

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

**Ing. Milan Brejl**

**OBNOVENÍ ZTRACENÝCH  
VYSOKOFREKVENČNÍCH SLOŽEK  
V HUDEBNÍCH SIGNÁLECH**

**RECOVERY OF LOST  
HIGH-FREQUENCY COMPONENTS  
IN MUSIC SIGNALS**

PhD Thesis

Studijní obor: Elektronika, měřicí a sdělovací technika

Školitel: Prof. Ing. Vladimír Šebesta, CSc.

Oponenti: Doc. Ing. František Žídek, Ph.D.

Prof. Ing. Zdeněk Smékal, CSc.

Datum obhajoby: 14. 3. 2001

© 2001 Milan Brejl

**ISBN 80-214-1855-9**

# OBSAH

<b>1. ÚVOD</b>	<b>5</b>
1.1 Stav problematiky	5
1.2 Cíl práce	6
<b>2. HARMONICKÁ ANALÝZA JEDNODUCHÉHO TÓNU</b>	<b>6</b>
2.1 Známa řešení	6
2.2 Navržený způsob řešení	7
2.2.1 Spektrální analýza tónu	7
2.2.2 Oddělení nalezených harmonických složek	9
2.2.3 Průběhy okamžité frekvence a amplitudy harmonické složky	9
2.3 Realizace	10
2.4 Výsledky	11
<b>3. DATABÁZE ANALYZOVANÝCH TÓNŮ</b>	<b>11</b>
3.1 Struktura databáze	12
3.2 Úspora dat	12
3.3 Realizace	13
<b>4. HARMONICKÁ ANALÝZA KONTINUÁLNÍ HUDBY</b>	<b>13</b>
4.1 Známa řešení	13
4.2 Postup	14
4.2.1 Segmentace	14
4.2.2 Harmonická analýza segmentu	14
4.2.3 Navázání segmentů	15
4.3 Realizace a výsledky	15
<b>5. VYHLEDÁNÍ JEDNOTLIVÝCH TÓNŮ V HUDBĚ A OBNOVENÍ JEJICH VYSOKOFREKVENČNÍCH SLOŽEK</b>	<b>15</b>
5.1 Míra podobnosti harmonických složek	15
5.2 Hledání tónů	16
5.2.1 Rozpoznání tónů v hudbě	16
5.2.2 Přiřazení nástrojů nalezeným tónům	16
5.3 Realizace	18
5.4 Výsledky	18
<b>6. ZÁVĚR</b>	<b>21</b>

## ABSTRACT

The theme of this work - Reconstruction of lost high frequency components in music signals - is a new area in the field of today science. The author of this work has worked on other themes of archive music restoration by digital signal processing like removing clicks from old gramophone recordings or noise reduction. The recovery of the lost high frequency components is very fecund to archive music listening quality improvement.

Important experiences were acquired during past approaches to this theme. The lost high frequency components represent a significant information lost that has to be compensated by a knowledge bank. A new algorithm that is presented in this work was proposed based on these experiences.

The music signal consists of harmonics of the each tone. Instantaneous amplitude and frequency courses of the harmonics carry the most important information for human hearing. As the band-limited music is analyzed into single harmonics instantaneous amplitude and frequency courses can be compared with known courses of analyzed model tones and the lost high frequency components can be added with accordance to the model tone high frequency components.

Model tones of different instruments are analyzed and the results are used to build a knowledge bank - database of analyzed model tones. The spectrum of the model tones analyze is based on autocorrelation matrix eigenvalues and eigenvectors properties. Single harmonics localized in the spectrum are filtered out by band-pass Gabor filtering. The DESA-1 (Discrete Energy Separation Algorithm) is applied to the narrow-band filter outputs to get the courses of harmonics instantaneous amplitude and frequency.

A similar method is used to analyze continuous music. Each music segment is analyzed. The results are tied. In the set of all harmonics of the continuous music subsets of harmonics that belongs to the same tone are determined. For each subset the closest model tone from the database is found. The model tone is adjusted to the tone from music by time positioning and gaining. The lost high-frequency components of the tone from band-limited music are generated with accordance to the model tone high frequency components. This is done for all tones from the band-limited music.

The examples of band-limited music restoration show that the method is successful and based on right principles. The courses of harmonics instantaneous amplitude and frequency carry the important information in the music signal. As the algorithm work with this information the results sounds naturally and authentically.

# 1. ÚVOD

## 1.1 Stav problematiky

Ve druhé polovině devadesátých let se téma restaurace archivních hudebních nahrávek stalo ve světě velmi žádané. V této době byla již zvládnuta digitalizace hudebních signálů do číslicové podoby a výkonnost výpočetní techniky umožňovala realizovat složité číslicové algoritmy pro zpracování číslicových signálů. Zároveň kvalita nově vydávaných hudebních děl zpravidla na CD nosičích a nároky na kvalitní reprodukci hudby se prudce a výrazně zvýšily. Tyto okolnosti přinesly velký zájem o metody restaurace archivních hudebních záznamů, realizovatelné výhradně pomocí číslicového zpracování signálů.

