

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

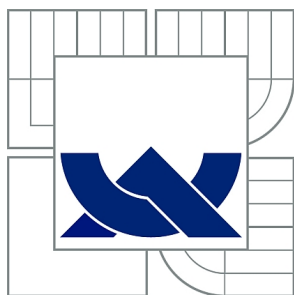
SEGMENTACE PRO ČASOVĚ-VARIANTNÍ SYSTÉMY A JEJICH
IMPLEMENTACE

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

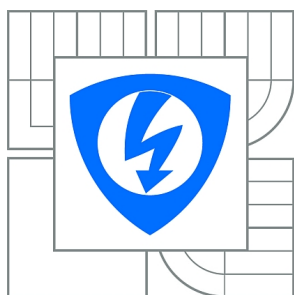
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. TOMÁŠ PAVLÍČEK

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

SEGMENTACE PRO ČASOVĚ-VARIANTNÍ SYSTÉMY A JEJICH IMPLEMENTACE

SEGMENTATIONS FOR TIME-VARIABLE SYSTEMS AND THEIR IMPLEMENTATION

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

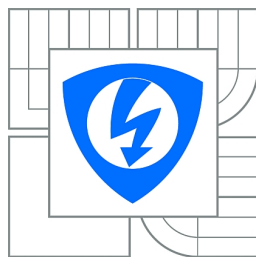
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. TOMÁŠ PAVLÍČEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. MIROSLAV BALÍK, Ph.D.

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Telekomunikační a informační technika

Student: Bc. Tomáš Pavlíček

ID: 98644

Ročník: 2

Akademický rok: 2013/2014

NÁZEV TÉMATU:

Segmentace pro časově-variantní systémy a jejich implementace

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Nastudujte a následně popište metody segmentace s přičtením přesahu COLA (Constant-Overlap-Add), VW-COLA (Variable-Window-Constant-Overlap-) a VW-VOLA (Variable-Window-Variable-Overlap-). Jednotlivé segmentace implementujte také pomocí metody odseknutí přesahu a srovnajte je s metodou přičtení přesahu. Implementované metody použijte pro segmentaci nestacionárního hudebního signálu. Použijte efektivní způsob analýzy lokální nestacionarity signálu, který umožní segmentaci s maximální délkou segmentu při zachování jeho stacionarity. Tyto metody implementujte v Matlabu tak, aby byly připraveny pro implementaci v reálném čase s minimálním procesním zpožděním.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Proakis, J.G. Manolakis, D.G. Digital Signal Processing - Third edition. Prentice Hall, ISBN 0-13-373762-4

[2] Gardner, W.G. Efficient Convolution without Input-Output Delay, JAES Vol. 43, Number 3 pp. 127, ISSN: 15494950

[3] Hayes, M. H. Digital Signal Processing. Schaum's Outline Series. New York: McGraw Hill. ISBN 0-07-027389-8.

Termín zadání: 10.2.2014

Termín odevzdání: 28.5.2014

Vedoucí práce: Ing. Miroslav Balík, Ph.D.

Konzultanti diplomové práce:

doc. Ing. Jiří Mišurec, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá popisem stacionárních náhodných diskrétních signálů se zaměřením na hudební signály. Je zde popsána, kdy je signál stacionární nebo nestacionární. Dále je zde uvedena vhodná úprava signálu pro detekci lokálních stacionarit. Práce obsahuje matematický popis charakteristik náhodných diskrétních signálů, podle kterých se určuje stacionarita signálu. Následuje popis základních váhovacích oken, jejich rozdělení, popis vlastností a porovnání jednotlivých oken. V další části práce jsou popsány metody segmentace odstranění konstantně dlouhého přesahu s konstantní délkou segmentu, přičtení konstantně dlouhého přesahu s konstantní délkou segmentu, odstranění konstantně dlouhého přesahu s proměnnou délkou segmentu, přičtení konstantně dlouhého přesahu s proměnnou délkou segmentu a přičtení proměnně dlouhého přesahu s proměnnou délkou segmentu. Následovně jsou analyzována okna používaná u segmentačních metod s proměnnou délkou segmentu. Jako další bod práce jsou přechodové jevy způsobené skokovou změnou koeficientů filtru při filtraci segmentů s proměnnou délkou. Nakonec je zkoumána vhodná metoda detekce nestacionarity signálu, jsou analyzovány segmenty vytvořené pomocí vhodné detekce. Práce obsahuje také ukázkou segmentace hudebního signálu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Stacionarita, váhovací okna, CWCOLS, CWCOLA, VWCOLS, VWCOLA, VVVOLA, přechodové jevy, detekce stacionarity

ABSTRACT

This thesis is interested in describing stationary random discrete signals, especially in music discrete signals. Here is described when is signal stationary and when is not stationary. It contains tip for preprocessing of signal for accurate recognition of local stationarity. Thesis contain mathematical definition of parameters of random digital signals, which are used for stationarity recognition. It is followed by description of basic windows, their categories, describing of their parameters and comparing of each. In next part of thesis are described methods of segmentations with constant window constant overlap save, constant window constant overlap add, variable window constant overlap save, variable window constant overlap add and variable window variable overlap add. It is followed by analyzing of windows used in segmentations with variable lengths of segments. As next point of thesis are transients made by step changes of coefficients of filter in filtering of segments with variable lengths. At the end is investigated the best accurate method of signal stationarity detection. Segments made by accurate method of detection are analyzed. thesis contains example of music signal segmentation.

KEYWORDS

Stationarity, window functions, CWCOLS, CWCOLA, VWCOLS, VWCOLA, VVVOLA, transients, stationarity detection

PAVLÍČEK, Tomáš *Segmentace pro časově-variantní systémy a jejich implementace*: diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2014. 69 s. Vedoucí práce byl Ing. Miroslav Balík, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Segmentace pro časově-variantní systémy a jejich implementace“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

Brno

.....

(podpis autora)

Výzkum popsáný v této diplomové práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.

.....

.....

(podpis autora)

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Miroslavu Balíkovi, Ph.D.
za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

OBSAH

Úvod	17
1 Stacionární náhodné diskrétní signály	18
2 Charakteristiky náhodných diskrétních signálů	20
2.1 Průměr	20
2.2 Rozptyl	20
2.3 Směrodatná odchylka	20
2.4 Autokorelace	21
2.5 Autokovariance	21
3 Váhovací okna	21
3.1 Obdélníkové okno	22
3.2 Trojúhelníkové okno	23
3.3 Hannovo okno	23
3.4 Hammingovo okno	23
3.5 Blackmanovo okno	23
3.6 Porovnání váhovacích oken	24
4 Segmentace	24
4.1 Metoda odstranění konstantně dlouhého přesahu s konstantní délkou segmentu	25
4.2 Metoda přičtení konstantně dlouhého přesahu s konstantní délkou segmentu	26
4.3 Metoda odstranění konstantně dlouhého přesahu s proměnnou délkou segmentu	29
4.4 Metoda přičtení konstantně dlouhého přesahu s proměnnou délkou segmentu	30
4.5 Metoda přičtení proměnně dlouhého přesahu s proměnnou délkou segmentu	31
5 Okna využívaná v časově variabilní segmentaci	32

6	Přechodové jevy segmentačních metod s proměnnou délkou segmentu	37
6.1	Přechodové jevy metody odstranění konstantně dlouhého přesahu s proměnnou délkou segmentu	37
6.2	Přechodové jevy metody přičtení konstantně dlouhého přesahu s proměnnou délkou segmentu	38
6.3	Přechodové jevy metody přičtení variabilně dlouhého přesahu s proměnnou délkou segmentu	40
7	Detekce lokálních stacionarit	41
7.1	Detekce lokálních stacionarit u uměle vytvořených signálů	44
7.2	Detekce lokálních stacionarit u hudebních signálů	48
8	Závěr	49
	Literatura	51
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	52
	Seznam příloh	54
A	Přehled chyb metody přičtení konstantně dlouhého přesahu s konstantní délkou segmentu bez doplnění nulami při použití pro konvoluci	55
B	Okna používaná u metody přičtení konstantně dlouhého přesahu s proměnnou délkou segmentu	56
C	Srovnání oken používaných u metody přičtení proměnně dlouhého přesahu s proměnnou délkou segmentu	57
D	Přechodové jevy segmentačních metod s proměnnou délkou	

segmentu	60
D.1 Přechodové jevy u metody odstranění konstantně dlouhého přesahu s konstantní délkou segmentu	60
D.1.1 Přechodové jevy u metody odstranění konstantně dlouhého přesahu s konstantní délkou segmentu pro sudý řád filtrů	61
D.2 Přechodové jevy u metody odstranění konstantně dlouhého přesahu s konstantní délkou segmentu	61
D.3 Přechodové jevy u metody odstranění konstantně dlouhého přesahu s konstantní délkou segmentu	62
E Detekce lokálních stacionarit	63
E.1 Detekce lokálních stacionarit u uměle vytvořených signálů	63
E.1.1 Spektra jednotlivých segmentů s proměnnou délkou s dlouhými stacionárními segmenty	67
E.2 Segmentace hudebních signálů	67
Obsah přiložených souborů	69

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Spektrogram diskrétního hudebního signálu	18
1.2	Detail spektrogramu diskrétního hudebního signálu	19
3.1	Ukázka trojúhelníkových oken	22
3.2	Porovnání váhovacích oken v časové oblasti	24
3.3	Porovnání váhovacích oken ve spektrální oblasti	24
4.1	Schéma metody odstranění konstantně dlouhého přesahu s konstantní délkou segmentu	26
4.2	Schéma první varianty metody přičtení konstantně dlouhého přesahu s konstantní délkou segmentu	27
4.3	Ukázka zpracovaných segmentů CWCOLA v1 pomocí rychlé konvoluce a jejich součtu s i bez použití přesahu	27
4.4	Schéma druhé varianty metody přičtení konstantně dlouhého přesahu s konstantní délkou segmentu	28
4.5	Ukázka zpracovaných segmentů CWCOLA v2 pomocí rychlé konvoluce a jejich součtu s i bez použití přesahu	28
4.6	Porovnání absolutních chyb metody CVCOLA v2 při použití různých oken	29
4.7	Schéma metody odstranění konstantně dlouhého přesahu s proměnnou délkou segmentu	30
4.8	Schéma metody přičtení konstantně dlouhého přesahu s proměnnou délkou segmentu	30
4.9	Schéma metody přičtení proměnně dlouhého přesahu s proměnnou délkou segmentu	31
5.1	Detail spekter obdélníkových oken o různé délce	32
5.2	Detail spekter Hammingových oken o různé délce	32
5.3	Menší detail spekter obdélníkových oken o různé délce	32
5.4	Ukázka okna VWCOLA	33
5.5	Detail spekter obdélníkových oken a okna VWCOLA	33
5.6	Porovnání spekter okna VWCOLA, trojúhelníkového a obdélníkového o stejné délce 1024 vzorků	33
5.7	Detail spekter obdélníkových oken a okna VWCOLA	34
5.8	Porovnání spekter okna VWCOLA, trojúhelníkového a obdélníkového o stejné délce 16384 vzorků	34
5.9	Časové posloupnosti váhovacích oken VWCOLA o délce 2048 s různou délkou přesahu	35
5.10	Porovnání spekter váhovacích oken VWCOLA o délce 2048 s různou délkou přesahu	35

5.11	Porovnání okna VWVOLA s oknem obdélníkovým a trojúhelníkovým se stejnými délkami v časové oblasti	35
5.12	Porovnání okna VWVOLA s oknem obdélníkovým a trojúhelníkovým se stejnými délkami ve spektrální oblasti	35
5.13	Časové posloupnosti oken VWVOLA o délce 1024 s různými přesahy	36
5.14	Porovnání spekter oken VWVOLA o délce 1024 vzorků s různými přesahy	36
5.15	Časové posloupnosti oken VWVOLA a VWCOLA o stejné délce . . .	36
5.16	Porovnání spekter oken VWVOLA a VWCOLA o stejné délce	36
6.1	Kmitočtové charakteristiky filtrů typu dolní a horní propust s mezním kmitočtem 1 kHz	37
6.2	Impulzní odezvy na jednotkový impuls filtrů typu dolní a horní propust s mezním kmitočtem 1 kHz	37
6.3	Přechodové jevy metody VWCOLS při skokových změnách filtrů IIR 2. kanonické formy	38
6.4	Přechodové jevy metody VWCOLA při skokových změnách filtrů IIR 2. kanonické formy	39
6.5	Kmitočtové charakteristiky filtrů typu dolní a horní propust s mezním kmitočtem 1 kHz druhého řádu	39
6.6	Kmitočtové charakteristiky filtrů typu dolní a horní propust s mezním kmitočtem 1 kHz čtvrtého řádu	39
6.7	Přechodové jevy metody VWCOLA při skokových změnách filtrů IIR 2. kanonické formy druhého řádu	40
6.8	Přechodové jevy metody VWCOLA při skokových změnách filtrů IIR 2. kanonické formy čtvrtého řádu	40
6.9	Přechodové jevy metody VWVOLA při skokových změnách filtrů IIR 2. kanonické formy	41
7.1	Zjednodušené schéma programu	41
7.2	Ukázka segmentace s proměnnou délkou segmentu stacionárních úseků vstupního signálu	42
7.3	Ukázka segmentace s proměnnou délkou segmentu se samostatným přechodovým oknem	43
7.4	Segmentace skokové změny frekvence harmonického signálu při detekci stacionarity pomocí směrodatné odchylky	45
7.5	Segmentace skokové změny frekvence harmonického signálu při detekci stacionarity pomocí rozptylu	45
7.6	Segmentace skokové změny frekvence harmonického signálu při detekci stacionarity pomocí porovnání prostředního vzorku autokorelace	46
7.7	Spektrogram segmentovaného signálu pomocí metody VWCOLS . . .	46

7.8	Spektra jednotlivých segmentů VWCOLS	46
7.9	Spektrogram segmentovaného signálu pomocí metody VWCOLA . . .	47
7.10	Spektra jednotlivých segmentů VWCOLA	47
7.11	Spektrogram segmentovaného signálu pomocí metody VWVOLA . . .	48
7.12	Spektra jednotlivých segmentů VWVOLA	48
7.13	Spektrogram hudebního signálu a vyznačená okna segmentace VW- COLA	48
A.1	Impulzní odezva na jednotkový impuls použité dolní propusti s mezním kmitočtem 1 kHz	55
A.2	Chyby čtyř po sobě jdoucích segmentů při použití metody CWCOLA bez doplnění nulami pro filtraci s FIR filtrem typu dolní propust s mezním kmitočtem 1 kHz	55
A.3	Impulzní odezva na jednotkový impuls použité dolní propusti s mezním kmitočtem 5 kHz	55
A.4	Chyby čtyř po sobě jdoucích segmentů při použití metody CWCOLA bez doplnění nulami pro filtraci s FIR filtrem typu dolní propust s mezním kmitočtem 5 kHz	55
A.5	Impulzní odezva na jednotkový impuls použité dolní propusti s mezním kmitočtem 1000 Hz	56
A.6	Chyby čtyř po sobě jdoucích segmentů při použití metody CWCOLA bez doplnění nulami pro filtraci s FIR filtrem typu horní propust s mezním kmitočtem 1000 Hz	56
A.7	Impulzní odezva na jednotkový impuls použité dolní propusti s mezním kmitočtem 5000 Hz	56
A.8	Chyby čtyř po sobě jdoucích segmentů při použití metody CWCOLA bez doplnění nulami pro filtraci s FIR filtrem typu horní propust s mezním kmitočtem 5000 Hz	56
B.1	Časové posloupnosti váhovacích oken VWCOLA o délce 1024 s přesahem 256 vzorků	57
B.2	Porovnání spekter oken VWCOLA vycházející z Hammingova okna o délce 1024 s přesahem 256 vzorků	57
B.3	Porovnání spekter oken VWCOLA vycházející z Hannova okna o délce 1024 s přesahem 256 vzorků	57
B.4	Porovnání spekter oken VWCOLA vycházející z Blackmanova okna o délce 1024 s přesahem 256 vzorků	57
C.1	Časové posloupnosti oken VWVOLA vycházející z Hammingova okna o délce 1024 s různými přesahy	58
C.2	Porovnání detailů spekter oken VWVOLA vycházející z Hammingova okna o délce 1024 vzorků s různými přesahy	58

C.3	Porovnání spekter oken VWVOLA vycházející z Hammingova okna o délce 1024 vzorků s různými přesahy	58
C.4	Časové posloupnosti oken VWVOLA vycházející z Hannova okna o délce 1024 s různými přesahy	58
C.5	Porovnání detailů spekter oken VWVOLA vycházející z Hannova okna o délce 1024 vzorků s různými přesahy	59
C.6	Porovnání spekter oken VWVOLA vycházející z Hannova okna o délce 1024 vzorků s různými přesahy	59
C.7	Časové posloupnosti oken VWVOLA vycházející z Blackmanova okna o délce 1024 s různými přesahy	59
C.8	Porovnání detailů spekter oken VWVOLA vycházející z Blackmanova okna o délce 1024 vzorků s různými přesahy	59
C.9	Porovnání spekter oken VWVOLA vycházející z Blackmanova okna o délce 1024 vzorků s různými přesahy	59
D.1	Kmitočtové charakteristiky FIR filtrů řádu 50 typu dolní a horní propust s mezním kmitočtem 1 kHz	60
D.2	Přechodové jevy metody VWCOLS při skokových změnách filtrů IIR přímé formy	60
D.3	Přechodové jevy metody VWCOLS při skokových změnách filtrů IIR 1. kanonické formy	60
D.4	Přechodové jevy metody VWCOLS při skokových změnách filtrů FIR přímé formy	61
D.5	Přechodové jevy metody VWCOLS při skokových změnách filtrů FIR 1. kanonické formy	61
D.6	Přechodové jevy metody VWCOLS při skokových změnách filtrů FIR 2. kanonické formy druhého řádu	61
D.7	Přechodové jevy metody VWCOLS při skokových změnách filtrů FIR 2. kanonické formy čtvrtého řádu	61
D.8	Přechodové jevy metody VWCOLA při skokových změnách filtrů IIR přímé formy	62
D.9	Přechodové jevy metody VWCOLA při skokových změnách filtrů IIR 1. kanonické formy	62
D.10	Přechodové jevy metody VWCOLA při skokových změnách filtrů FIR přímé formy	62
D.11	Přechodové jevy metody VWCOLA při skokových změnách filtrů FIR 1. kanonické formy	62
D.12	Přechodové jevy metody VWVOLA při skokových změnách filtrů IIR přímé formy	63

D.13	Přechodové jevy metody VWVOLA při skokových změnách filtrů IIR	
	1. kanonické formy	63
D.14	Přechodové jevy metody VWVOLA při skokových změnách filtrů FIR	
	přímé formy	63
D.15	Přechodové jevy metody VWVOLA při skokových změnách filtrů FIR	
	1. kanonické formy	63
E.1	Segmentace skokové změny frekvence harmonického signálu při de-	
	tekci stacionarity pomocí porovnání autokorelačních posloupností . .	64
E.2	Segmentace skokové změny frekvence harmonického signálu při de-	
	tekci stacionarity pomocí porovnání autokovariančních posloupností .	64
E.3	Segmentace skokové změny frekvence harmonického signálu při de-	
	tekci stacionarity pomocí porovnání prostředního vzorku autokova-	
	riančních posloupností	65
E.4	Segmentace VWCOLS skokové změny frekvence harmonického signálu	
	při detekci stacionarity pomocí porovnání autokovariančních posloup-	
	ností	65
E.5	Segmentace VWVOLA skokové změny frekvence harmonického signálu	
	při detekci stacionarity pomocí porovnání autokovariančních posloup-	
	ností	66
E.6	Spektra jednotlivých segmentů VWCOLS s dlouhými stacionárními	
	segmenty	67
E.7	Spektra jednotlivých segmentů VWCOLA s dlouhými stacionárními	
	segmenty	67
E.8	Spektra jednotlivých segmentů VWVOLA s dlouhými stacionárními	
	segmenty	67
E.9	Spektrogram hudebního signálu a vyznačená okna segmentace VW-	
	COLS	68
E.10	Spektrogram hudebního signálu a vyznačená okna segmentace VW-	
	VOLA	68

ÚVOD

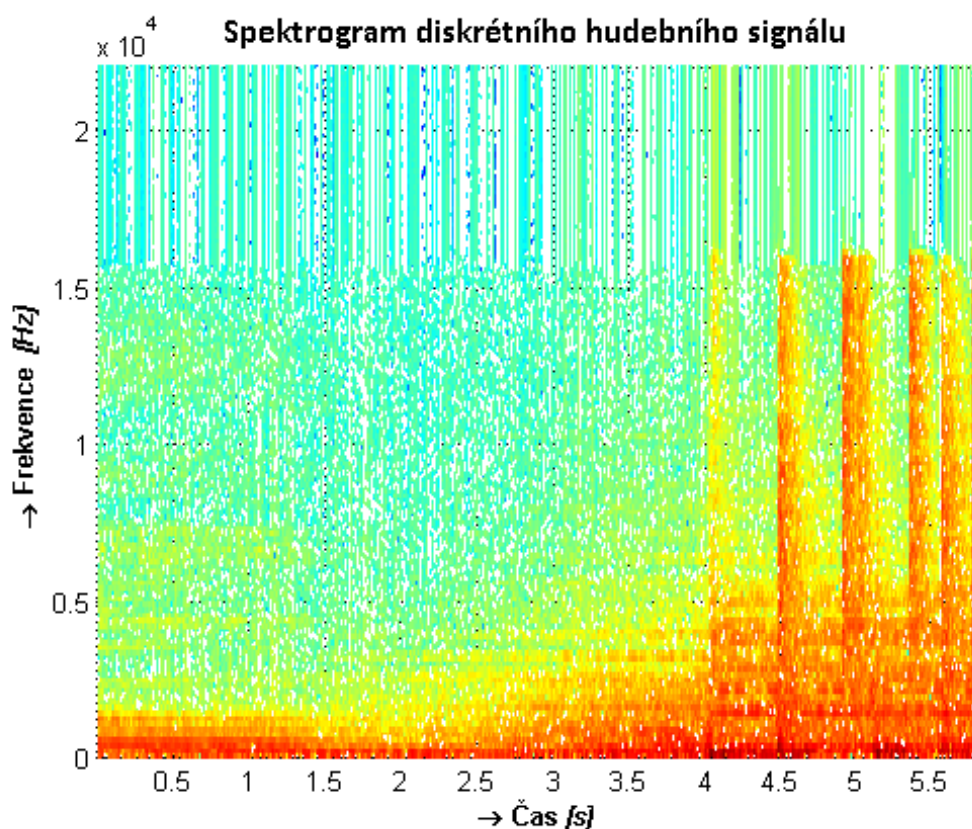
V první kapitole této práce jsou popsány stacionární diskrétní signály se zaměřením na hudební signály. Je zde popsáno, kdy se signál považuje za stacionární. Dále jsou zde popsány lokální stacionarity a nestacionarity v signálu. Dále je zde popsána vhodná úprava signálu pro analýzu stacionarity signálu. V další kapitole jsou matematicky popsány charakteristiky náhodných diskrétních signálů, podle kterých se určuje stacionarita signálu. Následuje popis základních váhovacích oken, jejich rozdělení, popis vlastností a porovnání jednotlivých oken.

