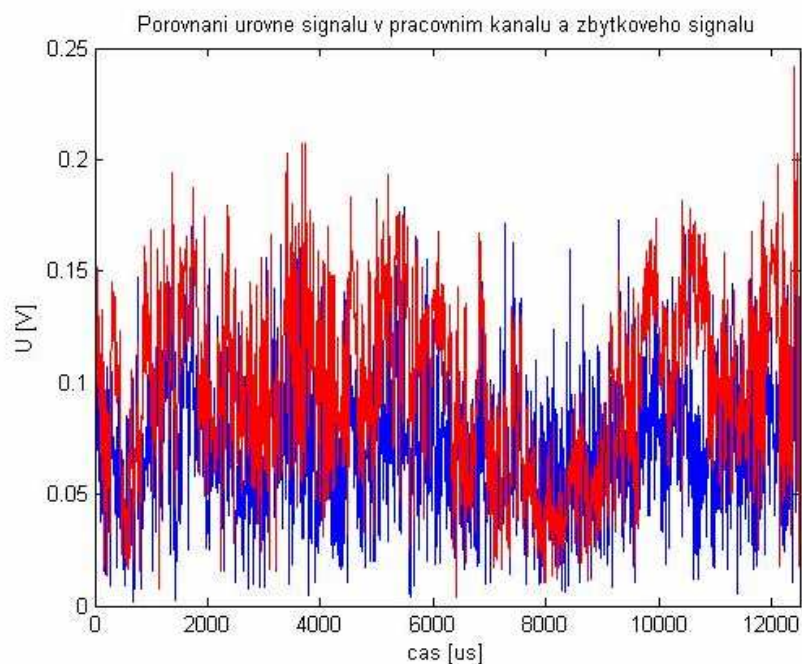
Obr. 21 Porovnání úrovně signálu v pracovním kanálu s_p a zbytkového signálu z , při odstupu signálu od šumu v referenčním kanálu 20 dB.

4.1.4 Odstup signálu v referenčním kanálu od šumu 10 dB

Výkon signálu v pracovním kanálu $P_{sp} = 11,3 \cdot 10^{-3} \text{ W}$ a výkon zbytkového signálu $P_z = 6,4 \cdot 10^{-3} \text{ W}$.



Obr. 22 Vypočítané amplitudy replik přímého signálu v pracovním kanálu při odstupu signálu od šumu v referenčním kanálu 10 dB



Obr. 23 Porovnání úrovně signálu v pracovním kanálu sp a zbytkového signálu z , při odstupu signálu od šumu v referenčním kanálu 10 dB.

Na obrázku. 22 jsou vypočítané repliky přímého signálu jejichž velikosti jsou mnohem menší než v předcházejících případech. Na obrázku 23 je vidět že výkony signálů sp a z jsou téměř totožné.

4.1.5 Účinnost ekvalizace při různém odstupu signálu od šumu v referenčním kanálu

V následujících tabulkách je uvedeno shrnutí výsledků pro různé hodnoty odstupu signálu od šumu v referenčním kanálu. V tab. 1 jsou hodnoty výkonů zbytkového signálu počítaného podle vztahu (4.2). Je zde vidět, že výkon tohoto signálu podle očekávání se snižujícím se odstupem signálu od šumu roste. Výkon signálu v pracovním kanálu je konstantní $P_{sp} = 11,3 \cdot 10^{-3}$ W. V tabulce je vidět, že při odstupu signálu od šumu 50 dB v referenčním kanále je potlačení replik v pracovním kanále (počítané podle vztahu (4.3)) asi 15 dB, což je přibližně mezní hodnota pro praktické použití. Při odstupu 20 dB je potlačení replik menší než 10 dB, což by už asi nevyhovovalo.

$$PVR = 10 \cdot \log\left(\frac{P_{sp}}{P_z}\right) \quad (4.3)$$

Odstup signálu od šumu SNR [dB]	Výkon zbytkového signálu P_z [W]	Potlačení výkonu replik PVR [dB]
100	$3,651 \cdot 10^{-4}$	14,9
50	$3,6769 \cdot 10^{-4}$	14,9
20	$1,3 \cdot 10^{-3}$	9,4
10	$6,4 \cdot 10^{-3}$	2,5

Tab.1 Porovnání výkonů zbytkového signálu při různém odstupu signálu od šumu.

V tab. 2 jsou velikosti amplitud vypočítaných replik přímého signálu v pracovním kanálu. Je vidět, že s klesajícím odstupem signálu od šumu se jejich velikosti zmenšují.

Odstup signálu od šumu [dB]	Velikost replik přímého signálu [V]				
	1.replika	2.replika	3.replika	4.replika	5.replika
100	0,9474	0,3748	0,1466	0,0815	0,0445
50	0,9472	0,3745	0,1464	0,0813	0,0444
20	0,8131	0,3102	0,1236	0,0776	0,0504
10	0,3738	0,1310	0,0553	0,0459	0,0255

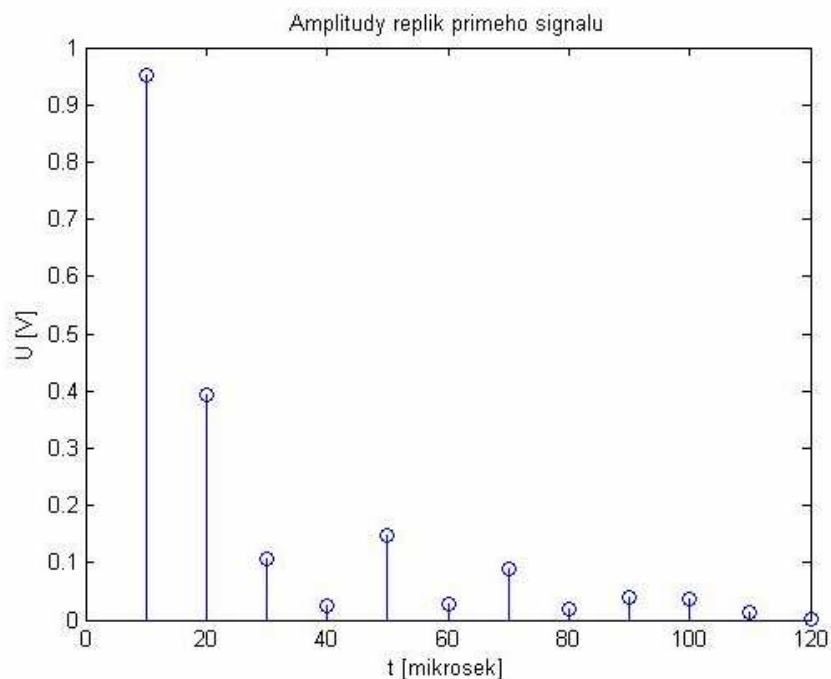
Tab.2 Porovnání velikosti jednotlivých replik přímého signálu

4.2 Vliv úrovně clutteru v referenčním kanálu na výsledky

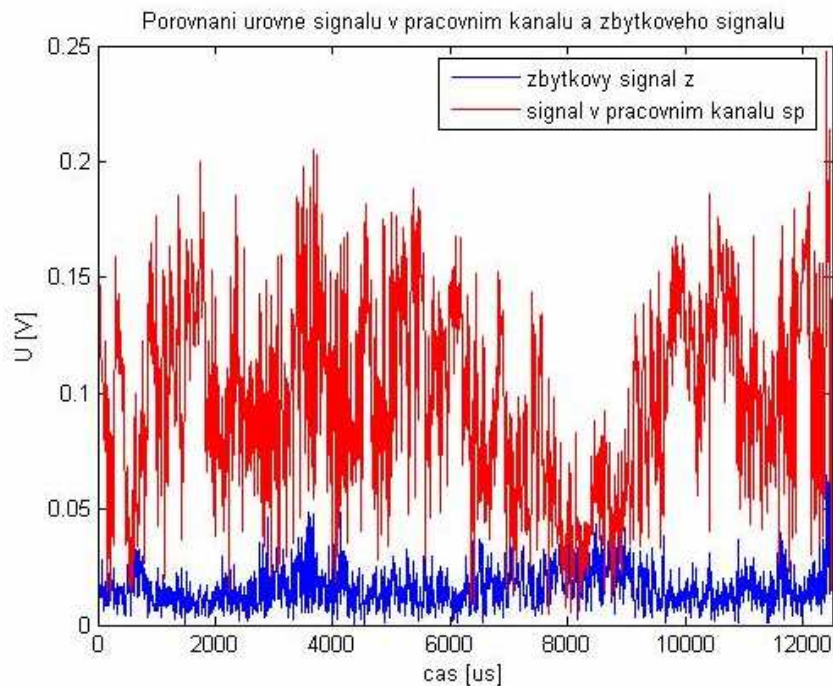
4.2.1 Odstup signálu v referenčním kanálu od clutteru 50 dB

Výkon signálu v pracovním kanálu $P_{sp} = 11,3 \cdot 10^{-3}$ W a výkon zbytkového signálu $P_z = 3,4397 \cdot 10^{-4}$ W. Na obrázku 24 jsou vypočítané amplitudy replik přímého signálu jejichž velikosti jsou podobné jako při odstupu signálu od clutteru 100 dB (stejný případ jako odstup signálu od šumu 100 dB, uvedený v předcházející části) . Na obrázku 25 jsou

signály sp a z , výkon signálu z je téměř stejný jako v případě odstupu signálu od clutteru 100 dB.



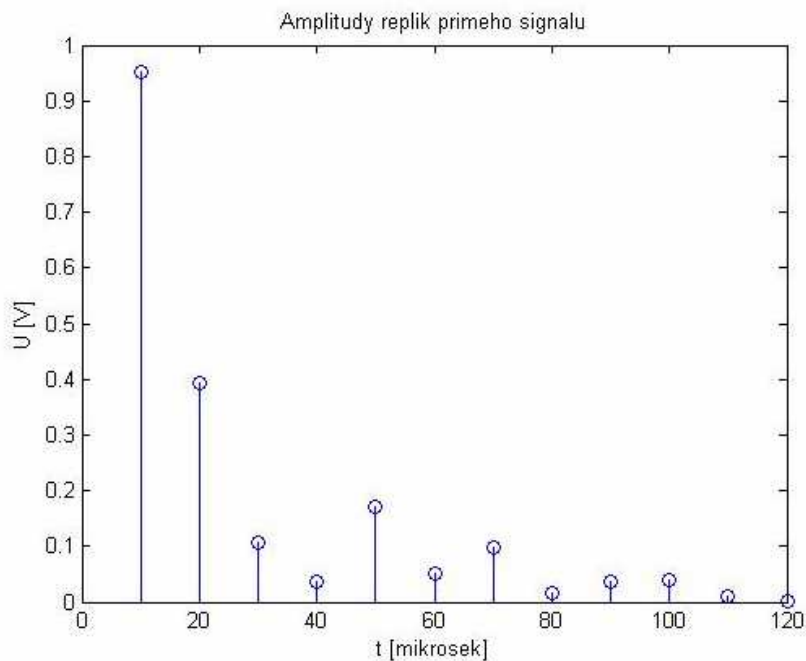
Obr. 24 Vypočítané amplitudy replik přímého signálu v pracovním kanálu při odstupu signálu od clutteru v referenčním kanálu 50 dB



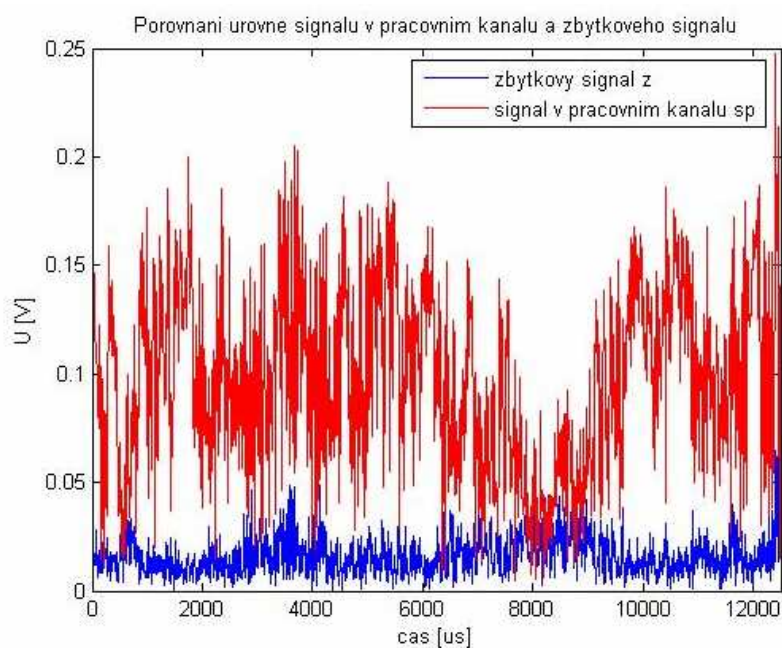
Obr. 25 Porovnání úrovně signálu v pracovním kanálu sp a zbytkového signálu z , při odstupu signálu od clutteru v referenčním kanálu 50 dB.

4.2.2 Odstup signálu v referenčním kanálu od clutteru 20 dB

Výkon signálu v pracovním kanálu $P_{sp} = 11,3 \cdot 10^{-3}$ W a výkon zbytkového signálu $P_z = 3,4407 \cdot 10^{-4}$ W. Na obrázku 26 jsou vypočítané amplitudy replik přímého signálu jejichž velikosti jsou opět podobné jako v předcházejících případech.