Věda byla před požadavky trhu v mírném náskoku. Rozličné více či méně úspěšné metody potlačení šumu v hudebních signálech [29], [22] byly používány již delší dobu. Skutečný průlom však přinesli pánové Simon J. Godshill a Peter J. W. Rayner z Univerzity v Cambridge [21]. Jejich algoritmus odstranění impulzního rušení z akustických signálů přinesl možnost vysoce kvalitní restaurace gramofonových nahrávek. Bylo možno archivní gramofonové nahrávky zbavit „praskání“. Touto metodou jsem se i já podrobně zabýval [10], [11]. Vyzkoušel jsem též několik metody potlačení šumu v hudebních signálech založených na spektrální subtrakci, ale moje výsledky nepředčily výsledky některých komerčně dostupných programů pro počítačové zpracování hudby. Při práci s archivními hudebními záznamy a snaze o zlepšení jejich poslechové kvality jsem si všiml, že obnovení ztracených vysokofrekvenčních složek by přineslo podstatné zvýšení poslechové kvality. Staré nahrávky jsou již od svého pořízení kdysi nedokonalou studiovou technikou a nebo po uchovávání na např. magnetopáskových médiích zpravidla chudé na vysokofrekvenční složky.

Chybějící vysokofrekvenční složky představují nenávratně ztracenou informaci a jejich obnova zdánlivě není možná. Pro zlepšení poslechové kvality však není nutné bezchybně obnovit tyto složky, ale velmi přínosné a dostačující může být i doplnění vysokofrekvenčních složek, které se sice neshodují s původními, ale jsou vygenerovány na základě fyziologických vlastností lidského sluchu a přirozeně doplňují zachovanou část spektra.

Tato práce je první, která se tematikou obnovení vysokofrekvenčních složek v hudbě zabývá. Několikrát již bylo řešeno obnovení ztracených vysokofrekvenčních složek v řečovém signálu, který je omezen na telefonní přenosové pásmo (do 3400 Hz [24], [1]). Tato řešení však používají výchozí principy, které jsou specifické pro řečové signály a neumožňují aplikaci pro hudební signály.

## 1.2 Cíl práce

*Cílem této práce je uplatnit dynamické pojetí vlastností hudebního signálu v aplikaci obnovení ztracených vysokofrekvenčních složek.*

V hudebním signálu je třeba rozpoznat jednotlivé harmonické složky všech znějících tónů a nástrojů. Každá harmonická složka má svůj průběh v dynamické i melodické rovině. Průběh v dynamické rovině lze zachytit sledováním okamžité amplitudy, průběh v melodické rovině lze zachytit sledováním okamžité frekvence harmonické složky. Průběhy okamžitých amplitud a okamžitých frekvencí všech harmonických složek vyjadřují nejpodstatnější informace, které hudební signál z hlediska lidského vnímání nese.

*Dílčím cílem práce je nalézt takový algoritmus analýzy hudebního signálu, který dokáže časový průběh signálu převést na průběhy okamžitých amplitud a frekvencí všech harmonických složek, které se v daném hudebním signálu vyskytují.*

Dalším zkoumáním průběhů hodnot amplitud a frekvencí harmonických složek lze rozdělit takto vyjádřený hudební signál na jednotlivé tóny, stejně jako lidské ucho rozeznává jednotlivé tóny v hudbě. Toto umožní obnovit ztracené vysokofrekvenční složky na každém tónu zvlášť.

*Dalším cílem práce je nalézt a realizovat algoritmus, který rozpozná jednotlivé tóny v hudbě.*

Doplnění ztracených harmonických složek jednoho tónu lze s vysokou kvalitou uskutečnit za pomoci vzorových tónů, které určují typické průběhy vyšších harmonických složek různých nástrojů a jejich tónů.

*Podstatným úkolem této práce je vytvořit banku vzorových tónů analyzovaných na průběhy okamžitých hodnot amplitud a frekvencí všech harmonických složek.*

Za pomoci původního frekvenčně omezeného signálu a informací o průbězích okamžitých amplitud a frekvencí obnovovaných harmonických složek lze syntetizovat restaurovaný signál.

*Realizace algoritmu obnovení ztracených harmonických složek, jehož výstupem je restaurovaný hudební signál, a vytvoření ukázek, které prokáží vlastnosti tohoto algoritmu, je posledním cílem této práce.*

## 2. HARMONICKÁ ANALÝZA JEDNODUCHÉHO TÓNU

### 2.1 Známá řešení

Nejjednodušší metoda analýzy hudebního tónu využívá DFT (Diskrétní Fourierovu transformaci), přičemž délka signálu vstupujícího do DFT je rovna délce periody časového průběhu signálu hudebního tónu. Jednotlivé koeficienty spektra po DFT pak určují okamžitou amplitudu a frekvenci každé harmonické složky. Tato metoda předpokládá, že frekvence harmonických složek jsou celočíselnými násobky

základní frekvence tónu, což je velké zjednodušení, a že délka periody signálu obecně je rovna celistvému počtu vzorkovacích period.

