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

SPEKTRÁLNÍ ANALÝZA V REÁLNÉM ČASE V PROGRAMOVÉM PROSTŘEDÍ LABVIEW

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE KAREL VAŠÁTKO
AUTHOR

BRNO 2011

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

SPEKTRÁLNÍ ANALÝZA V REÁLNÉM ČASE V PROGRAMOVÉM PROSTŘEDÍ LABVIEW

REAL-TIME SPECTRAL ANALYSIS IN LABVIEW SOFTWARE ENVIRONMENT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE KAREL VAŠÁTKO
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE Ing. ONDŘEJ RÁŠO
SUPERVISOR

BRNO 2011

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Teleinformatika

Student:	Karel Vašátko	***ID:***	119662
Ročník:	3	***Akademický rok:***	2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Spektrální analýza v reálném čase v programovém prostředí LabVIEW

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Nastudujte problematiku spektrální analýzy číslicových signálů v reálném čase. Matematicky popište procesy segmentace s překryvem, váhování váhovacím oknem a výpočet spekter. Stanovte vliv diskretizace na spektrum. Pro výpočet diskrétní Fourierovy transformace použijte nejprve přímou metodu výpočtu a pak také algoritmus FFT a srovnejte výpočetní náročnosti. Stanovte jaký vliv má na výsledné spektrum délka segmentu, velikost překryvu, typ váhovacího okna. Dále navrhněte program pro spektrální analýzu v programovém prostředí LabVIEW. Tento návrh realizujte a pomocí specializovaných měřících karet proveďte praktická měření.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] VLACH, J., HÁVLÍČEK, J., VLACH, M.: Začínáme s LabVIEW. BEN, Praha 2008. ISBN: 978-80-7300-245-9.
[2] VÍCH, R., SMÉKAL, Z.: Číslicové filtry. Academia, Praha 2000. ISBN 80-200-0761-X.
[3] JAN, Jiří. Číslicová filtrace, analýza a restaurace signálů. 2. Vyd. Brno: VUTIUM, 2002, 427 s. ISBN 80-214-0816-2.

Termín zadání:	7.2.2011	***Termín odevzdání:***	2.6.2011

Vedoucí práce: Ing. Ondřej Rášo

prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské 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 bakalářská práce se zabývá problematikou zpracování signálu a zobrazení jeho spektra v prostředí LabVIEW. Je zde popis teorie zpracování signálu, popis blokového schéma spektrální analýzy a popis metod pro výpočet výkonové spektrální hustoty

V hlavní části práce je popis vytvořeného programu pro spektrální analýzu v reálném čase. Část obsahuje bloková zapojení a měření.

Klíčová slova

Spektrální analýza, FFT, Welchova metoda, výkonová spektrální hustota, modifikovaný periodogram, LabVIEW

Abstract

This bachelor thesis deals with issues of signal processing and display its spektrum in the environtment LabVIEW. Here is description signal processing theory, description of a block diagram of a spectral analysis and description of the methods for compute power spectral density.

In the main part is a description of program developed for real-time spectral analysis. Part contains block diagrams and measurements.

Keywords

Spectral analysis, FFT, Welchs method, Power spectral dentisty, Modified periodogram, LabVIEW.

VAŠÁTKO, K. *Spektrální analýza v reálném čase v programovém prostředí LabVIEW.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. XY s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Ondřej Rášo.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Spektrální analýza v reálném čase v programovém prostředí LabVIEW jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské 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 bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské 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.

V Brně dne ……. .....

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu práce Ing. Ondřeji Rášovi za velmi užitečnou metodickou pomoc a cenné rady při zpracování bakalářské práce.

V Brně dne …….. .....

Podpis autora

Obsah

1 Úvod ..... - 1 -
1.1 Dělení signálů ..... - 1 -
1.1.1 Signál se spojitým časem ..... - 1 -
1.1.2 Signál s diskrétním časem ..... - 2 -
1.2 Fourierovská zobrazení ..... - 2 -
1.2.1 Fourierova řada ..... - 2 -
1.2.2 Fourierova transformace ..... - 3 -
1.2.3 Diskrétní Fourierova řada ..... - 3 -
1.2.4 Fourierova transformace s diskrétním časem ..... - 3 -
1.2.5 Diskrétní Fourierova transformace ..... - 3 -
1.2.6 FFT - Rozklad v časové oblasti ..... - 4 -
1.2.7 Krátkodobá Fourierova transformace ..... - 4 -
2 Realizace spektrální analýzy ..... - 5 -
2.1 Segmentace a váhování oknem ..... - 5 -
2.2 DFT ..... - 5 -
2.3 Problematika spektrální analýzy ..... - 5 -
2.3.1 Vliv diskretizace na spektrum ..... - 5 -
2.3.2 Výpočetní náročnost DFT, FFT ..... - 5 -
2.3.3 Frekvenční rozsah ..... - 7 -
2.3.4 Interpolace ve spektru ..... - 7 -
2.3.5 Prosakování ve spektru ..... - 8 -
2.3.6 Používaná okna ..... - 8 -
2.3.7 Velikost překryvu segmentů ..... - 10 -
3 Výkonová spektrální hustota a její výpočet ..... - 11 -
3.1 Způsob výpočtu ..... - 11 -
3.1.1 Parametrické metody ..... - 11 -
3.1.2 Neparametrické metody ..... - 12 -
4 LabView ..... - 14 -
5 Praktická část ..... - 15 -
5.1 Popis programu ..... - 15 -

5.1.1 Segmentace a váhování oknem ..... - 15 -
5.1.2 DFT ..... - 16 -
5.1.3 Zobrazení ..... - 16 -
5.1.4 Čelní panel ..... - 17 -
5.2 Praktická měření ..... - 20 -
5.2.1 Wav analýza ..... - 20 -
5.2.2 Analýza dat získaných pomocí zvukové karty ..... - 23 -
6 Závěr ..... - 25 -
Seznam použité literatury ..... - 26 -
Seznam použitých zkratek a symbolů ..... - 27 -
Přílohy ..... - 29 -

Seznam obrázků

Obr.1.1: Harmonický signál s modulovým a fázovým spektrem ..... - 1 -

Obr.1.2: Diskrétní harmonický signál s modulovým a fázovým spektrem..... - 2 -

Obr.1.3: Rozklad v originální oblasti pro *N*=8 [2] ..... - 4 -

Obr.3.1: Měření výkonové spektrální hustoty.[1]……..…..…- 11 -

Obr.5.1: Blokové zapojení Segmentování a váhování oknem……...……...….- 15 -

Obr.5.2: Blokové zapojení DFT…...……...….- 16 -

Obr.5.3 : Blokové zapojení zobrazení……...……...…..- 17 -

Obr.5.4: Zapojení pro zastavení struktury WHILE……..…….- 17 -

Obr.5.5: Čelní panel……..……- 19 -

Obr.5.6 : Blokové zapojení pro načtení zvukového souboru……....……- 20 -

Obr.5.7: Výsledky analýzy zvukového souboru wav (N=512 ,překryv 50%, Hammingovo váhovací okno)……..…....- 21 -

Obr.5.8: Odhad výkonové spektrální hustoty zvukového souboru wav (N=512 , překryv 50%, Hammingovo váhovací okno)……..…….- 21 -

Obr.5.9: Výsledky analýzy zvukového souboru wav (N=256 , překryv 50%, Hammingovo váhovací okno)…….....…..- 22 -

Obr.5.10: Odhad výkonové spektrální hustoty zvukového souboru wav (N=512 , překryv 50%, Hammingovo váhovací okno)……..….- 22 -

Obr.5.11: Zapojení bloku pro ovládání zvukové karty...…….....- 23 -

Obr.5.12: nastavení zvukové karty……...……...…...- 23 -

Obr.5.13: Výsledky analýzy dat ze zvukové karty (N=512 , překryv 50%, Hammingovo váhovací okno)……...……..…....- 24 -

Obr.5.14: Výsledky analýzy dat ze zvukové karty (N=512 , překryv 50%, Hammingovo váhovací okno)…….....- 24 -

Seznam tabulek

Tab.2.1: Počet součinů DFT,FFT v závislosti na velikosti *N*..... - 6 -

1 Úvod

Spektrální analýza signálu je vyjádření signálu v kmitočtové oblasti jako směs komplexních harmonických složek. Reálný signál je v kmitočtové oblasti zobrazen jako oboustranné spektrum.

1.1 Dělení signálů

- Se spojitým časem
- S diskrétním časem

Signál se spojitým časem je obvyklou analogií spojitě se měnící fyzikální veličiny, proto také nazývaný analogový signál. [2]

Signál s diskrétním časem, je model signálu, ve kterém je hodnota signálu definovaná pouze v časových okamžicích. [2]

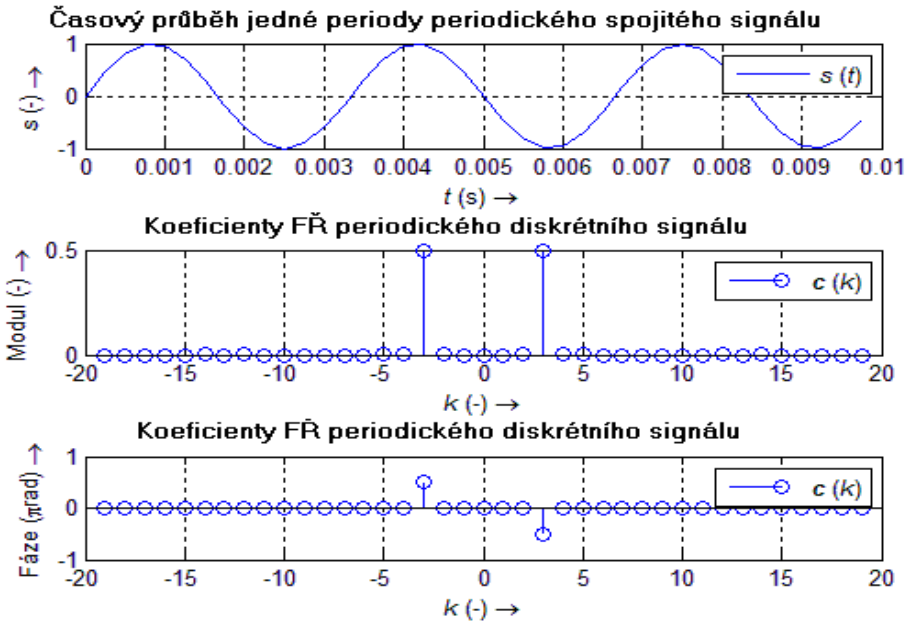
1.1.1 Signál se spojitým časem

Harmonický signál je nejjednoduším periodickým signálem. Může být popsán pomocí obecné funkce kosinové, viz vzorec 1.1.

$$s(t) = A \cdot \cos(\omega t + \varphi) \tag{1. 1}$$

Kde A je amplituda , ω úhlový kmitočet, t je proměnná čas a φ je fáze signálu

Tomuto signálu odpovídá dvojice spektrálních čar s úhlovým kmitočtem ω a $-\omega$ o velikosti $\frac{A}{2}$ a fázi $\pm\varphi$, viz obr. 1.1. [1]

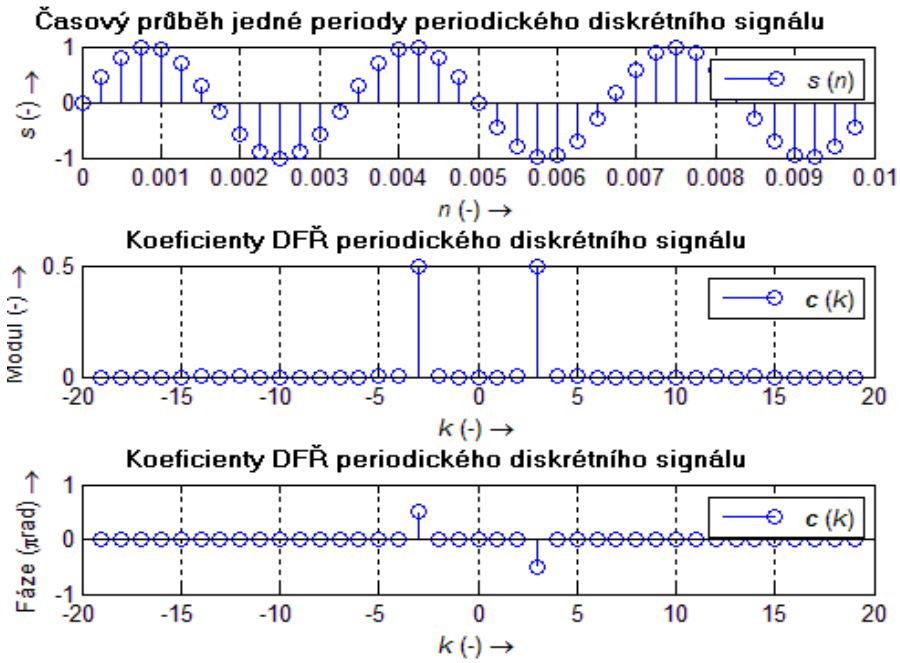


Obr.1.1: Harmonický signál s modulovým a fázovým spektrem

1.1.2 Signál s diskrétním časem

Pro diskrétní signály vždy platí, že jejich spektra jsou periodická s úhlovým kmitočtem ω_{vz}. Diskrétní harmonický signál lze totiž vyjádřit pomocí vztahu 1.2. [4]

$$s(n) = \cos(\omega nT + \varphi) = \cos(2\pi \frac{f}{f_{vz}} n + \varphi) \qquad (1.\ 2)$$