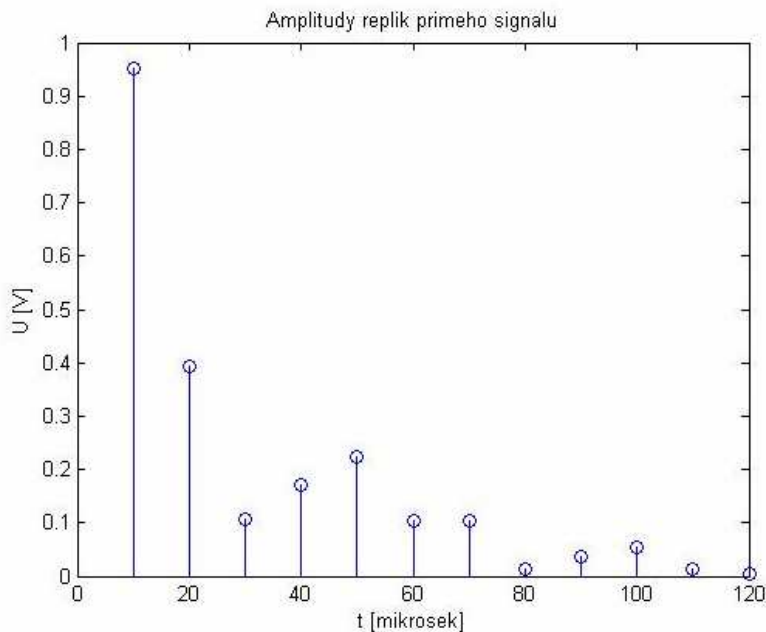
Obr. 26 Vypočítané amplitudy replik přímého signálu v pracovním kanálu při odstupu signálu od clutteru v referenčním kanálu 20 dB



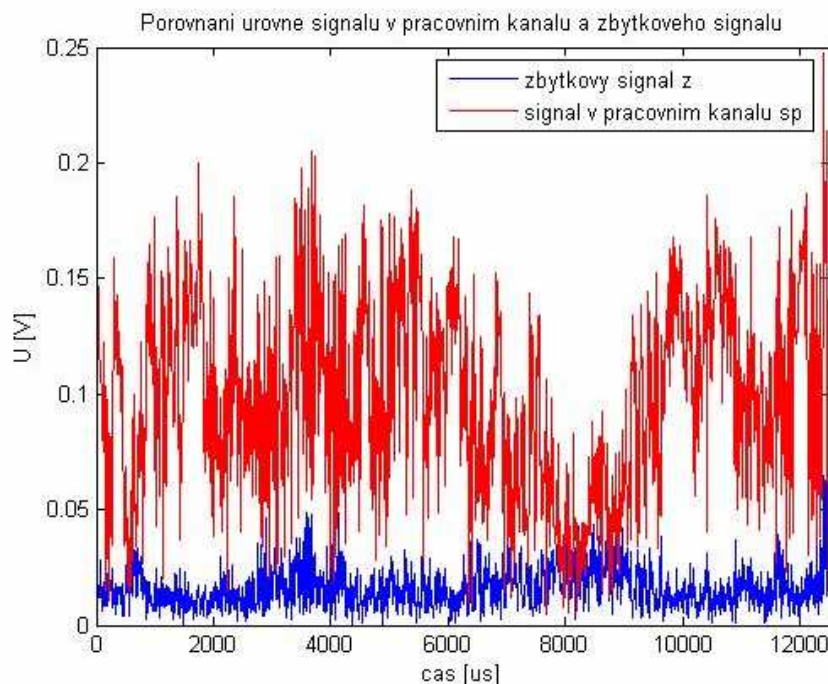
Obr. 27 Porovnání úrovně signálu v pracovním kanálu sp a zbytkového signálu z , při odstupu signálu od clutteru v referenčním kanálu 20 dB

Na obrázku 27 jsou signály sp a z , tento graf je opět téměř stejný jako v předcházejících případech. Výsledky tedy zůstávají podobné jako v případě odstupu signálu od clutteru 50 dB.

4.2.3 Odstup signálu v referenčním kanálu od clutteru 10 dB



Obr. 28 Vypočítané amplitudy replik přímého signálu v pracovním kanálu při odstupu signálu od clutteru v referenčním kanálu 10 dB



Obr. 29 Porovnání úrovně signálu v pracovním kanálu sp a zbytkového signálu z , při odstupu signálu od clutteru v referenčním kanálu 10 dB

Výkon signálu v pracovním kanálu $P_{sp} = 11,3 \cdot 10^{-3}$ W a výkon zbytkového signálu $P_z = 3,7785 \cdot 10^{-4}$ W. Na obrázku 28 jsou vypočítané amplitudy replik přímého signálu jejichž velikosti vycházejí podobně jako v předcházejících případech. Na obrázku 29 jsou signály sp a z , jejich velikosti jsou téměř stejné jako v předcházejících případech.

4.2.4 Účinnost ekvalizace při různém odstupu signálu od clutteru v referenčním kanálu

V následujících tabulkách je uvedeno shrnutí výsledků pro různé hodnoty odstupu signálu od clutteru. V tabulce 3 jsou hodnoty výkonu zbytkového signálu P_z , počítané podle vztahu (4.2), které vycházejí ve všech případech podobně. Výkon signálu v pracovním kanálu je konstantní $P_{sp} = 11,3 \cdot 10^{-3}$ W. Potlačení výkonu replik PVR , počítané podle vztahu (4.3), vychází také ve všech případech podobně. V tab. 4 jsou velikosti vypočítaných replik přímého signálu, je vidět že jejich velikosti jsou ve všech případech také přibližně stejné.

Odstup signálu od clutteru [dB]	Výkon zbytkového signálu P_z [W]	Potlačení výkonu replik PVR [dB]
100	$3,651 \cdot 10^{-4}$	14,9
50	$3,4397 \cdot 10^{-4}$	15,2
20	$3,4407 \cdot 10^{-4}$	15,2
10	$3,7785 \cdot 10^{-4}$	14,8

Tab.3 Porovnání výkonů zbytkového signálu při různém odstupu signálu od šumu v referenčním kanálu.

Odstup signálu od clutteru [dB]	Velikost replik přímého signálu [V]				
	1.replika	2.replika	3.replika	4.replika	5.replika
100	0,9474	0,3748	0,1466	0,0815	0,0445
50	0,9511	0,3933	0,1467	0,0886	0,0384
20	0,9511	0,3933	0,1705	0,0979	0,0361
10	0,9510	0,3933	0,2245	0,1050	0,0364

Tab.4 Porovnání velikosti jednotlivých replik přímého signálu

5 Rozdělení zpracovávaného signálu na více částí

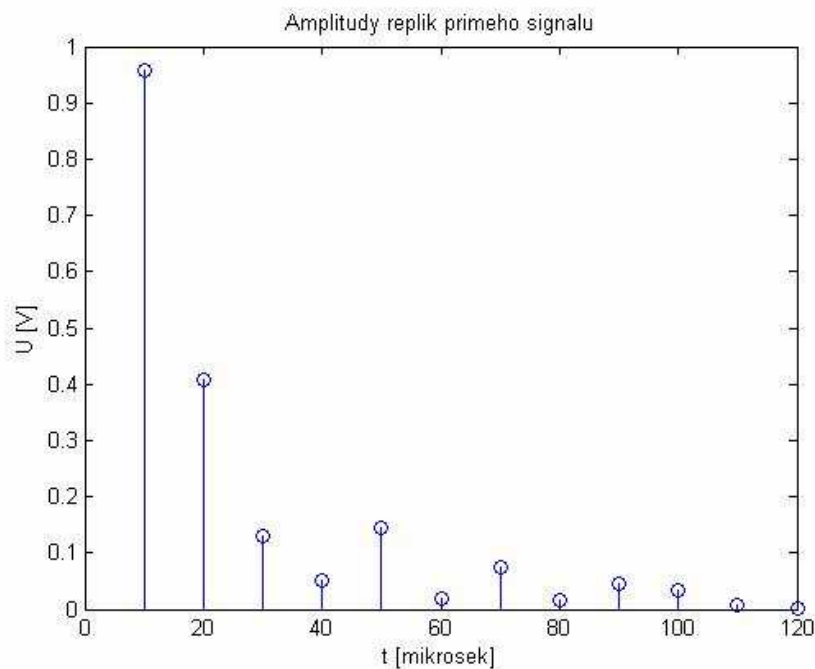
Dále jsou uvedeny výsledky při rozdělení signálu v pracovním kanálu sp a v referenčním kanálu sr na více částí (poloviny čtvrtiny, osminy a šestnáctiny). Ekvalizace byla poté aplikována na jednotlivé části samostatně.

5.2 Rozdělení signálu na dvě části

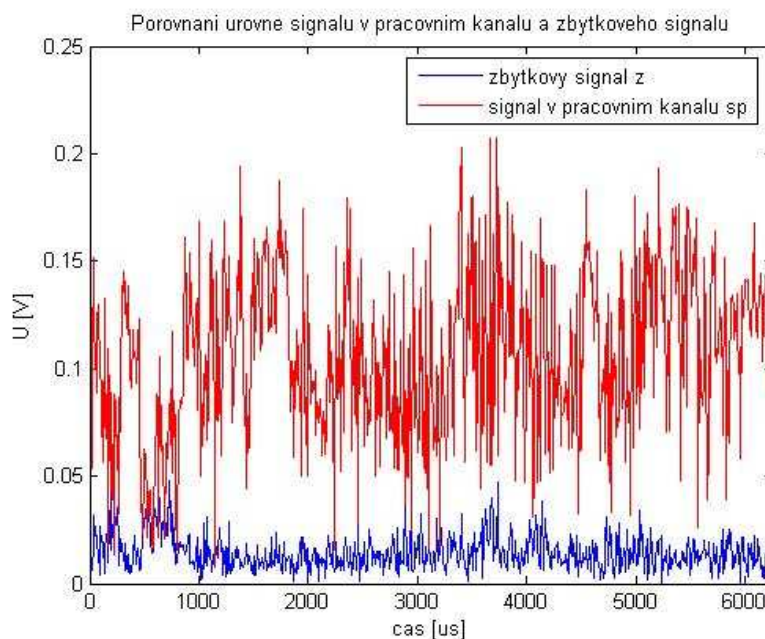
Rozdělením signálu vzniknou dvě části, signál v každé z nich obsahuje 625 vzorků. V každé části zvlášť je potom vypočítán vektor amplitud replik přímého signálu \mathbf{f} . A dále je vypočítán zbytkový signál \mathbf{z} a je porovnán jeho výkon P_z s výkonem signálu v pracovním kanálu P_{sp} . Nakonec je ve všech částech signálu vypočítán zbytkový signál \mathbf{z} za pomoci vektoru \mathbf{f} vypočítaného ze druhé části signálu

5.2.1 Výsledky vypočítané z první poloviny

Výkon signálu v pracovním kanálu $P_{sp} = 11,3 \cdot 10^{-3}$ W a výkon zbytkového signálu $P_z = 3,6509 \cdot 10^{-4}$ W. Na obrázku 30 je vidět, že amplitudy replik přímého signálu vycházejí podobně jako při použití celého signálu, ekvalizace tedy funguje i v tomto případě správně. Na obrázku. 31 je vidět, že zbytkový signál je mnohokrát menší než signál v pracovním kanálu.



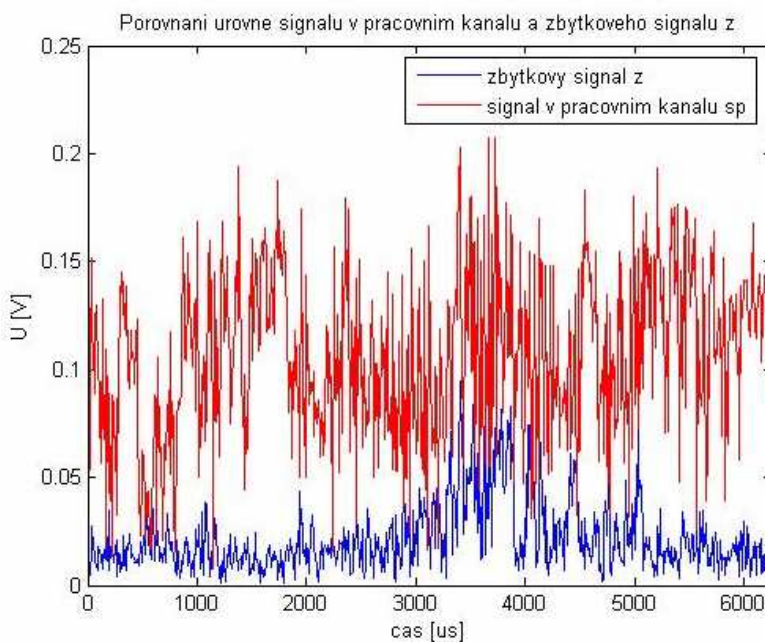
Obr. 30 Vypočítané amplitudy replik přímého signálu v pracovním kanálu pro první polovinu signálu



Obr. 31 Porovnání úrovně signálu v pracovním kanálu *sp* a zbytkového signálu *z*, pro první polovinu signálu.