Další metoda je známá pod názvem Fázový vokodér. Podle principů STFT (Short Time Fourier Transformation) vytváří banku filtrů na předem stanovených frekvencích takovou, že komplexní signály na výstupech filtrů určují okamžitou amplitudu a fázi každé harmonické složky. K analýze hudby se Fázový vokodér používal opět se stejnoměrně rozloženými propustnými pásmy pásmových filtrů podle základní frekvence tónu.

Intenzivně rozvíjenou oblastí jsou metody časově-frekvenční analýzy založené na Wignerově distribuci [28], které mají oproti STFT mnohé přednosti. Pro relativně značně složité signály, jakými hudební signály jsou, se tyto však ukázaly nevhodné, především díky vzniku křížových produktů.

V [20] je navržen „inharmonický hřebínkový filtr“ - filtr, který má neekvidistantně rozdělená propustná pásma. Tato metoda je použitelná pro nástroje, u kterých je na základě fyzikálního modelu známo, podle jaké závislosti dochází k inharmonicitě - odchylce střední frekvence harmonické složky od celočíselného násobku základní harmonické složky.

Tým Stephen McAdams a Suzanna Meneguzzi z Laboratoře psychologických experimentů na Universitě René Descarta v Paříži [31], 1999, se snaží nalézt vhodný způsob parametrizace průběhů okamžité frekvence a amplitudy harmonických složek. Přestože žádný model vhodný pro obecné použití nenalézají, vyplývají z jejich, že průběhy okamžité frekvence a amplitudy harmonických složek jsou stěžejní informací z hlediska lidského sluchového vnímání hudebních tónů.

## 2.2 Navržený způsob řešení

Oddělení jednotlivých harmonických složek ze signálu hudebního tónu lze spolehlivě uskutečnit pomocí pásmových filtrů. Po zjištění středních frekvencí harmonických složek touto metodou spektrální analýzy jsou jednotlivé harmonické složky odděleny ze signálu pásmovou filtrací a jejich průběhy okamžité frekvence a amplitudy jsou určeny pomocí DESA-1, stejně jako v [35].

### 2.2.1 Spektrální analýza tónu

Navržená metoda vychází z analýzy vlastních čísel a vlastních vektorů autokorelační matice [38], podobně jako např. metoda PCA (Principal Component Analysis) [25].

Signál  $x$  se vyjádří jako lineární kombinace ortonormálních bázevých funkcí. Jednou z možných sad bázevých funkcí jsou vlastní vektory  $\mathbf{u}_i$  ( $i = 1, \dots, D$ ) autorokelační matice  $\mathbf{R}$  řádu  $D$ . Každému vlastnímu vektoru  $\mathbf{u}_i$  odpovídá jedno vlastní číslo  $\lambda_i$ .

$$\mathbf{R}\mathbf{u}_i = \lambda_i\mathbf{u}_i \quad (2.1)$$

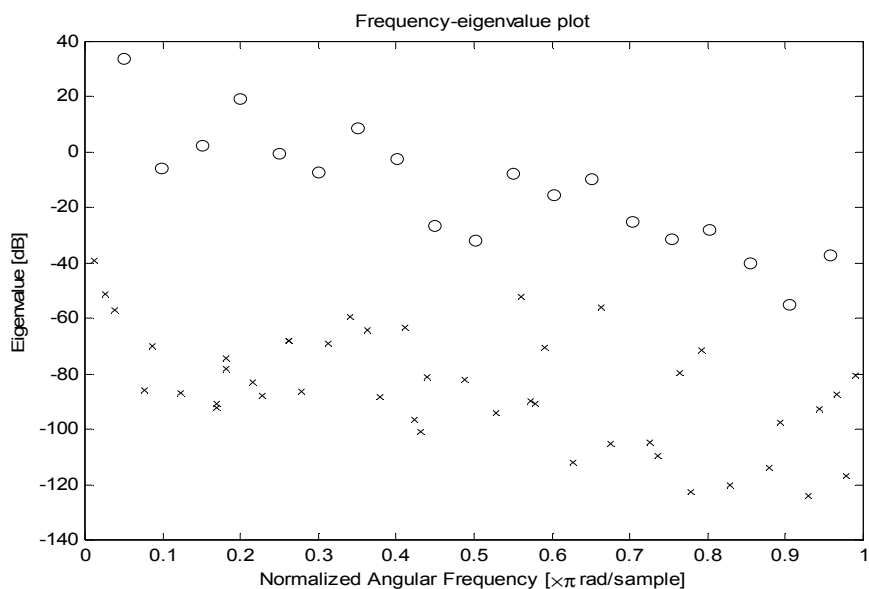
Pan Szegö [36] ukázal, že velikost vlastních čísel je asymptoticky rovna spektrálnímu výkonu na příslušné frekvenci. Jelikož autokorelační matice je reálná

a symetrická, jsou i vlastní čísla reálná a vlastní vektory lze uvažovat reálné. Vlastní čísla existují po dvojicích příslušných ke dvěma vlastním vektorům, které mají přibližně harmonické průběhy vzájemně posunuté o  $90^\circ$ .