Ve třetí kapitole je popsána segmentace signálu metodami odstranění konstantně dlouhého přesahu s konstantní délkou segmentu, přičtení konstantně dlouhého přesahu s konstantní délkou segmentu, odstranění konstantně dlouhého přesahu s proměnnou délkou segmentu, přičtení konstantně dlouhého přesahu s proměnnou délkou segmentu a přičtení proměnně dlouhého přesahu s proměnnou délkou segmentu. Pro metody s proměnnou délkou segmentu jsou v následující kapitole popsány váhovací okna. Jsou zde popsány jednotlivé typy oken, jejich nevýhody a vzájemné porovnání.

Následovně jsou popsány přechodové jevy vznikající při filtraci segmentovaného signálu při segmentaci s proměnnou délkou segmentu u časově variantního systému se skokovou změnou koeficientů filtru pro různé implementace filtrů. V poslední kapitole je popsán vytvořený program. Porovnání detekcí pomocí porovnání číselných charakteristik sousedních segmentů. Dále jsou zde popsány segmentace s proměnnou délkou segmentu uměle vytvořených signálů. Ukázky segmentací a porovnání spekter jednotlivých segmentů u jednotlivých metod. Nakonec je zde uvedena ukázka segmentace hudebního signálu.

1 STACIONÁRNÍ NÁHODNÉ DISKRÉTNÍ SIGNÁLY

Pro náhodné diskrétní signály platí, že jejich hodnota signálu je určena s jistou mírou pravděpodobnosti. Pokud se pravděpodobnostní charakteristiky nemění v čase, může se o signálu říci, že je stacionární. Hudební signál se obecně považuje za nestacionární náhodný diskrétní signál, ovšem lze říci, že jde o po částech stacionární diskrétní signál. Většina hudebních signálů obsahuje kvazistacionární část spektra v oblasti přibližně do frekvence 6 kHz, tuto část spektra lze považovat jako globálně stacionární. Změna energie ve spektru nad touto hranicí naznačuje, že se jedná o lokální nestacionaritu signálu. Typickým příkladem je úder do bicích nebo změna směru pohybu smyčce. Tuto charakteristiku lze zaznamenat zejména u hudebních signálů, které byly vytvořeny hudebními nástroji. U syntetických hudebních signálů bývá většinou energie rozprostřena do vyšších kmitočtů a jako kvazistacionární část spektra tedy u nich nelze považovat frekvenční pásmo do 6 kHz.

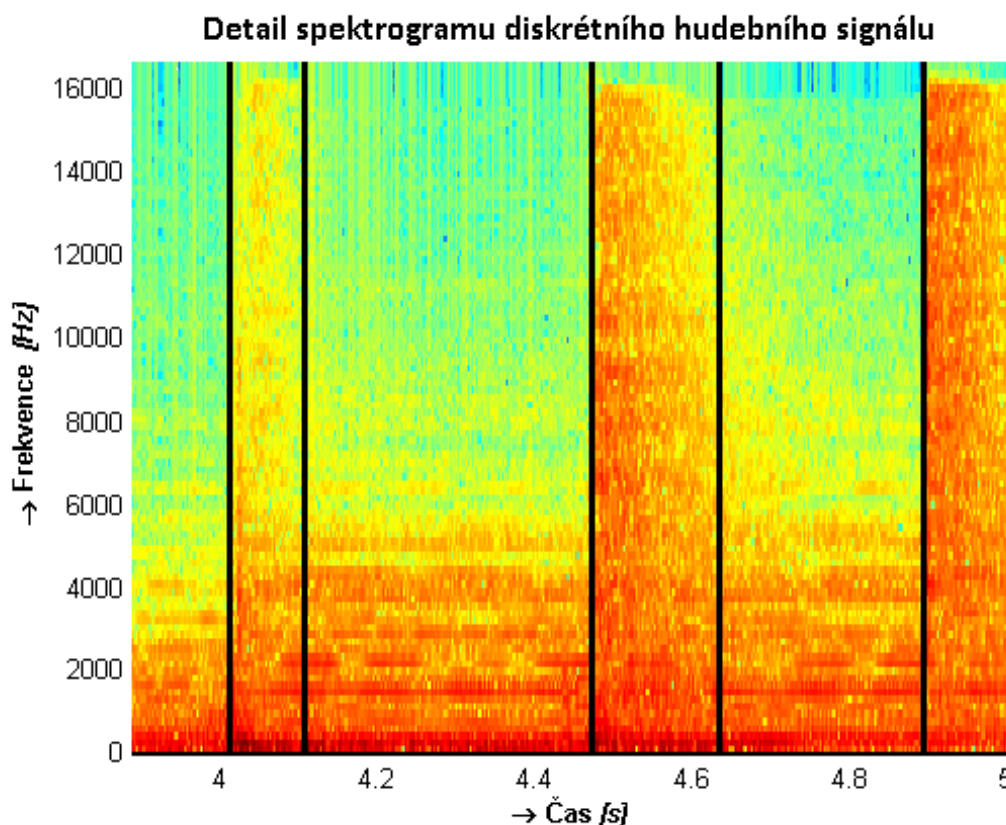


Obr. 1.1: Spektrogram diskretního hudebního signálu

Na obrázku 1.1 je zobrazen spektrogram diskretního hudebního signálu, na kterém lze vidět lokální stacionární úsek od 0 do 4 sekund a od 4 sekund lze vidět několik

za sebou jdoucích globálních nestacionárních úseků, které se mohou považovat jako lokálně stacionární. Tyto konkrétní globálně nestacionární úseky jsou údery do bicích. Na obrázku si lze také povšimnout, že energie soustředěná na kmitočtech menších než 6 kHz je i v místech, kde se vyskytují globální nestacionární úseky, přibližně stejná.

Na obrázku 1.2 je detail spektrogramu diskretního hudebního signálu z obrázku 1.1. Jelikož se energie signálu úderu do bicích na vysokých kmitočtech s časem zmenšuje, nelze říci, že by byl signál stacionární od začátku prvního úderu do začátku dalšího úderu, ale vznikají dílčí lokální stacionární úseky v oblastech dozívání. Těchto úseků může být více mezi jednotlivými údery, to záleží na konkrétním signálu. V případě signálu, jehož detail spektra je zobrazen na obrázku 1.2 a jenž byl pro ukázkou rozdělen černými čarami na lokální stacionární úseky, je mezi jednotlivými lokálními stacionárními úseky úderů pouze jeden úsek zachytávající dozívání úderů.



Obr. 1.2: Detail spektrogramu diskretního hudebního signálu

Pro zjištění, jestli se jedná o stacionární nebo nestacionární úsek, se vypočítají statistické charakteristiky jednotlivých úseků, většinou jednotlivých segmentů segmentovaného signálu[8]. Pokud jsou jejich hodnoty příliš odlišné, indikuje to jistou nestacionaritu daných segmentů. Jako první statistická charakteristika se používá

průměr signálu v časové doméně. Dalšími využívanými charakteristikami jsou rozptyl a směrodatná odchylka, které jsou závislé na energii signálu. Dalšími alternativami jsou autokorelace a autokovariance. Tyto metody je možné i kombinovat. Pro všechny tyto metody je vhodné nejprve odfiltrovat pomocí horní propusti s mezním kmitočtem 6 kHz část spektra, aby neovlivňovala detekci stacionarity.

2 CHARAKTERISTIKY NÁHODNÝCH DISKRÉTNÍCH SIGNÁLŮ

2.1 Průměr

Aritmetický průměr, jenž je nejtypičtější mírou polohy, je definován jako součet všech hodnot vydělený jejich počtem, což je dáno vzorcem

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i, \quad (2.1)$$

kde x_i značí hodnoty N -členného statistického souboru. V případě této práce se jedná o vzorky signálu jednoho segmentu[2].

2.2 Rozptyl

Rozptyl je nejpoužívanější mírou variability. Vyjadřuje variabilitu rozdělení statistického souboru kolem její střední hodnoty a je definován vzorcem

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2. \quad (2.2)$$

2.3 Směrodatná odchylka

Jelikož výsledek rozptylu je dán ve čtvercích měrných jednotek, používá se často pro vyhodnocení variability jeho druhá odmocnina, která se nazývá směrodatná odchylka, která je dána vzorcem

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}. \quad (2.3)$$

2.4 Autokorelace

Korelace je mírou podobnosti mezi hodnotami signálů. Autokorelace je korelací, u které se porovnává signál sám se sebou. Je dána rovnicí

$$r_{xx}(j) = \begin{cases} \sum_{i=0}^{N-j-1} x_i^* x_{i+j} & , j \geq 0 \\ r_{xx}(-j) & , j < 0, \end{cases} \quad (2.4)$$

kde j je index vzorků autokorelační posloupnosti[4].

2.5 Autokovariance

Jedná se o centralizovanou autokorelaci danou vztahem

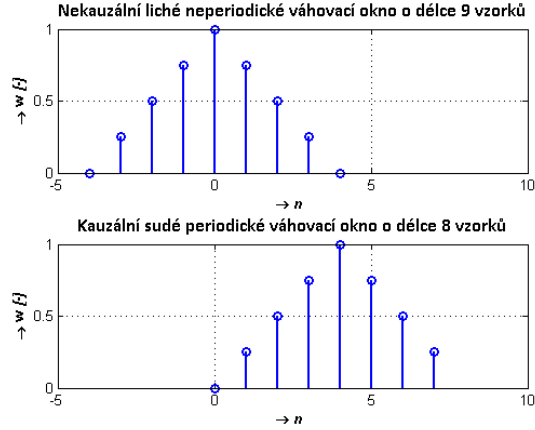
$$c_{xx}(j) = \begin{cases} \sum_{i=0}^{N-j-1} [x_i^* - \bar{x}][x_{i+j} - \bar{x}] & , j \geq 0 \\ c_{xx}(-j) & , j < 0. \end{cases} \quad (2.5)$$

3 VÁHOVACÍ OKNA

Váhovací okno je posloupnost vzorků o délce N , kterou se násobí posloupnost sledovaného signálu. Váhovací okna se používají při návrhu FIR (finite impulse response) filtrů, kdy se impulzní odezva IIR (infinite impulse response) filtrů násobí váhovacím oknem, které ovlivňuje tvar kmitočtové charakteristiky FIR filtru. Váhovací okna se také používají při frekvenční analýze signálu, zejména při výpočtu spektrogramu. Váhovacím oknem se může spektrum signálu vyhladit, případně se jím mohou zvýraznit lokální maxima spektra nebo přímo samotné harmonické složky. Použití váhovacích oken je možné i ve spektrální oblasti, například při rekonstrukci signálu z jeho spektra, kdy při použití správného okna může dojít k vyhlazení signálu v časové oblasti.

Okna se rozdělují dle kauzality na kauzální, s nulovou fázovou frekvenční charakteristikou, a na nekauzální, se spojitou lineární fázovou frekvenční charakteristikou pouze v oblasti hlavního laloku a dále jen s po částech lineární fázovou charakteristikou. Nekauzální okna jsou symetrická podle nultého vzorku. Kauzální okna jsou posunutými nekauzálními okny tak, že se první vzorek okna nachází v diskrétním čase $0T_{f_{vz}}$, kde $T_{f_{vz}}$ značí vzorkovací periodu signálu. Dále se váhovací okna rozdělují podle toho, zda je jejich délka sudá, nebo lichá. Sudých váhovacích oken se používá zejména tam, kde se počítá spektrum signálu pomocí FFT (fast Fourier transform), které počítá vždy se sudou délkou signálu. Váhovací okna mohou být neperiodická, tehdy jsou symetrická, nebo periodická, kdy se odebere z původně symetrického okna

jeden krajní vzorek, čímž se změní okno liché na sudé nebo naopak sudé na liché. Na obrázku 3.1 jsou pod sebou zobrazeny ukázky trojúhelníkového okna, nahoře nekauzální liché neperiodické váhovací okno o délce 9 vzorků a dole kauzální sudé periodické váhovací okno o délce 8 vzorků, které vzniklo z horního okna posunutím prvního vzorku okna do nuly a odebráním posledního vzorku okna[1].



Obr. 3.1: Ukázka trojúhelníkových oken

Existuje velké množství oken, ovšem v praxi je nejpoužívanějších pět typů oken, které jsou následovně popsány.

3.1 Obdélníkové okno

Jedná se o jedno z nejpoužívanějších oken, což je dáno zejména díky výpočetní náročnosti při použití, jelikož všechny vzorky okna jsou rovny jedné, což v praxi znamená, že váhovaný signál není potřeba nijak násobit. Obdélníkové okno se vyznačuje tím, že má velmi úzký hlavní lalok spektra, což je možno využít pro zvýraznění úzkopásmových lokálních extrémů spektra. Ovšem díky výraznému Gibsovu jevu, viz literatura [7], má první postraní lalok spektra odstup od hlavního laloku pouze přibližně 13 dB, což je nejméně ze všech běžně používaných váhovacích oken. Pokles dalších laloků je velmi pozvolný. Posloupnost obdélníkového okna je dána vztahem

$$w_{obd}(n) = \begin{cases} 1 & , n = 0, 1, \dots, N-1 \\ 0 & , \text{pro ostatní } n, \end{cases} \quad (3.1)$$

kde n je index vzorku posloupnosti okna.

3.2 Trojúhelníkové okno

Trojúhelníkové okno, známé také jako Bartlettovo okno, je druhé nejjednodušší okno vzhledem k výpočetní náročnosti při jeho realizaci, jelikož na rozdíl od následně popsanych oken není potřeba k výpočtu goniometrických funkcí. Hlavní lalok tohoto okna má dvojnásobnou šířku, oproti oknu obdélníkovému, tudíž lépe vyhlazuje průběh. Postraní laloky klesají rychleji než u okna obdélníkového. Trojúhelníkové okno se dáno vztahem

$$w_{tro}(n) = \begin{cases} \frac{2n}{N-1} & , n = 0, 1, \dots, \frac{N-1}{2} \\ 2 - \frac{2n}{N-1} & , n = \frac{N-1}{2}, \dots, N-1. \end{cases} \quad (3.2)$$

3.3 Hannovo okno

Hannovo okno, někdy nazývané jako Hanningovo okno, je často používaným oknem zejména u frekvenční analýzy, jelikož jsou jeho vlastnosti dobrým kompromisem mezi šířkou laloku a poklesem postraních laloků. Oproti předchozím oknům je zde ovšem větší výpočetní náročnost okna, jelikož je k realizaci potřeba goniometrické funkce. Hannovo okno se počítá podle vzorce

$$w_{han}(n) = 0,5 \left(1 - \cos \left(\frac{2\pi n}{N-1} \right) \right), n = 0, 1, \dots, N-1. \quad (3.3)$$

3.4 Hammingovo okno

Hammingovo okno je nejširší ze všech představovaných oken, což je dáno také tím, že krajní vzorky okna se nerovnají nule. První postraní lalok má odstup od hlavního přibližně 40 dB a další laloky klesají jen mírně. Tohoto se využívá například při návrhu filtrů nebo při analýze řečových signálů. Posloupnost Hammingova okna je dána vztahem

$$w_{ham}(n) = 0,54 - 0,46 \cos \left(\frac{2\pi n}{N-1} \right), n = 0, 1, \dots, N-1. \quad (3.4)$$

3.5 Blackmanovo okno

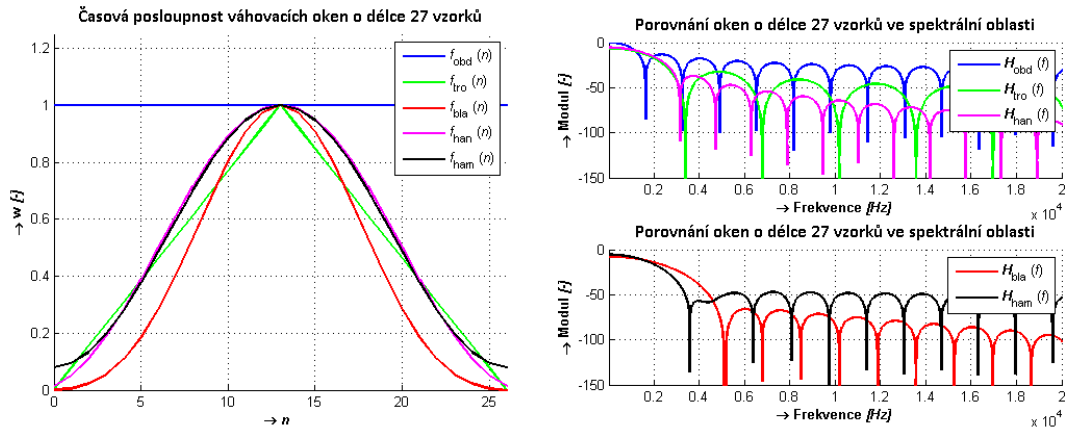
Jedná se o nejúžší okno s největším útlumem postraních laloků spektra z představovaných váhovacích oken, což je ovšem kompenzováno šířkou pásma hlavního laloku,

která je oproti obdélníkovému oknu trojnásobná. Blackmanovo okno je vhodné například pro zvýraznění harmonické složky v šumu. Je definováno vzorcem

$$w_{bla}(n) = 0,42 - 0,5 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right) + 0,08 \cos\left(\frac{4\pi n}{N-1}\right),$$

$$n = 0, 1, \dots, N-1.$$
(3.5)

3.6 Porovnání váhovacích oken



Obr. 3.2: Porovnání váhovacích oken v časové oblasti Obr. 3.3: Porovnání váhovacích oken ve spektrální oblasti

Na obrázku 3.2 jsou zobrazena popsána okna v časové oblasti a na obrázku 3.3 ve spektrální oblasti, kde je možné vidět, že spektrum obdélníkového váhovacího okna odpovídá funkci sinc . Spektra ostatních oken jsou pouze modifikací této funkce. Z obrázku 3.3 je také zřetelné, že šířka hlavního laloku a útlum postranních laloků jsou přímo úměrné.

Pro segmentovou analýzu je pro zachování výkonových poměrů nutné použít správný přesah váhovacích oken. Pro obdélníkové okno se přesah nepoužívá, jelikož jsou všechny jeho vzorky rovny jedné. Pro trojúhelníkové, Hannovo a Hammingovo váhovací okno se používá přesah 50%, pouze pro Blackmanovo okno se používá přesah 66%.

4 SEGMENTACE

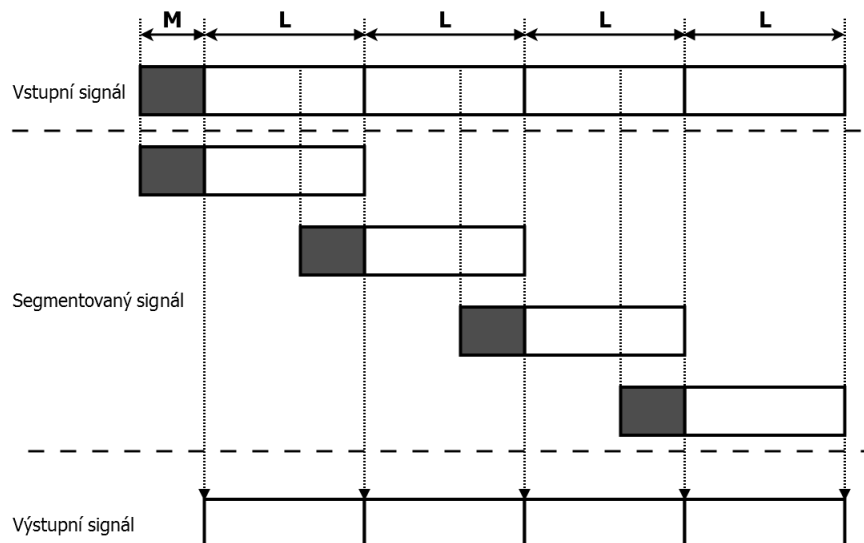
Pro zpracování i pro analýzu signálu není vždy vhodné pracovat s celým signálem, ale je vhodné jej rozdělit na menší části, což se nazývá segmentace. Ta je vhodná v případech, kdy dopředu neznáme délku signálu nebo signál není konečný, například při zpracování v reálném čase. Segmentaci je potřeba použít v případě kmitočtové analýzy dlouhodobého signálu, kde by se při zpracování celé délky signálu skryly

sledované detaily a analýza by pak postrádala smysl. Existují dvě základní dobře známé metody segmentace, kterými jsou metoda odstranění konstantně dlouhého přesahu s konstantní délkou segmentu (CWCOLS - constant window constant overlap save) a metoda přičtení konstantně dlouhého přesahu s konstantní délkou segmentu (CWCOLA – constant window constant overlap add). Segmentace se standardně provádí s konstantně dlouhým oknem a konstantně dlouhým přesahem, proto jsou metody známy pouze pod názvy metoda odstranění přesahu (obdobně OLS) a metoda přičtení přesahu (obdobně OLA). Pokud je potřeba signál segmentovat na základě nějakého parametru, délky segmentů potom nejsou konstantní. Takové segmentace se dají provést třemi způsoby popsanými níže. Jsou to metoda odstranění konstantně dlouhého přesahu s proměnnou délkou segmentu (VWCOLS – variable window constant overlap save), metoda přičtení konstantně dlouhého přesahu s proměnnou délkou segmentu (VWCOLA – variable window constant overlap add) a metoda přičtení proměnně dlouhého přesahu s proměnnou délkou segmentu (VWVOLA - variable window variable overlap add). Logicky se nabízí ještě varianta odstranění proměnně dlouhého přesahu s proměnnou délkou segmentu, která ovšem vzhledem k podstatě metody nemá oproti VWCOLS žádnou výhodu a v této práci není vůbec uvažována.

4.1 Metoda odstranění konstantně dlouhého přesahu s konstantní délkou segmentu

Tato metoda se používá zejména pro rychlou konvoluci, neboli filtraci systémem FIR realizovanou jako druhá kanonická forma. Tato metoda je charakteristická tím, že se zahazuje část zpracovaného signálu, což je velmi nepraktické pro analýzu a primárně se tato metoda pro analýzu nepoužívá, pouze v extrémním případě, kdy je délka přesahu rovna nule. Tato metoda používá zpravidla obdélníkové okno, tudíž se sousední segmenty nepřekrývají, respektive překrývají se pouze v oblasti přesahu na vstupu systému a na výstupu tomu tak už není, což je názorně ukázáno na obrázku 4.1.