Zbytkový signál vypočítaný pomocí vektoru *f* z druhé části

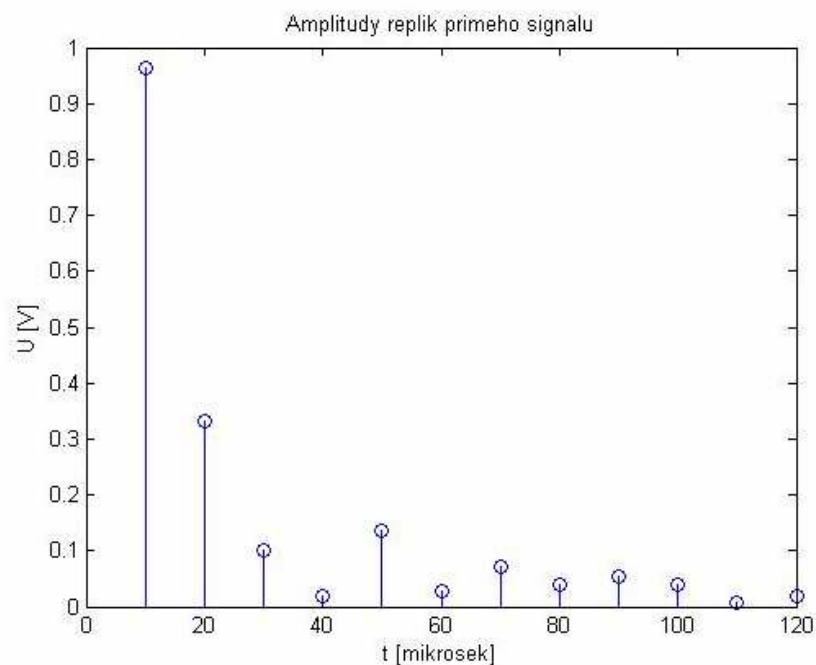
Na obrázku 32 je graf porovnání úrovně signálu v pracovním kanálu a zbytkového signálu v případě, kdy byl k výpočtu použit vektor *f* z druhé části signálu, výsledky jsou podobné, ale výkon signálu *z* je o něco větší. Výkon $P_z = 7,3463 \cdot 10^{-4} \text{ W}$. Je to vidět i v grafu, kde má zbytkový signál o něco větší úroveň než v předchozím případě.



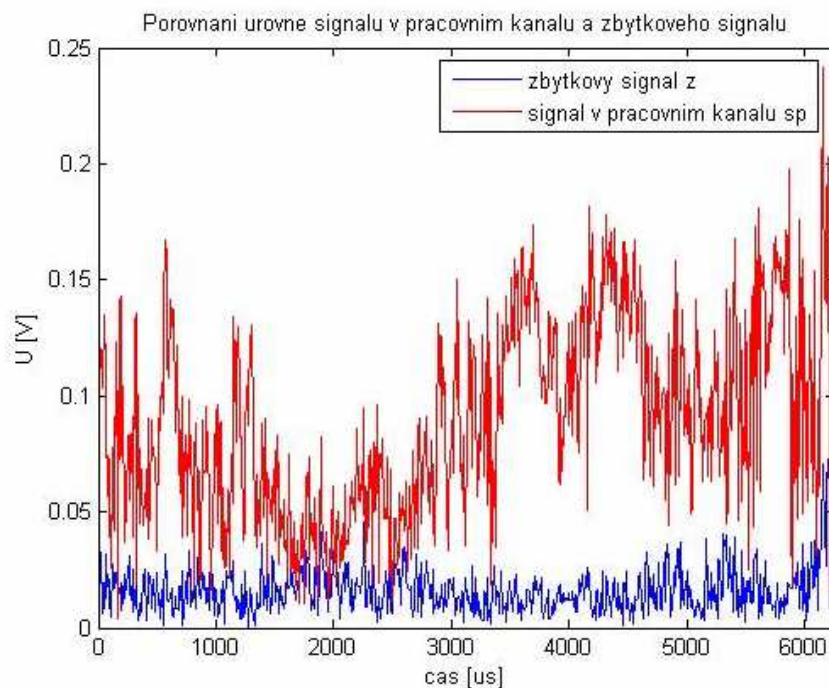
Obr. 32 Porovnání úrovně signálu v pracovním kanálu *sp* a zbytkového signálu *z*, vypočítaného pomocí vektoru *f* z druhé části signálu.

5.2.2 Výsledky vypočítané z druhé poloviny

Výkon signálu v pracovním kanálu $P_{sp} = 11,3 \cdot 10^{-3}$ W a výkon zbytkového signálu $P_z = 3,6509 \cdot 10^{-4}$ W.



Obr. 33 Vypočítané amplitudy replik přímého signálu v pracovním kanálu pro druhou polovinu signálu

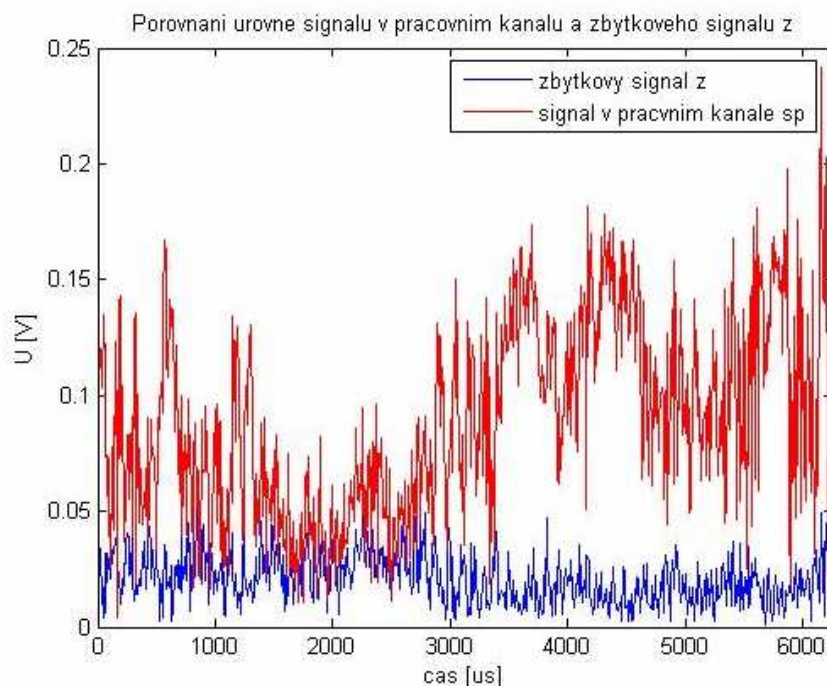


Obr. 34 Porovnání úrovně signálu v pracovním kanálu sp a zbytkového signálu z , pro první polovinu signálu.

Vypočítané amplitudy replik přímého signálu (obrázek 33) i výkony signálu v pracovním kanálu sp a zbytkového signálu (obrázek 34) jsou téměř totožné jako v případě první poloviny.

Zbytkový signál z vypočítaný pomocí vektoru \mathbf{f} z první části

Na obrázku 35 je opět graf porovnání úrovně signálu v pracovním kanálu a zbytkového signálu v případě, kdy byl k výpočtu použit tentokrát vektor \mathbf{f} z druhé části signálu. Výkon $P_z = 5,6773 \cdot 10^{-4} W$



Obr. 35 Porovnání úrovně signálu v pracovním kanálu sp a zbytkového signálu z , vypočítaného pomocí vektoru \mathbf{f} z první části signálu.

5.2.3 Porovnání výsledků pro obě části

V tabulce 3 jsou porovnány výkony signálů pro obě části. Byly použity následující zkratky: P_{sp} - výkon signálu v pracovním kanálu, P_z - výkon zbytkového signálu, P_{z1} - výkon signálu z , vypočítaného pomocí vektoru \mathbf{f} z jiné části signálu, P_{VR} - potlačení výkonu replik, P_{VR1} , potlačení výkonu replik při použití signálu z , vypočítaného pomocí vektoru \mathbf{f} z jiné části signálu.

část	P_{sp} [W]	P_z [W]	P_{z_1} [W]	PVR [dB] ($10 \cdot \log(P_{sp}/P_z)$)	$PVRI$ [dB] ($10 \cdot \log(P_{sp}/P_{z_1})$)
1.	$12,7 \cdot 10^{-3}$	$2,6567 \cdot 10^{-4}$	$7,3463 \cdot 10^{-4}$	16,8	12,4
2.	$9,9 \cdot 10^{-3}$	$3,6156 \cdot 10^{-4}$	$5,6773 \cdot 10^{-4}$	14,4	12,4

Tab.5 Porovnání výkonů zbytkového signálu a signálu v pracovním kanálu při rozdělení signálu na dvě části.

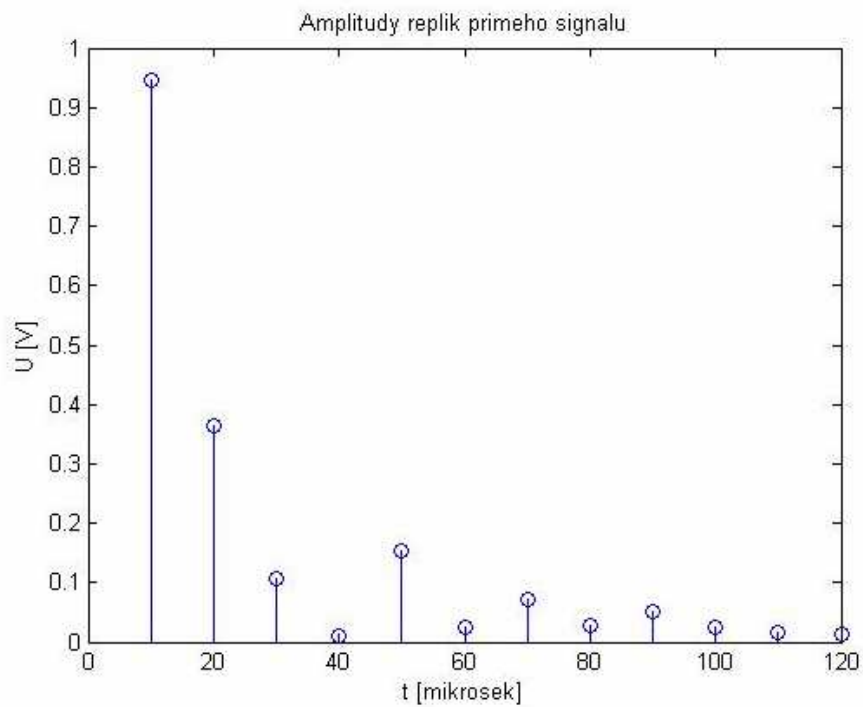
V tabulce je vidět, že potlačení výkonu replik při výpočtu signálu \mathbf{z} pomocí vektoru \mathbf{f} z jiné části signálu vychází vždy jen o něco menší než při použití jen jedné části signálu, použití vektoru \mathbf{f} z jiné části signálu je tedy možné. Hodnoty potlačení výkonu replik vycházejí přibližně mezi 12 a 17 dB.

5.3 Rozdělení signálu na čtyři části

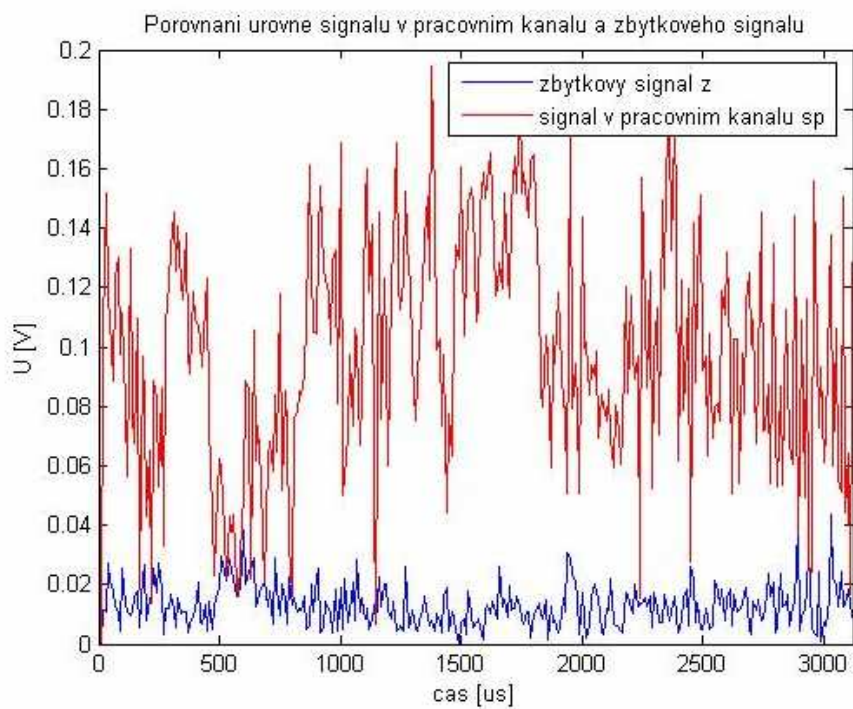
Rozdělením signálu vzniknou čtyři části, každá obsahuje 312 vzorků. V každé části zvlášť je potom vypočítán vektor amplitud replik přímého signálu \mathbf{f} . A dále je vypočítán zbytkový signál \mathbf{z} a je porovnán jeho výkon P_z s výkonem signálu v pracovním kanálu P_{sp} . Ve všech částech signálu byl také vypočítán zbytkový signál \mathbf{z} za pomoci vektoru \mathbf{f} vypočítaného z druhé části signálu.

5.3.1 První čtvrtina

Výkon signálu v pracovním kanálu $P_{sp} = 11 \cdot 10^{-3}$ W a výkon zbytkového signálu $P_z = 2,2241 \cdot 10^{-4}$ W. Na obrázku 36 jsou vypočítané amplitudy replik přímého signálu pro první čtvrtinu. Je vidět že amplitudy jsou poměrně dobře indikovány a přibližně odpovídají skutečnosti. Graf ale obsahuje i čáry s úrovní menší než 0,1V na místech kde ve skutečnosti odražené signály nejsou. V grafu na obrázku 37 je vidět, že zbytkový signál \mathbf{z} je malý v porovnání se signálem v pracovním kanálu sp .