Pro náš případ - autokorelační matice konečného, ale dostatečně velkého řádu - jsou bazové funkce závislé na signálu tak, aby při konečném počtu dokázaly co nejlépe vystihnout energeticky podstatné složky signálu. Vlastní vektory pak tvoří impulsové charakteristiky sady pásmových propustí s propustnými pásmy centrovanými kolem jednotlivých maxim ve výkonovém spektru.

### ***Oddělení signálového a šumového podprostoru***

Vlastní čísla můžeme rozdělit na principiální a zanedbatelná. Celý bazový prostor se díky tomu rozdělí na signálový podprostor (jehož bazové funkce jsou tvořeny vlastními vektory odpovídajícími principiálním vlastním číslům) a šumový podprostor (jehož báze jsou tvořeny zbývajících vlastními vektory) [17], [14].



Obr. 2.1 Zobrazení vlastních čísel autokorelační matice do roviny. Principiální vlastní čísla (O) a zanedbatelná (X).

Při zobrazení vlastních čísel autokorelační matice do roviny, jejíž  $y$ -ová souřadnice určuje velikost vlastního čísla v dB nebo jiné logaritmické míře a  $x$ -ová souřadnice určuje střední frekvenci propustného pásma filtru s koeficienty příslušného vlastního vektoru, je dobře patrné rozdělení principiálních a zanedbatelných vlastních čísel v této rovině - Obr. 2.1.

Rozdělení vlastních čísel lze při tomto zobrazení snadno provést manuálně. Pro automatické rozdělení byly vytvořeny dvě metody. První z nich je určena pro použití při analýze jednoduchého tónu, u něhož střední frekvence harmonických složek tvoří přibližně aritmetickou posloupnost a tato vlastnost je metodou využívána,



druhá metoda je určena pro použití při analýze kontinuální hudby (viz. 4), v níž může hrát najednou více tónů.

### 2.2.2 Oddělení nalezených harmonických složek

Po rozpoznání dominantně zastoupených frekvencí ve spektru analyzovaného tónu, které představují střední frekvence jednotlivých harmonických složek, je třeba harmonické složky od sebe oddělit v časové oblasti. Použije se sada úzkopásmových filtrů se středními frekvencemi propustného pásma naladěnými na střední frekvence jednotlivých harmonických složek metoda dopředné a zpětné filtrace [23].

K odfiltrování harmonických složek se nabízejí filtry, jejichž koeficienty tvoří prvky vlastních vektorů autokorelační matice příslušné vybraným vlastním číslům. Tyto FIR filtry mají charakter pásmových propustí, ale často neposkytují dostatečné potlačení nepropustných frekvenčních pásem a navíc občas existuje v jejich frekvenční charakteristice vedlejší propustné pásmo.

Proto jsou použity Gaborovy filtry, jehož koeficienty jsou dány předpisem

$$h(n) = e^{-(bn)^2} \cos(\pi f_c n), \quad (2.2)$$

kde  $n$  je index koeficientu filtru,  $-N \leq n \leq N$ ,  $f_c$  je střední normalizovaná frekvence propustného pásma,  $b$  určuje šířku pásma filtru tak, že

$$b = B \frac{\sqrt{2\pi}}{2}, \quad (2.3)$$

kde  $B$  je normalizovaná šířka propustného pásma.

### 2.2.3 Průběhy okamžité frekvence a amplitudy harmonické složky

Každá harmonická složka analyzovaného tónu je na výstupu z filtru v podobě časového průběhu úzkopásmového signálu. Výsledkem analýzy má být průběh okamžité frekvence a amplitudy každé harmonické složky. Pro jeho určení jsou vhodné algoritmy DESA (Discrete Energy Separation Algorithm - DESA-1a, DESA-1, DESA-2) [30] nebo metody ve výsledku podobné metodám DESA, ale vycházející z jiné teorie - kovarianční metoda a Pronyho [18].

Obě třídy algoritmů byly testovány na konkrétních úzkopásmových signálech vyjadřujících oddělené harmonické složky vzorových tónů. Jako nejvhodnější pro analýzu harmonických složek hudebních signálů byl vybrán algoritmus DESA-1:

Analyzovaný úzkopásmový signál  $x$  je vyjádřen jako frekvenčně a amplitudově modulovaný harmonický signál:

$$x_n = a_n \cos \phi_n, \quad (2.4)$$

kde  $a_n$  je okamžitá amplituda a  $\phi_n$  je okamžitá fáze.