Obr.1.2: Diskrétní harmonický signál s modulovým a fázovým spektrem

1.2 Fourierovská zobrazení

Na základě typu analyzovaného signálu a vlastností spekter se používají následující Fourierovská zobrazení :

- Fourierova řada(FŘ)
- Fourierova transformace (FT)
- Diskrétní Fourierova řada (DFŘ)
- Fourierova transformace s diskrétním časem (DTFT)
- Diskrétní Fourierova transformace (DFT)
- Krátkodobá Fourierova transformace (STFT)

1.2.1 Fourierova řada

Spojitý periodický signál *s(t)* může být reprezentován lineární kombinací komplexních harmonických signálů o kmitočtech $k\Omega$, kde $\Omega = \frac{2\pi}{T}$ je základní kmitočet signálu *s(t)* a *T* je jeho perioda a c_k jsou komplexní koeficienty foureirovy řady, viz vzorec 1.3. [4]

$$s(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k e^{jk\Omega t} \qquad (1.\ 3)$$

Fourierova řada se používá pro výpočet spektra spojitého periodického signálu a jeho spektrum je diskrétní a neperiodické

1.2.2 Fourierova transformace

Je obecnější v tom smyslu, že ji lze použít ke zkoumání spektrálních vlastností neperiodických signálů i signálů periodických (spojitých), viz 1.4. Výsledkem Fourierovi transformace je spektrum (spektrální hustota) jako funkce spojitého kmitočtu.[4]

$$S_{\mathrm{FT}}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) e^{-j\omega t} dt \tag{1. 4}$$

1.2.3 Diskrétní Fourierova řada

Je diskrétní obdobou FŘ. Vychází z možnosti reprezentace diskrétního periodického signálu *s(nT)* lineární kombinací diskrétních komplexních harmonických signálů o kmitočtech $k\Omega$, k=0,1,…,N-1, kde $\Omega = \frac{2\pi}{NT}$ je základní úhlový kmitočet signálu $s(nT)$ a NT jeho perioda (N je počet vzorků v periodě). C_k jsou komplexní koeficienty DFŘ, viz 1.5.[4]

$$s(nT) = \sum_{k=0}^{N-1} c_k e^{jkn\frac{2\pi}{N}} \tag{1. 5}$$

Spektrum diskrétního signálu je periodické.

1.2.4 Fourierova transformace s diskrétním časem

Je Fourierovou transformací neperiodického diskrétního signálu $s(nT)$, kde T_{vz} je perioda vzorkování, $T_{\mathrm{vz}} = \frac{1}{f_{\mathrm{vz}}}$, viz 1.6. Spektrum DTFT je spojité, neperiodické.[4]

$$S_{\mathrm{DTFT}}(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} s(nT) e^{-j\omega nT} \tag{1. 6}$$

Význam DTFT je dán tím, že je užitečným nástrojem pro popis systémů s diskrétním časem v kmitočtové oblasti, čili pro zavedení a používání kmitočtových charakteristik systémů.[1]

1.2.5 Diskrétní Fourierova transformace

Je diskrétní obdobou FŘ. Vychází z možnosti reprezentace diskrétního periodického signálu $s(nT)$ lineární kombinací diskrétních komplexních harmonických signálů o úhlových kmitočtech $k\Omega$, k=0,1,…,N-1, kde $\Omega = \frac{2\pi}{NT}$ je základní úhlový kmitočet signálu $s(nT)$ a NT jeho perioda (N je počet vzorků v periodě), viz 1.7.

Spektrum je diskrétní a periodické. [4]

$$S_{\mathrm{DFT}}(k\Omega) = \sum_{k=0}^{N-1} s(nT) e^{-jkn\frac{2\pi}{N}}, k = 0,1,..., N-1 \tag{1. 7}$$

Velké množství výpočetních operací ovšem výrazně snižovalo možnost použití DFT na výpočty v reálném čase. To vedlo k objevu efektivnějšího algoritmu nazvaného rychlá Fourierova transformace (FFT). Ten drasticky snížil pracnost DFT a přispěl k rozšíření její aplikace.

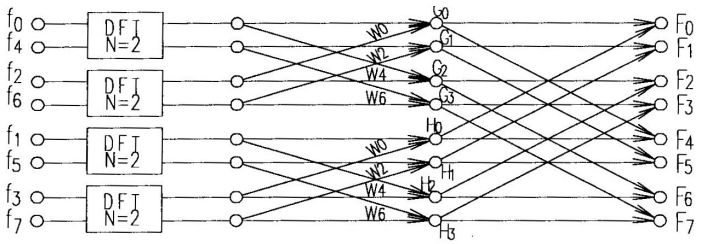
1.2.6 FFT - Rozklad v časové oblasti

Vyjdeme ze vztahu pro DFT ve tvaru:

$$S_{\mathrm{FFT}}(n) = \sum_{n=0}^{N-1} s(n) W^{nk} \tag{1. 8}$$

Kde W^{nk} je periodická posloupnost s periodou *N*, tj.: $W^{(n+mN)(k+lN)} = W^{nk}$. Základní myšlenkou FFT je rozdělit vstupní *N*-bodovou posloupnost na dvě posloupnosti kratší (sudou a lichou) a zkombinovat jejich DFT tak, aby získala DFT vstupní *N*-bodové posloupnosti.[5] Bližší popis FFT lze najít např. V publikaci [3].

Jiná zajímavá vlastnost algoritmu je existence opakujících se struktur a hran, tzv. ,,motýlků" , viz obr. 1.3



Obr.1.3: Rozklad v originální oblasti pro *N*=8 [2]

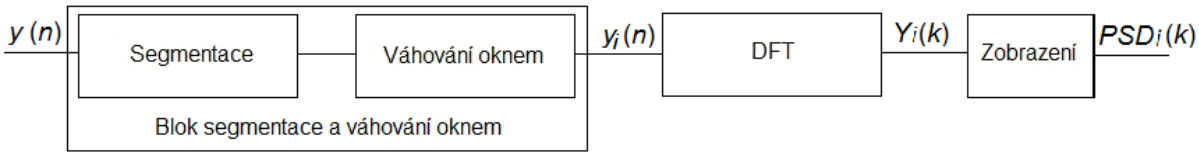
1.2.7 Krátkodobá Fourierova transformace

Krátkodobá FT diskrétního a spojitého signálu rozděluje dlouhodobý signál do kratších časových úseků a jeho spektrum popisuje právě pro tyto úseky.

2 Realizace spektrální analýzy

Cílem práce je poskytnout přehled o výpočtu spektrální analýzy obecného nestacionárního a stochaického signálu.

Na obrázku 2.1 je blokové schéma pro realizaci této analýzy. Blok segmentace je možné rozdělit na podbloky Segmentování a váhování oknem.



Obr.2.1: Blokové schéma pro výpočet výkonové spektrální analýzy

2.1 Segmentace a váhování oknem

Segmentace rozděluje dlouhodobý signál do krátkých segmentů, které jsou pak vynásobeny vhodným oknem. Aktuální segment $y_i(n)$ vstupního signálu $y(n)$ lze matematicky popsat pomocí vzorce 2.1. [7]

$$y_i(n) = w(n)\,y(n + iN(1-v)) \tag{2. 1}$$

Pro: n = 0,1,…,N-1 a i = 0,1,…,I-1 , kde N je délka segmentu $y_i(n)$, i je index segmentu, I je celkový počet segmentů, $w(n)$ je váha okna a v je velikost překryvu, pro v = 0,5 se překryv rovná 50%.[7]

2.2 DFT

Počet koeficientů DFT je roven dálce zpracovaného signálu, viz vzorec 2.2. [7]

$$Y_i(k) = \sum_{n=0}^{N-1} y_i(n) e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} \tag{2. 2}$$

Kde $Y_i(k)$ je DFT spektrum signálu $y_i(n)$ a k jsou jednotlivé koeficienty DFT platí, že k=0,1,…,N-1.

2.3 Problematika spektrální analýzy

2.3.1 Vliv diskretizace na spektrum

Vzniká periodizace spektra v důsledku vzorkování signálu. Přitom může dojít ke zkreslení spektra takzvaným aliasingem. Náprava je možná zejména zvýšením vzorkovacího kmitočtu nebo zpracování signálu antialiasingovým filtrem.[3]

Při vzorkování musí být dodržen Shannon – Kotelníkův vzorkovací teorém , který lze popsat pomocí vztahu 2.3.

$$f_{vz} \geq 2 f_{max} \tag{2. 3}$$

2.3.2 Výpočetní náročnost DFT, FFT

Chceme-li zjistit úsporu počtu součinů a součtů použitím algoritmu typu FFT vůči DFT, pak vypočítáme počet operací motýlku v jednotlivých stupních. Uvažujme

algoritmus FFT o základu 2, tj. když N je mocninou čísla 2. Protože operace násobení je při realizaci časově náročnější, budeme srovnávat počet součinů. Počet stupňů algoritmu FFT je dán vztahem 2.4.[1]

$$m = \log_2 N \tag{2. 4}$$

V každém stupni je provedeno $\frac{N}{2}$ operací motýlku. Operace motýlku obsahuje 2 součiny. Celkový počet součinů (Γ) při realizaci algoritmu FFT je uveden ve vzorci 2.5. [1]

$$\Gamma_{\mathrm{FFT}} = m\frac{N}{2} = (\log_2 N)\frac{N}{2} \tag{2. 5}$$

Počet součinů pro přímý výpočet DFT podle definičního vztahu 2.6. [1]

$$\Gamma_{\mathrm{DFT}} = N^2 \tag{2. 6}$$

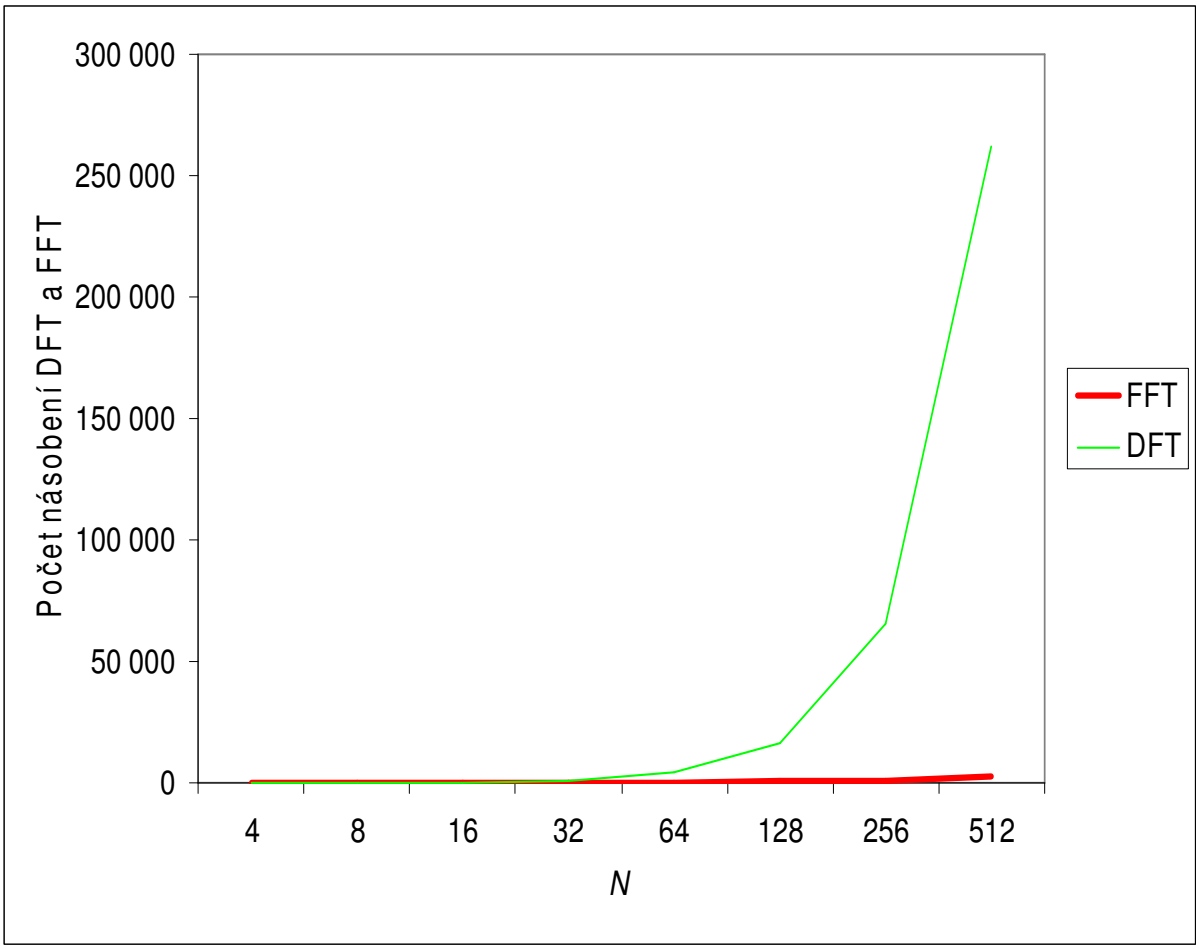
Úsporu počtu operací součinu můžeme vyjádřit pomocí činitele α_m viz 2.7. [1]

$$\alpha_m = \frac{2N}{\log_2 N} \tag{2. 7}$$

Porovnání obou metod je zřetelné z tabulky 2.1, ve které je uveden počet násobení DFT a FFT v závislosti na N a činitel úspory α_m. Dále je zde uveden graf na obrázku 2.2, kde je tato závislost vyjádřena graficky.