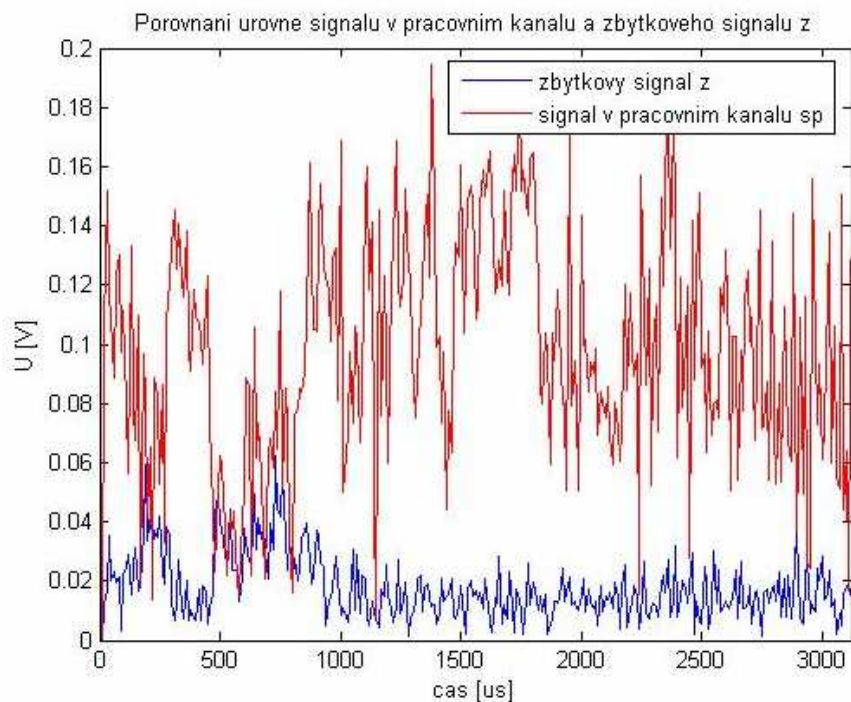
Obr. 36 Vypočítané amplitudy replik přímého signálu v pracovním kanálu pro první čtvrtinu



Obr. 37 Porovnání úrovně signálu v pracovním kanálu *sp* a zbytkového signálu *z*, pro první čtvrtinu.

Zbytkový signál z vypočítaný pomocí vektoru \mathbf{f} z druhé čtvrtiny signálu

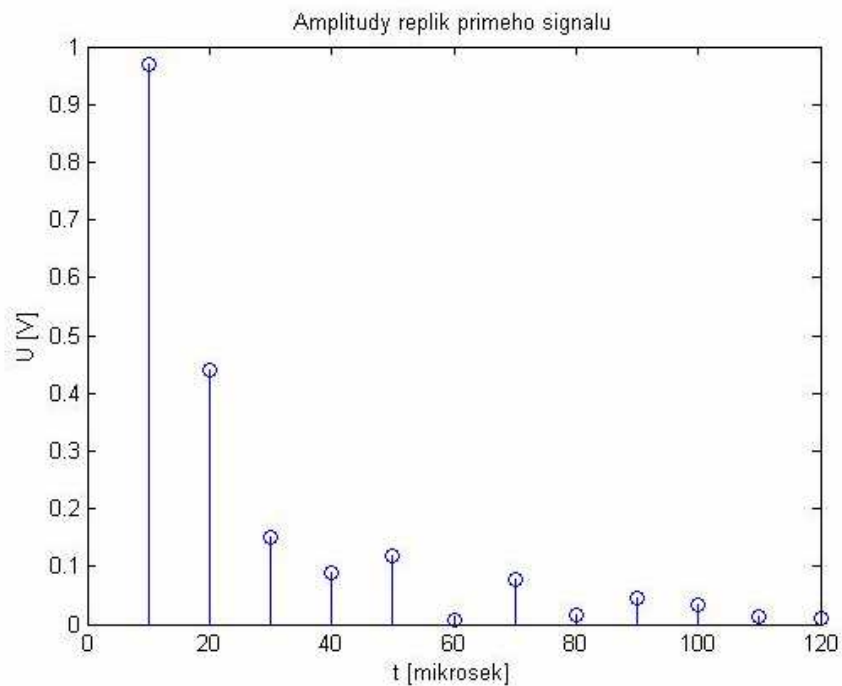
Na obrázku 38 je porovnání signálu v pracovním kanálu sp a zbytkového signálu z vypočítaného pomocí vektoru \mathbf{f} ze druhé části signálu. Graf je podobný jako v předcházejícím případě, $P_z = 4,36 \cdot 10^{-4} W$.



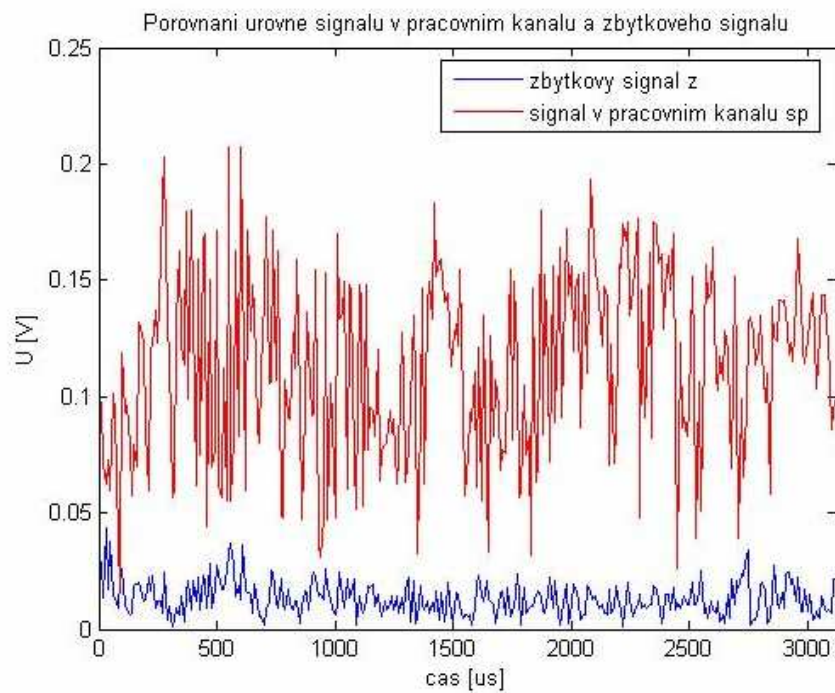
Obr. 38 Porovnání úrovně signálu v pracovním kanálu sp a zbytkového signálu z , vypočítaného pomocí vektoru \mathbf{f} ze druhé čtvrtiny.

5.3.2 Druhá čtvrtina

Výkon signálu v pracovním kanálu $P_{sp} = 14,4 \cdot 10^{-3} W$ a výkon zbytkového signálu $P_z = 2,2859 \cdot 10^{-4} W$. Výsledky jsou podobné jako v prvním případě, na obrázku 39 je vektor amplitud replik přímého signálu a na obrázku 40 porovnání zbytkového signálu z a signálu sp v pracovním kanálu. Zbytkový signál je opět dostatečně potlačen.



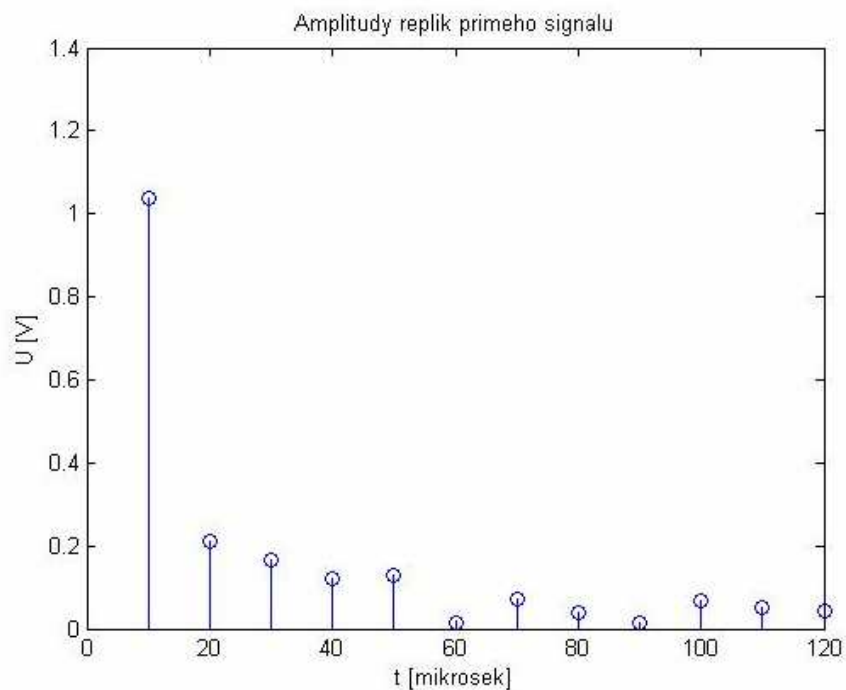
Obr. 39 Vypočítané amplitudy replik přímého signálu v pracovním kanálu pro druhou čtvrtinu



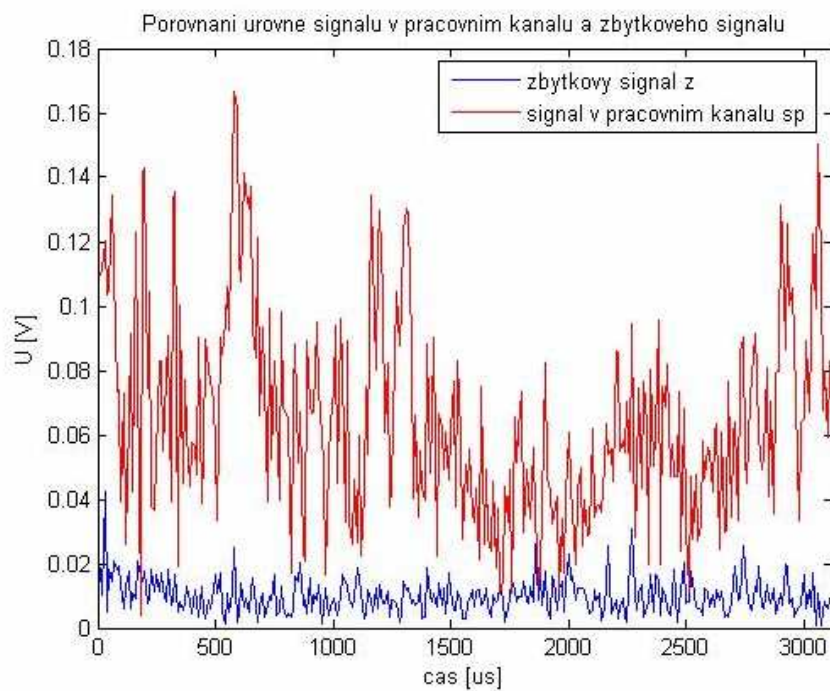
Obr. 40 Porovnání úrovně signálu v pracovním kanálu *sp* a zbytkového signálu *z*, pro druhou čtvrtinu.

5.3.3 Třetí čtvrtina

Výkon signálu v pracovním kanálu $P_{sp} = 5,2 \cdot 10^{-3}$ W a výkon zbytkového signálu $P_z = 1,3041 \cdot 10^{-4}$ W.



Obr. 41 Vypočítané amplitudy replik přímého signálu v pracovním kanálu pro třetí čtvrtinu

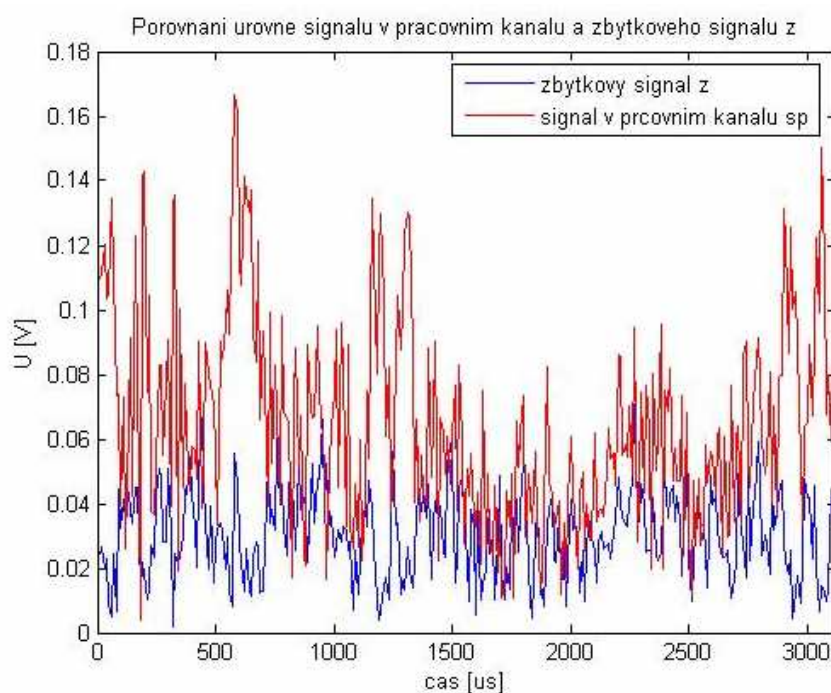


Obr. 42 Porovnání úrovně signálu v pracovním kanálu sp a zbytkového signálu z , pro třetí čtvrtinu.