Proces segmentace CVCOLS lze popsat následovně. Na začátku zpracování se signál doplní o M nul, kde M je délka přesahu. Pro rychlou konvoluci je délka přesahu rovna řádu FIR filtru, jelikož přechodový jev filtrace je stejně dlouhý. Následně se ze vstupního signálu vybere segment o délce $M+L$, který může být následně zpracován. Po zpracování segmentu se prvních M vzorků zahodí a na výstupu systému je pak pouze část segmentu o délce L . Další segment je vybrán také o délce $M + L$, kde prvních M vzorků nového segmentu je posledních M vzorků předchozího segmentu před zpracováním. Tento segment je dále zpracován a stejně jako v předchozím



Obr. 4.1: Schéma metody odstranění konstantně dlouhého přesahu s konstantní délkou segmentu

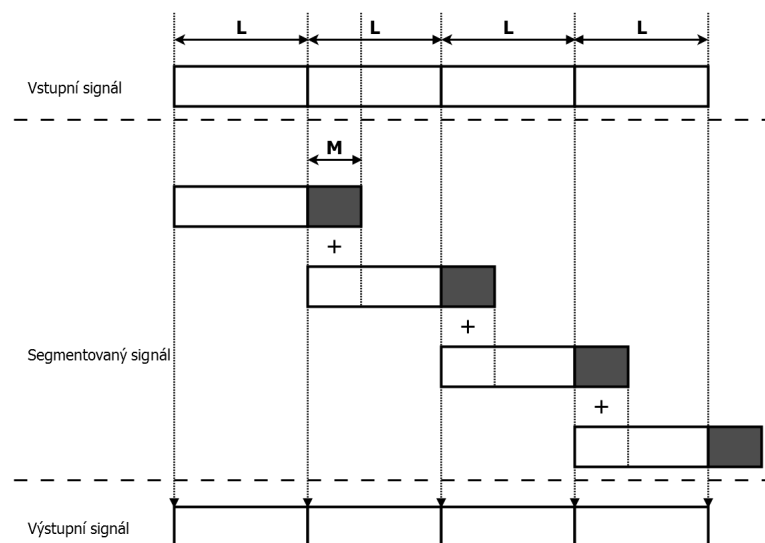
případě je prvních M vzorků zahozeno, než jde segment na výstup systému. Tento proces se cyklicky opakuje, dokud se nasegmentuje celý signál. Z principu metody lze tedy je zřejmé, že je možné aplikovat pouze obdélníkové okno a že se vzorky přesahu zpracovávají dvakrát, což je názorně zobrazeno na 4.1, kde je přesah vyobrazěn šedým polem.

4.2 Metoda přičtení konstantně dlouhého přesahu s konstantní délkou segmentu

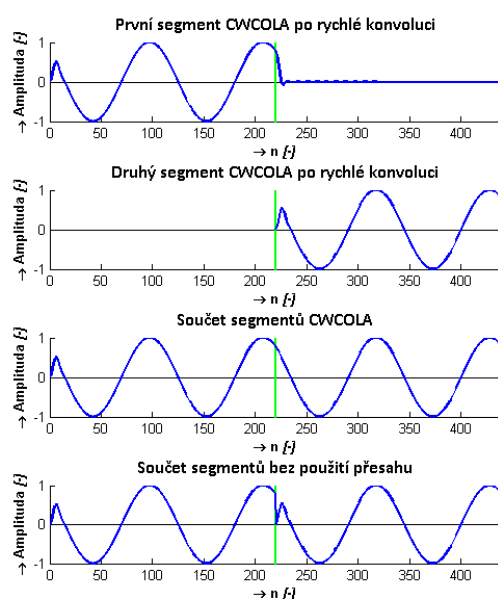
Na metodu přičtení konstantně dlouhého přesahu s konstantní délkou segmentu je možné se dívat ze dvou pohledů. První varianta odpovídá použití CWCOLA pro rychlou konvoluci a druhá varianta se týká segmentace signálu okny[5].

Na obrázku 4.2 je zobrazena první varianta CWCOLA (dále jen CWCOLA v1). Proces segmentace lze popsat následovně. V prvním kroku segmentace se segment ze vstupního signálu o délce L doplní nulami na délku $L + M$ ze stejných důvodů, jako u metody CWCOLS docházelo k odstranění přesahu. Dále dochází ke zpracování signálu. Poté se na výstup zapíše prvních L vzorků a přesah, neboli zbylých M vzorků, se uloží do zásobníku. V dalším kroku se opět doplní vstupní segment nulami a po zpracování na výstup zapsán součet prvních L vzorků a zásobníku. Zbylých M vzorků se opět uloží do zásobníku. Tento krok se opět cyklicky opakuje. U této metody bývá často délka vstupního segmentu L rovna délce přesahu M .

Na obrázku 4.3 jsou zobrazeny jednotlivé segmenty CWCOLA v1 po zpracování rychlou konvolucí, dále součet těchto segmentů a součet segmentů, pokud by nebyly



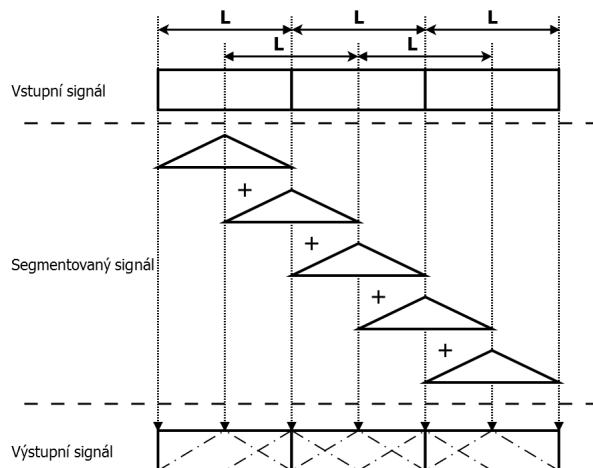
Obr. 4.2: Schéma první varianty metody přičtení konstantně dlouhého přesahu s konstantní délkou segmentu



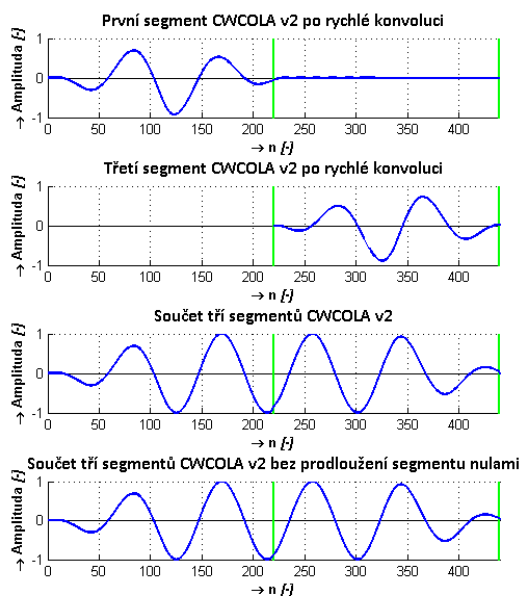
Obr. 4.3: Ukázka zpracovaných segmentů CWCOLA v1 pomocí rychlé konvoluce a jejich součtu s i bez použití přesahu

doplněny nulami. Z průběhů jednotlivých segmentů je zřejmé, že na začátku segmentu vzniká přechodový jev, který je potřeba vykompenzovat součtem s přechodovým jevem předchozího segmentu, jinak na výstupu systému tyto přechody vyniknou, což je zřejmé z posledního průběhu na obrázku. Stejného výsledku by bylo dosaženo i při použití metody CWCOLS bez doplnění nulami.

Druhá varianta CWCOLA je založena na segmentaci signálu okny (dále jen



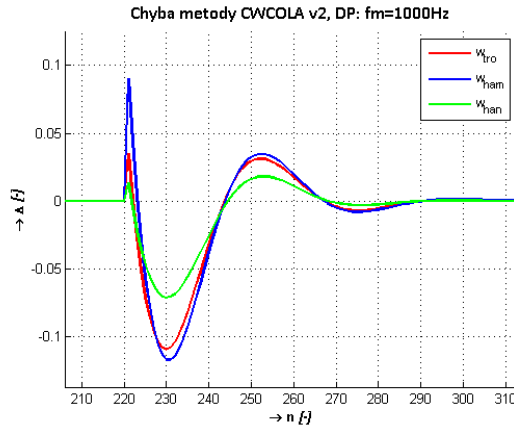
Obr. 4.4: Schéma druhé varianty metody přičtení konstantně dlouhého přesahu s konstantní délkou segmentu



Obr. 4.5: Ukázka zpracovaných segmentů CWCOLA v2 pomocí rychlé konvoluce a jejich součtu s i bez použití přesahu

CWCOLA v2). Na ukázkou je pro jednoduchost zvoleno trojúhelníkové okno, jakož tomu je v celé práci, pokud není řečeno jinak. Jedná se v podstatě o modifikaci předchozí varianty, kdy bylo použito obdélníkové okno, které se používá s nulovým překryvem. Jelikož se pro trojúhelníkové okno používá překryv 50%, jsou segmenty vstupního signálu vybírány postupně se začátkem segmentu v násobcích $L/2$ a následně váhovány oknem, jak lze vidět na obrázku 4.4, kde je zobrazeno schéma této metody. Tato metoda je vhodná jak pro analýzu, tak pro zpracování signálů. Lze ji použít dokonce i pro rychlou konvoluci bez prodloužování nulami, jelikož okno zásadně

zmenší amplitudu přechodového jevu a rozdíl mezi výstupním signálem systému CWCOLA v2 s prodloužením segmentu nulami a výstupním signálem systému CWCOLA v2 bez prodloužení je tímto minimalizován, což je zřejmé z obrázku 4.5, kde jsou zobrazeny jednotlivé váhované segmenty po zpracování a součty tří po sobě jdoucích segmentů s a bez prodlužování segmentu nulami. Velikost přechodového jevu závislá jak na typu použitého váhovacího okna, tak na tvaru a délce impulzní odezvy použitého FIR filtru. Například pro trojúhelníkové váhovací okno, pro FIR filtr typu dolní propust s mezním kmitočtem 5 kHz, kdy vstupní signál je na stejné frekvenci jako je mezní kmitočet filtru, činí maximální absolutní chyba $\Delta = 0,0412$, což znamená že relativní chyba je $\delta = 4,12\%$. Metoda CWCOLA je vhodná pro konvoluci jen v případě, že délka přechodového signálu je výrazně kratší než délka přesahu nebo v případě, kdy je přechodový signál zanedbatelný. Přehled absolutních chyb této metody se zobrazením impulzních odezev na jednotkový impuls použitých filtrů jsou v příloze A.



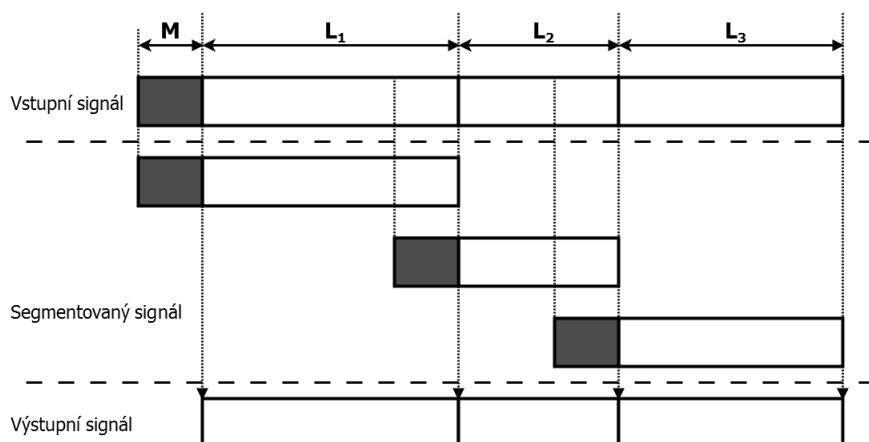
Obr. 4.6: Porovnání absolutních chyb metody CVCOLA v2 při použití různých oken

Na obrázku 4.6 jsou porovnány absolutní chyby metod CWCOLA v2 při použití trojúhelníkového, Hammingova a Hannova okna. Nejhoršího výsledku je dosaženo při použití Hammingova okna, což se dalo očekávat vzhledem k časovému průběhu tohoto okna. Hannovo okno vykazuje oproti trojúhelníkovému oknu lepší výsledek, jelikož je na krajích okna užší.

4.3 Metoda odstranění konstantně dlouhého přesahu s proměnnou délkou segmentu

Tato metoda vychází z metody CWCOLS a jediným rozdílem je délka zpracovávaného segmentu L , která se mění podle určitého vstupního parametru. To znamená, že L není konstantní, což platí pro všechny metody s proměnou délkou segmentu, a že

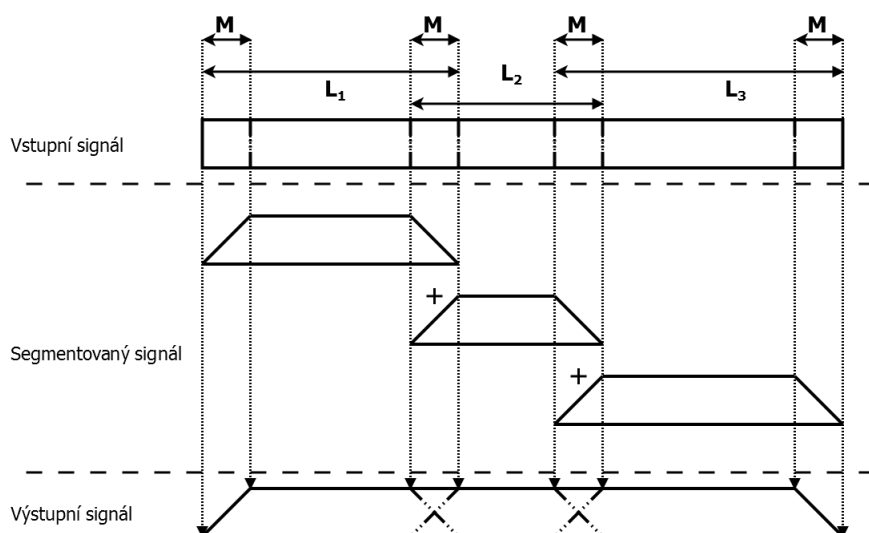
při kmitočtové analýze jednotlivých segmentů, má spektrum rozdílné rozlišení. Tato metoda umožňuje váhování pouze oknem obdélníkovým. Schéma této metody je na obrázku 4.7.



Obr. 4.7: Schéma metody odstranění konstantně dlouhého přesahu s proměnnou délkou segmentu

4.4 Metoda přičtení konstantně dlouhého přesahu s proměnnou délkou segmentu

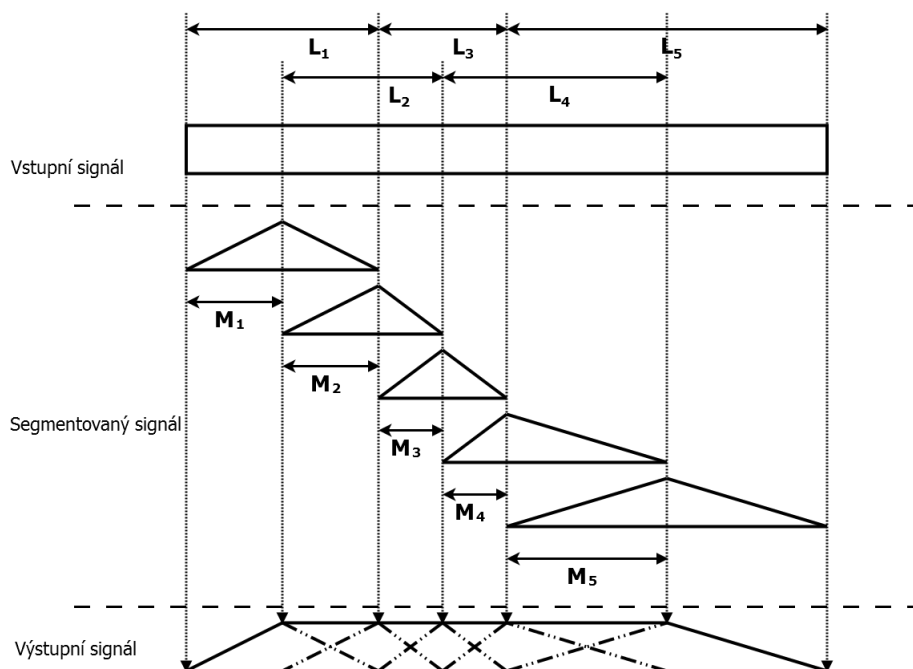
Schéma metody je na obrázku 4.8.



Obr. 4.8: Schéma metody přičtení konstantně dlouhého přesahu s proměnnou délkou segmentu

Tato metoda vychází z metody CWCOLA, jedná se tedy o segmentaci okny. Délka přesahu M je konstantní, což v případě trojúhelníkového okna činí 50%. Velikost segmentu se ovšem mění, tudíž se nutně mění i velikost okna, pro zachování konstantního přesahu M se tedy okno rozšíří o $L-2*M$ vzorků s hodnotou 1 mezi dva vzorky s nejvyšší hodnotou, neboli trojúhelníkové okno se rozdělí na dvě poloviny o délce M a mezi ně se vloží $L - 2 * M$ vzorků s hodnotou 1. Nejmenší možné okno této metody má tedy délku $2 * M$, které odpovídá trojúhelníkovému oknu. Metoda tedy počítá s okny se sudou délkou. Výše zmiňované samozřejmě platí pro všechny uvedené okna kromě obdélníkového.

4.5 Metoda přičtení proměnně dlouhého přesahu s proměnnou délkou segmentu



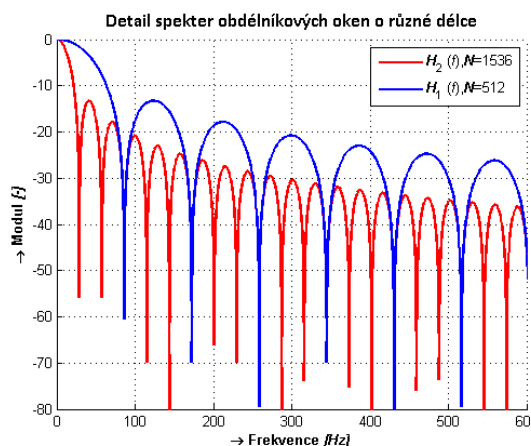
Obr. 4.9: Schéma metody přičtení proměnně dlouhého přesahu s proměnnou délkou segmentu

Metoda je podobná metodě VWCOLA, ale zde se mění v čase jak délka segmentu L , tak délka přesahu M . Aby byla zachována energie signálu, je potřeba aby byl každý segment váhován vlastním oknem o délce segmentu a aby délka společného přesahu dvou oken byla stejná. Aby byla tato podmínka zaručena, nelze vždy použít symetrických oken, ale je potřeba použít i okna nesymetrická. Okna symetrická lze použít pouze pro každý druhý segment, pokud se délky segmentů mění, což odpovídá segmentům s délkou L_1 , L_3 a L_5 podle obrázku 4.9, kde je zobrazeno

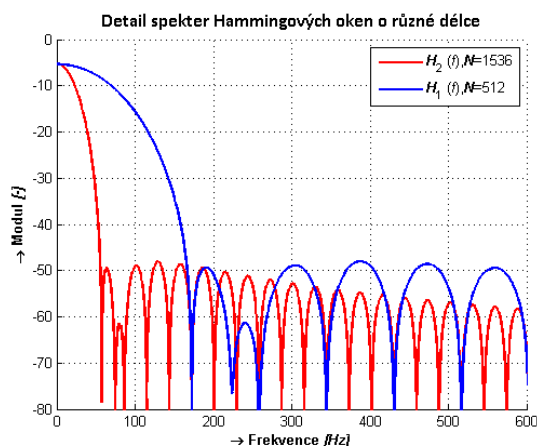
schéma metody. Mezi těmito segmenty je potřeba použít nesymetrické okno, což odpovídá segmentům s délkou L_2 a L_4 .

5 OKNA VYUŽÍVANÁ V ČASOVĚ VARIABILNÍ SEGMENTACI

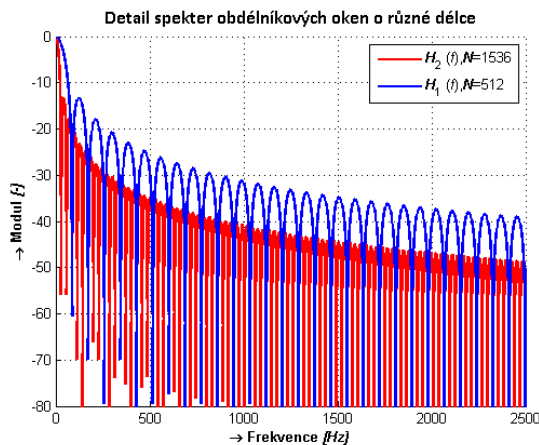
Prvním aspektem časově variabilní segmentace je, že se mění délka okna. Na obrázku 5.1 a 5.2 jsou zobrazena spektra obdélníkových a Hammingových oken o různé délce.



Obr. 5.1: Detail spekter obdélníkových oken o různé délce



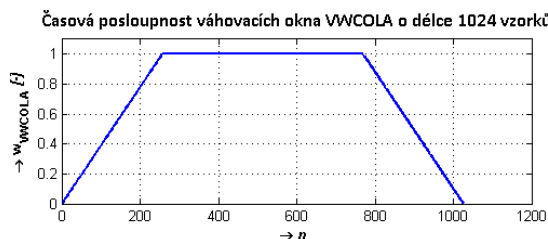
oken o různé délce



Obr. 5.3: Menší detail spekter obdélníkových oken o různé délce

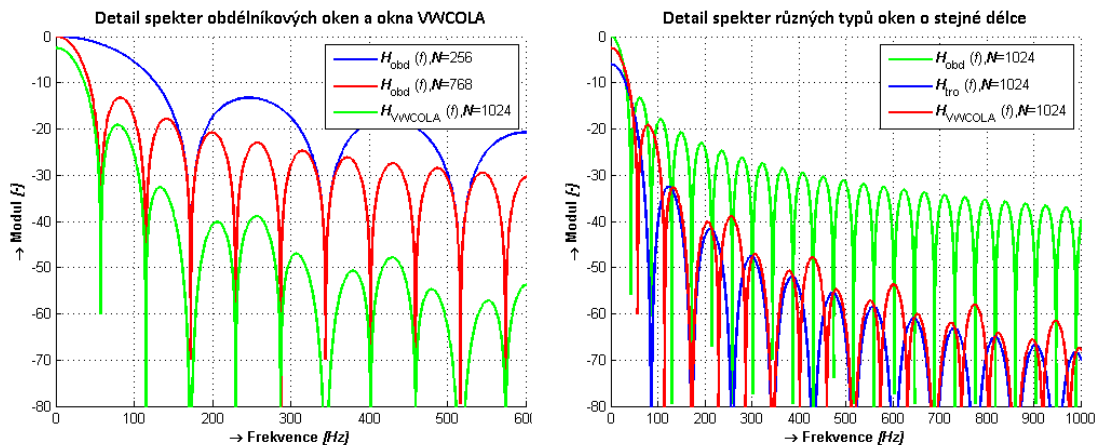
Ze spekter je zřejmé, že čím je délka okna větší, tím více laloků spektrum obsahuje. Na obrázcích je příklad, kdy je délka druhého okna L_{w2} třikrát větší než délka prvního okna L_{w1} , neboli platí $L_{w2} = 3L_{w1}$. Šířka hlavního laloku delšího okna je třikrát užší než šířka laloku okna kratšího. Obecně tedy platí, že pokud je délka okna k -krát větší, jeho hlavní lalok je k -krát užší. Spektrum druhého okna je

v podstatě spektrem prvního okna se změněným měřítkem osy x . Všechny hodnoty spektra druhého okna jsou tedy rovny hodnotám spektra prvního na frekvenci k -krát větší. Z toho plyne, že útlum prvního postraního laloku je na stejné úrovni, ale na k -krát menší frekvenci, stejně jako tomu je u ostatních laloků. Strmost útlumu laloků obou oken je totožná, tudíž nemají postraní laloky obou oken stejný útlum na stejné frekvenci, ale delší okno vykazuje větší útlum, což je zřetelné na obrázku 5.3.