Je definován diskrétní operátor oddělení energie (energy separation operator):

$$\psi[x_n] = x_n^2 - x_{n+1}x_{n-1} \quad (2.5)$$

na analyzovaném signálu  $x$  a zaveden diferenční signál  $y$

$$y_n = x_n - x_{n-1} \quad (2.6)$$

Okamžitá frekvence signálu  $x$  na  $n$ -tém vzorku  $f_n$  je vyjádřena

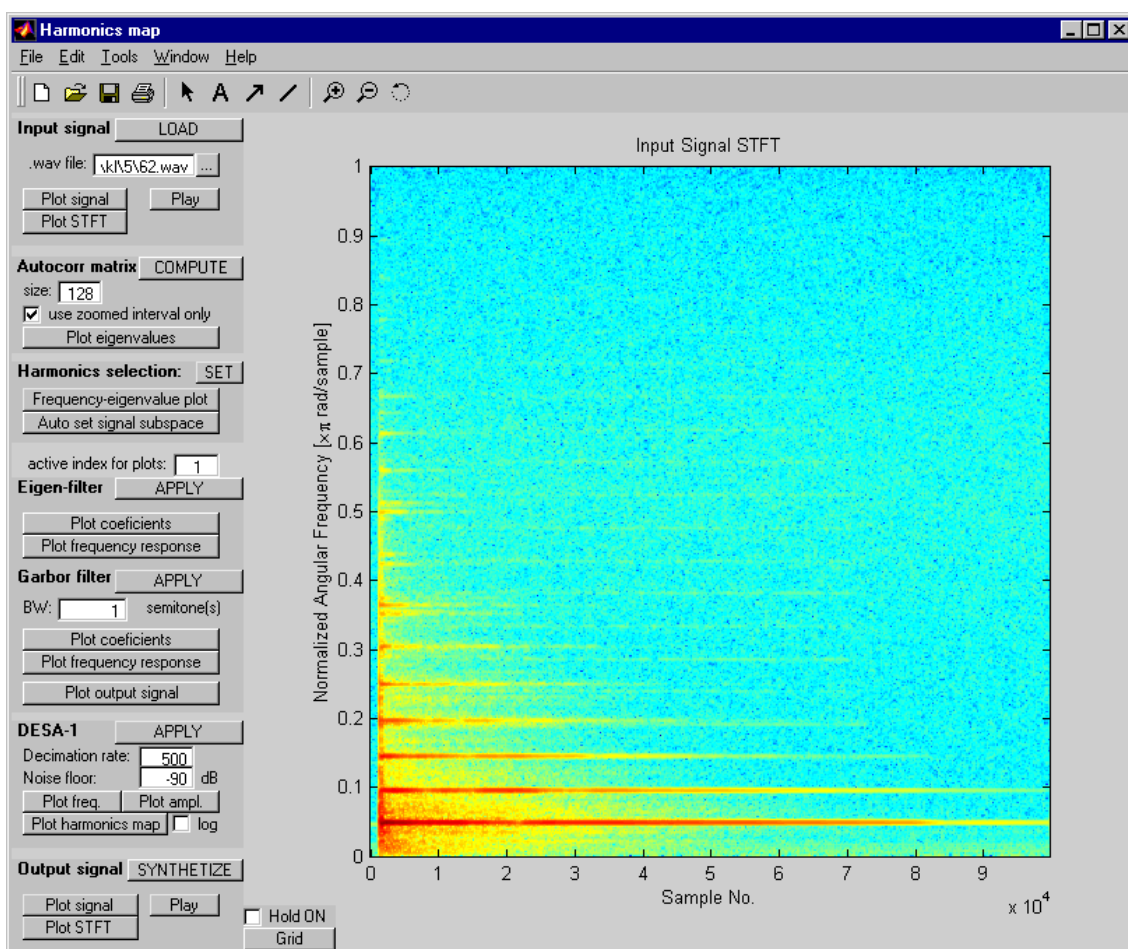
$$f_n = \arccos\left(1 - \frac{\psi[y_n] + \psi[y_{n+1}]}{4\psi[x_n]}\right) \quad (2.7)$$

a okamžitá amplituda  $a_n$  signálu  $x$  ve stejném místě

$$|a_n| = \sqrt{\frac{\psi[x_n]}{1 - \left(1 - \frac{\psi[y_n] + \psi[y_{n+1}]}{4\psi[x_n]}\right)}} \quad (2.8)$$

## 2.3 Realizace

Algoritmus analýzy jednoduchých tónů na průběhy okamžitých frekvencí a amplitud harmonických složek je realizován v prostředí Matlab - aplikace *HM* s uživatelským prostředím.