Vektor amplitud replik přímého signálu vyšel v této části signálu nejvíce zkreslený jak je vidět na obrázku 41. První replika je indikována dobře, ale další už jdou těžko rozpoznat. Porovnání signálu v pracovním kanálu sp a zbytkového signálu z je na obrázku 42.

Zbytkový signál z , vypočítaný pomocí vektoru f z druhé čtvrtiny signálu

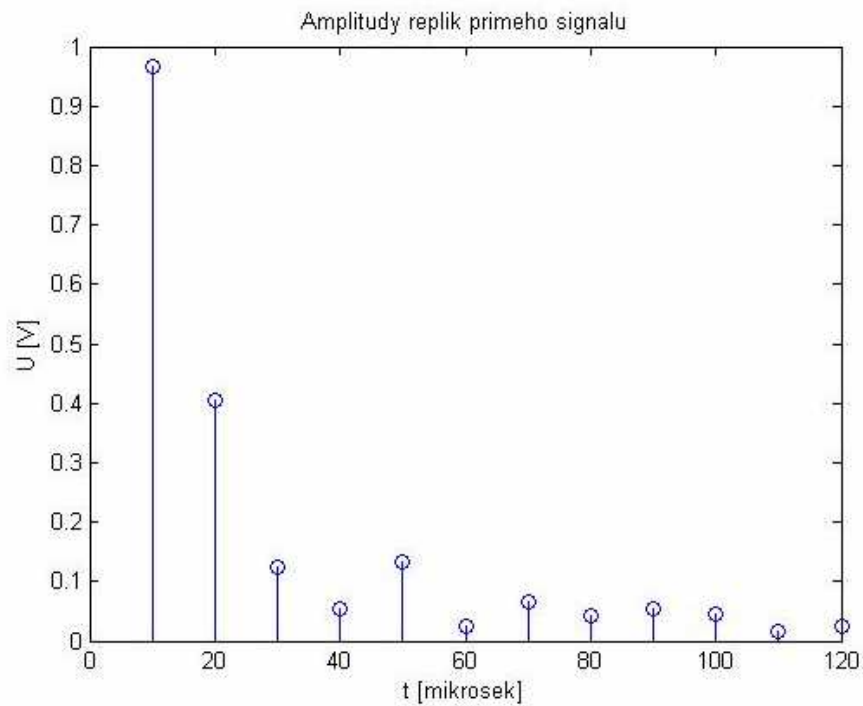
Na obrázku 43 je porovnání signálu v pracovním kanálu sp a zbytkového signálu z , vypočítaného pomocí vektoru f ze druhé části signálu. Výsledek je ve třetí čtvrtině horší než v ostatních částech signálu. Výkon zbytkového signálu $P_z = 1,1 \cdot 10^{-3} W$. Což je přibližně o jeden řád vyšší hodnota než v předchozím případě. I v grafu je vidět že úroveň zbytkového signálu je v tomto případě větší.



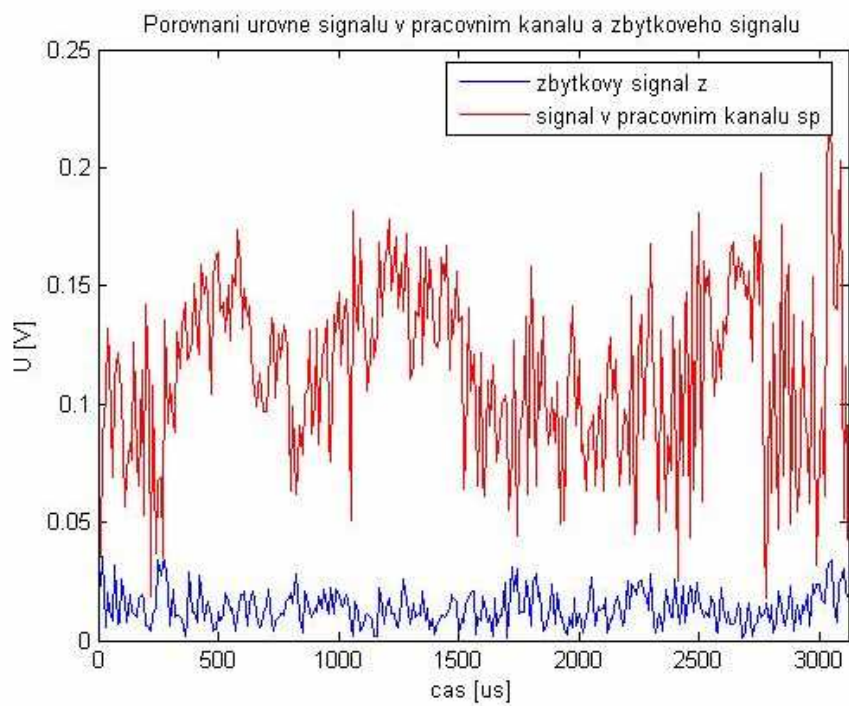
Obr. 43 Porovnání úrovně signálu v pracovním kanálu sp a zbytkového signálu z , vypočítaného pomocí vektoru f ze druhé čtvrtiny.

5.3.4 Poslední čtvrtina

Výkon signálu v pracovním kanálu $P_{sp} = 14,4 \cdot 10^{-3} W$ a výkon zbytkového signálu $P_z = 2,4643 \cdot 10^{-4} W$. Pro poslední úsek signálu vycházejí výsledky podobné jako pro první a druhou část. Amplitudy replik přímého signálu jsou na obrázku 44 a porovnání zbytkového signálu a signálu v pracovním kanálu na obrázku 45.



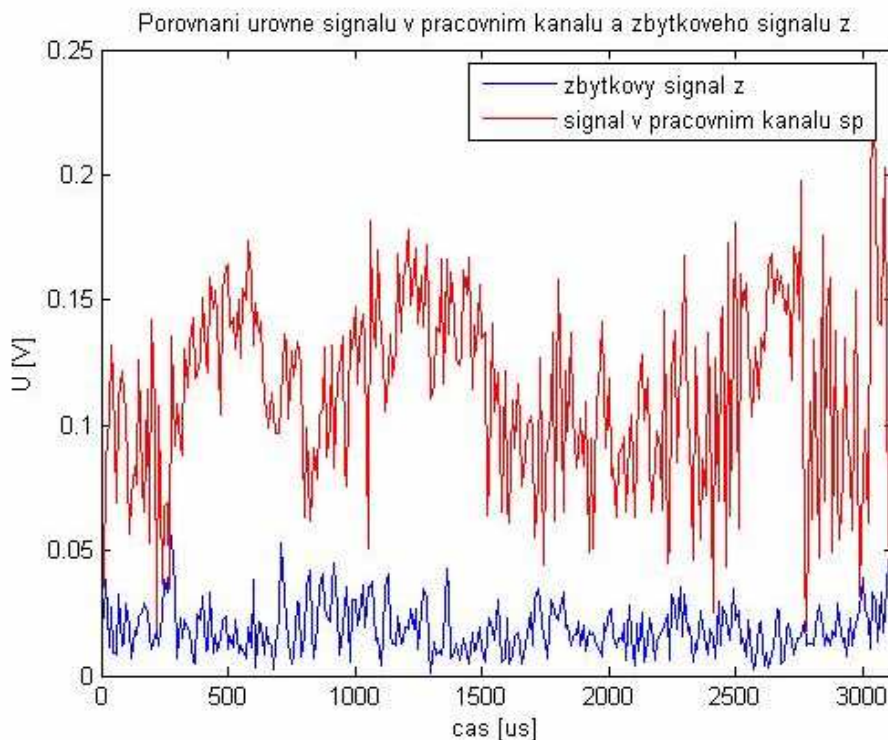
Obr. 44 Vypočítané amplitudy replik přímého signálu v pracovním kanálu pro poslední čtvrtinu



Obr. 45 Porovnání úrovně signálu v pracovním kanálu *sp* a zbytkového signálu *z*, pro poslední čtvrtinu.

Zbytkový signál z vypočítaný pomocí vektoru \mathbf{f} z druhé čtvrtiny signálu

Na obrázku 46 je porovnání signálu v pracovním kanálu sp a zbytkového signálu z , vypočítaného pomocí vektoru \mathbf{f} ze druhé části signálu. Úrovně signálů v grafu jsou podobné jako v předcházejících případech.. Výkon zbytkového signálu $P_z = 4,5892 \cdot 10^{-4} W$. Je tedy o něco vyšší než při výpočtu pouze z této části..



Obr. 46 Porovnání úrovně signálu v pracovním kanálu sp a zbytkového signálu z , vypočítaného pomocí vektoru \mathbf{f} ze druhé čtvrtiny.

5.3.5 Porovnání výsledků ze všech částí signálu

V tabulce 3 jsou porovnány výkony signálů pro všechny části. V tabulce jsou uvedeny následující zkratky: P_{sp} - výkon signálu v pracovním kanálu, P_z - výkon zbytkového signálu, P_{zI} - výkon signálu z , vypočítaného pomocí vektoru \mathbf{f} z jiné části signálu, PVR - potlačení výkonu replik, $PVRI$ potlačení výkonu replik při použití signálu z , vypočítaného pomocí vektoru \mathbf{f} z jiné části signálu.

část	P_{sp} [W]	P_z [W]	P_{z1} [W]	PVR [dB] ($10 \cdot \log(P_{sp}/P_z)$)	$PVR1$ [dB] ($10 \cdot \log(P_{sp}/P_{z1})$)
1.	$11 \cdot 10^{-3}$	$2,2241 \cdot 10^{-4}$	$4,36 \cdot 10^{-4}$	16,9	14,0
2.	$14,4 \cdot 10^{-3}$	$2,2859 \cdot 10^{-4}$	$2,2859 \cdot 10^{-4}$	17,9	17,9
3.	$5,2 \cdot 10^{-3}$	$1,3041 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	16	6,7
4.	$14,4 \cdot 10^{-3}$	$2,4643 \cdot 10^{-4}$	$4,5892 \cdot 10^{-4}$	17,6	14,9

Tab.6 Porovnání výkonů zbytkového signálu a signálu v pracovním kanálu při rozdělení signálu na čtyři části.

Z uvedených grafů je patrné, že při rozdělení signálu na čtyři části a provedení ekvalizace na všech čtyřech částech zvlášť, jsou výsledky podobné jako při použití celého signálu a ekvalizace je účinná. Potlačení vektoru replik při použití vektoru \mathbf{f} z druhé části vycházejí většinou o něco menší než při výpočtu ze stejné části ale i tyto hodnoty jsou ještě použitelné. Hodnoty potlačení výkonu replik se pohybují v rozmezí 14 -18 dB. Jediná výjimka je třetí čtvrtina, kde jsou výsledky horší než v ostatních částech a při použití vektoru \mathbf{f} z druhé části signálu vyšla hodnota potlačení výkonu replik 6,7 dB, což je nevyhovující hodnota.

5.4 Rozdělení signálu na osm částí

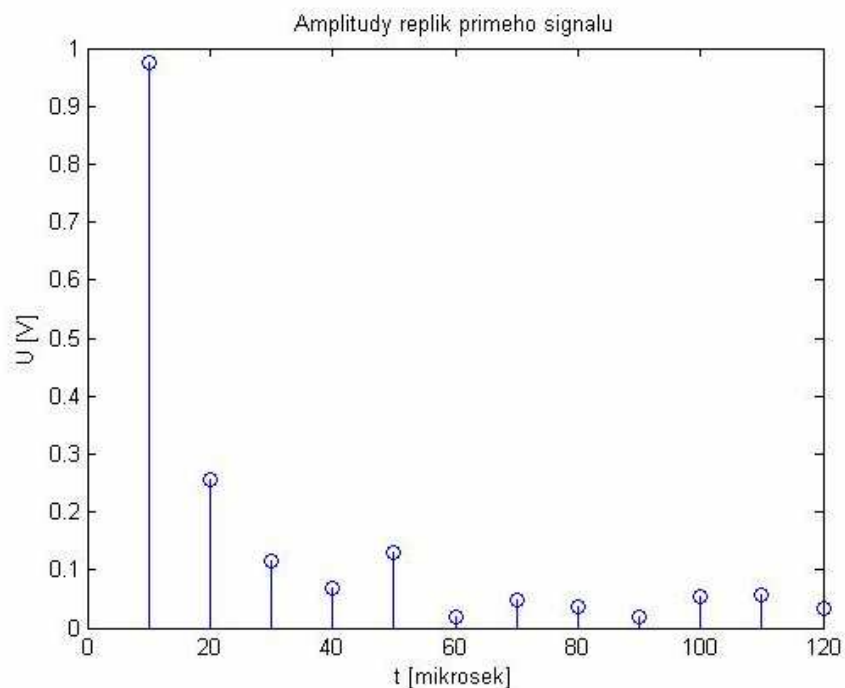
Rozdělením signálu vznikne osm částí, každá z nich obsahuje 156 vzorků. V každé části zvlášť je potom vypočítán vektor amplitud replik přímého signálu \mathbf{f} . Dále je vypočítán zbytkový signál \mathbf{z} a je porovnán jeho výkon P_z s výkonem signálu v pracovním kanálu P_{sp} . Ve všech částech signálu je také vypočítán zbytkový signál \mathbf{z} za pomoci vektoru \mathbf{f} vypočítaného ze druhé části signálu.