Obr. 5.4: Ukázka okna VWCOLA

Okno používané u metody VWCOLA je stejně jako okno trojúhelníkové, které je mezním případem okna VWCOLA, normalizovanou konvolucí dvou obdélníkových oken. Trojúhelníkové okno je konvoluce dvou stejně dlouhých obdélníkových oken o délce přesahu M . Pokud je jedno z oken delší než M , pak se jedná právě o okno VWCOLA. Příklad takového okna je na obrázku 5.4.



Obr. 5.5: Detail spekter obdélníkových VWCOLA, trojúhelníkového a obdélníkového o stejné délce 1024 vzorků

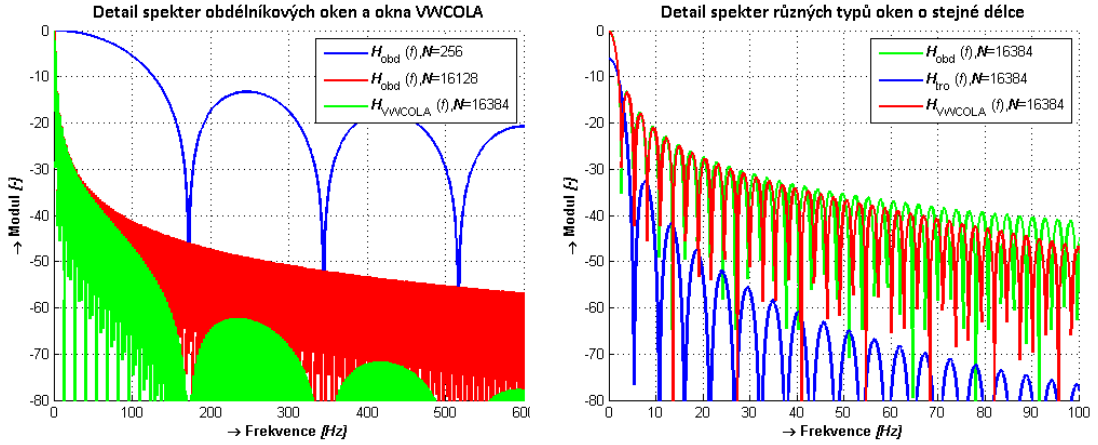
Obr. 5.6: Porovnání spekter okna

Na obrázku 5.5 jsou spektra obdélníkových oken a okna CWCOLA. Modře je vykresleno spektrum okna, jehož délka je rovna délce přesahu $M = 256$, spektrum vykresleno červeně je spektrum obdélníkového okna o délce $L - M$, kde L je délka okna VWCOLA, jehož spektrum je vykresleno zeleně. Platí, že násobení v časové oblasti odpovídá konvoluci v kmitočtové oblasti a také naopak, dáno vzorcem

$$\begin{aligned} x(n)y(n) &\Leftrightarrow \mathbf{X}(\omega) * \mathbf{Y}(\omega) \\ x(n) * y(n) &\Leftrightarrow \mathbf{X}(\omega) \mathbf{Y}(\omega), \end{aligned} \quad (5.1)$$

kde $\mathbf{X}$ je spektrum signálu x a $\mathbf{Y}$ je spektrum signálu y . Jelikož je tedy okno VWCOLA dáno konvolucí oken v časové oblasti, spektrum tohoto okna je tedy dáno násobením spektrů těchto oken, což je vidět na obrázku 5.5.

Na obrázku 5.6 jsou vykreslena spektra oken VWCOLA, trojúhelníkového a obdélníkového o stejné délce $L = 1024$. Pro tuto délku jsou vlastnosti okna CWCOLA mnohem lepší, než vlastnosti okna obdélníkového. Hlavní lalok je mírně širší a potlačení postranních laloků je mnohem větší, neboli je zde lépe potlačen Gibbsův jev. Jelikož je délka okna relativně malá, spektrum okna VWCOLA se více podobá spektru trojúhelníkového okna.



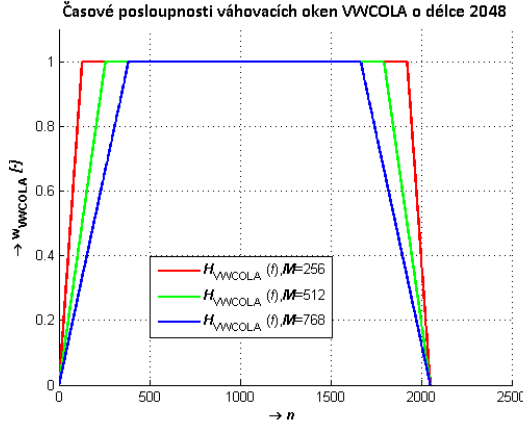
Obr. 5.8: Porovnání spekter okna

Obr. 5.7: Detail spekter obdélníkových VWCOLA, trojúhelníkového a obdélníkového o stejné délce 16384 vzorků

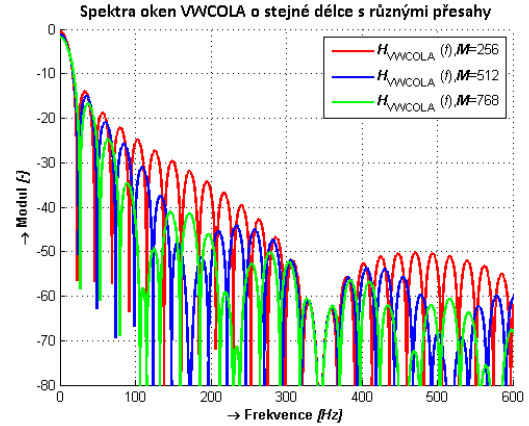
Na obrázku 5.8 jsou vykreslena spektra oken VWCOLA, trojúhelníkového a obdélníkového o stejné délce $L = 16384$. Jelikož je tato délka oproti délce přesahu několikrát větší, spektrum okna VWCOLA se blíží spektru okna obdélníkového. Gibbsův jev je zde potlačen minimálně. K výraznějšímu útlumu postranních laloků dochází až v části spektra pro frekvence větší než přibližně 100 Hz pro délku přesahu $M = 256$, což je zřetelné na obrázku 5.7.

Obecně lze tedy říci, že okna používaná u metody VWCOLA mají lepší vlastnosti, než okna obdélníková, ovšem při velkých délkách oken jsou výhody minimální. Okna VWCOLA, které vychází z jiných oken než z trojúhelníkového, tedy Hammingovo, Hannovo okno a další, již nejsou přímo konvolucí dvou jednoduchých oken, ale platí pro ně stejné principy jako pro okno VWCOLA vycházejícího z trojúhelníkového okna. Jejich spektra jsou zobrazeny v příloze B.

Na obrázku 5.9 jsou zobrazena okna VWCOLA s různou délkou přesahu a na obrázku 5.10 jejich spektra. Ze spekter je zřejmé, že čím je délka přesahu kratší, tím více se projevuje Gibbsův jev.

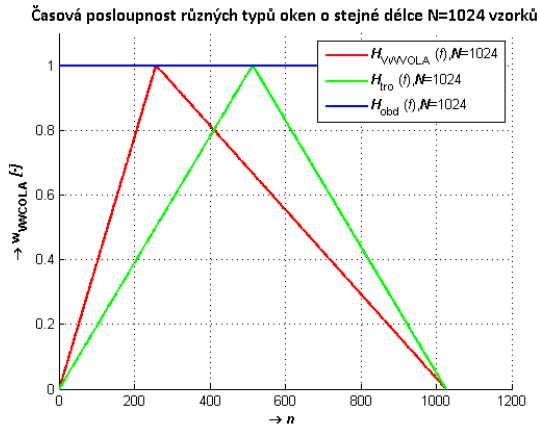


Obr. 5.9: Časové posloupnosti váhovacích oken VWCOLA o délce 2048 s různou délkou přesahu

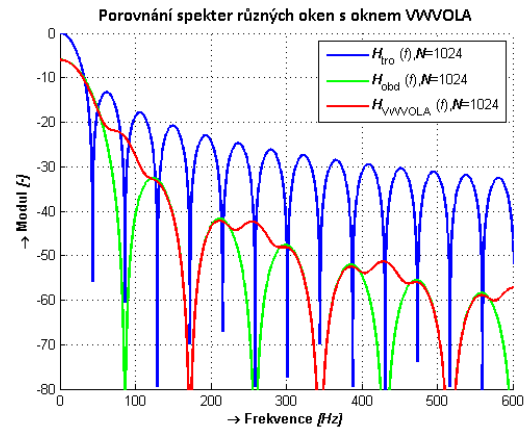


Obr. 5.10: Porovnání spekter váhovacích oken VWCOLA o délce 2048 s různou délkou přesahu

Okna používaná u metody VWVOLA jsou charakteristické tím, že mohou být i nesymetrická. Příklad nesymetrického okna VWVOLA v porovnání se symetrickým trojúhelníkovým a obdélníkovým oknem jsou na obrázku 5.11. To, že je okno nesymetrické, způsobuje, že délka přesahu okna zleva M_L není rovna délce přesahu okna zprava M_R . Zobrazené okno VWVOLA má špiči ve čtvrtině délky okna, neboli platí $3 * M_L = M_R$.

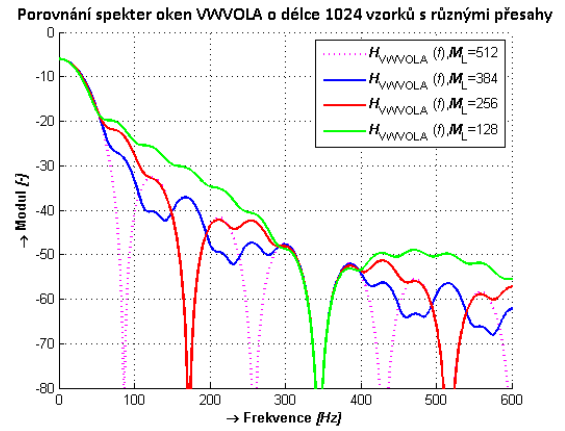
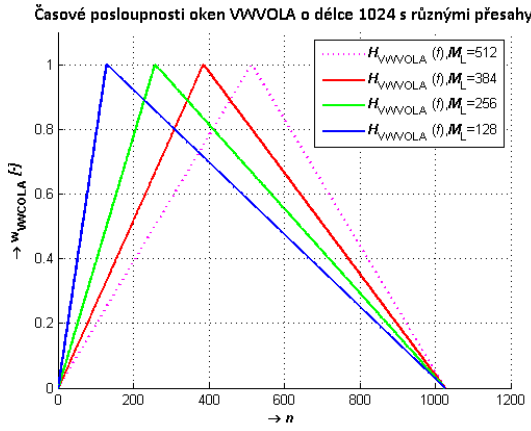


Obr. 5.11: Porovnání okna VWVOLA s oknem obdélníkovým a trojúhelníkovým se stejnými délkami v časové oblasti



Na obrázku 5.12 jsou zobrazeny spektra výše uvedených oken. Spektrum okna VWVOLA je velmi podobné spektru trojúhelníkového okna, ovšem uplaňuje se zde negativně Gibbsův jev, který rozšiřuje hlavní lalok na čtyřnásobek šířky obdélníkového

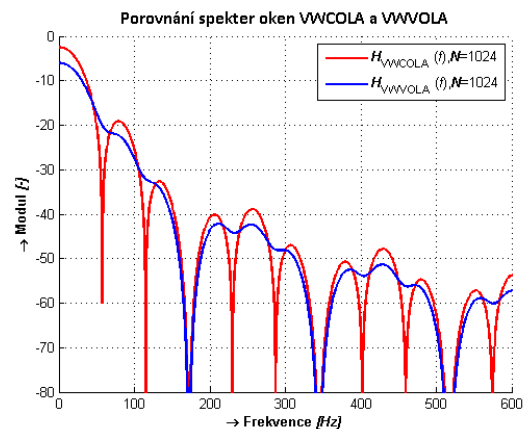
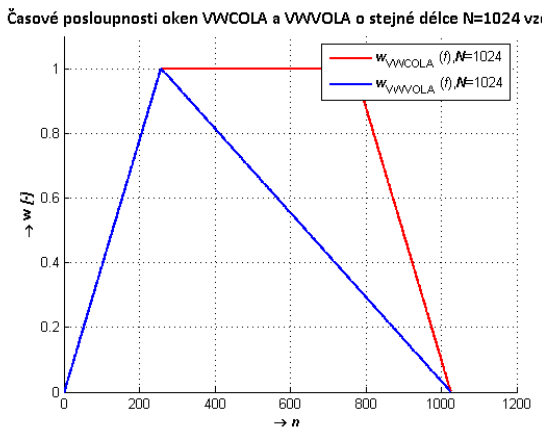
okna a mění jeho tvar. Postraní laloky mají menší útlum a jsou dvakrát širší oproti oknu trojúhelníkovému a jejich tvar je také deformován.



Obr. 5.13: Časové posloupnosti oken VWVOLA o délce 1024 s různými přesahy
Obr. 5.14: Porovnání spekter oken VWVOLA o délce 1024 vzorků s různými přesahy

Na obrázku 5.13 jsou zobrazeny okna VWVOLA o délce 1024 s různými přesahy a na obrázku 5.14 jsou zobrazena jejich spektra. Čím méně se okno podobá oknu trojúhelníkovému v časové oblasti, neboli čím větší je rozdíl mezi M_L a M_R , tím více se projevuje Gibbsův jev. Pokud pro trojúhelníkové okno platí $M_L = L/2^m$, pro $m \in \mathbb{N}$, okno dosahuje lepších vlastností v oblasti vyšších kmitočtů, kde jsou laloky méně deformované.

Na obrázku 5.15 jsou časové průběhy oken VWCOLA a VWVOLA, kde má nesymetrické okno VWVOLA přesah levé strany okna stejnou délku jako má přesah VWCOLA. Na obrázku 5.16 jsou jejich spektra, které jsou si velmi podobné. Okno VWVOLA má mírně horší vlastnosti, jelikož téměř nedochází mezi laloky k poklesu, což má negativní vliv zejména v oblasti hlavního laloku.



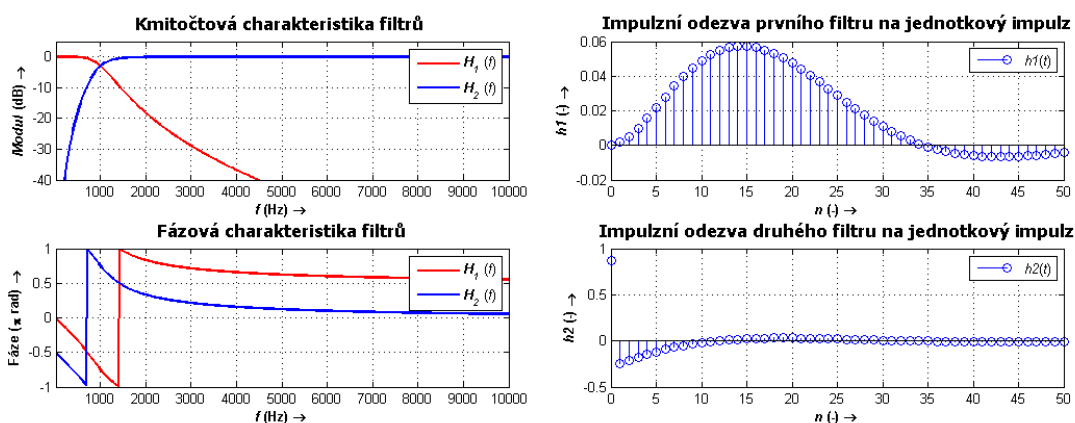
Obr. 5.15: Časové posloupnosti oken VWCOLA a VWVOLA o stejné délce
Obr. 5.16: Porovnání spekter oken VWCOLA a VWVOLA o stejné délce

6 PŘECHODOVÉ JEVY SEGMENTAČNÍCH METOD S PROMĚNNOU DÉLKOU SEGMENTU

6.1 Přechodové jevy metody odstranění konstantně dlouhého přesahu s proměnnou délkou segmentu

Pokud je systém skokově časově variantní, dochází u něj k nelinearitě v čase skokové změny systému a vznikají přechodové jevy. Pokud jsou segmenty filtrovány a při přechodu z jednoho segmentu na druhý dojde ke skokové změně koeficientů, dá se ve výstupním signálu očekávat přechodový jev[6]. K zásadní změně koeficientů dochází například při změně filtru typu dolní propust na horní a naopak. V těchto dvou případech se změní pouze čítecí přenosové funkce.

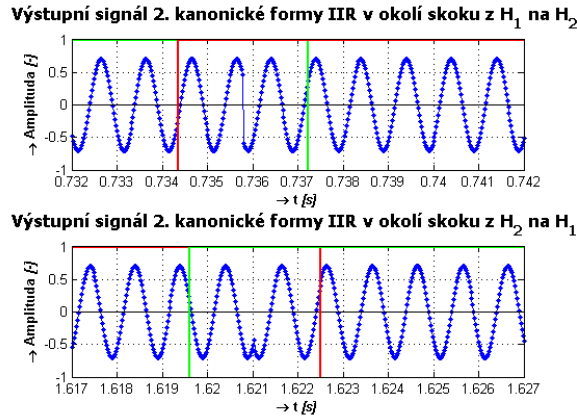
V následující části práce jsou přepínány skokově koeficienty filtru typu dolní propust na koeficienty filtru typu horní propust a naopak mezi dvěma sousedními segmenty metod s variabilní délkou segmentu. Na obrázku 6.1 jsou kmitočtové charakteristiky obou filtrů s mezním kmitočtem 1 kHz, jedná se o IIR filtry třetího řádu. Na obrázku 6.2 je pak prvních 51 vzorků impulzních odezev na jednotkový impuls těchto filtrů.



Obr. 6.1: Kmitočtové charakteristiky filtrů typu dolní a horní propust s mezním kmitočtem 1 kHz
Obr. 6.2: Impulzní odezvy na jednotkový impuls filtrů typu dolní a horní propust s mezním kmitočtem 1 kHz

Na obrázku 6.3 jsou zobrazeny části výstupního signálu systému segmentovaného metodou VWCOLS v okolí skoku koeficientů prvního filtru na druhý a naopak. Vstupní

signál systému je harmonický signál o amplitudě 1 a frekvenci 1 kHz, neboli je roven meznímu kmitočtu filtrů. Amplituda ustálené odezvy systému je tedy rovna $2^{-(\frac{1}{2})}$. Zelenou a červenou barvou jsou naznačena okna VWCOLS. K přechodovému jevu dochází v polovině přesahu, jelikož se v tomto případě odstraňuje polovina délky přesahu z obou stran okna, jak tomu bude také v následující kapitole. Filtr je implementován jako druhá kanonická forma. Z průběhu výstupního signálu je zřejmé, že došlo pouze k diskontinuitě vzhledem k rozdílu fází obou filtrů, který pro třetí řád filtrů činí $\pi/2$. Jelikož je přechodový signál vzniklý změnou koeficientů filtru odstraněn, tohoto výsledku se dosáhne i při použití jiných implementací filtru. Pro ukázkou byly vybrány implementace přímé formy IIR filtru, první kanonické IIR filtru, přímá forma FIR filtru a první kanonická FIR filtru, kde FIR filtry jsou padesátého řádu a jsou vytvořeny zkrácením impulzní odezvy IIR filtrů. Jejich impulzní odezva na jednotkový impuls jsou tedy přímo odezvami na obrázku 6.2. Kmitočtová charakteristika FIR filtrů je v příloze D a přechodové jevy výše zmíněných implementací jsou v příloze D.1.

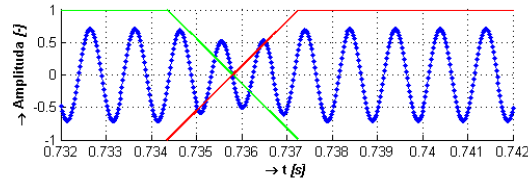


Obr. 6.3: Přechodové jevy metody VWCOLS při skokových změnách filtrů IIR 2. kanonické formy

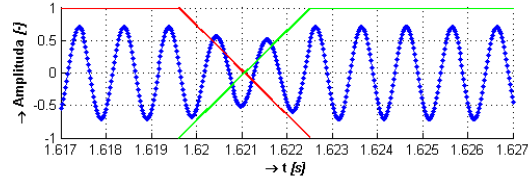
6.2 Přechodové jevy metody přičtení konstantně dlouhého přesahu s proměnnou délkou segmentu

Na obrázku 6.4 jsou zobrazeny části výstupního signálu systému segmentovaného metodou VWCOLA v okolí skoku koeficientů prvního filtru na druhý a naopak. Filtry jsou opět implementovány pomocí druhé kanonické formy. Z průběhu výstupního signálu je zřejmé, že přechodový jev způsobuje součet dvou váhovaných přesahů sousedních segmentů, které mají posuv již zmiňovaných $\pi/2$ radiánů. Jelikož jsou

Výstupní signál 2. kanonické formy IIR v okolí skoku z H_1 na H_2



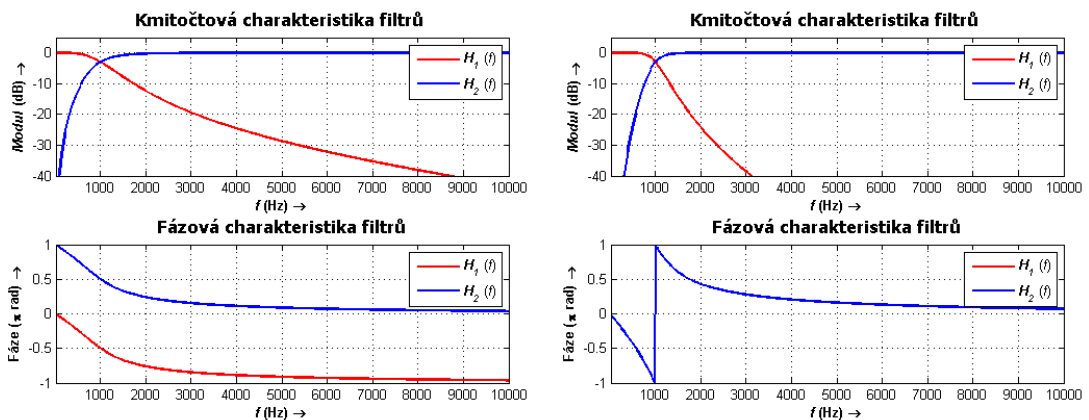
Výstupní signál 2. kanonické formy IIR v okolí skoku z H_2 na H_1



Obr. 6.4: Přechodové jevy metody VWCOLA při skokových změnách filtrů IIR 2. kanonické formy

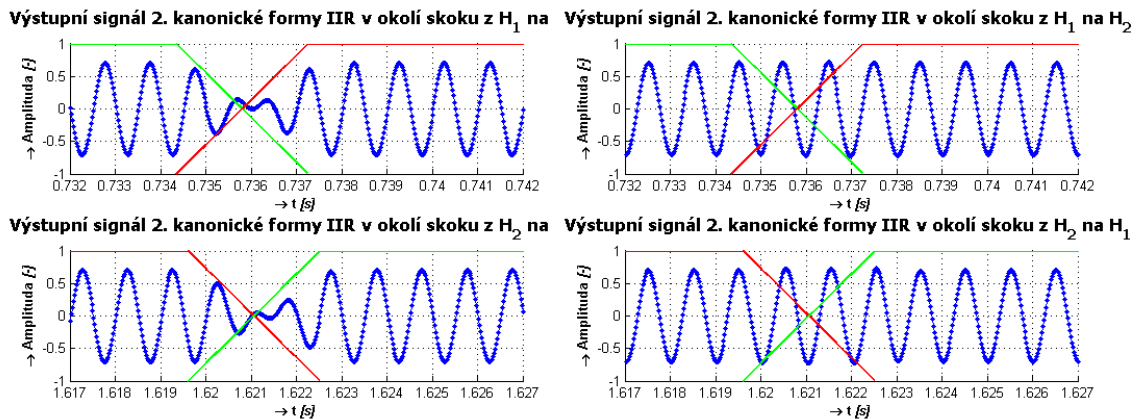
obě části segmentů v oblasti přesahu váhovány trojúhelníkovým oknem, v obálce spektra tak vzniká prohlubeň, jejíž absolutní minimum je 0,5. Přechodový signál vzniklý změnou koeficientů filtru je minimalizován oknem. Díky tomuto je stejných výsledků je dosaženo při použití ostatních dříve uvedených implementací filtru, jejichž přechodové jevy jsou zobrazeny v příloze D.2. V případě filtrace u segmentace VWCOLA je nutné také každý segment doplnit nulami, jinak by se chyba metody přičítala k přechodovému signálu a výsledky by byly nejednoznačné.