N	DFT	FFT	α_m (krát)
4	16	4	4,0
8	64	12	5,3
16	256	32	8,0
32	1 024	80	12,8
64	4 096	192	21,3
128	16 384	448	36,6
256	65 536	1 024	64,0
512	262 144	2 304	113,8

Tab.2.1: Počet součinů DFT,FFT v závislosti na velikosti N



Obr.2.2: Graf počtu násobení DFT,FFT v závislosti velikosti *N*

2.3.3 Frekvenční rozsah

Je – li počet vzorků analyzovaného signálu *N*, je rozměr transformace *N* a počet vzorků spektra (spektrálních čar - *n*) rovněž *N*. Z toho vyplývá že frekvenční interval (Δf) mezi dvěma spektrálními čarami je roven vztahu 2.8. [5]

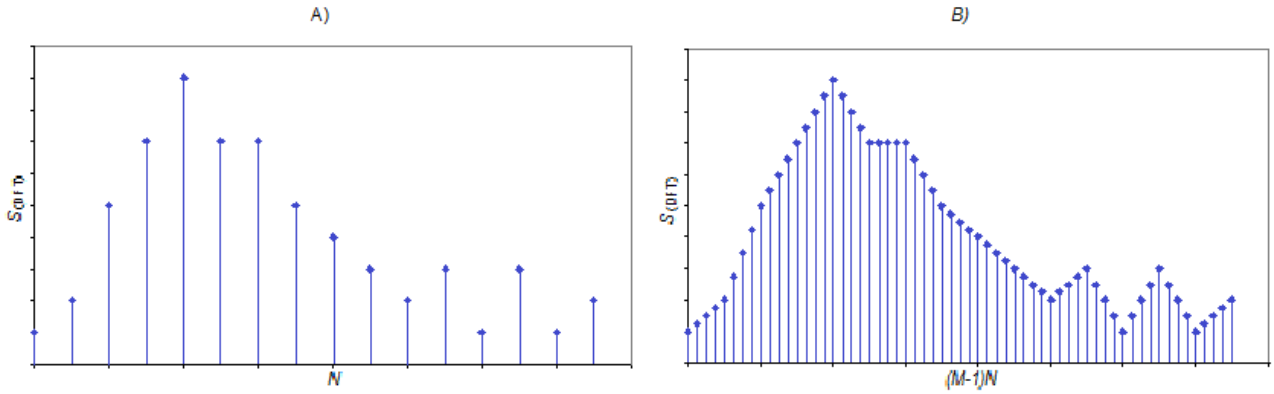
$$\Delta f = \frac{f_{vz}}{N} \qquad \textbf{(2. 8)}$$

Pokud trváme na určení hodnoty mezi dvěma čarami, musíme využít interpolaci ve spektru.[5]

2.3.4 Interpolace ve spektru

Doplnění původního signálu *y(n)* nulami. To zaručí podrobnější vzorkování spektra.

Lze dosáhnout *M* - krát hustšího vzorkování téhož spektra, jestliže se transformuje posloupnost signálu *M* - krát delší, začínají původní signálovou posloupností a doplněná (*M* -1)*N* nulami. [3] Rozdíl je vidět na obrázku 2.3 .



Obr.2.3: Původní čárové spektrum (A) , převzorkované spektrum (B) [3]

2.3.5 Prosakování ve spektru

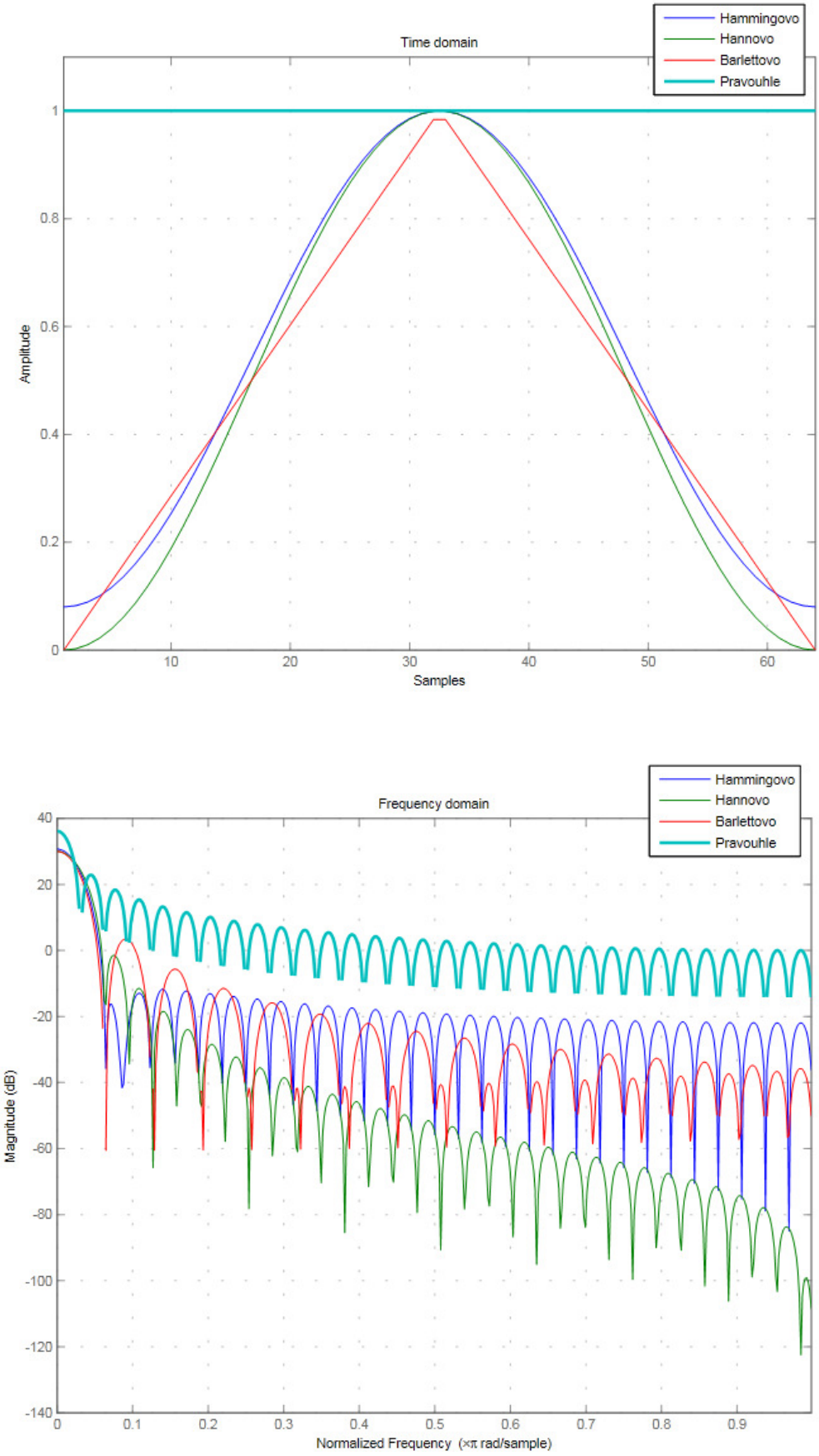
Ve spektrální oblasti dochází ke konvoluci původního spektra se spektrem okna. Lze říci, že každá čára v původním spektru se ,,rozmaže“ na příslušně posunutý průběh, takže dochází k ,,prosakování“ hodnot na nepatřičné kmitočty.[3]

Tento jev je žádoucí omezit na nejmenší možnou míru, neboť takto ,,prosáklá” energie může maskovat spektrum signálů s malou energií.[5]

Potlačení prosakování je možné docílit vhodnou volbou tvaru okna, dále pak v prodloužení okna a tím zúžení hlavního laloku.[5]

2.3.6 Používaná okna

Na obrázku 2.4 je přehled nejpoužívanějších oken, včetně jejich spekter.

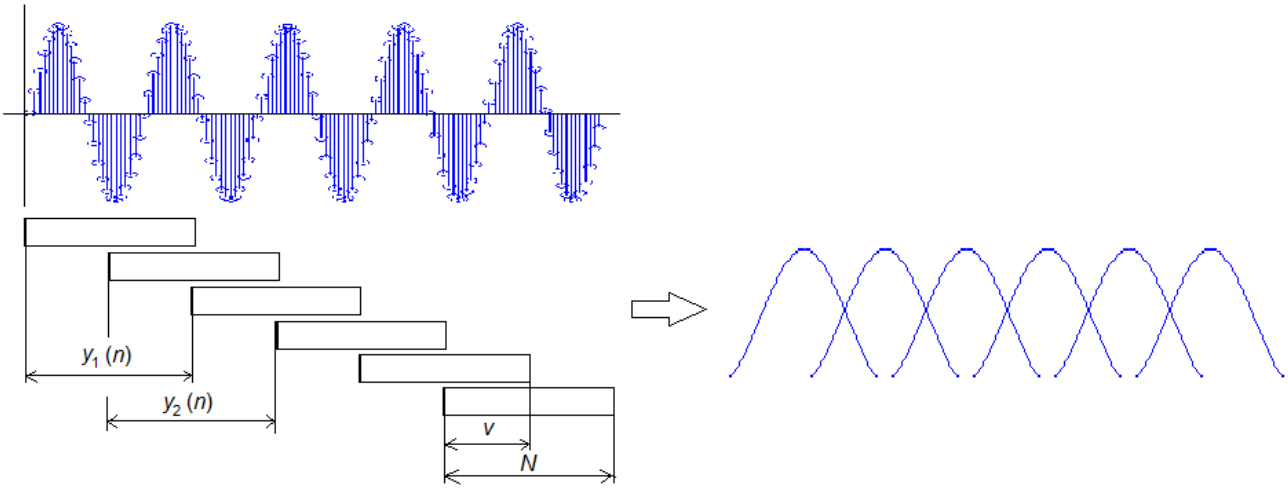


Obr.2. 4: Základní typy oken a jejich spektra pro *N*=32

2.3.7 Velikost překryvu segmentů

Na obrázku 2.5 je vidět způsob dělení vstupní posloupnosti diskrétního signálu *y(n)* a jeho dělení na dílčí posloupnosti $y_i(n)$ s přesahem 50%.

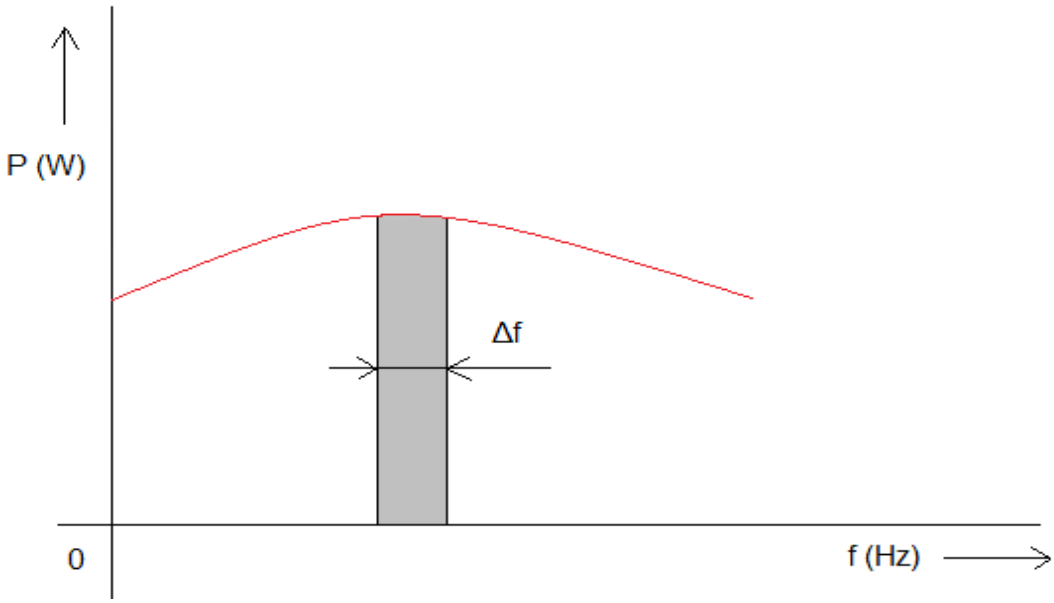
Při použití jiného než pravoúhlého váhovacího okna může docházet ke ztrátám při zpětném skládání jednotlivých posloupností. Pokud zvolíme vhodné okno (typ okna,délku okna) a vhodný přesah , lze signál bez ztráty rekonstruovat.



Obr.2.5: Segmentování vstupního diskrétního signálu s přesahem 50%

3 Výkonová spektrální hustota a její výpočet

Výkonová spektrální hustota PSD (Power spectral dentisty) vyjadřuje výkon obsažený v úzkém intervalu Δ*f* spojitého spektra a je vyjádřena ve W/Hz, viz obr. 3.1.



Obr.3.1: Měření výkonové spektrální hustoty.[1]

Výkonová spektrální hustota spojitého signálu – ukazuje rozložení výkonu podél kmitočtové osy.[7]

Výkonová spektrální hustota diskrétního signálu – z fyzikálního hlediska diskrétní signál žádný výkon nemá, pojem výkonová spektrální hustota je převzat od spojitých signálů.