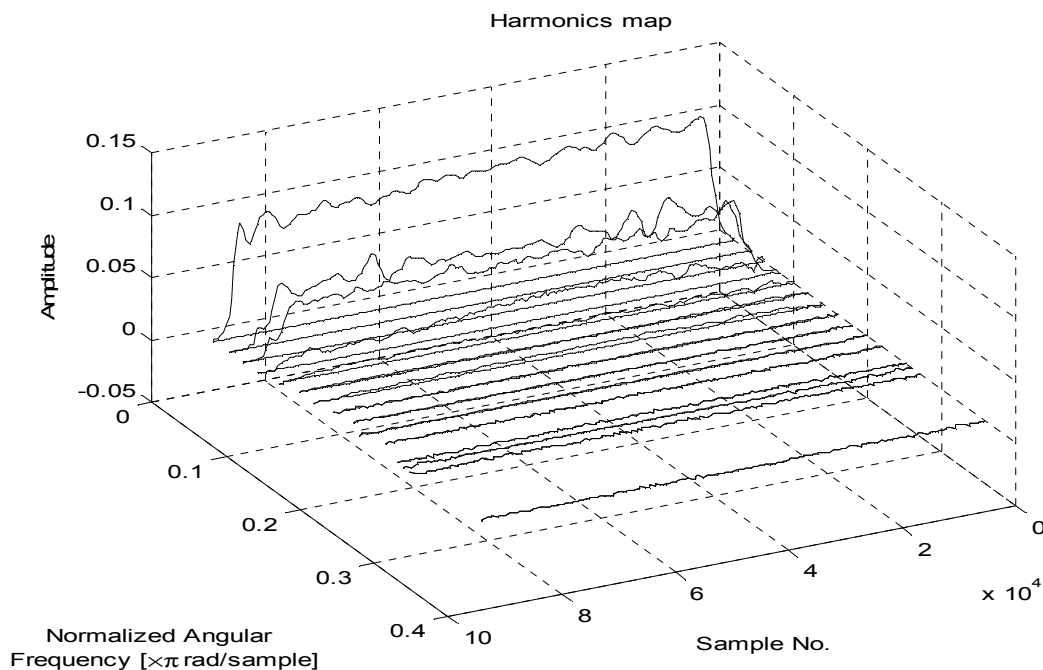


Obr. 2.2 Okno aplikace *HM* se zobrazeným spektrogramem analyzovaného tónu.

V levé části okna jsou umístěny všechny ovládací prvky, které slouží k nastavování parametrů, spouštění výpočtů a zobrazování výsledků a dílčích výsledků.

## 2.4 Výsledky

Výsledkem harmonické analýzy jednoduchého tónu je harmonická mapa. V rámci této práce byly vytvořeny harmonické mapy pro více než 500 jednoduchých tónů, které jsou uloženy v databázi analyzovaných tónů (viz. následující kapitola).



Obr. 2.3 Harmonická mapa tónu flétny - tón C3. Je patrné mírné tremolo - kolísání amplitud všech harmonických složek.

### *Zpětná syntéza analyzovaného tónu*

Tón lze zpětně syntetizován pomocí informací obsažených v harmonické mapě, tedy z průběhů okamžitých hodnot amplitud  $a$  a frekvencí  $f$  jednotlivých harmonických složek. Úzkopásmový signál  $x$ , který vyjadřuje časový průběh jedné harmonické složky, se získá amplitudovou a frekvenční modulací harmonického signálu podle  $x$  a  $f$ . Součtem všech časových průběhů jednotlivých harmonických složek vzejde výsledný syntetizovaný signál  $s$ .