Pokud se použijí filtry jiných řádů, přechodové jevy se změni. Na obrázcích 6.5 a 6.6 jsou kmitočtové charakteristiky druhého a čtvrtého řádu. Přechodové jevy vzniklé při skokové změně koeficientů mezi sousedními segmenty při použití těchto filtrů jsou zobrazeny na obrázcích 6.7 a 6.8.



Obr. 6.5: Kmitočtové charakteristiky filtrů typu dolní propust s mezním kmitočtem 1 kHz druhého řádu
Obr. 6.6: Kmitočtové charakteristiky filtrů typu horní propust s mezním kmitočtem 1 kHz čtvrtého řádu

Jelikož je rozdíl fází filtrů druhého řádu π radiánů, obálka výstupního signálu klesá až do nuly, což platí pro všechny IIR filtry s řádem $4m_0 + 2$, kde $m_0 \in \mathbb{N}_0$. U

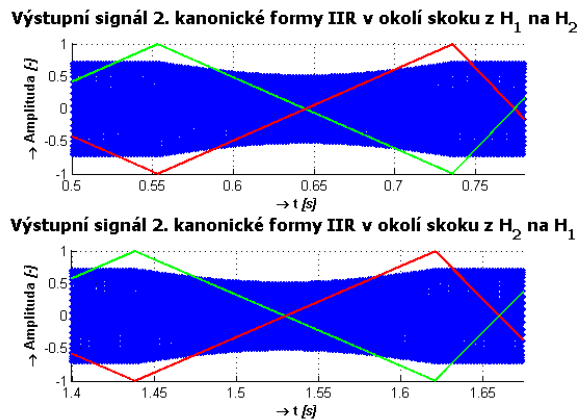


Obr. 6.7: Přechodové jevy metody VW- Cola při skokových změnách filtrů IIR 2. kanonické formy druhého řádu
Obr. 6.8: Přechodové jevy metody VW- Cola při skokových změnách filtrů IIR 2. kanonické formy čtvrtého řádu

filtrů čtvrtého řádu je rozdíl fází nulový, tudíž přechodový jev zcela zmizí a výstupní signál není tedy nijak skokovou změnou koeficientů filtrů ovlivněn, což platí pro všechny IIR filtry s řádem $4m$, kde $m \in \mathbb{N}$. U všech filtrů s lichým řádem je rozdíl mezi fázemi horní a dolní propusti $\pi/2$, tudíž pro ně platí, že obálka klesne na hodnotu 0,5 jak tomu bylo na obrázku 6.4. Změny přechodových jevů v závislosti na řádu filtrů se projevují u všech segmentačních metod. Pro metodu VWCOLS jsou v příloze D.1.1 pro druhý a čtvrtý řád filtrů zobrazeny výstupní signály v okolí skokové změny filtrů.

6.3 Přechodové jevy metody přičtení variabilně dlouhého přesahu s proměnnou délkou segmentu

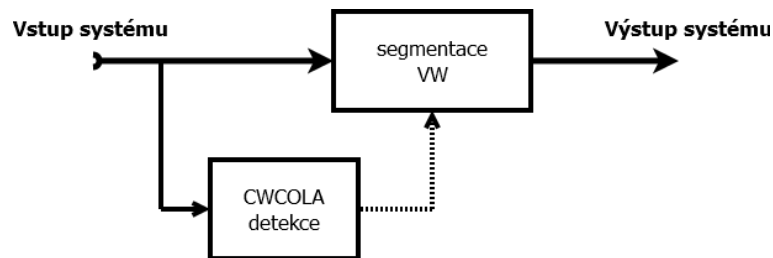
U metody VWVOLA oproti metodě VWCOLA nedochází k žádné změně přechodového jevu, jelikož se vyskytuje pouze v oblasti přesahu dvou segmentů. Pokud je tedy délka přesahu segmentů metody VWCOLA stejná jako délka přesahu segmentů VWVOLA, výstupní signál je v oblasti přechodového jevu totožný. Jelikož délka přechodového jevu odpovídá přímo délce přesahu, tak se zvětšující se délkou přesahu dochází pouze k prodloužení přechodového jevu, ale parametry obálky signálu zůstávají stejné, což je vidět na obrázku 6.9, kde jsou zobrazeny přechodové jevy metody VWVOLA při skokových změnách filtrů IIR druhé kanonické formy a kde obálka dosahuje absolutní minimální hodnoty 0,5. Přechodové jevy ostatních implementací filtrů jsou samozřejmě shodné a jsou zobrazeny v příloze D.3.



Obr. 6.9: Přechodové jevy metody VWVOLA při skokových změnách filtrů IIR 2. kanonické formy

7 DETEKCE LOKÁLNÍCH STACIONARIT

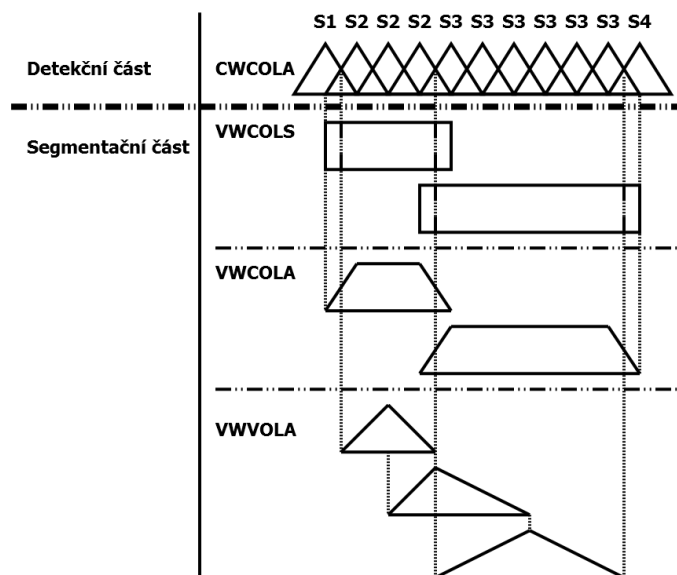
V rámci této práce byl vytvořen program v prostředí Matlab, který segmentuje signál pomocí metod VWCOLS, VWCOLA a VWVOLA. Segmentace je prováděna na základě stacionarity signálu. Systém, který je naprogramován, se tedy skládá ze dvou hlavních částí, které jsou zobrazeny ve zjednodušeném schématu systému na obrázku 7.1.



Obr. 7.1: Zjednodušené schéma programu

Hlavní části jsou tedy detekční a segmentační část. Signál je nejprve segmentován pomocí metody CWCOLA, pro jednoduchost opět pouze trojúhelníkovým oknem. Pro každý z těchto segmentů je počítána některá z charakteristik náhodného diskrétního signálu. Jestliže jsou charakteristiky dvou sousedních segmentů příliš rozdílné, systém zhodnotí, že se jedná o lokální nestacionaritu signálu a tato informace se přenesení do segmentačního bloku, kde dojde následně k segmentaci s proměnou délkou segmentu, kde jeden segment tvoří všechny po sobě jdoucí segmenty detekčního bloku se stejnou nebo podobnou charakteristikou náhodného diskrétního signálu.

Na obrázku 7.2 je znázorněna segmentace detekčního bloku a samotná segmentace s proměnlivě dlouhou délkou segmentu. Oknem zvažované segmenty jsou



Obr. 7.2: Ukázka segmentace s proměnnou délkou segmentu stacionárních úseků vstupního signálu

označeny S1 až S4 podle toho, jak je vyhodnocena stacionarita daného segmentu oproti předchozímu. Vznikají tak čtyři stacionární části, které jsou rozsegmentovány zvlášť. Na obrázku je zachycena segmentace pouze dvou prostředních stacionárních úseků vstupního signálu.

U metody VWCOLS je vybrán úsek od začátku prvního až po konec posledního detekčního segmentu se stejnou hodnotou číselné charakteristiky náhodných diskrétních signálů. Následně je možné segment zváhot stejně jako u metody VWCOLA na krajích vybraného segmentu z obou stran o čtvrtinu délky detekčního segmentu, neboli o délku přesahu této metody. Následně může dojít k analýze nebo zpracování segmentu, poté dojde k odstranění přesahu a segment je zapsán na výstup systému. Tento postup se opakuje.

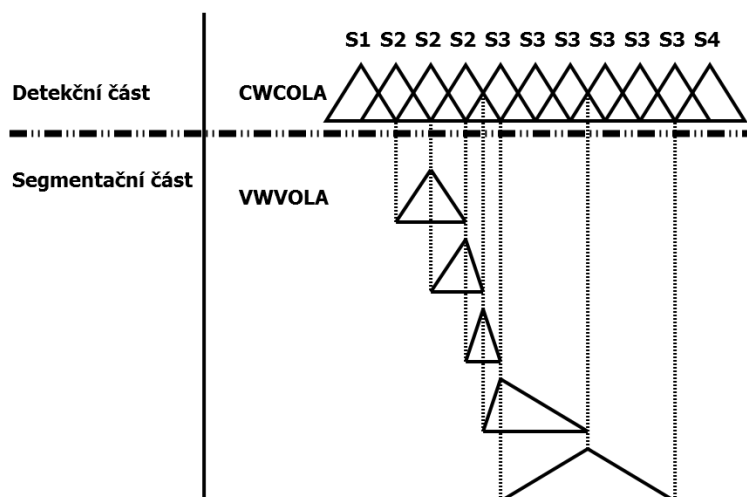
U metody VWCOLA je vybrán stejný úsek vstupního signálu jako u metody VWCOLS, segment je poté vždy váhován oknem CWCOLA. Dále je možné tento segment analyzovat nebo zpracovat a segment se zapíše na výstup. Tento postup se opakuje a přesahy oken se na výstupu počítají.

U metody VWVOLA je vybrán úsek vstupního signálu čtvrtiny délky prvního až po tři čtvrtiny délky posledního detekčního segmentu se stejnou hodnotou číselné charakteristiky náhodných diskrétních signálů. Tento segment je váhován symetrickým oknem, druhá polovina tohoto segmentu je uložena do paměti. Dále může dojít ke zpracování a analýze a segment je zapsán na výstup. V dalším kroku segmentace je první polovina vybraného segmentu přidána k půlce předchozího segmentu v paměti a tím je vytvořen další segment, který je váhován nesymetrickým oknem se sudou délkou segmentu, kdy délka segmentu v paměti je rovna délce levé strany

okna a délka přesahu pravé strany okna je rovna délce první půlky segmentu vybraného v tomto kroku. Takto váhovaný segment může být zapsán na výstup. Další postup je shodný s přechodím krokem a tyto kroky se opakují. Přesahy segmentů jsou samozřejmě na výstupu sčítány.

Délka segmentu se symetrickým oknem není shodná s délkami segmentů předchozích metod, což je z toho důvodu, že tato metoda má na stejnou délku vstupního signálu dvojnásobný počet oken než předchozí metody a z důvodu zachování energie signálu je nutné toto zkrácení délky. Aby byla délka segmentu všech metod stejná, musel by se přidat vždy jeden segment o délce detekčního okna mezi zkrácené segmenty metody VWCOLS a VWCOLA. To je ovšem nevhodné z důvodu značného navýšení počtu krátkých oken, což není vhodné pro mnohé metody zpracování signálu.

Segmentaci stacionárních úseků signálu se lze také dívat tak, že se mezi stacionární úseky vloží krátký segment, který odděluje jednotlivé stacionární segmenty a zároveň zachycuje přechod mezi těmito stacionárními úseky. Vložení přechodového okna lze provést u všech metod, na ukázkou je na obrázku 7.3 vyobrazena segmentace VWVOLA se samostatným přechodovým oknem.



Obr. 7.3: Ukázka segmentace s proměnnou délkou segmentu se samostatným přechodovým oknem

Pokud je signál stacionární po dlouhou dobu, program nasegmentuje stacionární úsek na předem definovanou maximální délku segmentu. Tato délka zároveň určuje maximální procesní zpoždění.

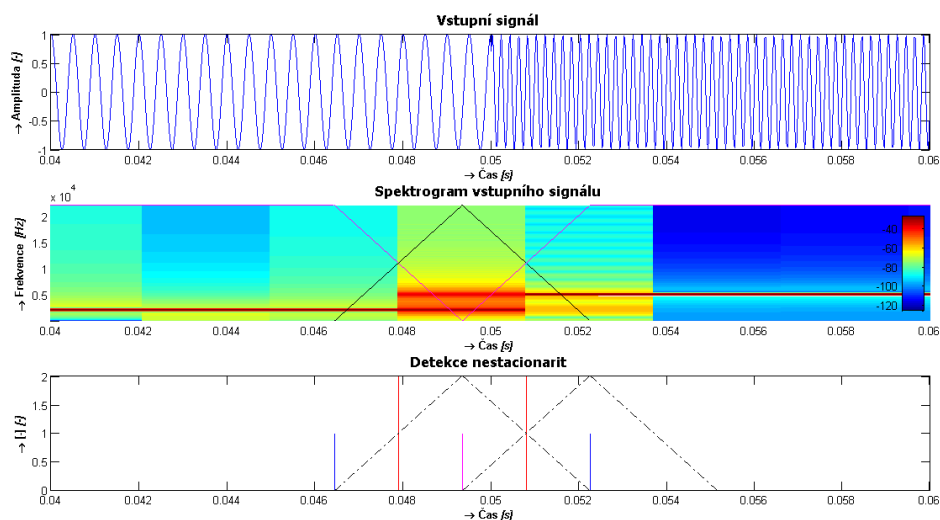
7.1 Detekce lokálních stacionarit u uměle vytvořených signálů

Pro detekci lokální stacionarity signálu je použito v programu detekčního bloku. Každý segment detekčního bloku je filtrován, horní propustí s mezním kmitočtem 6 kHz, aby do detekce nezasahovaly nízké kmitočty, z důvodů uvedených v první kapitole této práce. Pro každý segment detekčního segmentu CWCOLA je vypočítána jedna z číslicových charakteristik náhodného diskrétního signálu, které jsou uvedeny v druhé kapitole. Harmonický signál se skokovitou změnou frekvence z 2 kHz na 5 kHz je vybrán jako první testovací signál. První charakteristikou je průměr, který je pro tento signál nevhodný, jelikož střední hodnota harmonického signálu o libovolné frekvenci je rovna nule. Průměr je vhodný například pro řečové signály, kde střední hodnota signálu není konstantní.

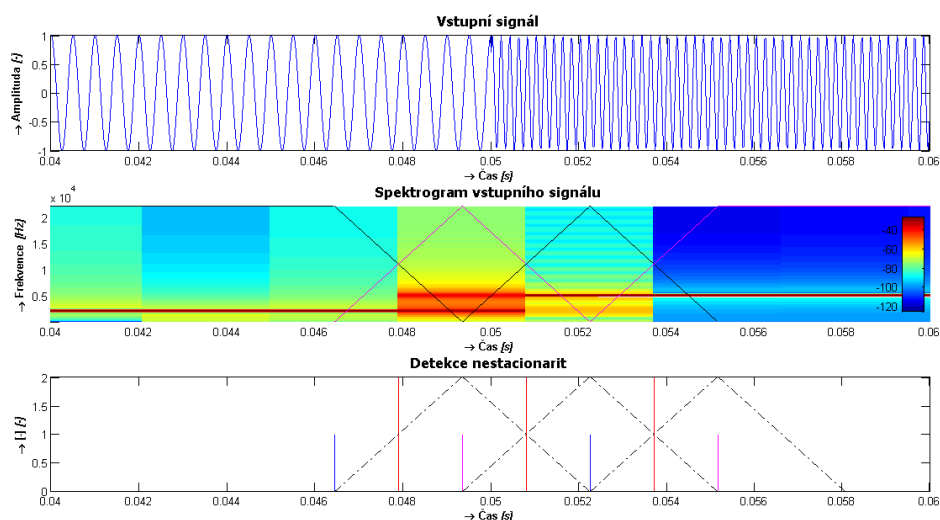
Na obrázku 7.4 je zobrazen vstupní signál, spektrogram vstupního signálu, kde jsou zobrazovány spektra jednotlivých segmentů detekčního bloku, s vyznačenými okny metody VWCOLA a ve spodní části obrázku jsou čerchovanou čarou vyznačena okna segmentů, které byly vyhodnoceny jako nestacionární oproti předchozím, spolu s vyznačením modře a fialově začátku a konce přesahu segmentů s proměnnou délkou segmentu pro metody VWCOLS a VWCOLA a spolu s vyznačením červenou čarou začátku a zároveň konce segmentů VWVOLA se symetrickým oknem. Pro detekci použita směrodatná odchylka. Jelikož je směrodatná odchylka závislá na energii signálu, zachycuje změnu energie na vyšších kmitočtech. Z obrázku je zřejmé, že pro každou frekvenci je nasegmentováno zvláštní okno a navíc je detekováno jedno přechodové okno. Proto není nutné požit metodu segmentace se zvláštním oknem pro přechod, jelikož je tohoto dosaženo na úrovni detekce. Třetí okno obsahující převážně harmonický signál o kmitočtu 5 kHz obsahuje část harmonického signálu o kmitočtu 1 kHz, což je zřetelné při porovnání vstupního signálu s okny. To znamená, že segment obsahuje subjektivně nestacionární signál.

Na obrázku 7.5 je zobrazena segmentace s detekcí stacionarity pomocí rozptylu. Oproti předchozímu případu jsou vytvořena dvě přechodová okna, což více odpovídá spektrogramu, kde druhé z přechodových oken obsahuje zvýšenou energii. krajní okna nyní obsahují pouze stacionární část signálu, pouze harmonický signál o jedné frekvenci. rozptyl je druhou mocninou směrodatné odchylky, což zaručuje větší diferenci hodnot této charakteristiky sousedních segmentů, proto je rozptyl vhodnější metodou detekce.

Stejných výsledků jako při použití rozptylu je dosaženo při použití autokorelace a autokovariance detekčního segmentu, při porovnání sum rozdílů jednotlivých vzorků autokorelačních a autokovariančních posloupností sousedních segmentů. Výstupy při



Obr. 7.4: Segmentace skokové změny frekvence harmonického signálu při detekci stacionarity pomocí směrodatné odchylky



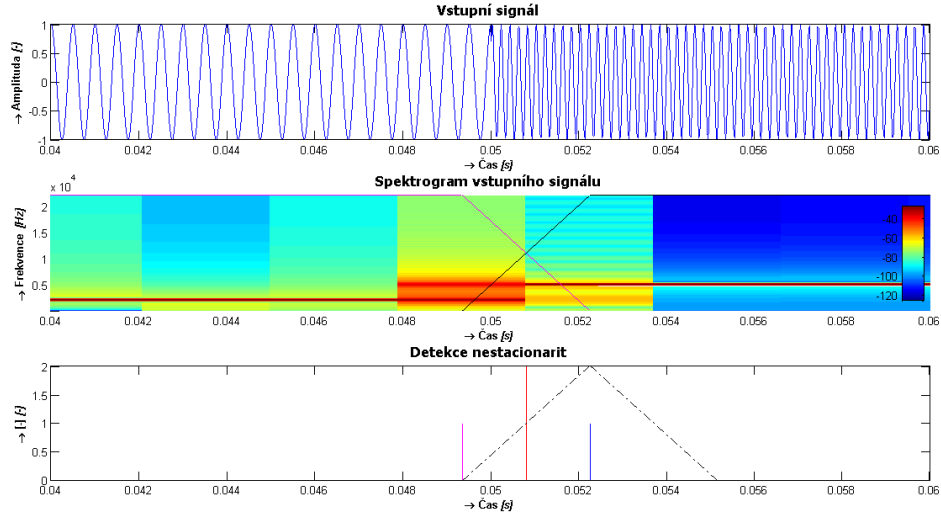
Obr. 7.5: Segmentace skokové změny frekvence harmonického signálu při detekci stacionarity pomocí rozptylu

použití těchto metod jsou v příloze E.1.