Pokud diskrétní signál vznikl dostatečně hustým vzorkováním signálu se spojitým časem , může být výkonová spektrální hustota diskrétního signálu úměrná výkonu spektrální hustoty spojitého signálu.[7]

3.1 Způsob výpočtu

3.1.1 Parametrické metody

Základem parametrických metod odhadu výkonového spektra je vytvoření vhodného vzniku signálu. Parametry takového modelu, při jeho známé struktuře, pak popisují signál (včetně jeho spektra) úsporným způsobem a představují tak vedle analytického popisu také redukci dat.[3]

Parametrické metody již dále rozvádět nebudeme, více o nich v publikaci [3]

3.1.2 Neparametrické metody

Metody se nazývají neparametrické, protože nejsou předem hledány vlastnosti (parametry) zpracovávaných dat. Jsou jednoduché na výpočet a používají k výpočtu rychlé Fourierovy transformace (FFT).[7]

Mezi neparametrické metody patří:

- Bartlettova metoda (BAR-48) průměrování periodogramů
- Welchova metoda (WEL-67) průměrování modifikovaných periodogramů

Bartlettova metoda periodogramů - Bartlettova metoda [BAR-48] zahrnuje tyto kroky :

Datová posloupnost o délce N_y je rozdělena na I nepřekrývajících se segmentů, každý segment má délku N, viz vzorec 3.1. [7]

$$y_i(n) = y(n + iN) \tag{3. 1}$$

Pro každý segment je vypočten periodogram, viz vzorec 3.2. [7]

$$PSD_{yy}^{i}(k) = \left| \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} y_i(n) e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} \right|^2 = \frac{1}{N} \left| DFT\{y_i(n)\}^2 \right| \tag{3. 2}$$

Pro k=0,1,…,N-1; i=1,2,…,I-2 .

Periodogramy pro I segmentů jsou průměrkovány podle vzorce 3.3. [7]

$$PSD_{yy}^{I}(k) = \frac{1}{I} \sum_{i=0}^{I-1} PSD_{yy}^{i}(k) \tag{3. 3}$$

Welchova metoda průměrování modifikovaných periodogramů - Welch [WEL-67] udělal dvě změny v Bartlettově metodě:

Povolil překrývání segmentů. To znamená, že data jsou reprezentována podle vzorce 3.4. [7]

$$y_i(n) = y(n + iN(1 - v)) \tag{3. 4}$$

Druhou změnou bylo násobení datového segmentu časovým oknem před výpočtem periodogramu. Výsledkem je modifikovaný periodogram podle vzorce 3.5.[7]

$$PSD_i(k) = \frac{1}{NU} \left| y_i(n) w(n) e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} \right|^2 \tag{3. 5}$$

Pro i=0,1,…,I-1 , kde U je normalizační koeficient

Normalizační koeficient, viz vzorec 3.6. [7]

$$U = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} w^2(n) \tag{3. 6}$$

Welchův odhad výkonové spektrální hustoty je pak průměr dílčích modifikovaných periodogramů a je dán vztahem 3.7. [7]

$$PSD_i^I(k) = \frac{1}{I}\sum_{i=0}^{I-1} PSD_i(k) \tag{3. 7}$$

4 LabView

Programovací a vývojové prostředí LabView (Laboratory Virtual Instruments Engeneering Worbench) je produktem americké firmy Native Instruments. LabView používá programovací G (Graphic language) k vytváření programů ve formě blokových diagramů a vlastní výpočet je řízen tokem dat. Program vytvořený v LabView se nazýva Virtual instrument .

Základním členem každého Virtual Instrumentu jsou vzájemně svázané části :

- Čelní panel
- Blokový diagram

Čelní panel – je pracovní plochou pro ovládací a identifikační prvky (obsahuje textové a grafické menu)

Blokový diagram – taktéž obsahuje textové a grafické pole (ekvivalentní s polemi čelního panelu) a je pracovní plochou pro blokové schéma.

5 Praktická část

Pro výpočet výkonové spektrální hustoty jsme použili Welchovu metodu průměrování modifikovaných periodogramů.

Vycházíme z blokového schéma na obrázku 2.1.

5.1 Popis programu

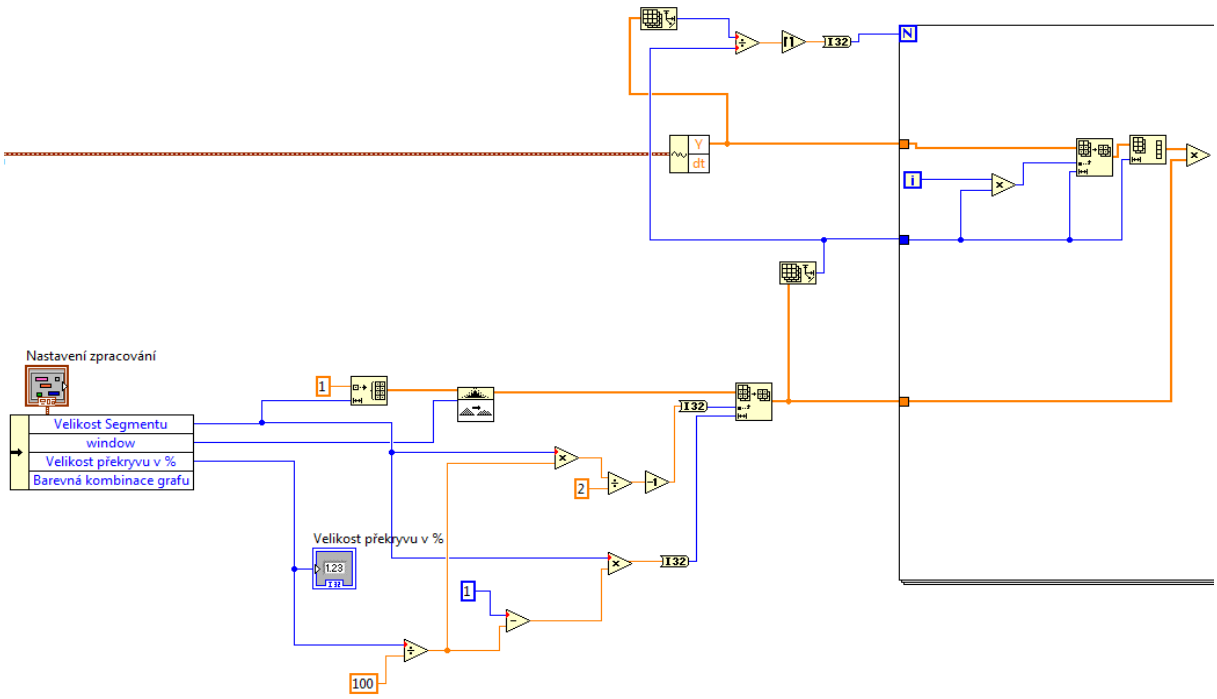
5.1.1 Segmentace a váhování oknem

Popis bloku na obrázku 5.1. Vycházíme ze vzorce 2.1. Zadáním velikosti segmentu vytvoříme pomocí funkce initialize array okno o požadovaném počtu *N*. Blokem array subset okno upravíme, aby odpovídalo námi zadanému překryvu.

K dělení vstupního signálu $y(n)$ na segmenty využijeme struktury For. Blokem array size zjistíme počet vzorků *N* vstupního sígnálu , a ten podělíme počtem *N* okna. Tato hodnota N_D, kterou zaokrouhlíme k nejbližšímu celému vyššímu číslu, určuje počet segmentů potřebných k úplnému rozdělení vstupního signálu. Signál postupuje do dalšího bloku array subset. Zde je iterační terminál i_D (nabývá hodnot $0,1,\ldots,N_D-1$) násoben s délkou okna a tato hodnota je přivedena na vstup index bloku array subset. Tak určíme první prvek pro každý segment. Jednotlivé segmenty jsou vedeny do bloku array subset , aby byla zachována původní délka při menším počtu *N* segmentu (doplní se 0).

Takto pravená data o počtu *N* se vynásobí oknem o stejném počtu *N*, získáme signál $y_i(n)$.

Blokem Get Waveform Components dělíme analogový průběh na jednotlivé vzorky (*Y*) a informaci o velikost času mezi nimi. (Δt).



Obr.5.1: Blokové zapojení Segmentování a váhování oknem

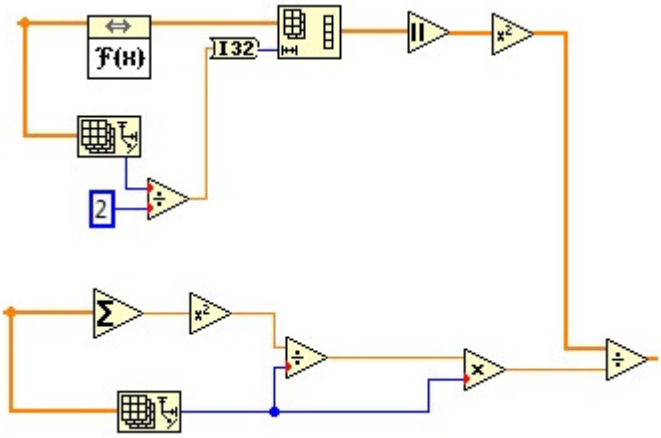
5.1.2 DFT

Popis bloků na obrázku 5.2. Vyjdeme ze vzorců 3.5 a 3.6.

Pro jednotlivé $y_i(n)$ spočítáme jejich diskrétní transformaci pomocí algoritmu FFT. V bloku array subset omezíme dvoustranné spektrum na jednostranné. Odpovídá $Y_i\ (k)$.

Pro takto upravené spektrum získáme jeho absolutní hodnoty a spočítáme jeho druhou mocninu. Tak dostaneme výkonové spektrum.

Abychom získali modifikovaný periodogram, musíme vynásobit výkonové spektrum koeficientem, viz vzorec 3.5. Ve spodní části obrázku počítáme normalizační koeficient *U*. Využijeme již dříve vytvořeného váhovacího okna a spočítáme sumu pro jednotlivé jeho vzorky a spočítáme její druhou mocninu. Blokem array subset zjistíme celkový počet *N* okna a tuto hodnotu podělíme. Normalizační koeficient *U* vynásobíme tím samým počtem *N* a podělíme výkonové spektrum. Odpovídá $PSD_i\ (k)$.



Obr.5.2: Blokové zapojení DFT

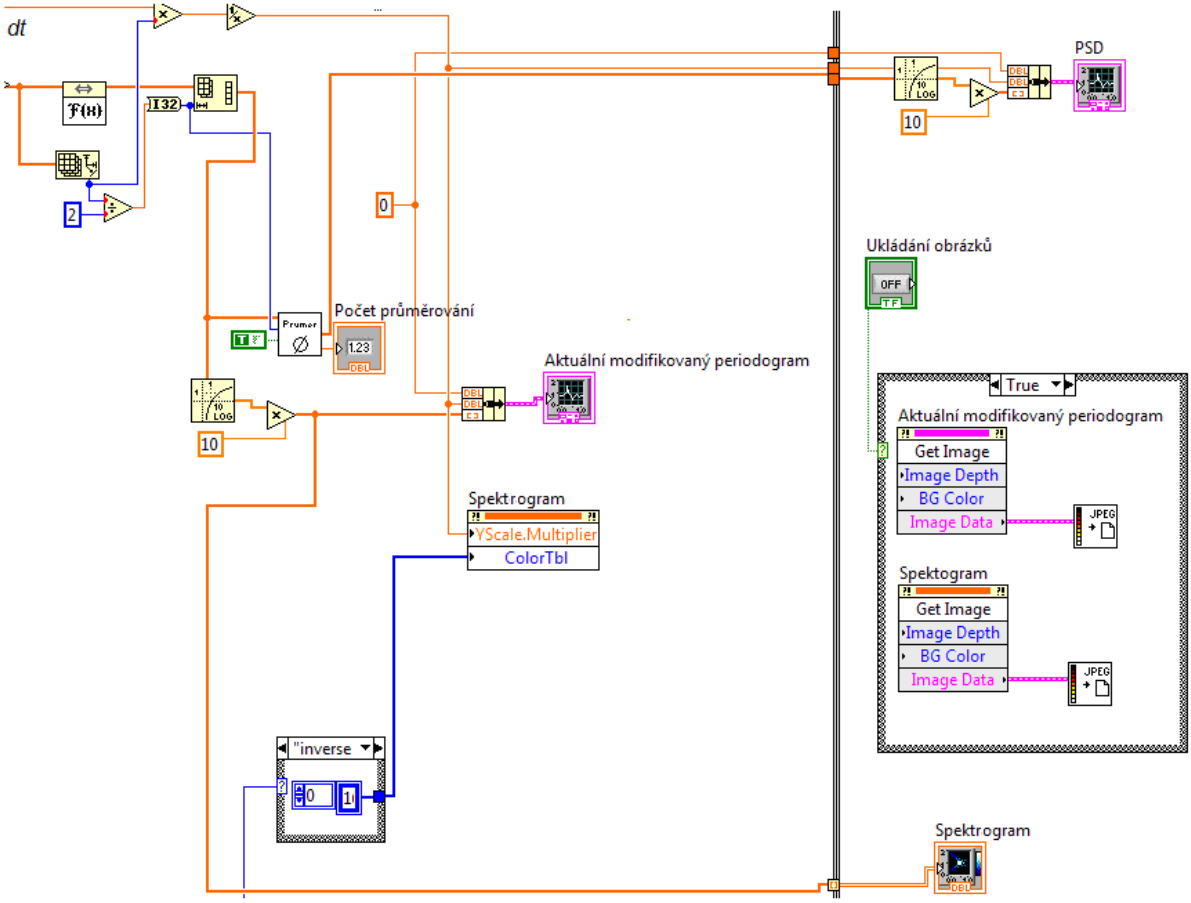
5.1.3 Zobrazení

Welchův odhad výkonové spektrální hustoty (PSD) je průměr dílčích modifikovaných periodogramů. V průměr.vi se jednotlivé modifikované periodogramy sčítají a jsou poděleny jejich celkovým počtem, odpovídá $PSD_{yy}^{I}(k)$.