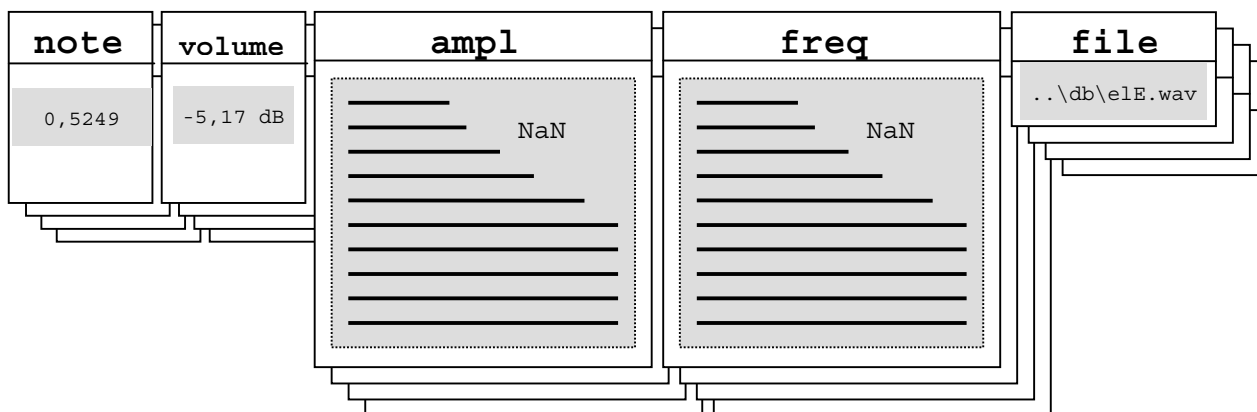
## 3. DATABÁZE ANALYZOVANÝCH TÓNŮ

Databáze analyzovaných tónů obsahuje průběhy okamžitých hodnot amplitudy a frekvencí harmonických složek jednoduchých tónů analyzovaných pomocí algoritmu a programu popsanych v předešlé kapitole. Databáze obsahuje analyzované tóny různých hudebních nástrojů, tóny stejného nástroje v různých výškách (polohách) v rámci celého rozsahu daného hudebního nástroje a tóny stejného nástroje a stejné výšky, ale různých hlasitostí. Tato databáze posloužila

ke hledání závislostí mezi průběhy harmonických složek a k hledání vlivů výšky a hlasitosti tónu na tyto závislosti. Především tato databáze bude sloužit jako vzorová znalostní banka při doplňování ztracených vyšších harmonických složek.

### 3.1 Struktura databáze

Pro každý nástroj se v prostředí Matlab<sup>®</sup> vytvoří jedna proměnná, která bude obsahovat podle výšky tónu seřazené položky. Každá položka má jednotný tvar struktury, ve které jsou uloženy všechny hodnoty vzniklé při analýze jednoho tónu.



Obr. 3.1 Databázová struktura uvnitř jedné proměnné

### 3.2 Úspora dat

Jednoduchým výpočtem tónů lze odhadnout datový objem databáze analyzovaných tónů. Jeden nástroj by zabíral více než 400 MB. Při další práci s takovouto databází, především při častém vyhledávání v ní, by nastaly velké problémy.

Pan Stephan McAdams působící na známém institutu IRCAM (Institut de Recherche et de Coordination Acoustique/Musique) v Paříži spolu s kolektivem uskutečnil v roce 1997 zajímavý pokus, který měl prověřit vliv různých zjednodušení průběhů okamžitých hodnot amplitud a frekvencí harmonických složek na vnímání posluchače [31]. Ze závěrů vyplývá, že poměrně velký stupeň zjednodušení není lidskému uchu postřehnutelný. Oblast nástupu tónu (attach) je na zjednodušení citlivější než oblast znění tónu (sustain).

V této práci nebyla parametrizace průběhů harmonických složek uplatněna a proto jejich zjednodušení je uskutečněno jen vyhlazením a následnou decimací. Na základě experimentů byl decimační poměr uplatněný na průběhy okamžitých amplitud a okamžitých frekvencí harmonických složek stanoven pro veškerou další práci na 1:500 při vzorkovací frekvenci 44100 Hz. Tento decimační poměr ještě nepoškodí výrazně charakteristiky tónu a přitom je již dostatečný pro vyžadovanou úsporu dat.

### 3.3 Realizace

V rámci této práce je vytvořena jen omezená databáze několika nástrojů, která poslouží ke zpracování hudby, v níž hrají pouze tyto nástroje. Na této databázi je ukázán způsob, jakým vytvořit případné jiné databáze pro hudbu hranou jinými nástroji nebo dokonce kompletní databázi všech nástrojů pro profesionální využití.

Vzniklá databáze obsahuje 549 analyzovaných tónů od 5 různých nástrojů. Tóny jsou sdruženy do 49 databázových. Její datový obsah je 74MB.

## 4. HARMONICKÁ ANALÝZA KONTINUÁLNÍ HUDBY

V části 2 se za účelem získání průběhů okamžitých hodnot amplitud a frekvencí harmonických složek analyzují jednoduché izolované tóny hudebních nástrojů. V této kapitole se pro stejný výsledek analyzuje hudba, v níž hraje postupně více tónů, více tónů současně (akordy) a dokonce i více nástrojů současně (polyfonní hudba).

### 4.1 Známá řešení

Nejstarší ze známých řešení podobných problémů je článek [33] pánů Rifea a Boorstyna z Polytechnického institutu v New Yorku z roku 1976. Tato práce je prací velmi teoretickou, zabývající se stanovením parametrů čistě harmonických signálů znějících na pozadí bílého šumu a hranicemi přesnosti tohoto stanovení při daných šumových podmínkách.

Velice pozoruhodnou prací je práce [27] japonských autorů Katayose a Inokuchiho z University v Osace (ústavu Řízení) z roku . Prvním krokem vyčlenění jednotlivých harmonických složek všech nástrojů a tónů z daného úseku hudby a určení jejich některých parametrů. K vyhledání harmonických složek je použito komplexní FFT spektrum. Získaná mapa harmonických složek je pak použita pro (překvapivě úspěšný) přepis hudby do notového zápisu a pro reprodukci virtuózního podání hudby, pro které jsou z analyzované hudby získány informace, které nejsou obsaženy v notovém zápisu.