Dále jsou na ukázkou uvedeny grafické výsledky z prvních tří částí, poté následuje tabulka obsahující porovnání číselných výsledků ze všech osmi částí signálu.

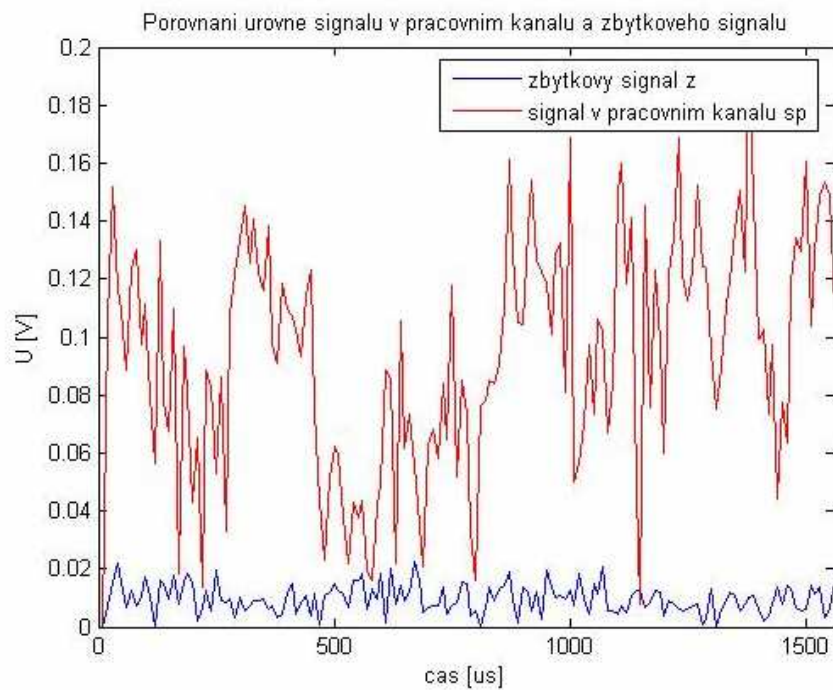
5.4.1 První osmina

Výkon signálu v pracovním kanálu $P_{sp} = 2,9 \cdot 10^{-3}$ W a výkon zbytkového signálu $P_z = 7,9853 \cdot 10^{-6}$ W. Na obrázku 47 jsou vypočítané amplitudy replik přímého signálu,

kteře přibližně odpovídají zadaným. Na obrázku 48 je opět porovnání signálu v pracovním kanálu sp a zbytkového signálu z , tentokrát pro první osminu.



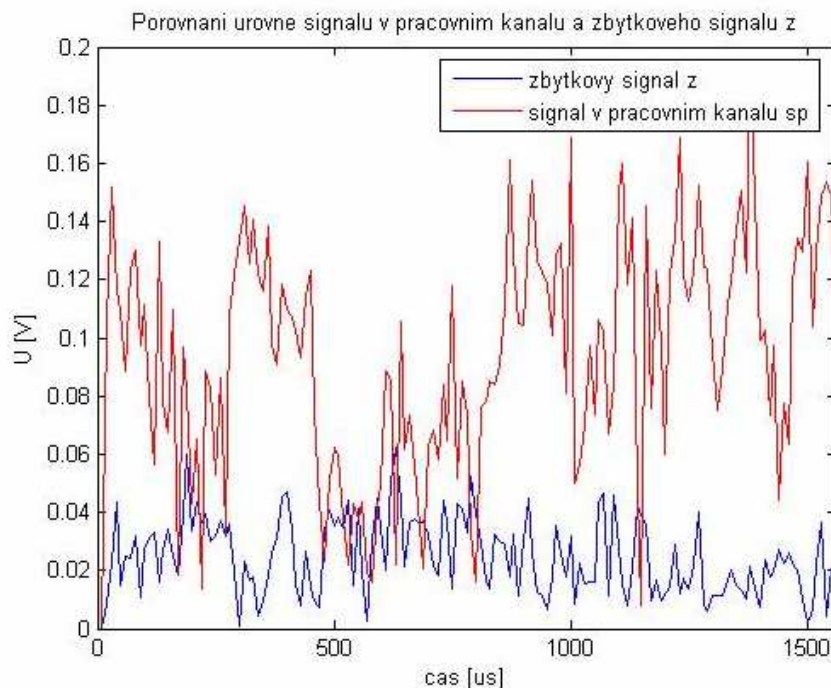
Obr. 47 Vypočítané amplitudy replik přímého signálu v pracovním kanálu pro první osminu



Obr. 48 Porovnání úrovně signálu v pracovním kanálu sp a zbytkového signálu z , pro první osminu

Zbytkový signál z vypočítaný pomocí vektoru f z druhé osminy signálu

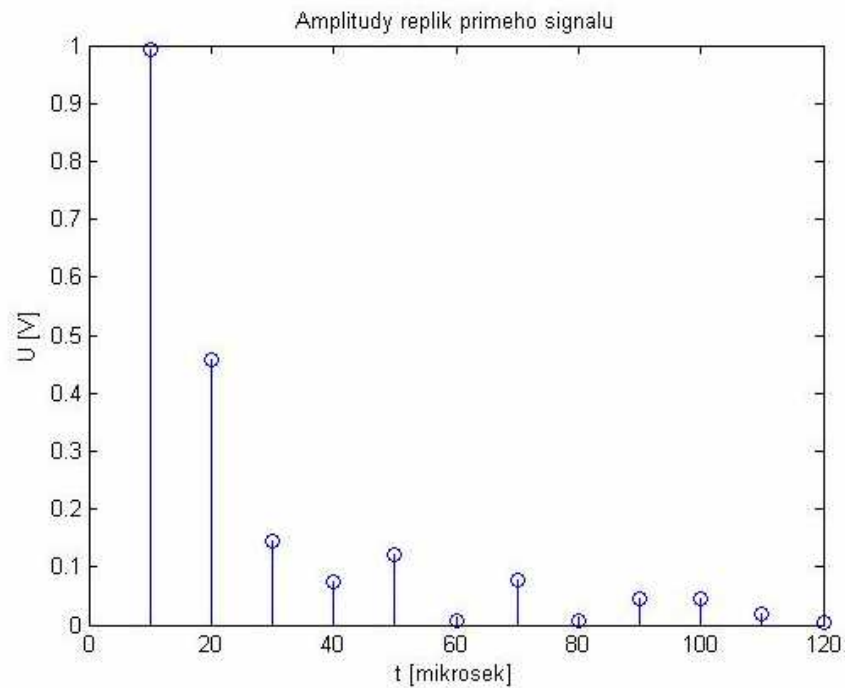
Na obrázku 49 je porovnání signálu v pracovním kanálu sp a zbytkového signálu z vypočítaného pomocí vektoru f ze druhé části signálu. Graf je podobný jako v předcházejícím případě.



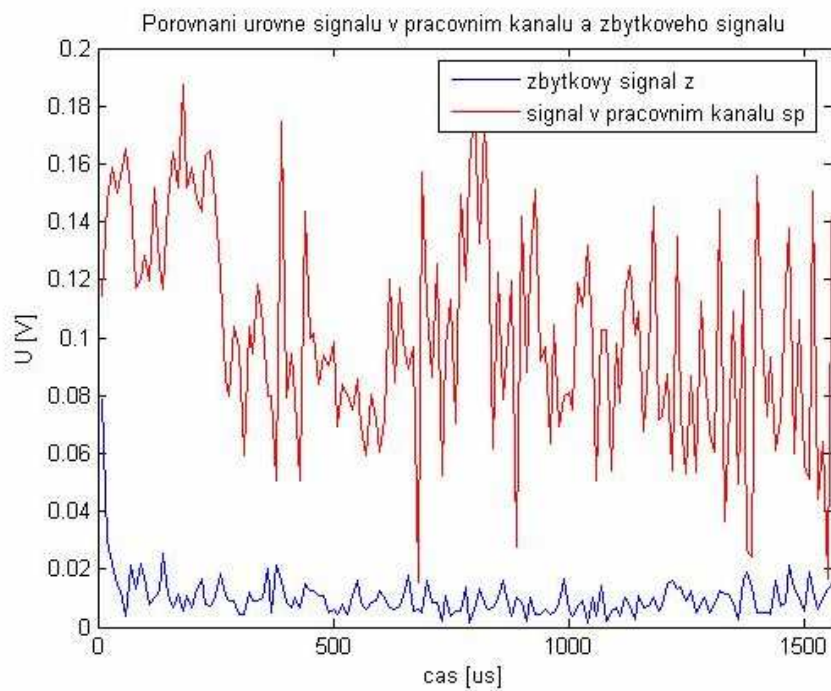
Obr. 49 Porovnání úrovně signálu v pracovním kanálu sp a zbytkového signálu z , vypočítaného pomocí vektoru f ze druhé osminy.

5.4.2 Druhá osmina

Výkon signálu v pracovním kanálu $P_{sp} = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ W}$ a výkon zbytkového signálu $P_z = 1,7621 \cdot 10^{-5} \text{ W}$. Výsledky pro druhou osminu jsou podobné jako pro první. Obrázek 50 zobrazuje amplitudy replik přímého signálu a na obrázku 51 je opět porovnání signálu v pracovním kanálu a zbytkového signálu z , tentokrát pro druhou osminu



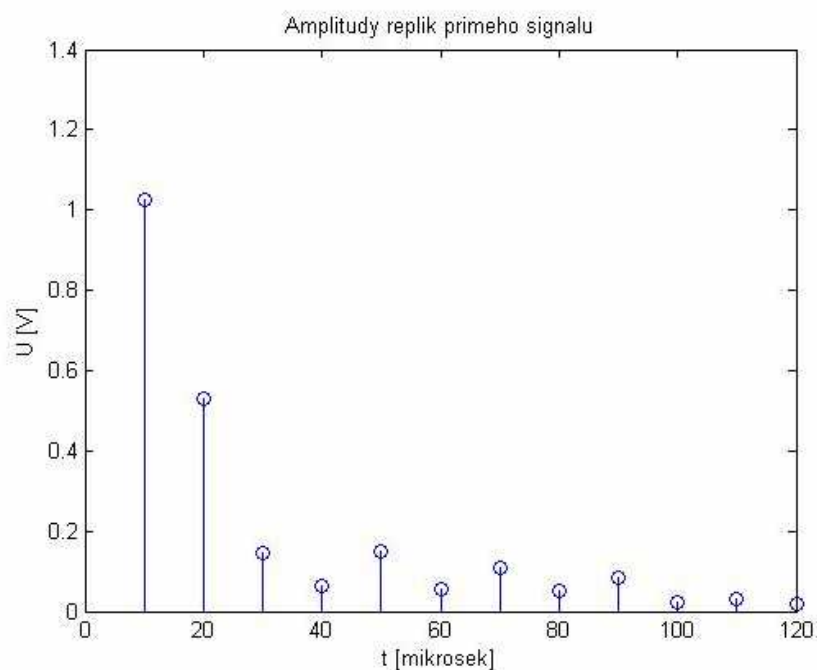
Obr. 50 Vypočítané amplitudy replik přímého signálu v pracovním kanálu pro druhou osminu signálu



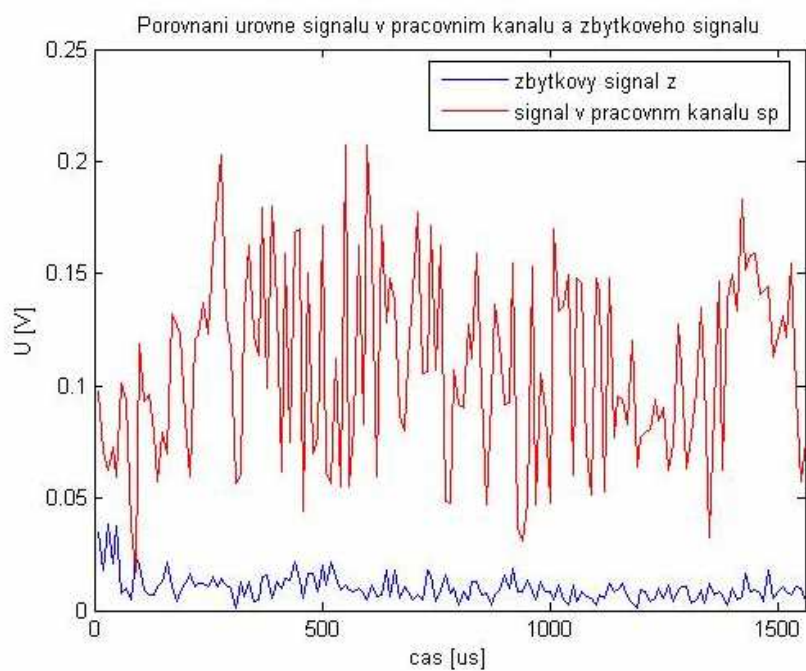
Obr. 51 Porovnání úrovně signálu v pracovním kanálu *sp* a zbytkového signálu *z*, pro druhou osminu signálu

5.4.3 Třetí osmina

Výkon signálu v pracovním kanálu $P_{sp} = 13,488 \cdot 10^{-3} \text{ W}$ a výkon zbytkového signálu $P_z = 1,3844 \cdot 10^{-4} \text{ W}$...