Na obrázku 7.6 je zobrazena VWCOLA segmentace při detekci pomocí porovnání prostředního vzorku autokorelační posloupnosti. Zde jsou segmenty pouze dva a oba segmenty obsahují část signálu s druhou frekvencí. V tomto případě nepomůže ani použití zvláštního přechodového okna, jelikož k detekci nestacionarity nedochází na úrovni přeskočení frekvencí, ale až o jeden detekční segment dále. Segmentace se samostatným přechodovým oknem se tedy stává neúčinnou a není v této práci dále uvažována. Stejný výsledek jako při použití autokorelace je dosaženo při použití

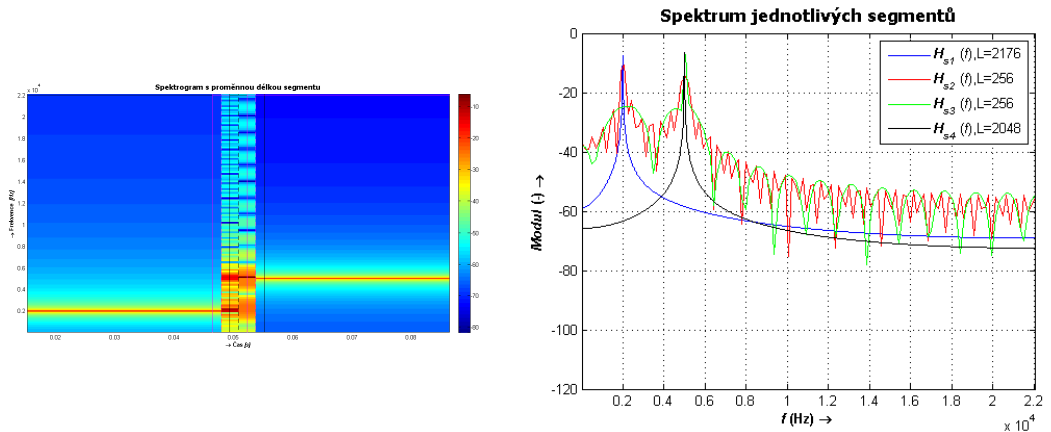
autokovariance, viz přílohu E.1.

V příloze E.1 jsou zobrazeny segmentace pomocí metody VWCOLS a VWVOLA při detekci pomocí porovnání rozptylu dvou sousedních segmentů.



Obr. 7.6: Segmentace skokové změny frekvence harmonického signálu při detekci stacionarity pomocí porovnání prostředního vzorku autokorelace

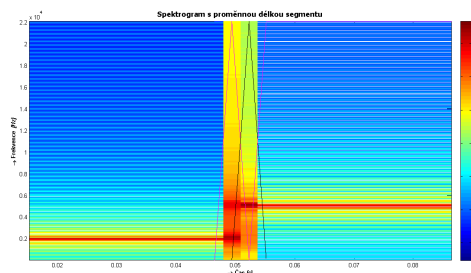
Na obrázku 7.7 je zobrazen spektrogram vytvořen ze spekter jednotlivých segmentů VWCOLS pro shodný vstupní signál jako v předchozím případě. Plnými čarami je vyznačeno okno před odstraněním přesahu a čárkovaně okno po odstranění přesahu. Obrázku 7.8 jsou vykreslena jednotlivá spektra těchto segmentů v pořadí zleva doprava na spektrogramu, která mají každé jiné rozlišení díky proměnné délce okna. Ze spekter krajních segmentů obsahující pouze harmonické složky je zřejmé, že jelikož nebylo použito žádné okno, pouze okno obdélníkové, dochází k výraznému projevu Gibbsova jevu.



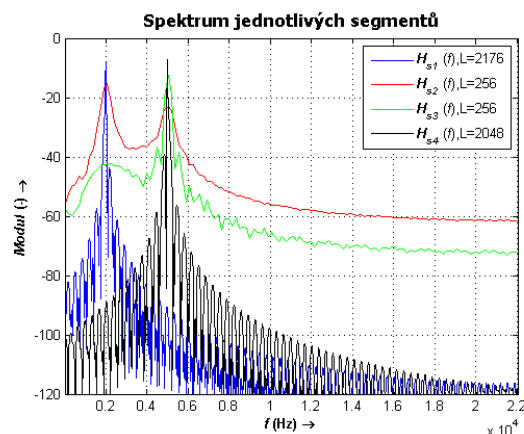
Obr. 7.7: Spektrogram segmentovaného signálu pomocí metody VWCOLS

Obr. 7.8: Spektra jednotlivých segmentů VWCOLS

Na obrázcích 7.9 a 7.10 jsou zobrazeny spektrogram a jednotlivá spektra pro metodu VWCOLA. Ze spekter krajních segmentů obsahující pouze harmonické složky je zřejmé, že díky použitému oknu VWCOLA je útlum postraních laloků větší, ale spektrum je rozšířené v oblasti frekvence harmonické složky.



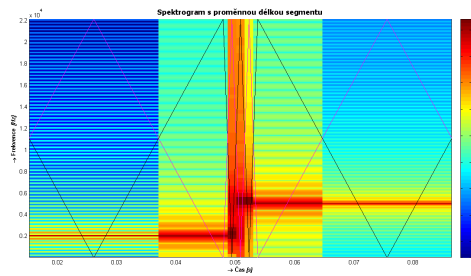
Obr. 7.9: Spektrogram segmentovaného signálu pomocí metody VWCOLA



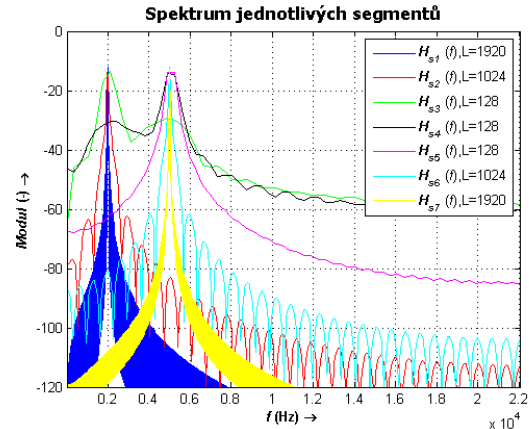
Obr. 7.10: Spektra jednotlivých segmentů VWCOLA

Na obrázcích 7.9 a 7.10 jsou zobrazeny spektrogram a jednotlivá spektra pro metodu VWCOLA. Ze spekter krajních segmentů obsahující pouze harmonické složky je zřejmé, že díky použitému symetrickému trojúhelníkovému oknu je útlum postraních laloků největší a ze všech zmiňovaných segmentačních metod jsou tyto segmenty nejméně postihnuty Gibbsovým jevem. Spektra segmentů váhovaných nesymetrickým oknem mají již výrazný Gibbsův jev a široké spektrum okolo frekvence harmonické složky. Spektra přechodových segmentů jsou podobná u všech metod a nejlepších vlastností dosahují přechodové segmenty VWCOLA, jelikož jsou váhovány trojúhelníkovým oknem a mají dvojnásobné rozlišení díky dvojnásobné délce segmentu.

Čím je větší délka analyzovaných stacionárních segmentů, tím víc se vlastnosti okna VWCOLA zhoršují a tím víc jsou vlastnosti segmentace pro segmenty se symetrickým oknem VWCOLA výhodnější oproti segmentaci VWCOLA. Segmenty VWCOLA u kterých je použito nesymetrické okno ovšem tyto výhody metody nesdílí, jelikož je u nich Gibbsův jev velmi výrazný. Ukázky spekter jednotlivých segmentů metod s dlouhými segmenty je v příloze E.1.1.



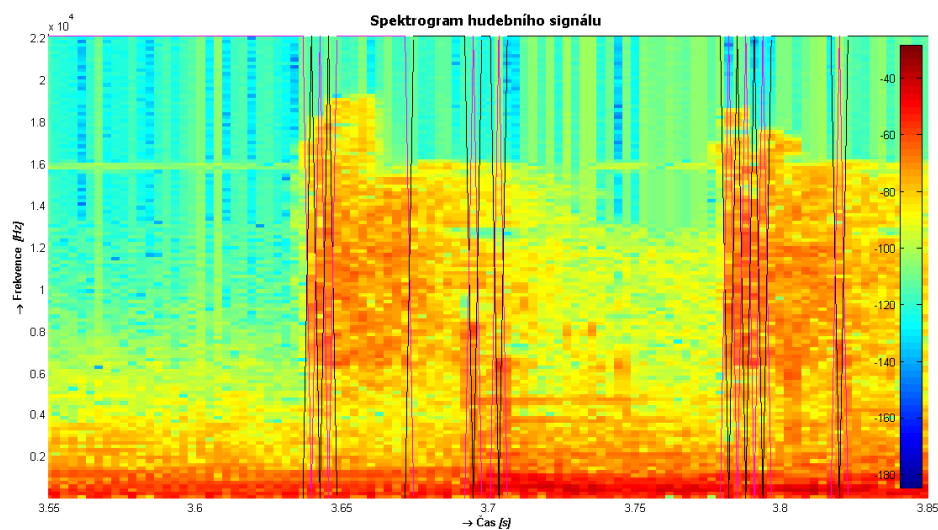
Obr. 7.11: Spektrogram segmentovaného signálu pomocí metody VWVOLA



Obr. 7.12: Spektra jednotlivých segmentů VWVOLA

7.2 Detekce lokálních stacionarit u hudebních signálů

Pro detekci stacionárních úseků se jeví jako nejlepší metoda porovnání rozptylů sousedních segmentů detekčního bloku. Na obrázku 7.13 je ukázka segmentace metodou VWCOLA. Ukázky pro ostatní metody jsou v příloze E.2. Obrázek zachycuje jak je pro každý úsek signálu, který má přibližně stejnou energii vytvořen vlastní segment. Je také zřejmé, že segmenty jsou kratší v oblasti prudkého nárůstu energie, neboli úderu do bicích a podobně a naopak jsou segmenty delší v oblasti doznívání takovýchto zvuků, kdy nedochází na kmitočtech vyšších jak 6 kHz k náhlé výrazné změně energie.



Obr. 7.13: Spektrogram hudebního signálu a vyznačená okna segmentace VWCOLA

8 ZÁVĚR

V rámci této práce jsou popsány náhodné diskrétní signály se zaměřením na hudební signály. Dále je zde poznamenáno, že signál lze považovat za stacionární v případě, že jeho číslicové charakteristiky se nemění v čase. To pro hudební signály znamená, že obsahují pouze lokální stacionární úseky, jelikož jsou obecně globálně nestacionární. Dalším závěrem je, že pro správnou detekci lokálních stacionárních úseků je nutné nejprve signál filtrovat horní propustí s mezním kmitočtem přibližně 6 kHz, aby se ze signálu odfiltrovala oblast nízkých kmitočtů, na kterých je hudební signál obecně konstantně stacionární, jelikož se zde výrazně skokově nemění energie. Dále zde jsou matematicky popsány charakteristiky náhodných diskrétních signálů, které se používají pro detekci stacionarity. Dalším bodem je popis základních nejčastěji používaných oken, jejich rozdělení, vzájemné porovnání a uvedení jejich výpočtu. Hlavní náplní je popis segmentace signálu s konstantní délkou segmentů a s proměnnou délkou segmentů. Byly popsány metody odstranění konstantně dlouhého přesahu s konstantní délkou segmentu a přičtení konstantně dlouhého přesahu s konstantní délkou segmentu pro analýzu signálu a pro filtraci signálu. Pro analýzu signálu není doporučována metoda odstranění konstantně dlouhého přesahu s konstantní délkou segmentu, jelikož je analyzován delší úsek, než bývá zapisován na výstup systému segmentace. U metody přičtení konstantně dlouhého přesahu s konstantní délkou segmentu byly porovnány výstupní signály při filtraci s doplněním a bez doplnění segmentu nulami. Bez doplnění segmentů nulami vzniká převhodový jev ve výstupním signálu, který je ovšem minimalizován díky oknu. Dále jsou popsány základní principy metod segmentace s proměnnou délkou segmentu. Následovně jsou popsána okna používaná u segmentací s proměnnou délkou segmentu. Jsou zde popsány rozdíly v časové a zejména spektrální oblasti, kde dochází k výraznému Gibbsovu jevu u obdélníkových oken, oken používaných metodou přičtení konstantně dlouhého přesahu s proměnnou délkou segmentu, které mají vzhledem k délce okna krátkou délku přesahu, dále u nesymetrických oken používaných u metody přičtení proměnně dlouhého přesahu s proměnnou délkou segmentu, u kterých se Gibbsův jev projevuje tím více, čím je okno méně symetrické. Při porovnání spekter oken obou metod s přičtení přesahu s proměnnou délkou segmentu, kde mají obě okna z jedné strany stejný přesah, je zřejmá výrazná podobnost. Spektrum okna s proměnnou délkou přesahu má v tomto případě mírně horší parametry, jelikož v oblastech mezi jednotlivými laloky téměř nedochází k poklesu, což má negativní vliv zejména v oblasti hlavního laloku spektra. Dále jsou zkoumány přechodové jevy vznikající při filtraci segmentovaného signálu při segmentaci s proměnnou délkou segmentu u časově variantního systému se skokovou změnou koeficientů filtru dolní propusti na horní a naopak pro různé implementace filtrů. Přechodové jevy všech imple-

mentací pro jednotlivé metody s proměnlivou délkou segmentu vycházejí shodně. U metody odseknutí přesahu kvůli tomu, že samotný přechodový signál je odseknut, a u obou metod s přičtením přesahu kvůli tomu, že je přechodový jev minimalizován váhovacím oknem. U metody s odstraněním přesahu dochází pouze k diskontinuitám na hraně dvou segmentů u kterých došlo ke změně koeficientů filtru. Tato diskontinuita je závislá na rozdílu fází použitých filtrů. Jelikož je fáze dolní a horní propusti filtru s nekonečnou impulzní odezvou s řádem čtyři a všech násobků čtyř rovna nule, diskontinuita je také nulová, proto je vhodné použít právě řád filtru čtyři nebo jeho násobek. U metody s přičtením přesahu dochází s součtu váhovaných přesahů s různou fází a dochází k poklesu obálky signálu, proto je opět vhodné použít filtr s nekonečnou impulzní odezvou řádu čtyři nebo násobku čtyř. Při použití filtru s konečnou délkou impulzní odezvy je vhodné vycházet z uvedeného filtru s nekonečnou impulzní odezvou. V rámci této práce je vytvořen program v prostředí Matlab, který je při praven pro implementaci v reálném čase. Procesní zpoždění tohoto programu je proměnlivé v závislosti na délce právě zpracovávaného segmentu. Jako nejvhodnější a nejuniverzálnější metodou detekce stacionarity signálu je porovnávání rozptylu dvou po sobě jdoucích segmentů, kdy při velkém rozdílu hodnot, je signál vyhodnocen jako nestacionární. Jako nevhodná metoda segmentace proměnlivě dlouhých segmentů pro číslicové zpracování se jeví metoda odseknutí konstantně dlouhého přesahu, jelikož segmenty nejsou váhovány okny a dochází k výraznému Gibbsovu jevu. Další nevýhodou této metody je, že část segmentu je zahozena, což je nevhodné zejména pro analýzu, jelikož analýza výstupního signálu je takto nepřesná. Jako nejvhodnější segmentační metoda je zvolena metoda přičtení proměnně dlouhého přesahu s proměnně dlouhým oknem, které má u segmentů s použitím symetrických oken nejlepší vlastnosti, jako je úzká šířka laloku a velký útlum postraních laloků. Pouze symetrická okna jsou použita pouze v oblastech dlouho stacionárních, pokud je detekována nestacionarita, je použito i nesymetrické okno, které stejnou míru zastoupení Gibbsova jevu, jako tomu je u metody přičtení konstantně dlouhého segmentu. Metoda přičtení konstantně dlouhého přesahu s konstantně dlouhým oknem je dobrým kompromisem mezi zastoupením Gibbsova jevu v segmentech a výpočetní náročností metody.

LITERATURA

- [1] BALÍK, M. *Číslicové zpracování akustických signálů*: skripta. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2014.
- [2] SMÉKAL, Z. *Číslicové zpracování signálů*: skripta. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2012
- [3] PROAKIS, J.G.; MANOLAKIS, D.G. *Digital Signal Processing - Third edition*. Prentice Hall, ISBN 0-13-373762-4, 1996.
- [4] THE MATHWORKS, INC. *Matlab help*. MathWorks, 2011.
- [5] SELESNIK, I. W.; BURRUS, C. S. *Fast Convolution and Filtering*, Digital Signal Processing Handbook CRC Press LLC, 1999. Dostupné z URL: <<http://dsp-book.narod.ru/DSPMW/08.PDF>>.
- [6] PAVLÍČEK, T. *Časově-variantní systémy s konečnou impulzní odezvou a jejich implementace* semestrální projekt. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2014. 35 s. Vedoucí práce byl Ing. Miroslav Balík, Ph.D.
- [7] ANTONIOU, A. *FIR Filters – Window Method* Tutorial ISCAS, 2007. Victoria, BC, Canada. Dostupné z URL: <<http://www.ece.uvic.ca/~andreas/ISCASTutorial/Part%201-FIR%20Filters-Window%20Method.pdf>>.
- [8] NASON, G. P. *Stationary and non-stationary time series* University of South Florida, 29s.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

$\bar{x}$	aritmetický průměr
N	počet členů statistického souboru
x_i	hodnoty členů statistického souboru
σ^2	rozptyl
σ	směrodatná odchylka
r_{xx}	autokorelace
c_{xx}	autokovariance
FIR	konečná impulzní odezva – finite impulse response
IIR	nekonečná impulzní odezva – infinite impulse response
$T_{f vz}$	vzorkovací perioda
FFT	rychlá Fourierova transformace – fast Fourier transform
w_{obd}	obdélníkové váhovací okno
w_{tro}	trojúhelníkové váhovací okno
w_{han}	Hannovo váhovací okno
w_{ham}	Hammingovo váhovací okno
w_{bla}	Blackmanovo váhovací okno
CVCOLS	odstranění konstantně dlouhého přesahu s konstantní délkou segmentu – constant window constant overlap save
CVCOLA	přičtení konstantně dlouhého přesahu s konstantní délkou segmentu – constant window constant overlap add
VWCOLS	odstranění konstantně dlouhého přesahu s proměnnou délkou segmentu – – variable window constant overlap save
VWCOLA	přičtení konstantně dlouhého přesahu s proměnnou délkou segmentu – variable window constant overlap add
VWVOLA	přičtení proměnně dlouhého přesahu s proměnnou délkou segmentu – variable window variable overlap add

OLA přičtení přesahu – overlap add

OLS odstranění přesahu – overlap save

L délka segmentu

M délka přesahu

Δ absolutní chyba

δ relativní chyba

CWCOLA v2 přičtení konstantně dlouhého přesahu s konstantní délkou segmentu
s doplnění nulami – constant window constant overlap add version 2

$X(\omega)$ signál x v kmitočtové oblasti

$Y(\omega)$ signál y v kmitočtové oblasti

M_L délka přesahu segmentu zleva

M_R délka přesahu segmentu zleva

m přirozená čísla

m_0 přirozená čísla nebo nula

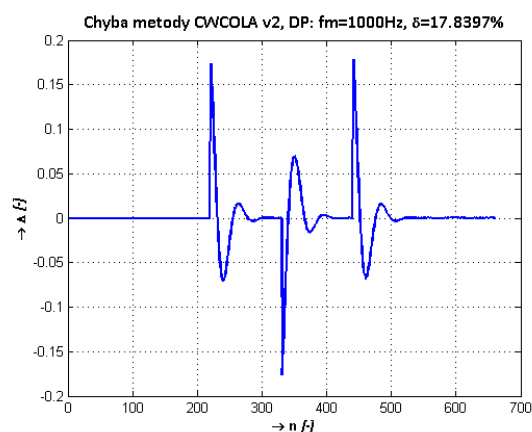
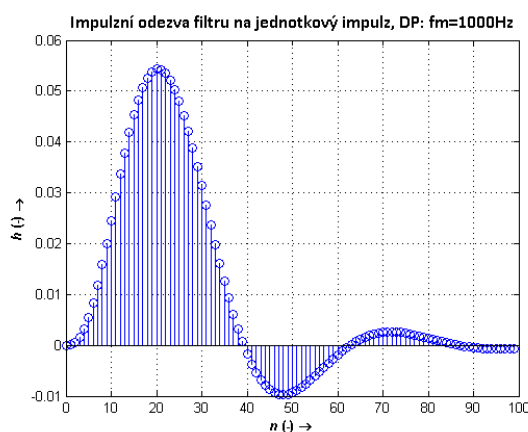
$\mathbb{N}$ obor přirozených čísel

$\mathbb{N}_0$ obor přirozených čísel doplněných o nulu

SEZNAM PŘÍLOH

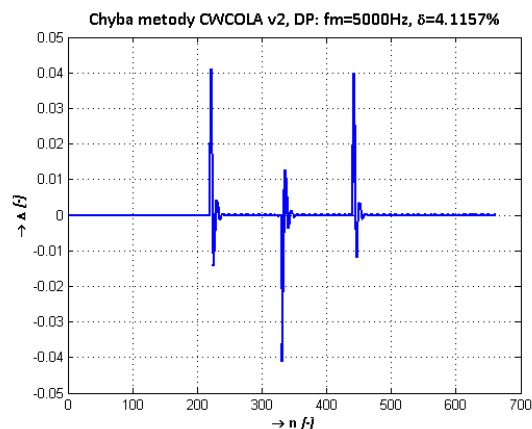
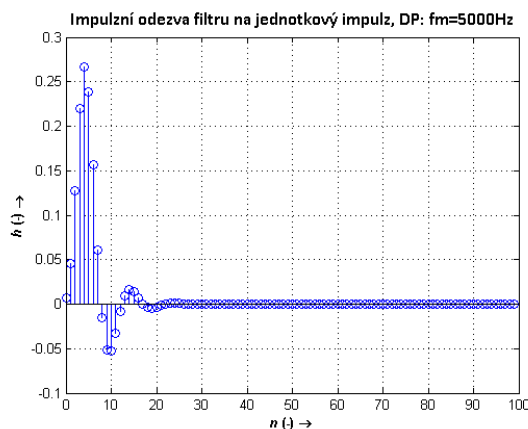
A	Přehled chyb metody přičtení konstantně dlouhého přesahu s konstantní délkou segmentu bez doplnění nulami při použití pro konvoluci	55
B	Okna používaná u metody přičtení konstantně dlouhého přesahu s proměnnou délkou segmentu	56
C	Srovnání oken používaných u metody přičtení proměnně dlouhého přesahu s proměnnou délkou segmentu	57
D	Přechodové jevy segmentačních metod s proměnnou délkou segmentu	60
D.1	Přechodové jevy u metody odstranění konstantně dlouhého přesahu s konstantní délkou segmentu	60
D.1.1	Přechodové jevy u metody odstranění konstantně dlouhého přesahu s konstantní délkou segmentu pro sudý řád filtrů	61
D.2	Přechodové jevy u metody odstranění konstantně dlouhého přesahu s konstantní délkou segmentu	61
D.3	Přechodové jevy u metody odstranění konstantně dlouhého přesahu s konstantní délkou segmentu	62
E	Detekce lokálních stacionarit	63
E.1	Detekce lokálních stacionarit u uměle vytvořených signálů	63
E.1.1	Spektra jednotlivých segmentů s proměnnou délkou s dlouhými stacionárními segmenty	67
E.2	Segmentace hudebních signálů	67

A PŘEHLED CHYB METODY PŘÍČTENÍ KONSTANTNĚ DLOUHÉHO PŘESAHO S KONSTANTNÍ DÉLKOU SEGMENTU BEZ DOPLNĚNÍ NULAMI PŘI POUŽITÍ PRO KONVOLUCI