Pro výsledné zobrazení jsou použity 2 typy grafu. Waveform graph a Intensity chart. V Wavefrom graph se data zobrazují pomocí bloku bundle. V této práci jsou celkem 3 různá zobrazení . Jsou to PSD , Aktuální modifikovaný periodogram (oba Waveform graph) a Spektrogram (Intensity chart).

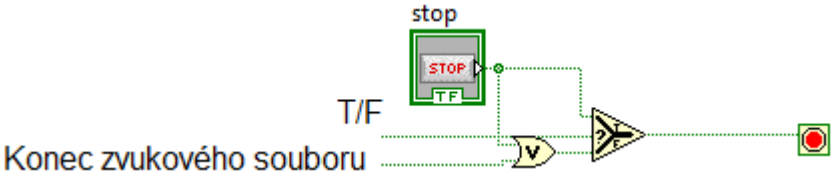
Spektrogram zobrazuje spektrální výkon na jednotlivých frekvencích v závislosti na počtu segmentů. Pro zobrazení se používá dvourozměrné pole (2D) , které je vytvořeno pomocí automatického indexování.

Grafy PSD a spektrogram lze uložit jako obrázek formátu JPEG.



Obr.5.3 : Blokové zapojení zobrazení

Celý program pracuje ve struktuře WHILE. Tato struktura pracuje, dokud nedostane příkaz k zastavení (Stop if True). V naší úloze je pro různé zdroje signálu potřeba různých způsobů zastavení. To je řešeno pomocí bloku select function. Pokud je na rozhodovacím vstupu T (analýza dat získaných pomocí zvukové karty), dojde k zastavení po stisku tlačítka stop. Pokud je na rozhodovacím vstupu F (analýza zvukového souboru wav), dojde k zastavení buď po stisku tlačítka stop nebo po konci zvukového souboru, viz obrázek 5.4.



Obr.5.4: Zapojení pro zastavení struktury WHILE

5.1.4 Čelní panel

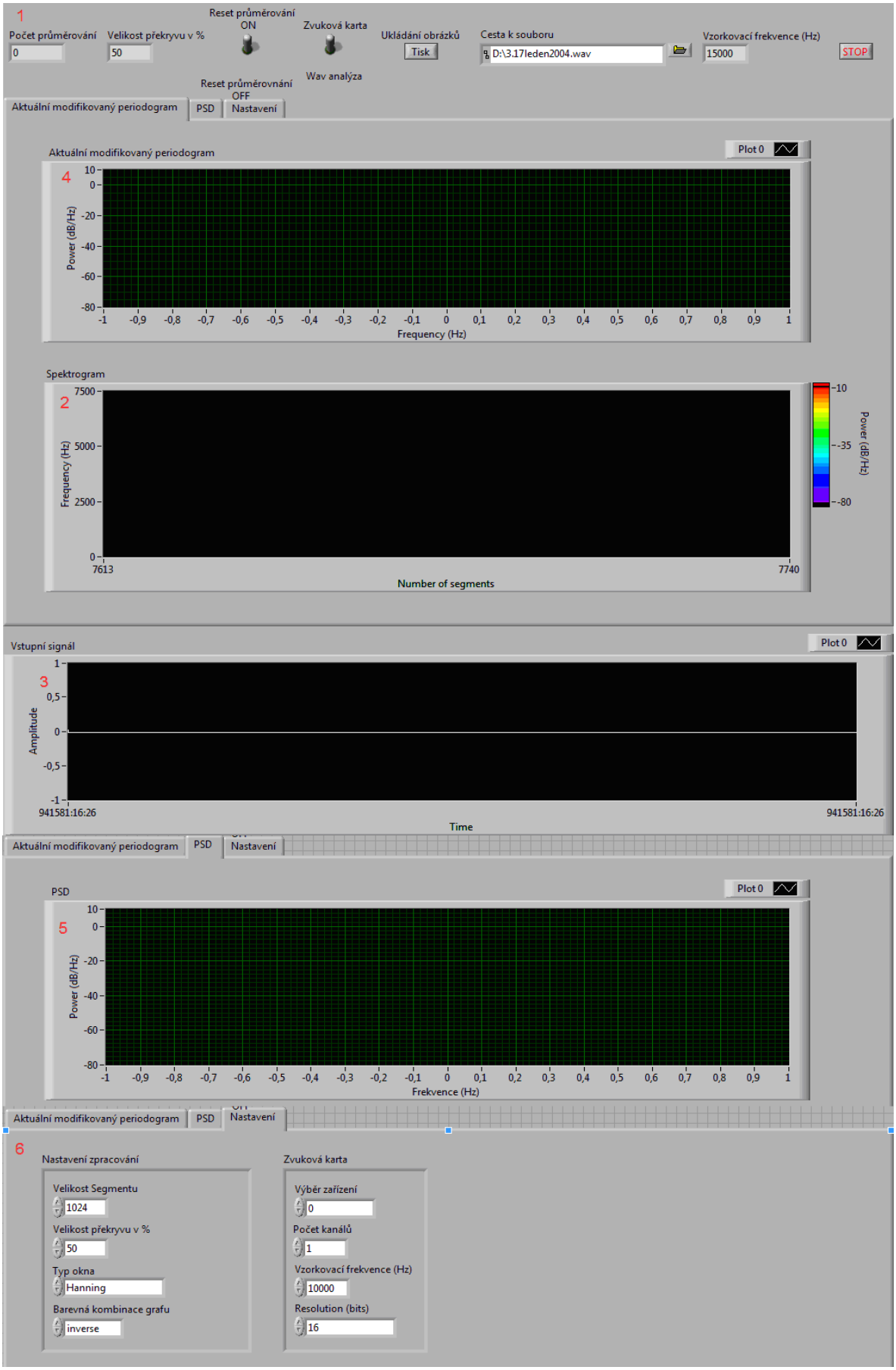
Popis prvků použitých na uživatelském rozhraní programu na obrázku 5.5.

Vrchní panel obsahuje 8 ovladačů a indikátrů :

- Počet průměrování – počet modifikovaných periodogramů ze kterých je PSD průměrován.

- Velikost překryvu – velikost překryvu váhovacích oken v %.
- Reset průměrování – resetuje dosavadní PSD. Po zapnutí začne průměrovat od začátku.
- Přepínač pro výběr zdroje vstupních dat.
- Ukládání obrázků – po stisknutí lze uložit PSD a Spektrogram do obrázků formátu JPEG
- Cesta k souboru – načtení souboru pro wav analýzu
- Vzorkovací frekvence – indikuje vzorkovací frekvency
- Stop – tlačítko pro zastavení běhu programu

Vstupní signál (1) – zobrazí průběh vstupního signálu
Spectrogram (2) – nachází se v kontejneru tab kontrol. Je společný pro všechny záložky
Aktuální modifikovaný periodogram (3) – záložka na které je graf zobrazující Aktuální modifikovaný periodogram
PSD (4) – záložka na které je graf zobrazující PSD
Nastavení (5) – Nastavení pro zpracování signálu, Nastavení pro zdroj vstupního signálu.



Obr.5.5: Čelní panel

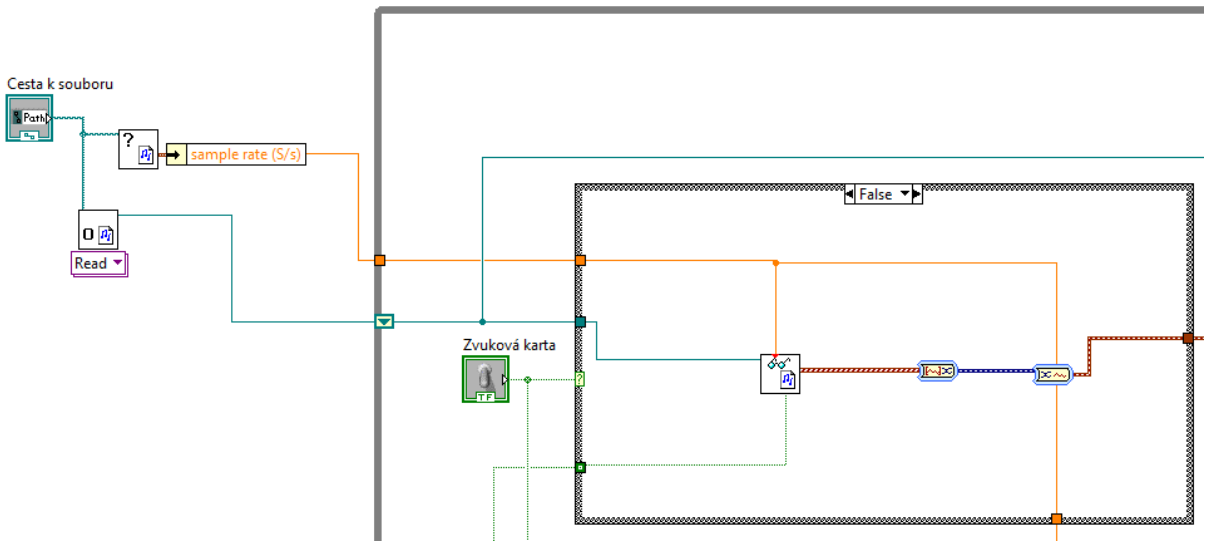
5.2 Praktická měření

Analyzovat budeme dva zdroje signálu, a to zvukový soubor wav nebo data získaná pomocí zvukové karty. Výběr provedeme pomocí struktury CASE, která je ovládaná přepínačem.

5.2.1 Wav analýza

První praktické měření je analýza zvukového souboru wav.

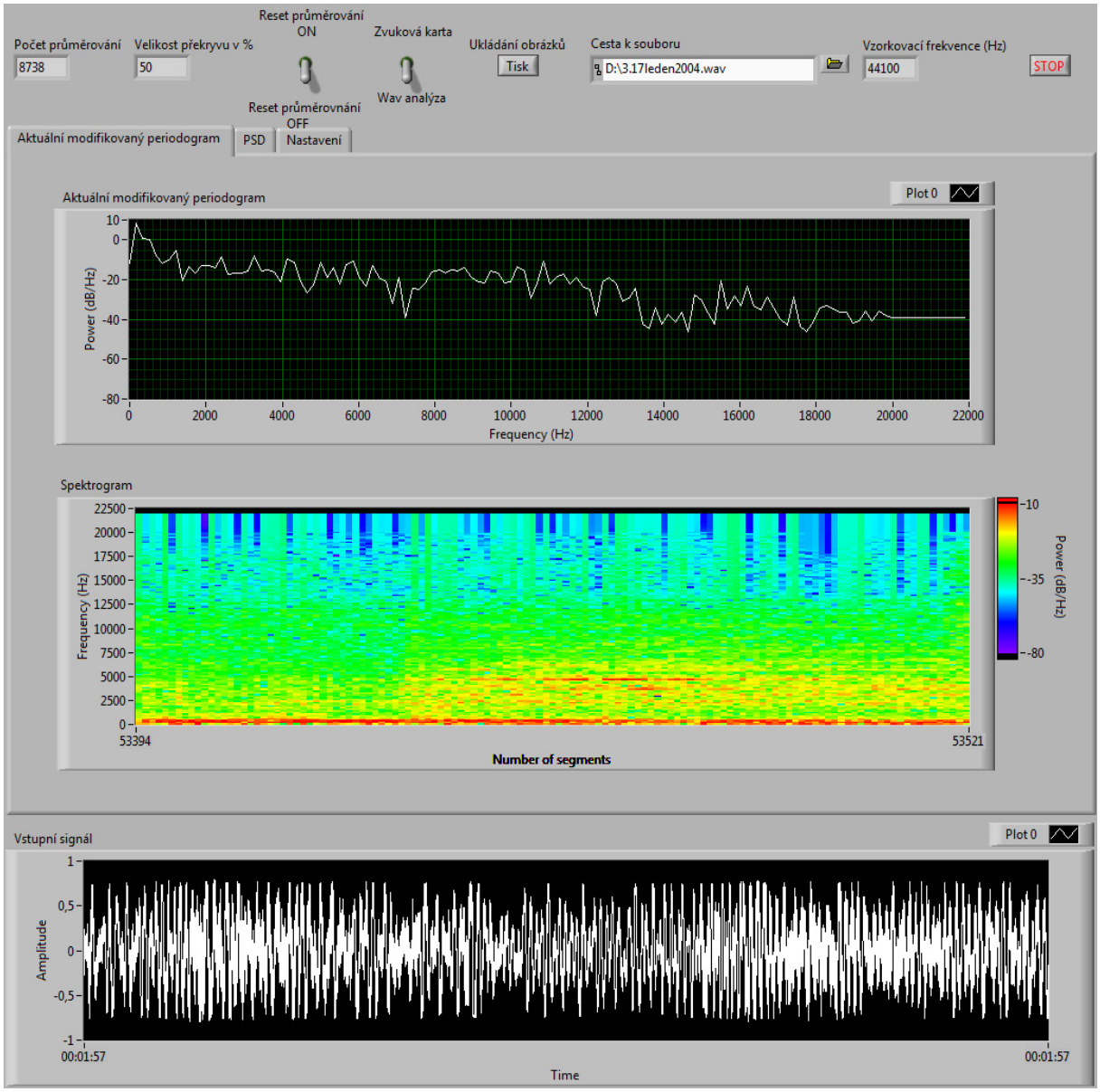
Na obrázku 5.6 je vidět zapojení pro načtení a spuštění zvukového souboru. První je blok Sound File Open. Na vstup tohoto bloku je přivedena cesta k zvukovému souboru. Výstupem je hodnota sound file refnum , díky které může předat soubor na jiné bloky. Dalším blokem je Sound File Info. Vstupem je opět cesta k zvukovému souboru, výstupem je mimo jiné i vzorkovací frekvence. Posledním blokem je Sound File Read. Na jeho vstupy jsou přivedeny hodnoty sound file refnum a vzorkovací frekvence. Výstupem jsou zvuková data z načteného souboru. Dalším výstupem je informace o konci zvukového souboru.