Obr. 52 Vypočítané amplitudy replik přímého signálu v pracovním kanálu pro třetí osminu signálu

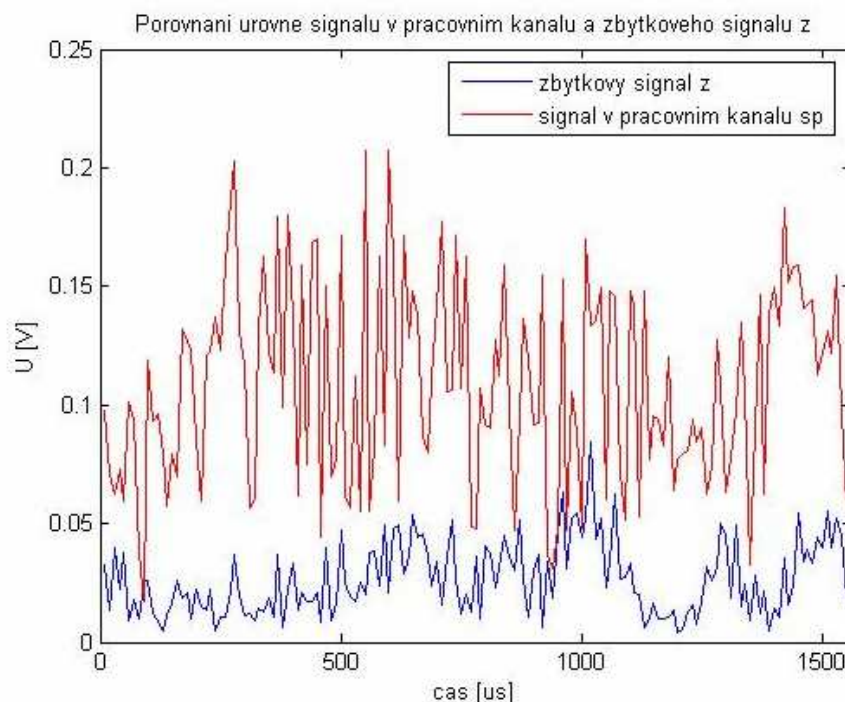


Obr. 53 Porovnání úrovně signálu v pracovním kanálu sp a zbytkového signálu z , pro třetí osminu signálu

Na obrázku 52 jsou vypočítané amplitudy replik přímého signálu, které přibližně odpovídají zadaným. Na obrázku 53 je opět porovnání signálu v pracovním kanálu sp a zbytkového signálu z , tentokrát pro první osminu signálu

Zbytkový signál z , vypočítaný pomocí vektoru f z druhé osminy signálu

Na obrázku 54 je porovnání signálu v pracovním kanálu sp a zbytkového signálu z vypočítaného pomocí vektoru f ze druhé části signálu. Graf je podobný jako v předcházejícím případě.



Obr. 54 Porovnání úrovně signálu v pracovním kanálu sp a zbytkového signálu z , vypočítaného pomocí vektoru f ze druhé osminy.

U dalších částí jsou výsledky řádově podobné. Tedy ekvalizace funguje i při rozdělení signálu na osm částí a použití ekvalizace na každou část zvlášť.

5.4.4 Porovnání výsledků ze všech částí

V tabulce 6 jsou porovnány výkony signálů pro všechny části. V tabulce jsou uvedeny následující zkratky: P_{sp} - výkon signálu v pracovním kanálu, P_z - výkon zbytkového signálu, P_{z_1} - výkon signálu z , vypočítaného pomocí vektoru f z jiné části signálu, P_{VR} - potlačení výkonu replik, P_{VR1} potlačení výkonu replik při použití signálu z , vypočítaného pomocí vektoru f z jiné části signálu.

část	P_{sp} [W]	P_z [W]	P_{z_l} [W]	PVR [dB] ($10 \cdot \log(P_{sp}/P_z)$)	$PVRI$ [dB] ($10 \cdot \log(P_{sp}/P_{z_l})$)
1.	$10,4 \cdot 10^{-3}$	$1,1952 \cdot 10^{-4}$	$7,8758 \cdot 10^{-4}$	19,4	11,2
2.	$11,7 \cdot 10^{-3}$	$1,6047 \cdot 10^{-4}$	$1,6047 \cdot 10^{-4}$	18,6	18,6
3.	$13,5 \cdot 10^{-3}$	$1,3844 \cdot 10^{-4}$	$9,4089 \cdot 10^{-4}$	19,9	11,6
4.	$15,3 \cdot 10^{-3}$	$1,5865 \cdot 10^{-4}$	$6,2393 \cdot 10^{-4}$	19,8	13,9
5.	$6,8 \cdot 10^{-3}$	$9,8202 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	8,4	7,2
6.	$3,7 \cdot 10^{-3}$	$8,8481 \cdot 10^{-4}$	$9,2645 \cdot 10^{-4}$	6,2	6,0
7.	$15,7 \cdot 10^{-3}$	$1,1888 \cdot 10^{-4}$	$6,8406 \cdot 10^{-4}$	21	13,6
8.	$13,2 \cdot 10^{-3}$	$1,4652 \cdot 10^{-4}$	$4,8645 \cdot 10^{-4}$	19,5	14,3

Tab.6 Porovnání výkonů zbytkového signálu a signálu v pracovním kanálu při rozdělení signálu na osm částí.

Z uvedených výsledků vyplývá, že i při rozdělení signálu na osm částí a provedení ekvalizace na všech částech zvlášť, ekvalizace funguje jako při použití celého signálu. Potlačení vektoru replik při použití vektoru f z druhé části vycházejí opět jen o něco menší než při výpočtu ze stejné části signálu. Hodnoty potlačení výkonu replik se pohybují v rozmezí přibližně 11 -19 dB. Výjimkou je pátá a šestá osmina signálu, kde jsou výsledky horší než v ostatních částech, hodnoty potlačení výkonu replik se pohybují v rozmezí 6 -8 dB, což není vyhovující

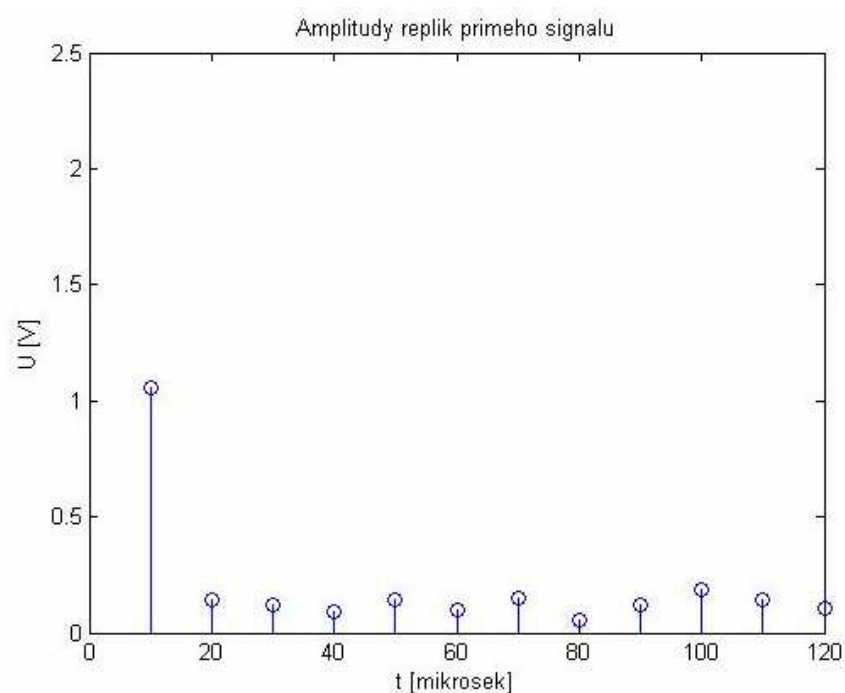
5.5 Rozdělení signálu na šestnáct částí

Rozdělením signálu vznikne šestnáct částí, každá z nich obsahuje 78 vzorků. Na ukázkou jsou zde uvedeny grafy pro první dvě šestnáctiny signálu.

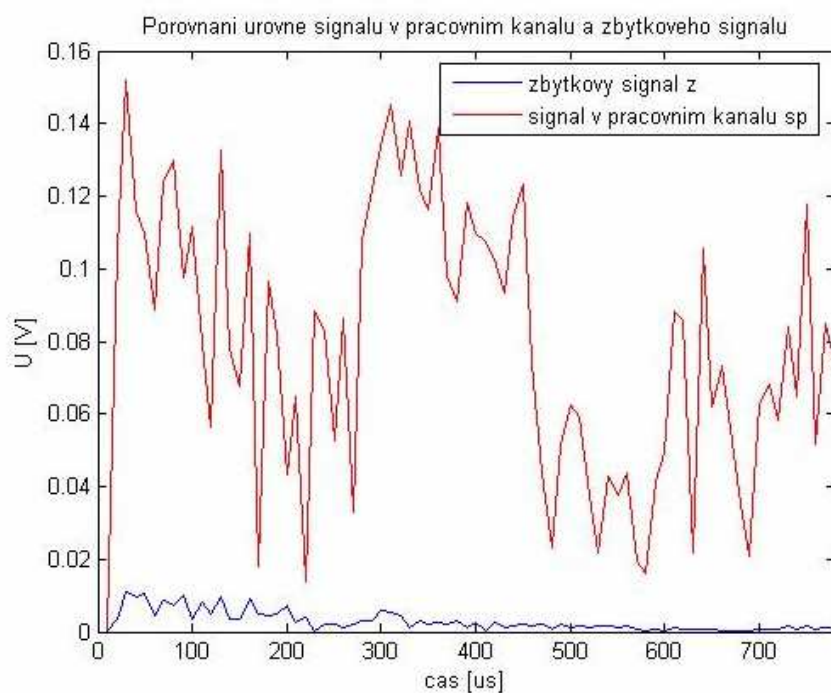
5.5.1 První šestnáctina

Výkon signálu v pracovním kanálu $P_{sp} = 7,6 \cdot 10^{-3}$ W a výkon zbytkového signálu $P_z = 1,5874 \cdot 10^{-5}$ W. Na obrázku 55 jsou vypočítané amplitudy replik, které ale vycházejí

téměř konstantní. Na obrázku 56 je porovnání signálu v pracovním kanálu *sp* a zbytkového signálu *z*.



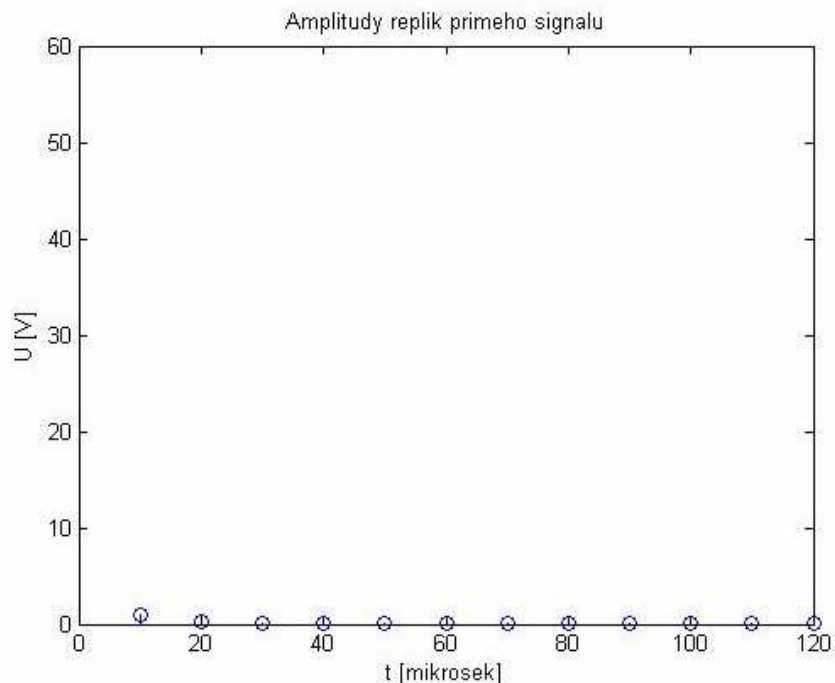
Obr. 55 Vypočítané amplitudy replik přímého signálu v pracovním kanálu pro první šestnáctinu



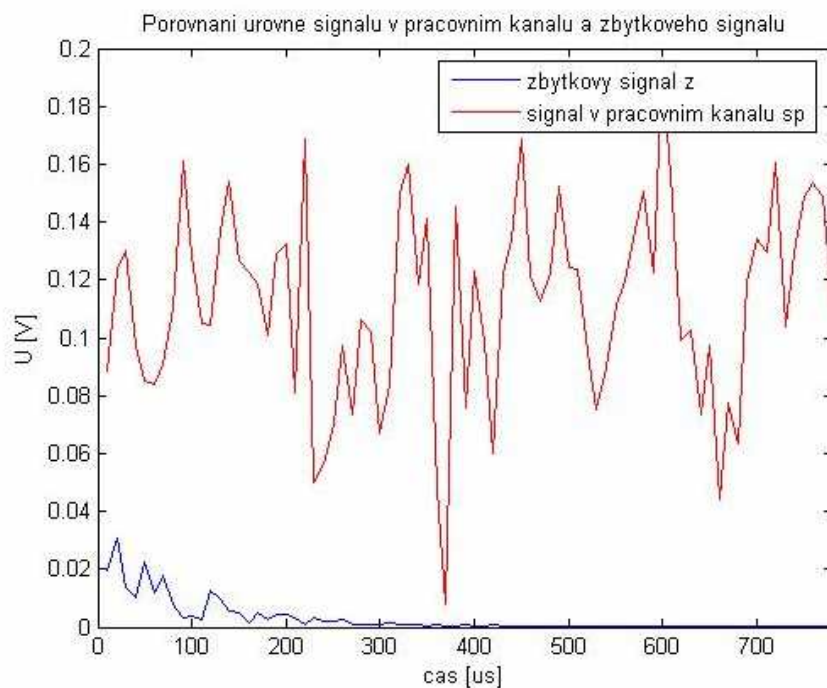
Obr. 56 Porovnání úrovně signálu v pracovním kanálu *sp* a zbytkového signálu *z*, pro první šestnáctinu

5.5.2 Druhá šestnáctina

Výkon signálu v pracovním kanálu $P_{sp} = 13,7 \cdot 10^{-3} \text{ W}$ a výkon zbytkového signálu $P_z = 4,0298 \cdot 10^{-5} \text{ W}$.