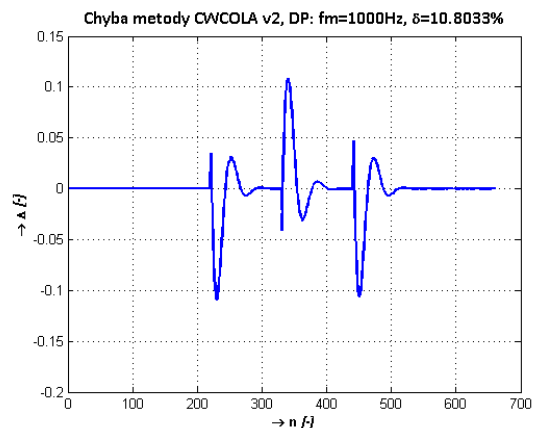
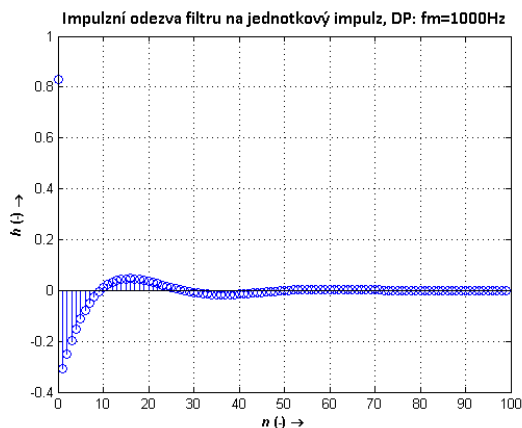
Obr. A.1: Impulzní odezva na jednotkový impuls použité dolní propusti s mezním kmitočtem 1 kHz

Obr. A.2: Chyby čtyř po sobě jdoucích segmentů při použití metody CWCOLA filtrem typu dolní propust s mezním kmitočtem 1 kHz



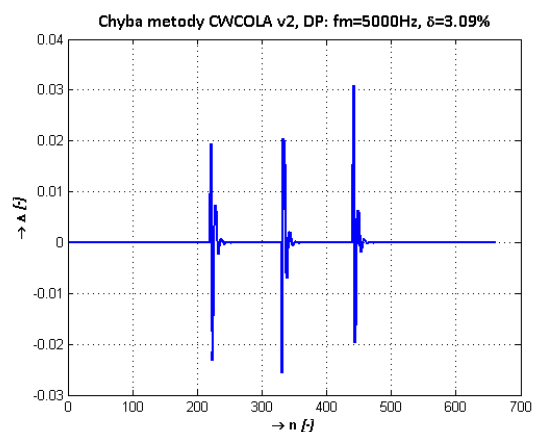
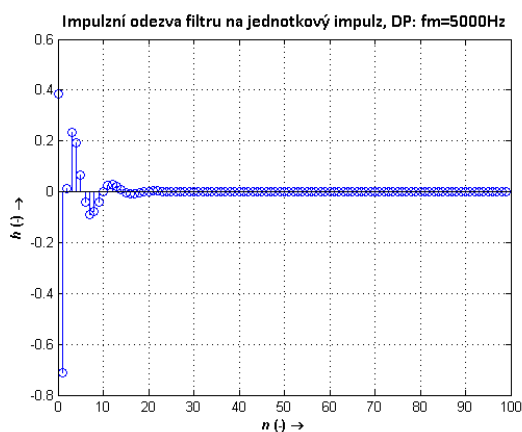
Obr. A.3: Impulzní odezva na jednotkový impuls použité dolní propusti s mezním kmitočtem 5 kHz

Obr. A.4: Chyby čtyř po sobě jdoucích segmentů při použití metody CWCOLA filtrem typu dolní propust s mezním kmitočtem 5 kHz



Obr. A.5: Impulzní odezva na jednotkový impuls použité dolní propusti s mezním kmitočtem 1000 Hz

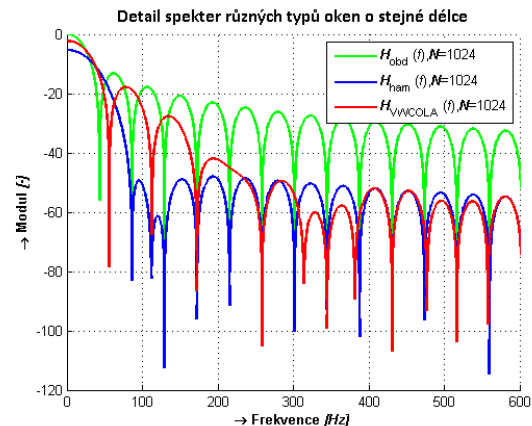
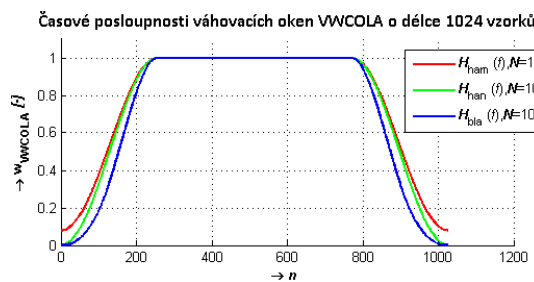
Obr. A.6: Chyby čtyř po sobě jdoucích segmentů při použití metody CWCOLA filtrem typu horní propust s mezním kmitočtem 1000 Hz



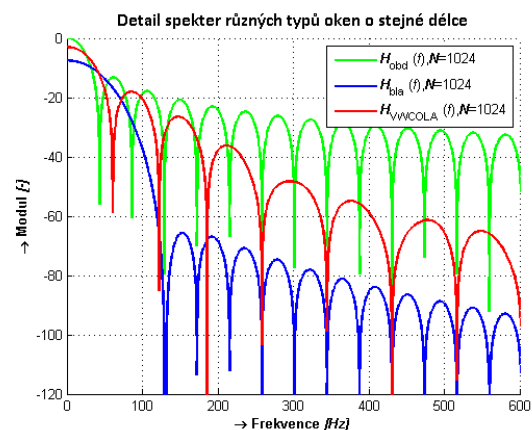
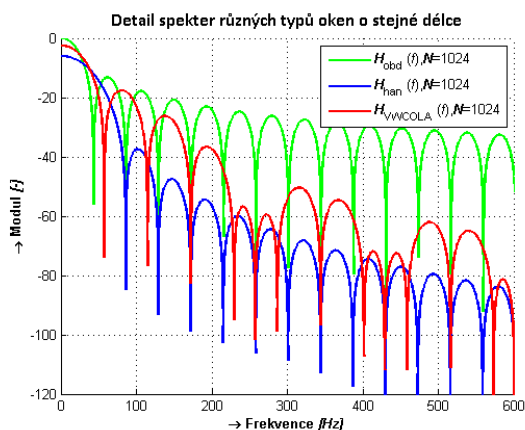
Obr. A.7: Impulzní odezva na jednotkový impuls použité dolní propusti s mezním kmitočtem 5000 Hz

Obr. A.8: Chyby čtyř po sobě jdoucích segmentů při použití metody CWCOLA filtrem typu horní propust s mezním kmitočtem 5000 Hz

B OKNA POUŽÍVANÁ U METODY PŘÍČTENÍ KONSTANTNĚ DLOUHÉHO PŘESAHO S PROMĚNNOU DÉLKOU SEGMENTU

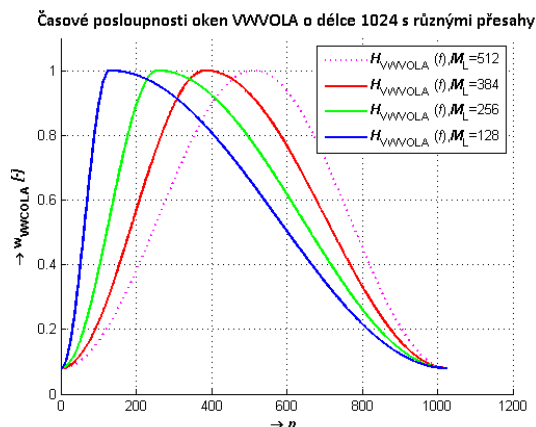


Obr. B.1: Časové posloupnosti váhovacích oken VWCOLA o délce 1024 s přesahem 256 vzorků
Obr. B.2: Porovnání spekter oken VWCOLA vycházející z Hammingova okna o délce 1024 s přesahem 256 vzorků

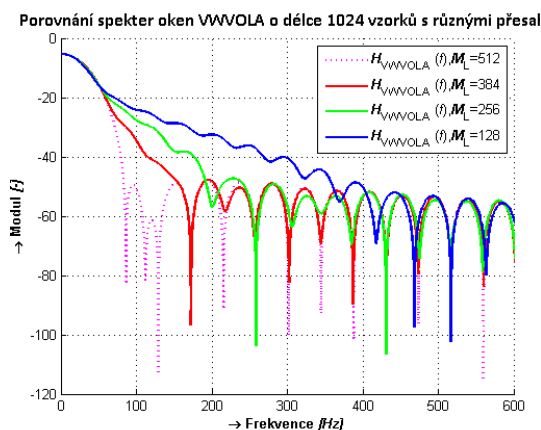


Obr. B.3: Porovnání spekter oken VWCOLA vycházející z Hannova okna o délce 1024 s přesahem 256 vzorků
Obr. B.4: Porovnání spekter oken VWCOLA vycházející z Blackmanova okna o délce 1024 s přesahem 256 vzorků

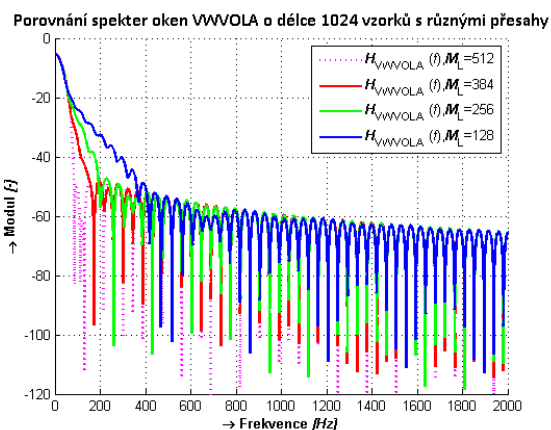
C SROVNÁNÍ OKEN POUŽÍVANÝCH U METODY PŘÍČTENÍ PROMĚNNĚ DLOUHÉHO PŘESAHA S PROMĚNNOU DÉLKOU SEGMENTU



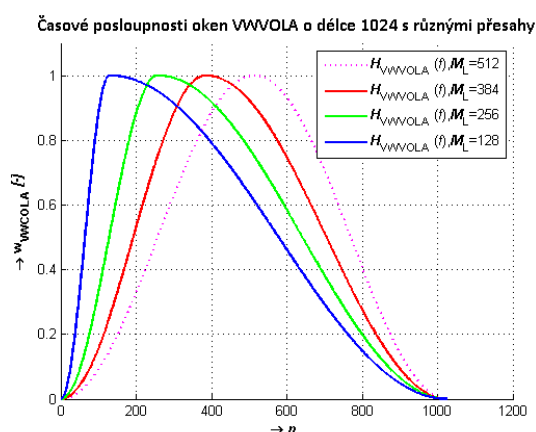
Obr. C.1: Časové posloupnosti oken VWVOLA vycházející z Hammingova okna o délce 1024 s různými přesahy



Obr. C.2: Porovnání detailů spekter oken VWVOLA vycházející z Hammingova okna o délce 1024 vzorků s různými přesahy

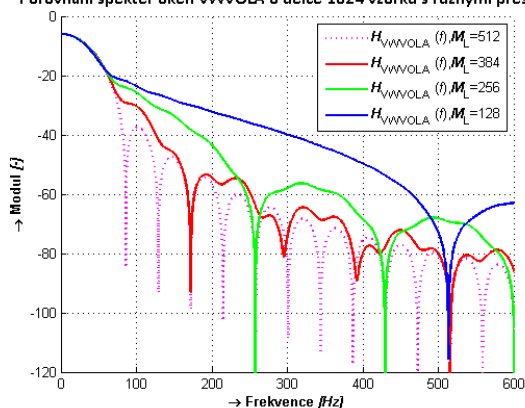


Obr. C.3: Porovnání spekter oken VWVOLA vycházející z Hammingova okna o délce 1024 vzorků s různými přesahy



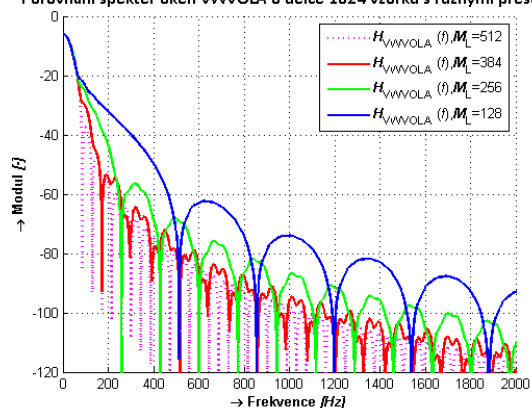
Obr. C.4: Časové posloupnosti oken VWVOLA vycházející z Hannova okna o délce 1024 s různými přesahy

Porovnání spekter oken VVWOLA o délce 1024 vzorků s různými přesahy



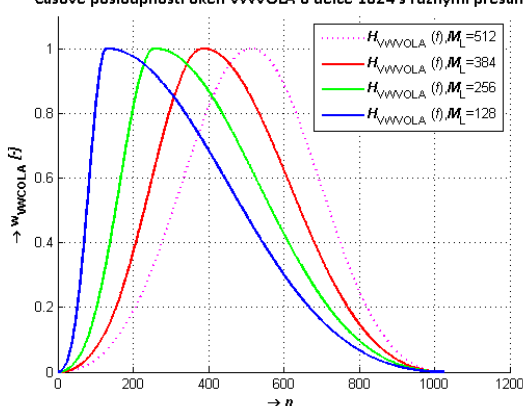
Obr. C.5: Porovnání detailů spekter oken VVWOLA vycházející z Hannova okna o délce 1024 vzorků s různými přesahy

Porovnání spekter oken VVWOLA o délce 1024 vzorků s různými přesahy



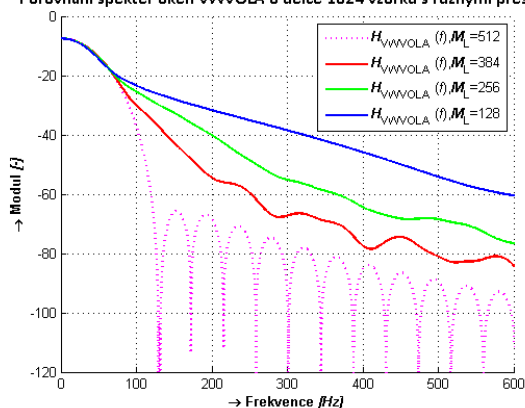
Obr. C.6: Porovnání spekter oken VVWOLA vycházející z Hannova okna o délce 1024 vzorků s různými přesahy

Časové posloupnosti oken VVWOLA o délce 1024 s různými přesahy



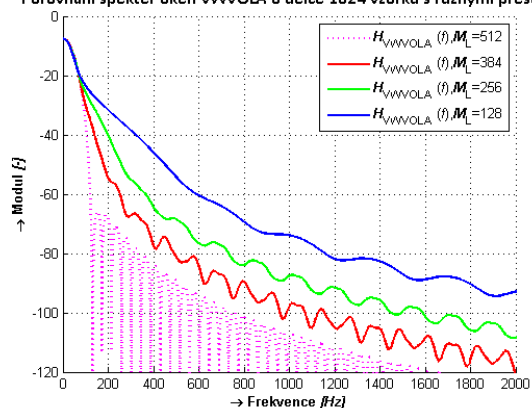
Obr. C.7: Časové posloupnosti oken VVWOLA vycházející z Blackmanova okna o délce 1024 s různými přesahy

Porovnání spekter oken VVWOLA o délce 1024 vzorků s různými přesahy



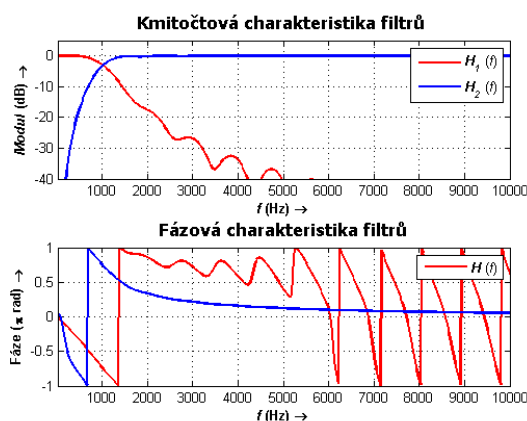
Obr. C.8: Porovnání detailů spekter oken VVWOLA vycházející z Blackmanova okna o délce 1024 vzorků s různými přesahy

Porovnání spekter oken VVWOLA o délce 1024 vzorků s různými přesahy



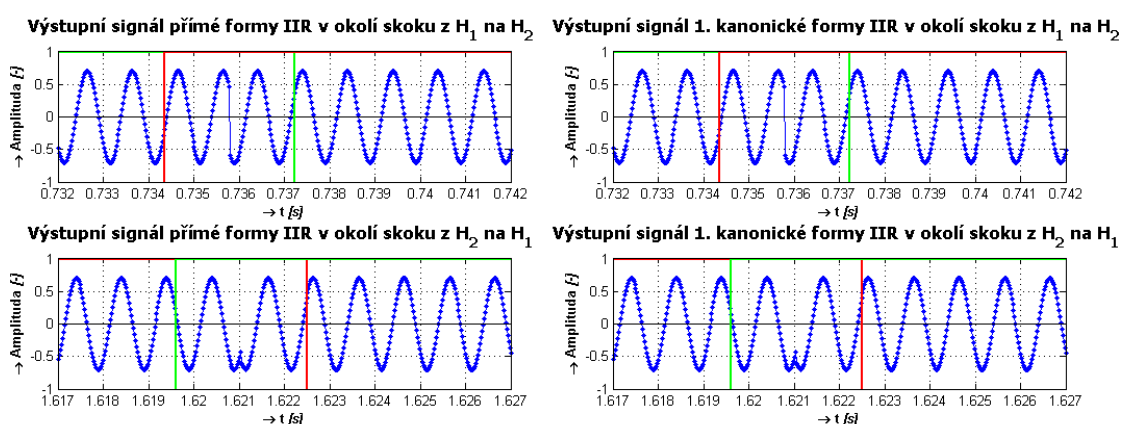
Obr. C.9: Porovnání spekter oken VVWOLA vycházející z Blackmanova okna o délce 1024 vzorků s různými přesahy

D PŘECHODOVÉ JEVY SEGMENTAČNÍCH METOD S PROMĚNNOU DÉLKOU SEGMENTU

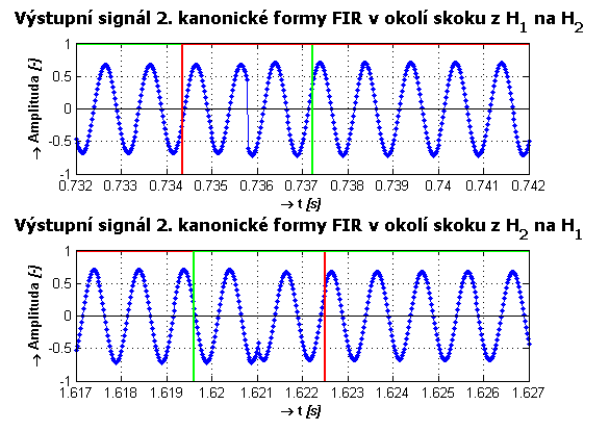
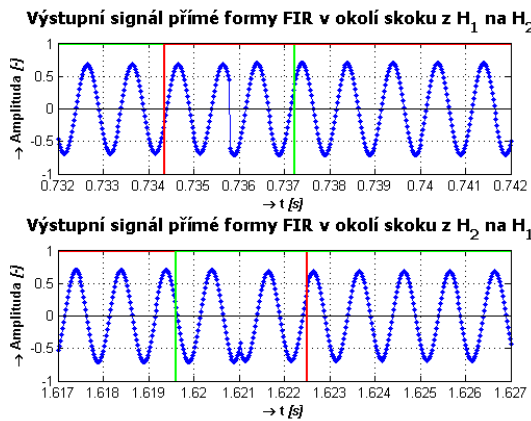


Obr. D.1: Kmitočtové charakteristiky FIR filtrů řádu 50 typu dolní a horní propust s mezním kmitočtem 1 kHz

D.1 Přechodové jevy u metody odstranění konstantně dlouhého přesahu s konstantní délkou segmentu

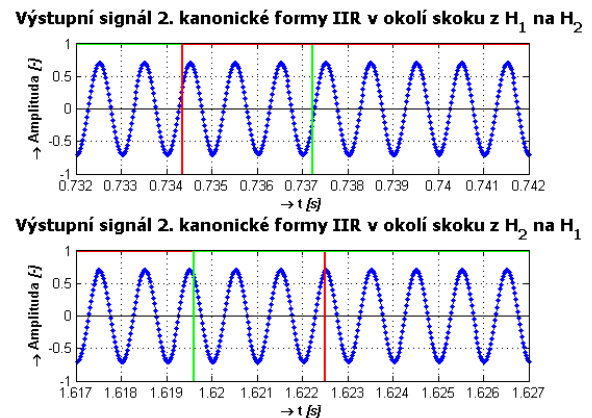
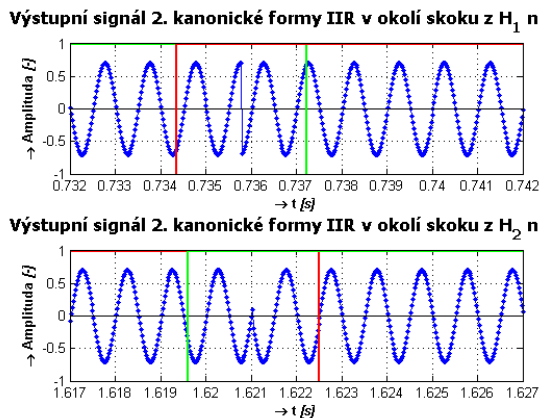


Obr. D.2: Přechodové jevy metody VW- Obr. D.3: Přechodové jevy metody VW- COLS při skokových změnách filtrů IIR COLS při skokových změnách filtrů IIR přímé formy 1. kanonické formy