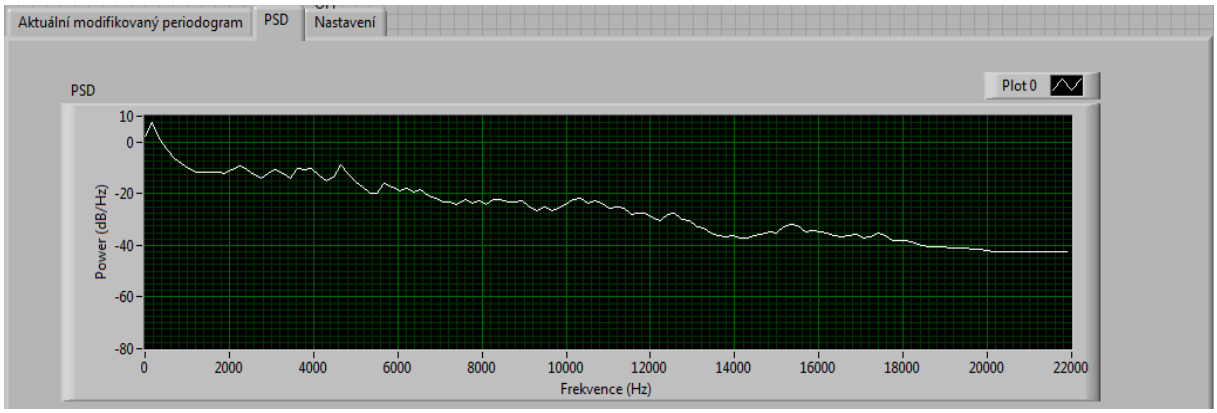
Obr.5.6 : Blokové zapojení pro načtení zvukového souboru

Na obrázku 5.7 jsou výsledky analýzy zvukového souboru wav. Nastavena byla délka segmentu *N*=512, velikost překryvu 50% a Hammingovo váhovací okno. Na obrázku 5.8 je odhad výkonové spektrální hustoty.

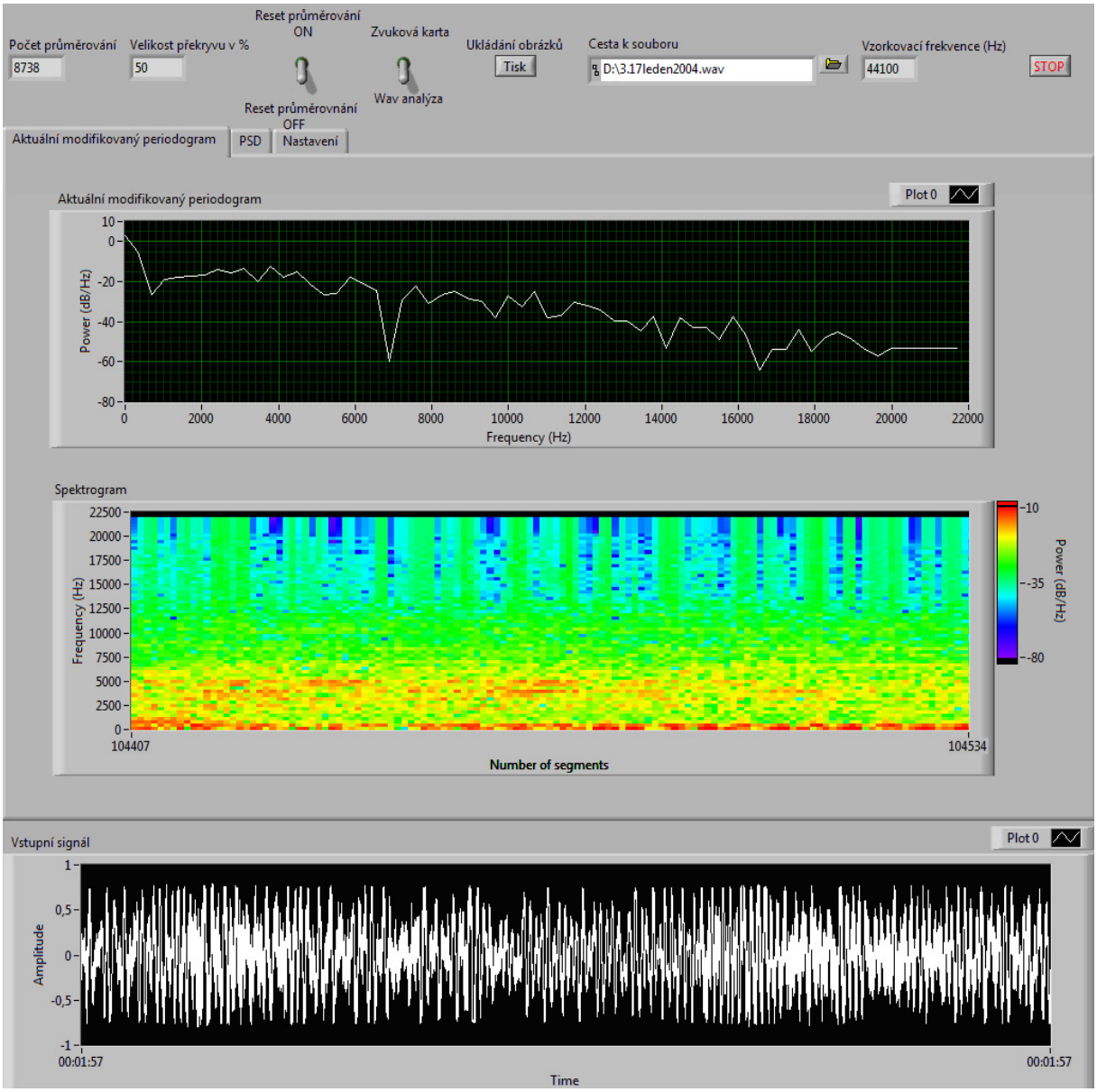
Na obrázku 5.9 jsou výsledky analýzy téhož zvukového souboru. Délka segmentu byla změněna na *N*=256. Na obrázku 5.10 je odhad výkonové spektrální hustoty.



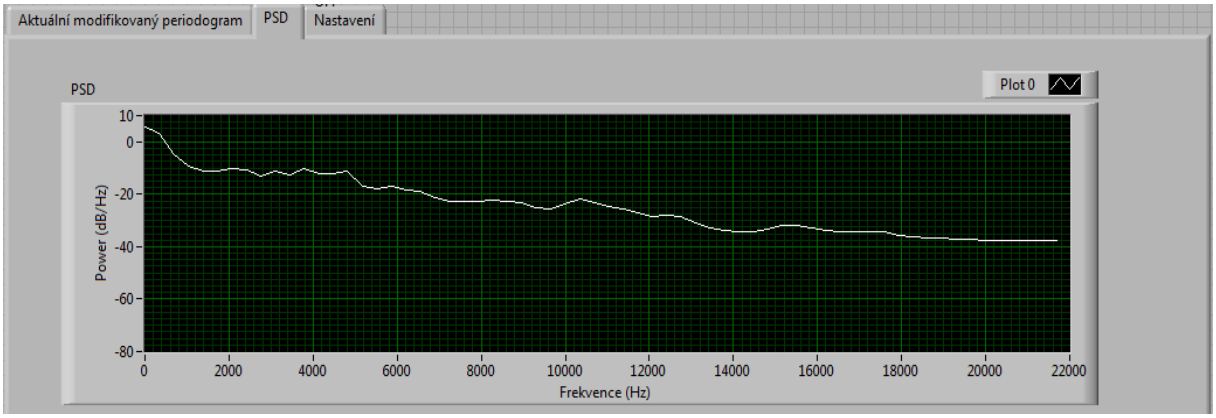
Obr.5.7: Výsledky analýzy zvukového souboru wav (N=512 , překryv 50%, Hammingovo váhovací okno).



Obr.5.8: Odhad výkonové spektrální hustoty zvukového souboru wav (N=512 , překryv 50%, Hammingovo váhovací okno).



Obr.5.9: Výsledky analýzy zvukového souboru wav (N=256 , překryv 50%, Hammingovo váhovací okno).

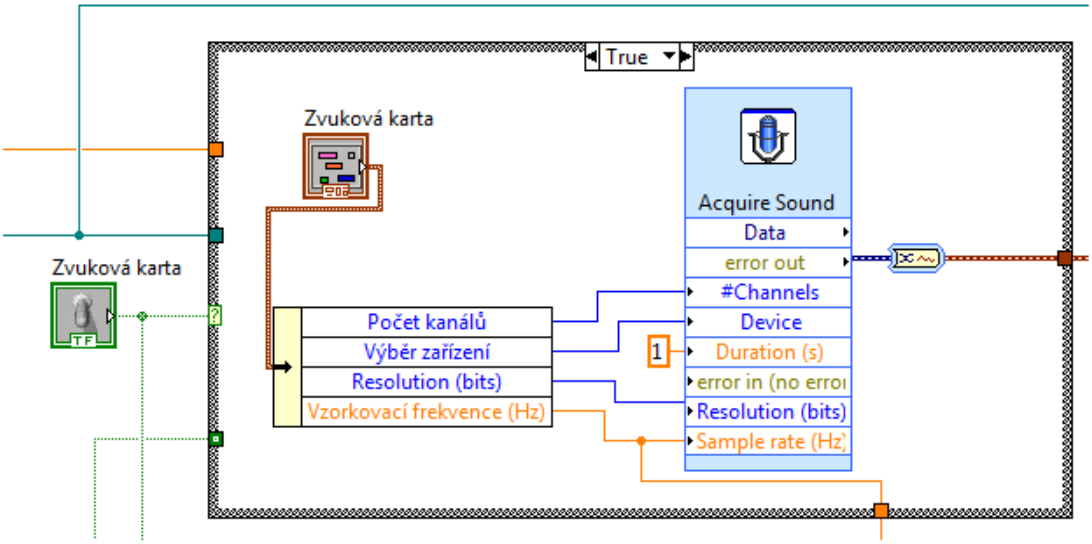


Obr.5.10: Odhad výkonové spektrální hustoty zvukového souboru wav (N=512 , překryv 50%, Hammingovo váhovací okno).

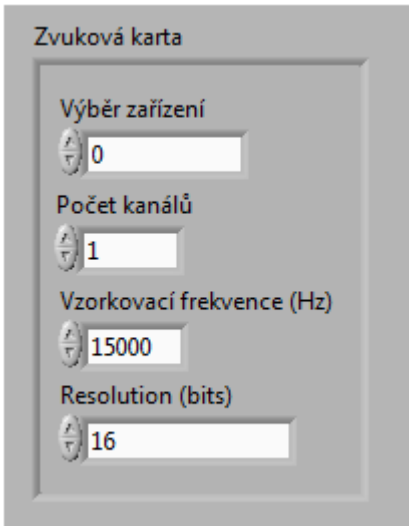
5.2.2 Analýza dat získaných pomocí zvukové karty

Druhým praktickým měřením je analýza signálu získaného pomací zvukové karty.

Na obrázku 5.11 je zapojení pro získání dat ze zvukové karty. Je využit blok Acquire Sound. Na obrázku 5.12 je panel pro nastavení zvukového zařízení. Výběr zařízení (device) je číslo, které vybere jedno zařízení ze seznamu všech připojených zvukových zařízení. Dále můžeme volit Počet kanálů, Vzorkovací frekvenci a Rozlišení, které určuje kvalitu každého vzorku v bitech (hodnoty 8 nebo 16). Výstupem jsou data přivedená na vstup vybraného zařízení.