Obr. 57 Vypočítané amplitudy replik přímého signálu v pracovním kanálu pro třetí osminu

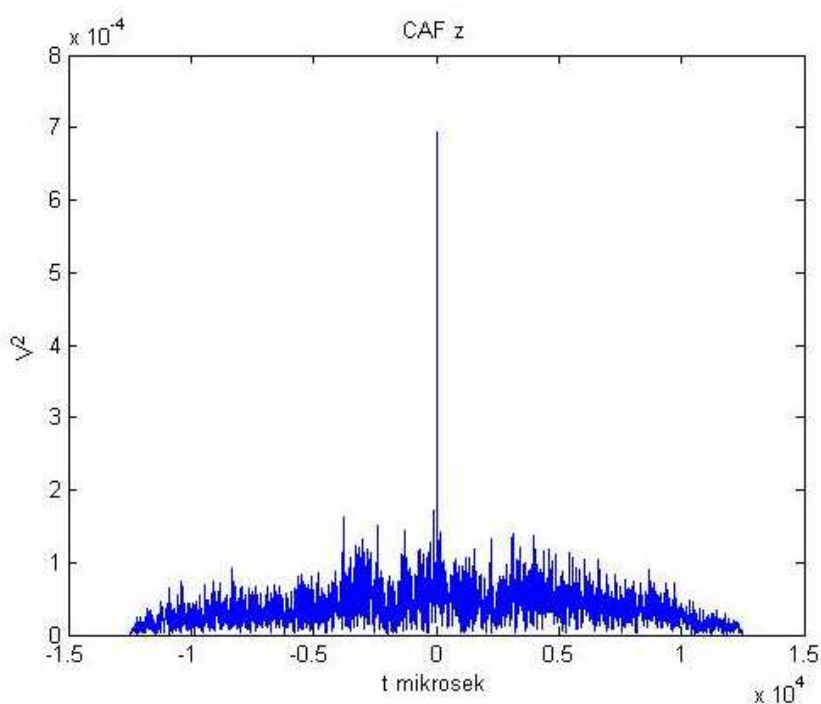


Obr. 58 Porovnání úrovně signálu v pracovním kanálu sp a zbytkového signálu z , pro druhou šestnáctinu

Na obrázku 57 jsou vypočítané amplitudy replik, které tentokrát vycházejí nulové. Na obrázku 58 je porovnání signálu v pracovním kanálu *sp* a zbytkového signálu *z*. U dalších částí jsou výsledky řádově podobné. Jak je vidět z uvedených výsledků i při takto krátkých úsecích signálu je zbytkový signál *z* stále dost potlačený oproti signálu v pracovním kanálu *sp*. Vypočítané amplitudy replik přímého signálu už ale nevycházejí správně. To může být způsobeno tím, že při rozdělení signálu na šestnáct částí, je v jednotlivých úsecích signálu už příliš málo vzorků.

6 Ověření přítomnosti Dopplerovského signálu

Na závěr byla pro ověření vypočítána vzájemná korelační funkce mezi původním Dopplerovsky posunutým signálem, který byl do signálu naprogramován a výsledným zbytkovým signálem, který zůstane po ekvalizaci. Právě tento Dopplerovsky posunutý signál se používá k odhalení pohybujících se předmětů, je tedy potřeba ověřit, zda nebyl v průběhu zpracování poškozen nebo odstraněn. Autokorelační funkce se používá k určení časového zpoždění mezi dvěma signály. Bylo tím ověřeno zda Dopplerovsky posunutý signál nebyl během zpracování signálu nechtěně odstraněn (odfiltrován).



Obr. 59 Autokorelační funkce

V grafu na obrázku 59 je vidět jasné maximum v nule, z čehož je patrné že Dopplerovsky posunutý signál zůstal zachován a nezměněn.

7 Závěr

Z výsledků provedených analýz vyplývá, při jakých hodnotách odstup signálu od šumu a signálu od clutteru v referenčním kanálu je ještě ekvalizační metoda použitelná. Dále pak je patrné, že lze ekvalizaci použít i samostatně na části signálu a to na půlky, čtvrtiny i osminy. Při rozdělení signálu na šestnáctiny už nevycházely amplitudy replik signálu správně, výsledky byly tedy nevyhovující. Ze všech uvedených výsledků, také vyplývá, že při výpočtu zbytkového signálu z předem vypočítaného vektoru \mathbf{f} , je možné vypočítat vektor \mathbf{f} z jedné části a tentýž vektor pak použít i v ostatních částech signálu, v takovém případě dojde jen k mírnému zhoršení výsledku a dojde k usnadnění výpočtu protože odpadne výpočet vektoru \mathbf{f} v ostatních částech signálu. Lze tedy takto výpočet ekvalizace zjednodušit při zachování dobrých výsledků.

Použitá literatura

- [1] Bezoušek P., Šedivý P.: *Radarová technika*, ČVUT Praha, 2007
- [2] Bezoušek, P., Schejbal, V.: Bistatic and multistatic radars, *Radioengineering*, 3, 2008, ISSN 1210-2512
- [3] Kolář R. *Analýza signálu FM rozhlasu*, bakalářská práce, Univerzita Pardubice, 2009
- [4] ERA a.s.: Pasivní koherentní lokace [online]. 2010[cit. 2010-03-15]. Dostupný z WWW: <mat.fsv.cvut.cz/seminar/foto/20080401/pcl_cvut.pdf>
- [5] Griffiths H. D.: Bistatic and Multistatic Radar [online] . 2010 [cit. 2010-02-05]. Dostupný z WWW: <<http://www2.theiet.org/oncomms/pn/radar/Griffiths%20Shrivenham.pdf>>
- [6] Slezak, L., Kvasnicka, M., Pelant, M, Vavra, J., Plsek, R., Passive coherent location system: Simulation and evaluation [online]. 2010[cit. 2010-02-12]. Dostupný z WWW: <<http://www.erabeyondradar.com/documents/whitepapers/Surveillance/pcl-system-simulation-and-evaluation.pdf>>
- [7] Holand, P. E., Maksimjuk, D., Reitsma, G., FM radio-based bistatic radar, *IEE Proc. Of Radar nad Sonar Navig.*, Vol. 152, no. 3, p.1007-1016, červen 2005
- [8] Willis, N., J.,: *Bistatic radar*, 2005
- [9] Techblog: Pasivní radary jako strategická zbraň [online]. 2010 [cit. 2010-04-22]. Dostupný z WWW: <<http://www.techblog.cz/technologie/pasivni-radary-jako-strategicka-zbran.html>>
- [10] Militarybox: Pasivní sledovací systémy [online]. 2010 [cit. 2010-04-25]. Dostupný z WWW: <<http://www.militarybox.cz/news/pasivni-sledovaci-systemy/>>
- [11] Armáda české republiky: Pasivní sledovací systém Věra [online]. 2010 [cit. 2010-04-18]. Dostupný z WWW: <<http://www.acr.army.cz/technika-a-vybroj/protivzdujna-obrana/pasivni-sledovaci-system-vera-3504/>>

Příloha A – skript obalka.m

```
%obalka.m
clc; % vyčistí workspace
close all; % zavře všechny obrázky a okna
%clear all; % vymaže všechny proměnné

%DATA
SkuCr = 100; % poměr signál ke clutteru v referenčním kanále v dB
SkuNr = 100; % poměr signál k šumu v referenčním kanále v dB
SkuD = 80;

%load mfsignalyBR;
N = length(sr);
sr = sr + sqrt(10^(-0.1*SkuCr))*cr + sqrt(10^(-0.1*SkuNr))*nr; %
celkový signál v referenčním kanále
sp = sp +sqrt(10^(-0.1*SkuD))*sd ; % celkový signál v pracovním k
anále

srsm=sr.*exp(-j*2*pi*(1:N)*10.65e6/160e6);
spsm=sp.*exp(-j*2*pi*(1:N)*10.65e6/160e6);
sdsm=sd.*exp(-j*2*pi*(1:N)*10.65e6/160e6);
Fs = 160; % Sampling Frequency

N = 35; % Order
Fc = 0.5; % Cutoff Frequency
flag = 'noscale'; % Sampling Flag

% Create the window vector for the design algorithm.
win = hamming(N+1);

% Calculate the coefficients using the FIR1 function.
b = fir1(N, Fc/(Fs/2), 'low', win, flag);
srsmf = 16*filter(b, 1,srsm);
spsmf = 16*filter(b, 1,spsm);

R = 1600; % řád decimace
j=1;
for i=1:R:2000000
    srdec(j)=srsmf(i);
    spdec(j)=spsmf(i);
    %sddec(j)=sdsmf(i);
    j=j+1;
end;
```

```

n=length(Ndr); %decimace vektorů Ndr a Ndp pro zobrazení původního
rozmístění posunutých signálů
for i=1:n
    Ndrdec(i)=Ndr(i)/1600;
end;

n=length(Ndp);
for i=1:n
    Ndpdec(i)=Ndp(i)/1600;
end;

save('deckomplobalkysrsp','srdec','spdec','Ndrdec','Ndpdec');

Fs2 = Fs/R; % nová vzorkovací frekvence v MHz
N2 = length(srdec);
t = (1:N2)/Fs2; % časová osa v mikrosek pro zobrazení signálů v
mikrosek
f2 = 1000*Fs2*((1:N2)-N2/2)/N2;
% figure;plot(f2,fftshift(abs(fft(srdec)))/N);title('spektrum srdec
(b) a sddec (g) po decimaci');xlabel('f
[kHz]');ylabel('V/Hz');xlim([-200 200]);
% hold on;
% plot(f2,fftshift(abs(fft(sddec)))/N,'g');% title('spektrum po
decimaci');xlabel('f [kHz]');ylabel('V/Hz');xlim([-200 200]);

figure;plot(t,abs(srdec));title('srdec');xlabel('t
[mikrosek]');ylabel('U[V]');
figure;plot(t,abs(spdec));title('spdec');xlabel('t
[mikrosek]');ylabel('U[V]');
%figure;plot(t,abs(sddec));title('sddec');

```

Příloha B – skript zpracovani.m

```
% zpracovani.m
clc; % vyčistí workspace
close all; % zavře všechny obrázky a okna

N = length(srdec);
M=70;

matA=zeros(M,N);

posun=1;
x=-posun;
for i=1:M
    x=x+posun;
    %if ((1250-x)>0)
        for j=1:(N-x)
            matA(i,j+x)=srdec(j);
        end
    %else break
    %end
end

save('maticeA','matA');

load zpev_pomaly-matlab;

N=length(srdec);
I = eye(N);

f=spdec*matA'*(inv(matA*matA'));
z=spdec*(matA'*(inv(matA*matA'))*matA-I);
Fs = 160;
novaF = Fs/1600; % nový vzorkovací kmitočet v MHz
%novad = delka/1600;
N = length(srdec);
t = (1/(novaF))*(1:N);
osaf = (1:M)/novaF;
%cas(1:N)=t(1:N);
figure;stem(osaf,abs(f));title('Amplitudy replik primeho
signalu');xlabel('t [mikrosek]');ylabel('U [V]'); xlim([0 120]);
%figure;stem(abs(f));title('Amplitudy replik primeho
signalu');xlim([0 12]);
figure;stem(osaf,abs(f));title('Amplitudy replik primeho
signalu');xlabel('t [mikrosek]');ylabel('U [V]');
```

```

figure;stem(10*Ndpdec,abs(Ap));title('Zadane amplitudy replik
primeho signalu');xlabel('t [mikrosek]');ylabel('U [V]'); xlim([0
120]);

figure;plot(t,abs(z));title('vektor z');;
%stem(Ndp,abs(Ap));
hold on;
plot(t,abs(spdec),'r');title('Porovnani urovne signalu v pracovnim
kanalu a zbytkoveho signalu');xlabel('cas [us]'); ylabel('U
[V]');xlim([0 12500]);
%stem(Ndp,abs(Ap));

n=length(spdec); %vypocet vykonu signalu sp a z
Pspdec = sum((abs(spdec)).^2)/n

n=length(z);
Pz = sum((abs(z)).^2)/n

save('sum10dB','z','f','Pspdec','Pz'); %ulozeni vysledku
j = sqrt(-1);
t2 = (-(n-1):n-1)/novaF; % časová osa pro zobrazení korel. funkcí v
mikrosek
figure; plot(t2,abs(xcorr(srdec))/n);title('ACF srdec');xlabel('t
mikrosek');ylabel('V^2');
figure;plot(t2,abs(xcorr(spdec,srdec))/n);title('CF
spdec');xlabel('t mikrosek');ylabel('V^2');
figure;plot(t2,abs(xcorr(z,srdec))/n);title('CF z');xlabel('t
mikrosek');ylabel('V^2');
figure;plot(t2,abs(xcorr(z,srdec.*exp(j*2*pi*0.01*t)))/n);title('CA
F z');xlabel('t mikrosek');ylabel('V^2');

```