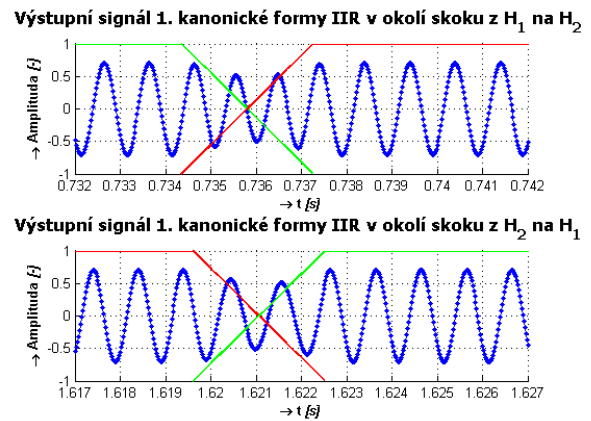
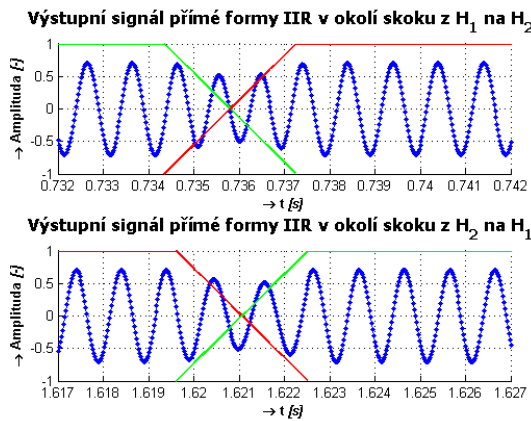
Obr. D.4: Přechodové jevy metody VW- Obr. D.5: Přechodové jevy metody VW-
COLS při skokových změnách filtrů FIR COLS při skokových změnách filtrů FIR
přímé formy 1. kanonické formy

D.1.1 Přechodové jevy u metody odstranění konstantně dlouhého přesahu s konstantní délkou segmentu pro sudý řád filtrů



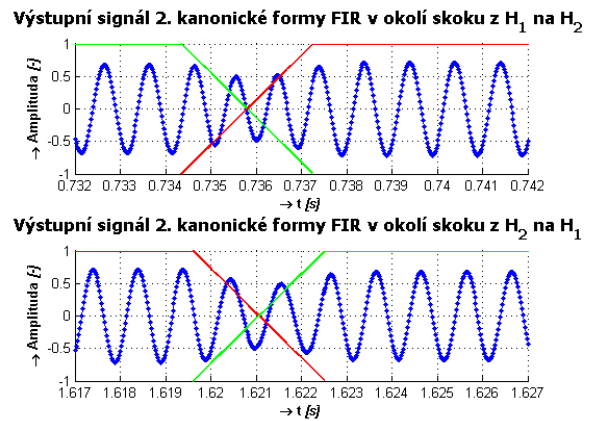
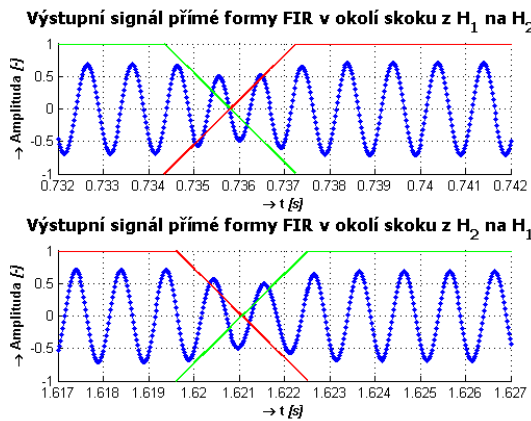
Obr. D.6: Přechodové jevy metody VW- Obr. D.7: Přechodové jevy metody VW-
COLS při skokových změnách filtrů FIR COLS při skokových změnách filtrů FIR
2. kanonické formy druhého řádu 2. kanonické formy čtvrtého řádu

D.2 Přechodové jevy u metody odstranění konstantně dlouhého přesahu s konstantní délkou segmentu



Obr. D.8: Přechodové jevy metody VW-COLA při skokových změnách filtrů IIR přímé formy

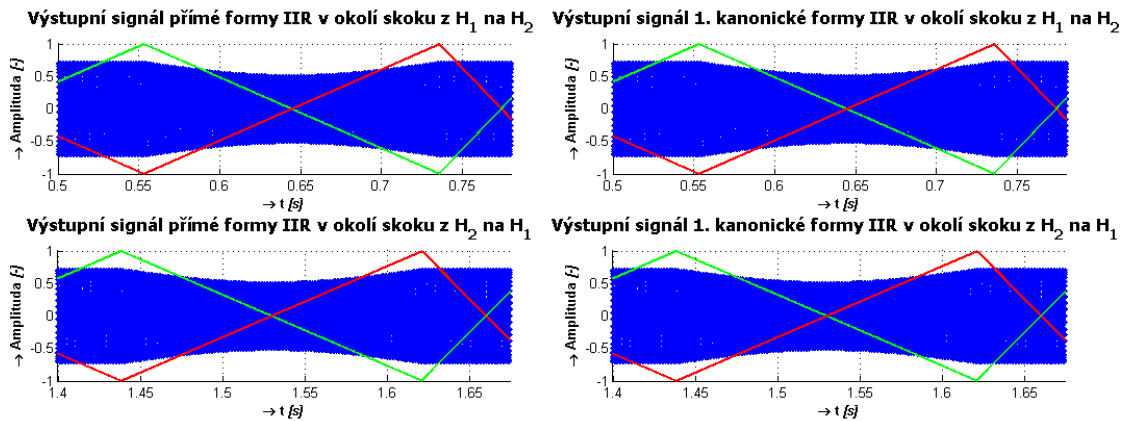
Obr. D.9: Přechodové jevy metody VW-COLA při skokových změnách filtrů IIR 1. kanonické formy



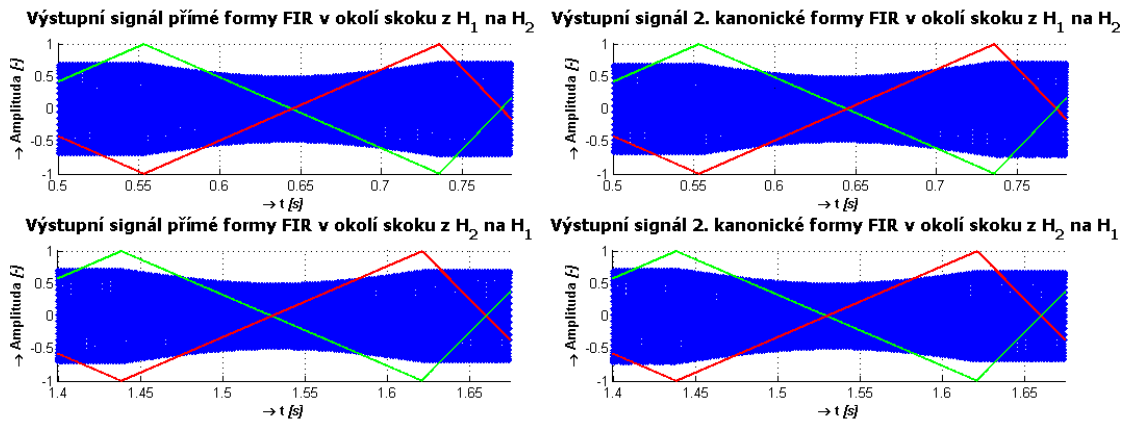
Obr. D.10: Přechodové jevy metody VWCOLA při skokových změnách filtrů FIR přímé formy

Obr. D.11: Přechodové jevy metody VWCOLA při skokových změnách filtrů FIR 1. kanonické formy

D.3 Přechodové jevy u metody odstranění konstantně dlouhého přesahu s konstantní délkou segmentu



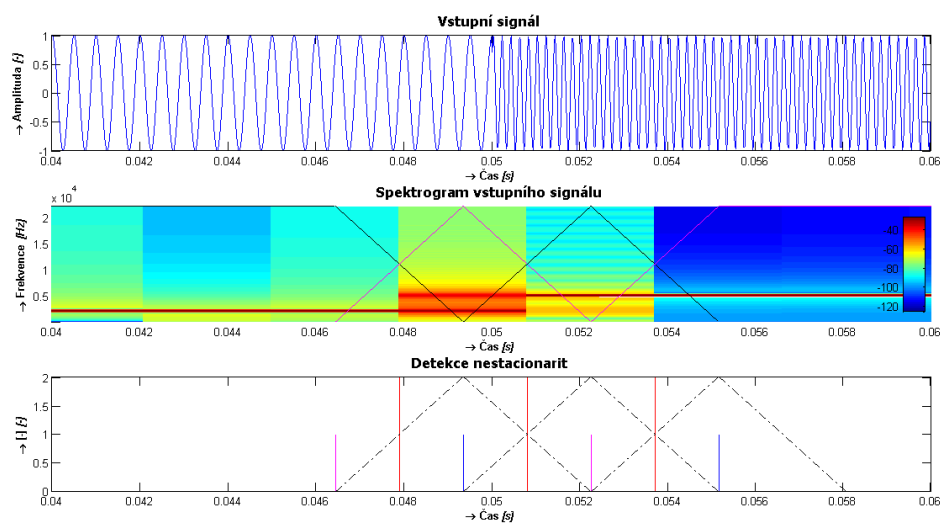
Obr. D.12: Přechodové jevy metody VWVOLA při skokových změnách filtrů IIR přímé formy
Obr. D.13: Přechodové jevy metody VWVOLA při skokových změnách filtrů IIR 1. kanonické formy



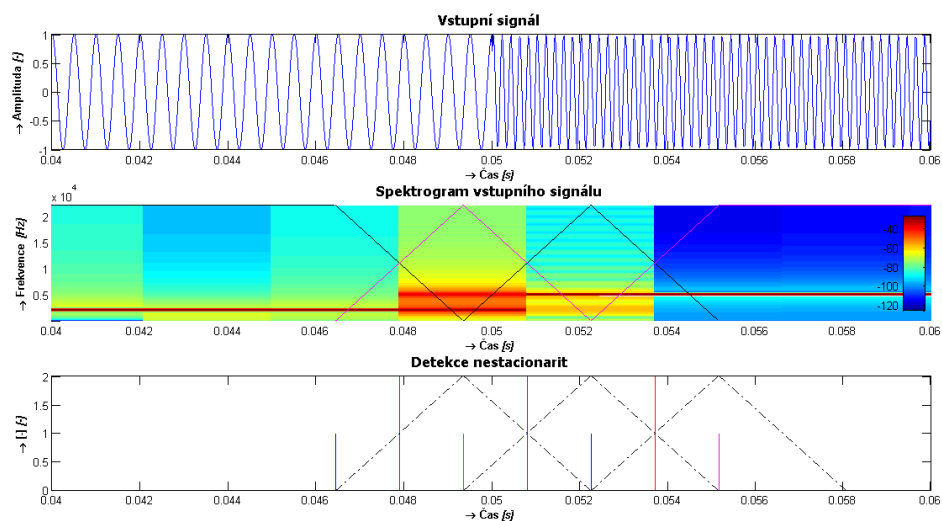
Obr. D.14: Přechodové jevy metody VWVOLA při skokových změnách filtrů FIR přímé formy
Obr. D.15: Přechodové jevy metody VWVOLA při skokových změnách filtrů FIR 1. kanonické formy

E DETEKCE LOKÁLNÍCH STACIONARIT

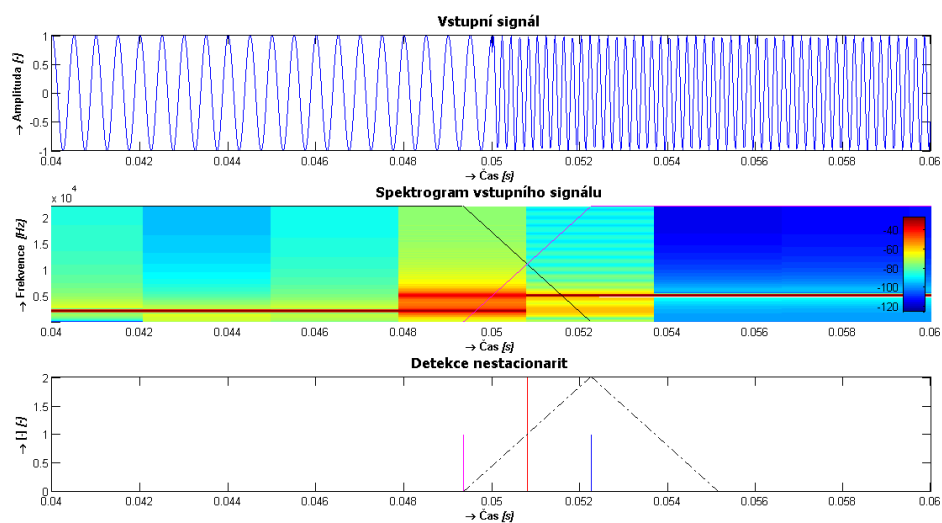
E.1 Detekce lokálních stacionarit u uměle vytvořených signálů



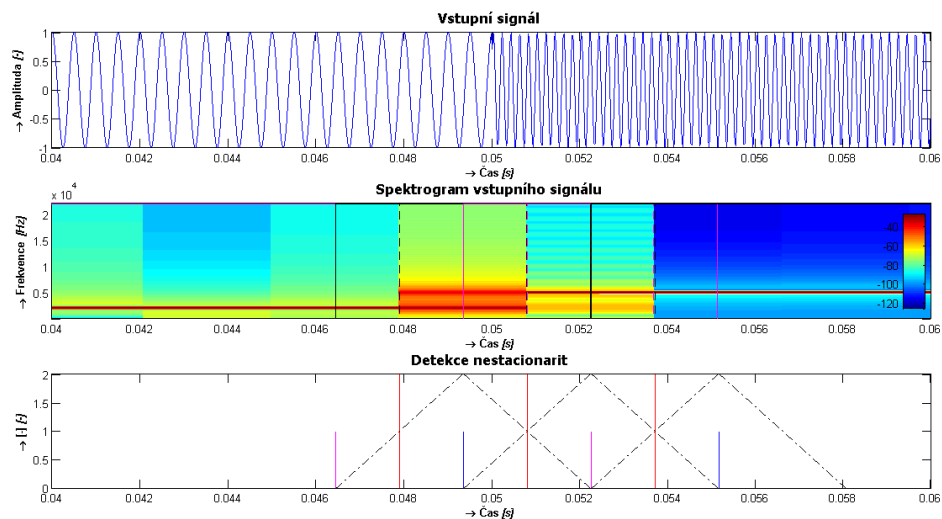
Obr. E.1: Segmentace skokové změny frekvence harmonického signálu při detekci stacionarity pomocí porovnání autokorelačních posloupností



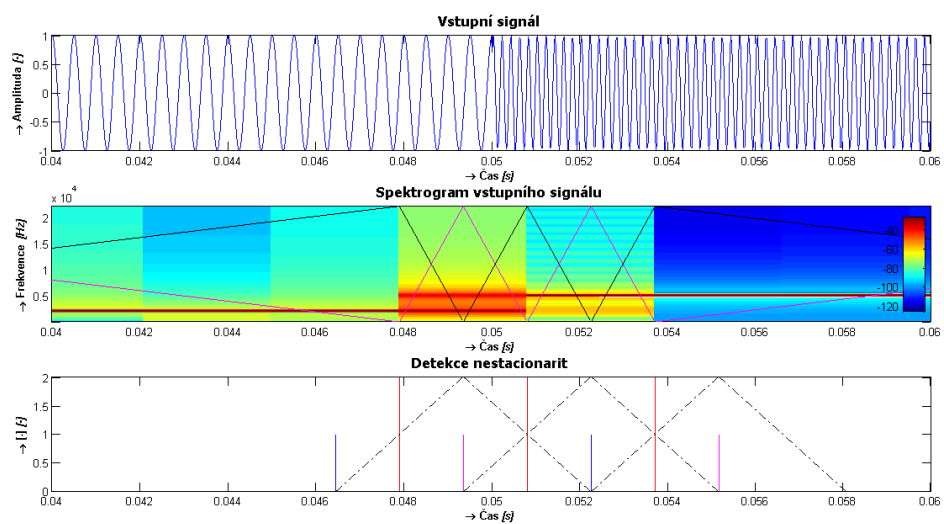
Obr. E.2: Segmentace skokové změny frekvence harmonického signálu při detekci stacionarity pomocí porovnání autokovariančních posloupností



Obr. E.3: Segmentace skokové změny frekvence harmonického signálu při detekci stacionarity pomocí porovnání prostředního vzorku autokovariančních posloupností

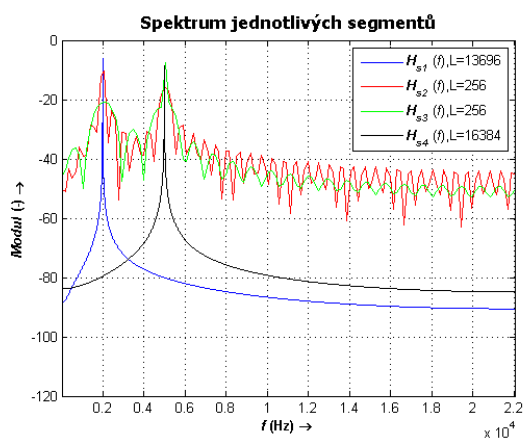


Obr. E.4: Segmentace VWCOLS skokové změny frekvence harmonického signálu při detekci stacionarity pomocí porovnání autokovariančních posloupností

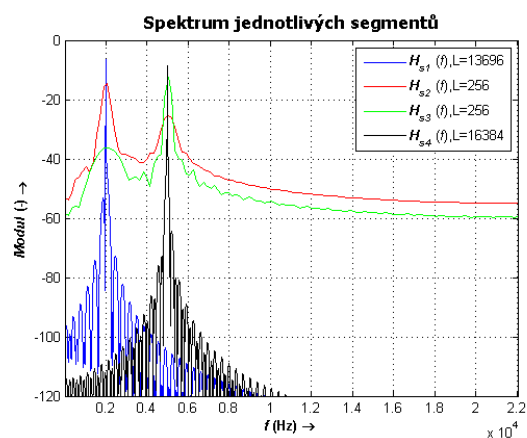


Obr. E.5: Segmentace VWVOLA skokové změny frekvence harmonického signálu při detekci stacionarity pomocí porovnání autokovariančních posloupností

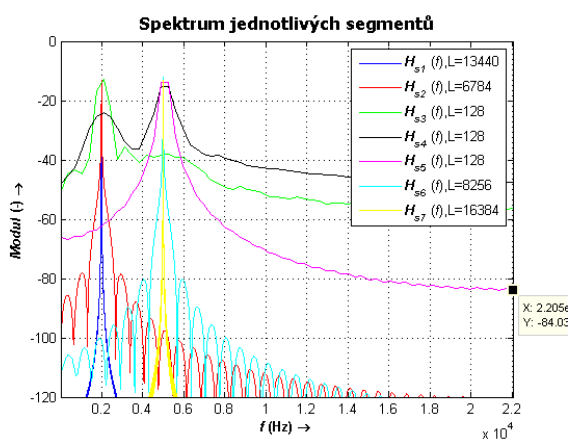
E.1.1 Spektra jednotlivých segmentů s proměnnou délkou s dlouhými stacionárními segmenty



Obr. E.6: Spektra jednotlivých segmentů VWCOLS s dlouhými stacionárními segmenty

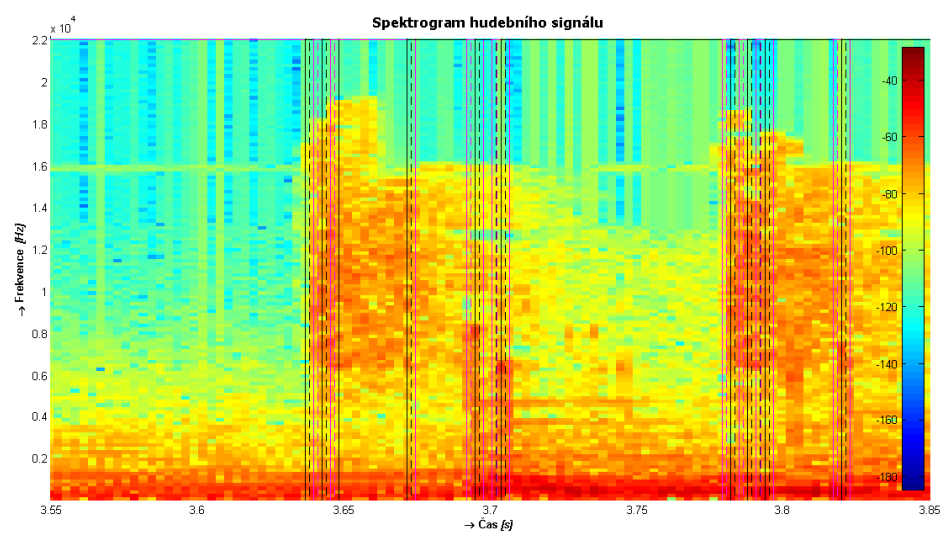


Obr. E.7: Spektra jednotlivých segmentů VWCOLA s dlouhými stacionárními segmenty

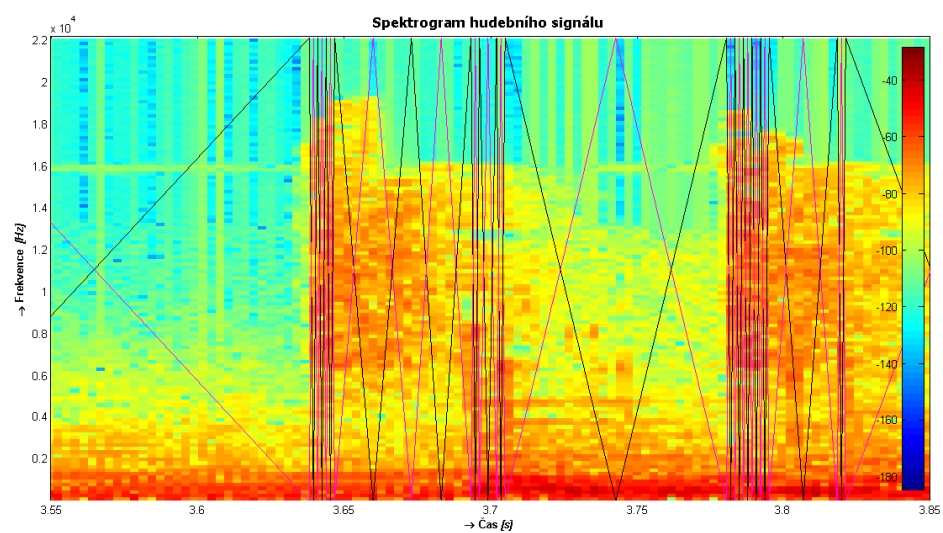


Obr. E.8: Spektra jednotlivých segmentů VWVOLA s dlouhými stacionárními segmenty

E.2 Segmentace hudebních signálů



Obr. E.9: Spektrogram hudebního signálu a vyznačená okna segmentace VWCOLS



Obr. E.10: Spektrogram hudebního signálu a vyznačená okna segmentace VWVOLA

OBSAH PŘILOŽENÝCH SOUBORŮ

Přiložené soubory obsahují skripty programu Matlab. Pro zobrazení jednotlivých ukázek je nejprve potřeba nastavit pracovní adresář programu matlab na kořenovou složku přílohy DP_tomas_pavlicek_98644, dále se do příkazového řádku postupně napíší příkazy `run1`, `run2`, `run3` ... `run13`. Skripty jsou testovány ve verzi Matlab R2011b.