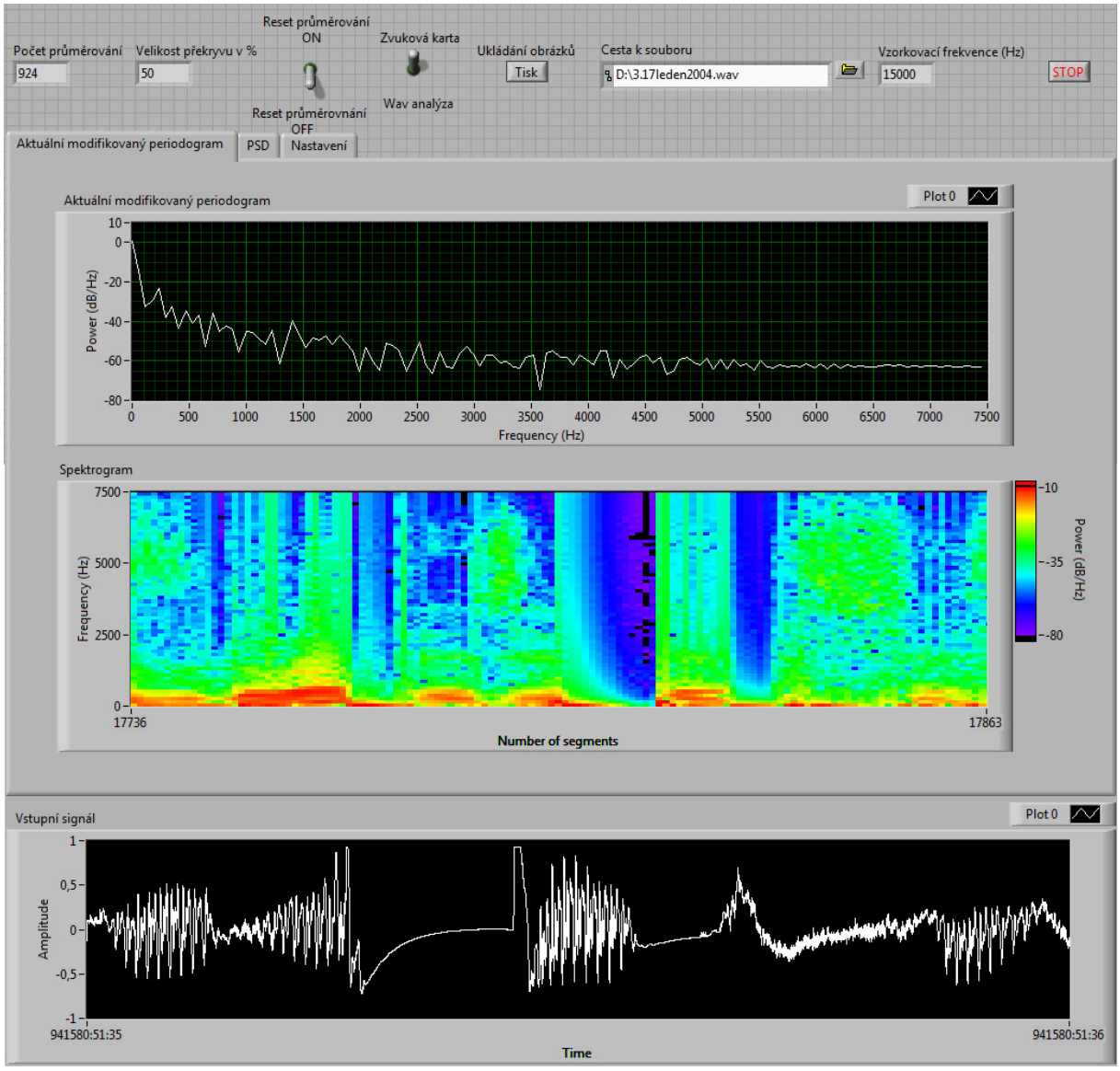


Obr.5.11: Zapojení bloku pro ovládání zvukové karty

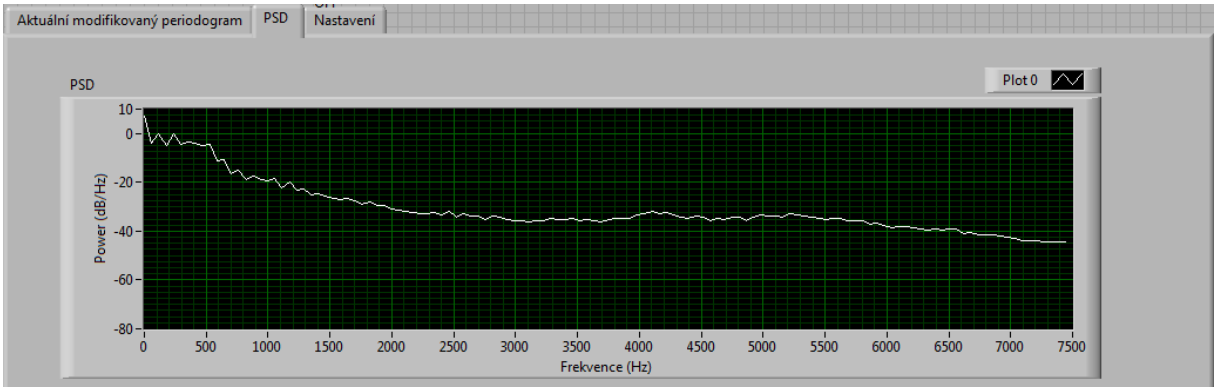


Obr.5.12: nastavení zvukové karty

Na obrázku 5.13 jsou výsledky analýzy signálu přivedeného ze zvukové karty. Nastavení zvukové karty je uvedeno na obrázku 5.12. Délka segmentu byla nastavena N=512, překryv 50% a Hammingovo váhovací okno. Na obrázku 5.13 je odhad výkonové spektrální hustoty.



Obr.5.13: Výsledky analýzy dat ze zvukové karty (N=512 , překryv 50%, Hammingovo váhovací okno).



Obr.5.14: Výsledky analýzy dat ze zvukové karty (N=512 , překryv 50%, Hammingovo váhovací okno).

6 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo zpracovat teorii nutnou k popisu a pochopení problematiky zpracování signálu a následného zobrazení jeho spektra. Na základě těchto poznatků bylo úkolem vytvořit program v programovém prostředí LabVIEW, který provede spektrální analýzu v reálném čase a provést praktická měření.

Teorie je zpracovaná v několika kapitolách. V úvodní kapitole jsou vysvětleny signály se spojitým a diskrétním časem, dále jsou popsány Fourierovská zobrazení signálu. V druhé kapitole je popsán proces zpracování vstupního signálu pomocí DFT. Ve třetí kapitole se zabýváme výkonovou spektrální hustotou, která je vysvětlena a je zde přehled metod pro její výpočet. Dále je krátký popis programu LabView.

Praktická část je rozdělena na dvě podkapitoly: Popis programu a praktická měření.

V podkapitole popis programu jsou podle blokového schéma popsány a vysvětleny jednotlivé bloky programu. Dále je popsán čelní panel programu.

V podkapitole praktická měření je provedena analýza pro dva zdroje signálu. Prvním zdrojem je zvukový soubor wav. Je popsán způsob získání dat ze zvukového souboru a jsou provedeny dvě analýzy pro různé délky segmentu(první má délku N=512 vzorků, druhý N=256 vzorků). Z grafů lze určit, že při délce segmentu 256 vzorků se zhoršilo frekvenční rozlišení. V druhém měření jsou data získána pomocí zvukové karty. Je provedena analýza řečového signálu, která je zobrazen v grafech. Podle předpokladů by měl být vyšší výkon až do frekvence cca 5 kHz. To může být z části dáno horší kvalitou mikrofonu.

Součástí práce je i návrh měřící úlohy na provedení spektrální analýzy v reálném čase, která je uvedena v příloze B.

Seznam použité literatury

[1] ŠEBESTA, Vladimír. *Signály a soustavy*. Brno, 2002. 155 s. Skriptum. Vysoké Učení Technické v Brně.

[2] NEVŘIVA, Pavel. *Analýza signálů a soustav*. 1. vydání. Praha : BEN, 2000. 671 s. ISBN 80-7300-004-0.

[3] JIŘÍ, Jan. *Číslicová filtrace,analýza a restaurace signálů*. 2. upravené a rozšířené vydání. Brno, Antonínská 1 : Vitium, 2002. 427 s. ISBN 80-214-1558-4.

[4] JIŘÍ, Jan. *Číslicové zpracování signálů a analýza signálů : Počítačová cvičení*. Brno, 2003. 86 s. Skriptum. Vysoké Učení Technické v Brně.

[5] DAVÍDEK, Vratislav; SOVKA, Pavel . *Číslicové zpracování signálů a implementace*. Praha : ČVUT, 1996. 239 s.

[6] RÁŠO, O.; BALÍK, M. Adaptive Thresholding of DFT Coefficients based on Probability Distribution of Additive Noise. WSEAS Transaction on Signal Processing, 2010, roč. 2009, č. 12, s. 390-399. ISSN: 1790-5052

[7] SMÉKAL, Zdeněk. *Číslicové zpracování signálů*. Brno, 2009. 203 s. Skriptum. Vysoké Učení Technické v Brně.

[8] National Instruments [on-line]. Dostupné z WWW: http://www.ni.com/labview/

[9] ŽÍDEK, Jan. *Grafické programování ve vývojovém prostředí LabVIEW* [online]. Ostrava, 2002. 215 s. Výuková skripta. VŠB-TU Ostrava. Dostupné z WWW: <http://autnt.fme.vutbr.cz/lab/FAQ/labview/VI_Skripta.pdf>.

Seznam použitých zkratek a symbolů

Zkratky

DFŘ	Diskrétní Fourierova řada
DFT	Diskrétní Fourierova transformace
DTFT	Fourierova transformace diskrétního času
FŘ	Fourierova řada
FT	Fourierova transformace
LabVIEW	Laboratory Virtual Instruments Engeneering Worbench
Power	Výkon [dB]
PSD	Výkonová spektrální hustota
STFT	Krátkodobá Fourierova transformace

Symboly

A	Amplituda
c_k	Komplexní koeficienty
cos	Cosinova funkce
f	Frekvence [Hz]
f_{max}	Maximální frekvence [Hz]
f_{vz}	Vzorkovací frekvence [Hz]
i	Index segmentu
I	Celkový počet segmentů
i_D	Iterační terminál
k	Jednotlivé koeficienty
M	Délka převzorkovaného spektra
m	Počet stupňů algoritmu FFT
n	Jednotlivé vzorky
N	Celkový počet vzorků
N_D	Podíl velikosti vstupího signálu s velikostí segmentu
N_y	Datová posloupnost
S	Spektrum
$s(nT)$	Diskrétní periodický signál
$s(t)$	Spojitý signál

T	Perioda
t	Proměnná čas
v	Velikost překryvu
$w(n)$	Váha okna
W^{nk}	Periodická poslopnost
Y	Datový výstup
$y(n)$	vstupní signál
$Y_i(k)$	Spektrum signálu $y(n)$
$y_i(n)$	Délka aktuálního segmentu
α_m	Činitel úspory počtu součinů
Γ	Počet součinů
Δf	Frekvenční interval
Δt	Časový interval
φ	Fáze signálu
ω	Úhlový kmitočet
Ω	Základní kmitočet signálu

Přílohy

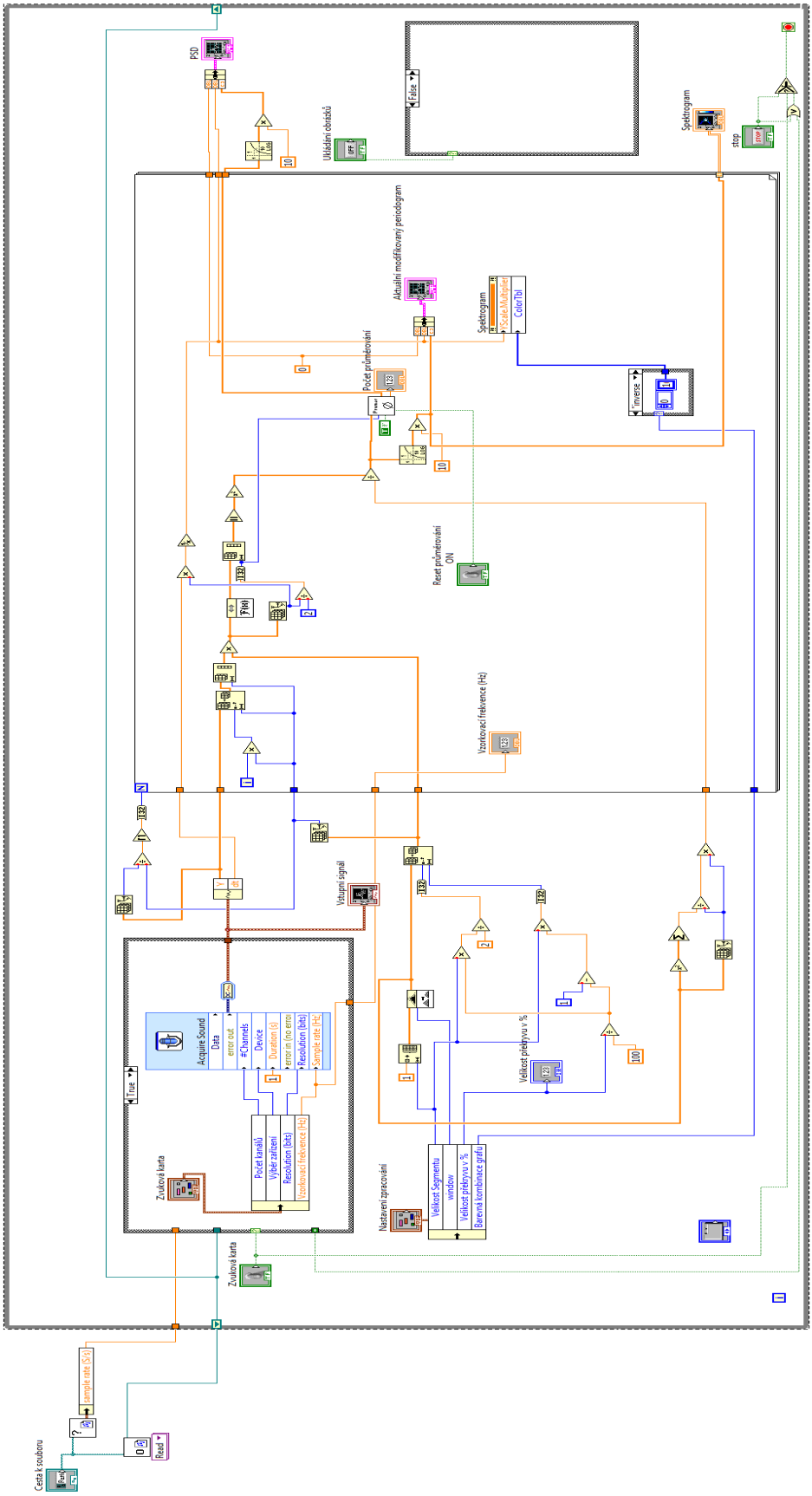
A) Obsah CD

- Program Spektrální analýza.vi
- Testovací zvukový soubor.wav
- Bakalářská práce v elektronické podobě

B) Blokové zapojení programu

C) Měřící úloha

Příloha B


PSD
Ukládání obrazků
False
Spektrogram
stop
Aktuální modifikovaný periodogram
Spektrogram
Scale Multiplier
Color Tbl
Počet průměrování
Timeese
Reset průměrování
ON
Vzorkovací frekvence (Hz)
Vstupní signál
Acquire Sound
Data
error out
#Channels
Device
Duration (s)
error in (no error)
Resolution (bits)
Sample rate (Hz)
True
Počet kanálů
Výběr zařízení
Resolution (bits)
Vzorkovací frekvence (Hz)
Zvuková karta
Velikost překryvu v %
100
Nastavení zpracování
Velikost Segmentu
window
Velikost překryvu v %
Barevná kombinace grafu
Zvuková karta
Sample rate (S/s)
Read
Cesta k souboru

Příloha C

Spektrální analýza v reálném čase

Cíl měření

V této laboratorní úloze studenti provedou na osobním počítači spektrální analýzu přiloženého zvukového souboru Testovací zvukový soubor.wav a signálu přivedeného ze zvukové karty. Při použití různých délek segmentů a překryvů budou studenti diskutovat o vlivu těchto hodnot na výsledné zobrazení.

Zadání

1) Pomocí programu analyzujte přiložený wav soubor. Měňte velikosti segmentů a sledujte jak se projeví na jejich celkovém počtu. Uložte obrázek PSD.

2) Pomocí zvukové karty a programu analyzujte mluvené slovo. Postupně měňte velikost překryvu a sledujte Spektrogram. Uveďte čím jsou dány rozdíly jednotlivých spektrogramů. Ty vytiskněte.

3) Sestavte přehlednou zprávu o měření, dosažené výsledky popište v závěru.

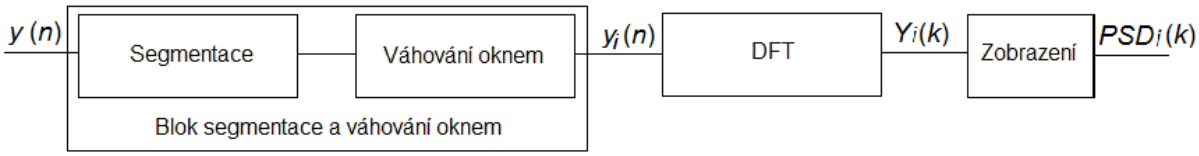
Úvod

Spektrální analýza signálu je vyjádření signálu v kmitočtové oblasti jako směs komplexních harmonických složek. Reálný signál je v kmitočtové oblasti zobrazen jako oboustranné spektrum.

Výkonová spektrální hustota PSD (Power spectral dentisty) vyjadřuje výkon obsažený v úzkém intervalu Δf spojitého spektra a je vyjádřena ve W/Hz.

Welchova metoda průměrování modifikovaných periodogramů

Na obrázku 1 je blokové schéma pro realizaci výkonové spektrální hustoty. Blok segmentace je možné rozdělit na podbloky Segmentování a váhování oknem.



Obr.1: Blokové schéma pro výpočet výkonové spektrální analýzy

Segmentace rozděluje dlouhodobý signál do krátkých segmentů, které jsou pak vynásobeny vhodným oknem. Aktuální segment $y_i(n)$ vstupního signálu $y(n)$ lze matematicky popsat pomocí vzorce 1.

$$y_i(n) = w(n)\,y(n + iN(1-v)) \tag{1}$$

Pro: n = 0,1,…,N-1 a i = 0,1,…,I-1, kde N je délka segmentu $yi(n)$, i je index segmentu, I je celkový počet segmentů, $w(n)$ je váha okna a v je velikost překryvu, pro v = 0,5 se překryv rovná 50%.

Pro výpočet DFT se používá algoritmus FFT. Počet koeficientů DFT je roven dálce zpracovaného signálu, viz vzorec 2.

$$Y_i(k) = \sum_{n=0}^{N-1} y_i(n) e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} \tag{2}$$

Kde $Y_i(k)$ je DFT spektrum signálu $y_i(n)$ a k jsou jednotlivé koeficienty DFT platí, že k=0,1,…,N-1.

Pro každý segment je vypočten periodogram, viz vzorec 3

$$PSD_i(k) = \frac{1}{NU}\left|DFT(Y_i)\right|^2 \tag{3}$$

Pro i=0,1,…,I-1 , kde U je normalizační koeficient

Normalizační koeficient, viz vzorec 4.

$$U = \frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N-1} w^2(n) \tag{4}$$

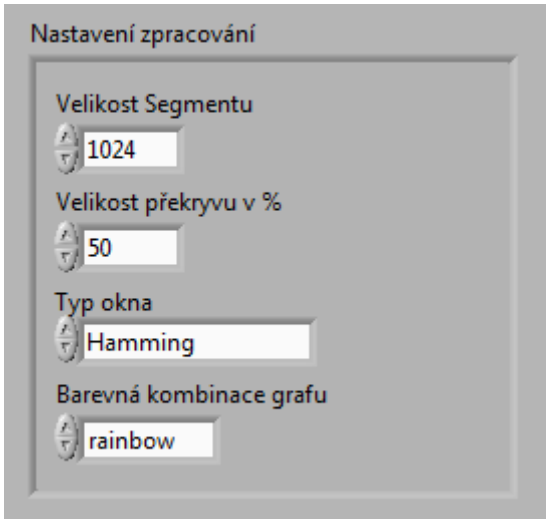
Welchův odhad výkonové spektrální hustoty je pak průměr dílčích modifikovaných periodogramů a je dán vztahem 5.

$$PSD_i^I(k) = \frac{1}{I}\sum_{i=0}^{I-1} PSD_i(k) \tag{5}$$

Postup měření

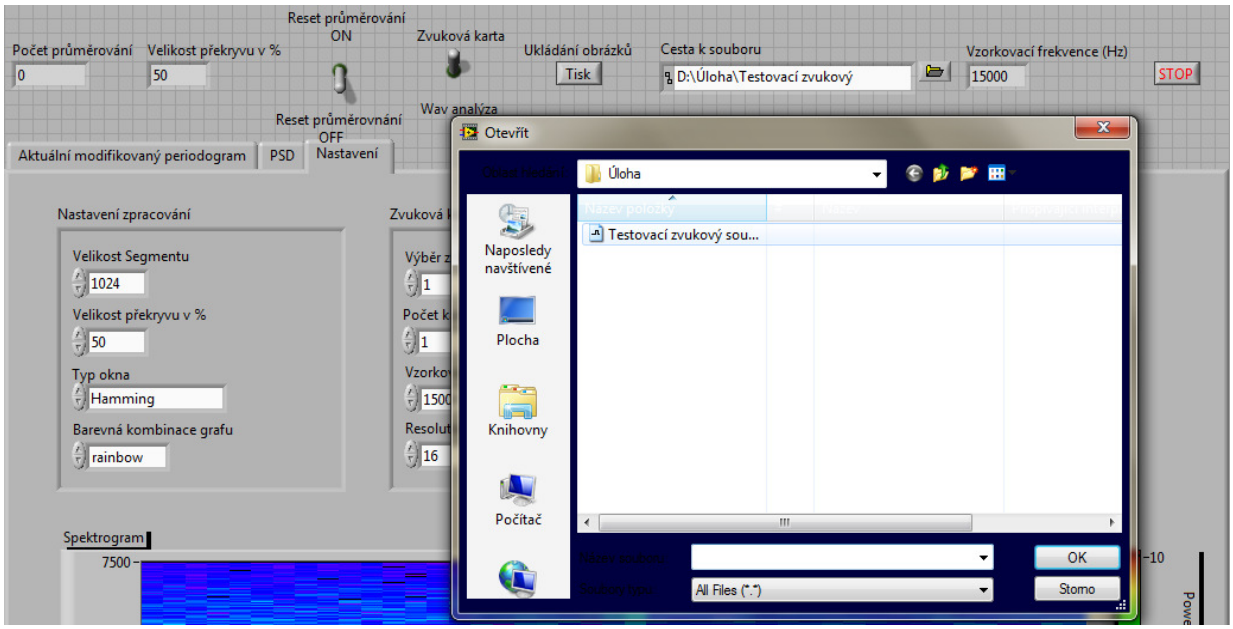
Bod zadání 1

- Spusťte program Spektrální analýza.vi a přepněte se do záložky Nastavení a najděte panel Nastavení zpracování. Nastavte velikost segmentu na 1024 vzorků. (Obr.2)



Obr.2 : Nastavení zpracování

- Podle obr.3 zkontrolujte zda jsou přepínače přepnuty na Reset průměrkování OFF a Wav výběr. Poté klikněte na ikonu složka a vyberte soubor Testovací zvukový soubor.wav. Potvrďte tlačítkem OK.
- Přepněte se do záložky Aktuální modifikovaný periodogram a stiskněte tlačítko Run (šipka v levém horním rohu). Sledujte Aktuální modifikovaný periodogram a analyzovaný vstupní signál. Po přehrátí souboru se program sám zastaví.

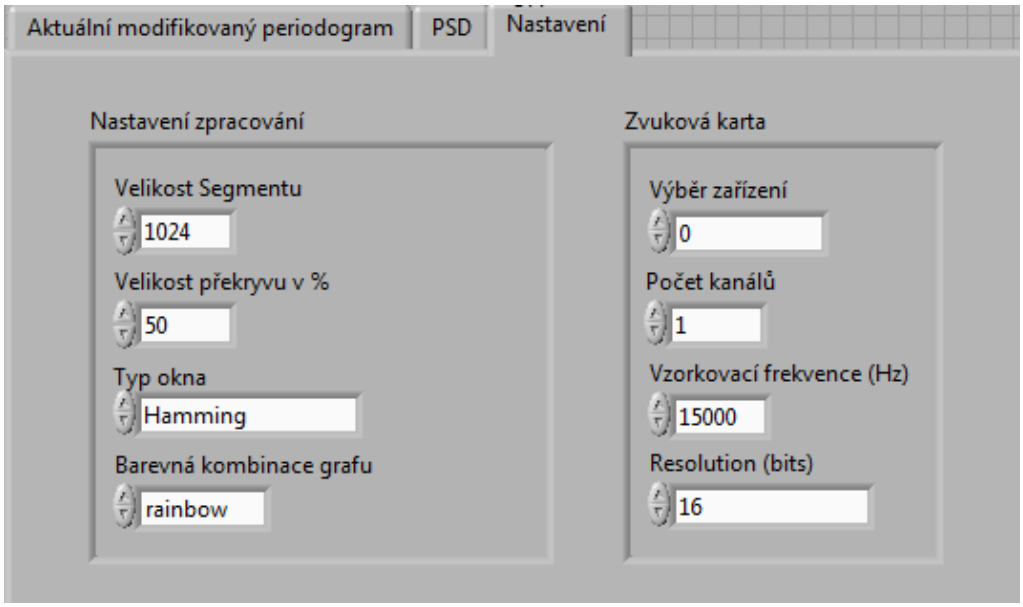


Obr.3 : Výběr zvukového souboru

- Přepněte se do záložky PSD a prohlédněte si odhad výkonové spektrální hustoty. Zaznamenejte si Počet průměrovnání a poté stiskněte tlačítko Tisk a následně Run. Takto si uložíte oba grafy.
- Před opakováním měření je nutné resetovat průměrkování. Přepínač nastavte do polohy Reset průměrkování ON, stikněte tlačítko Run a hned na to Stop. Poté přepněte přepínač zpět do polohy Reset průměrování OFF.
- V záložce Nastavení nastavte velikost segmentu na hodnotu 512. Měření opakujte.
- V závěru vysvětlete jak souvisí velikost segmentu s jejich celkovým počtem a popište změnu v zobrazení.

Bod zadaní 2

- Přepnětě se do záložky Nastavení. Podle obrázku 4 v panelu Nastavení zpracování zadejte velikost segmentu 1024 vzorků a překryv 50%. V panelu Zvuková karta nastavte výběr zařízení na 0, počet kanálů1, vzorkovací frekvence 15000 Hz a resolution na 16.



Obr.4: Nastavení pro zadaní 2

- Přepněte se do záložky Aktuální modifikovaý periodogram a stiskněte Run. Do mikrofonu napočítejte do 20 a hned stiskněte tlačítko Tisk a uložte si grafy.
- Nyní vyresetujte průměrovnání podle bodu zadání 1. Poté se přepněte do nastavení a změňte velikost překryvu na 20%. Měření opakujte.
- Postupujte podle předchozího bodu, velikost překryvu však změňte na 80%.
- V závěru popište jak se změnili grafy v závislosti na změně prekryvu.

Použité přístroje

PC se zvukovou kartou a programem Spektrální analýza.vi

Mikrofon