Pan Fancourt jako svoji Ph.D. práci na Universitě na Floridě v neuro-inženýrské laboratoři představil systém, který dokáže automaticky segmentovat obecný signál skládající se z kvazistacionárních úseků a zároveň při tom každý úsek analyzovat [17]. Systém se skládá z několika soutěžících PCA (Principal Component Analysis) bloků. Nevýhodou tohoto systému je, že je třeba tolik PCA bloků, kolik segmentů hudba obsahuje.

Autoři Sethares a Staley z USA publikovali na konci roku 1999 algoritmus Periodicity Transform [34]. Je to exaktně matematicky odvozený algoritmus, který dokáže signál vzniklý sečtením různých periodických signálů obecného (ale periodického) průběhu rozložit zpět na jednotlivé periodické sekvence. Nabízí se možnost využít tento algoritmus k rozkladu jednoho segmentu hudby na jednotlivé tóny v segmentu znějící. Každý tón představuje totiž v dostatečně krátkém úseku

kvaziperiodický signál. Takto by se rozdělila hudba na jednotlivé tóny, ty by se potom analyzovaly na průběhy okamžitých hodnot harmonických složek stejně jako jednoduché izolované tóny. Periodicity Transform předpokládá, že délky period jednotlivých příspěvkových signálů jsou celočíselné (při vyjádření ve vzorcích). Jak se ukázalo, tento předpoklad, který není v hudebních signálech splněn, je velmi podstatný.

## 4.2 Postup

Navržený postup je přímým rozšířením algoritmu harmonické analýzy z jednoduchých tónů na kontinuální hudbu a bude nazýván *harmonická analýza kontinuální hudby*.

V kontinuální hudbě se spektrální obsah mění s každou nově znějící notou, proto je třeba signál hudby zpracovávat po úsecích. V každém úseku se může použít stejná harmonická analýza jako pro jednoduché tóny a následně napojit harmonické složky znějící přes více úseků.

### 4.2.1 Segmentace

Úkolem segmentace je rozdělit hudební signál na takové úseky, v nichž je neměnný spektrální obsah.

Jednou možností je rozdělit signál v těch místech, kde začíná znít každý nový tón nebo nový akord. Bylo by třeba použít některý z algoritmů pro segmentaci signálu na kvazistacionární úseky [32], [16], [15]. Spolehlivost těchto algoritmů však je diskutabilní a hlubší testování a potřebné úpravy těchto algoritmů přesahující rámec této práce.

Druhou možností je použít segmentaci na stejně dlouhé úseky, jejichž délka je natolik krátká, aby nedocházelo k rámci trvání jednoho úseku k velkým změnám ve spektru a zároveň natolik dlouhá, aby umožňovala dostatečně přesnou spektrální analýzu segmentu. Pro lepší splnění obou protichůdných požadavků je navíc použito 50% překrývání segmentů. Délka segmentu je jedním z parametrů algoritmu.

### 4.2.2 Harmonická analýza segmentu

Polyfonní hudba může obsahovat daleko více harmonických složek než jednoduchý tón, harmonické složky různých tónů mohou být frekvenčně velice blízko. Analýza takové hudby zdánlivě vyžaduje rozeznání většího počtu harmonických složek v hudbě a tedy i vyšší řád autokorelační matice a s tím související mnohonásobně větší výpočetní náročnost. V této práci se ovšem jedná o analýzu hudby po ztrátě vysokofrekvenčních složek, tedy počet harmonických složek zůstává porovnatelný s počtem harmonických složek ve frekvenčně neomezeném jednoduchém tónu. Proto je algoritmus harmonické analýzy jednoduchého tónu úspěšně aplikovatelný i zde.

### 4.2.3 Navázání segmentů

Navázání harmonických složek mezi následujícími segmenty je založeno na porovnávání středních frekvencí harmonických složek. Cílem je získat množinu označovanou jako harmonická mapa  $HM$  všech harmonických složek nalezených v signálu kontinuální hudby. Každý prvek množiny  $HM$  obsahuje strukturu informací:

- čas začátku znění harmonické složky
- decimovaný průběh hodnot okamžité amplitudy harmonické složky
- decimovaný průběh hodnot okamžité frekvence harmonické složky

### 4.3 Realizace a výsledky

Popsaný algoritmus je realizován v matlabovské aplikaci HM3, ve která slouží k realizaci celého algoritmu obnovení ztracených vysokofrekvenčních složek v hudbě a harmonická analýza kontinuální hudby je jeho první částí. Aplikace HM3 je popsána a výsledky ukázány v následující kapitole v části 5.3.

## 5. VYHLEDÁNÍ JEDNOTLIVÝCH TÓNŮ V HUDBĚ A OBNOVENÍ JEJICH VYSOKOFREKVENČNÍCH SLOŽEK

V předcházejících kapitolách byl vyřešen způsob, jak zvuky hudebních nástrojů tvořené souzněním jednotlivých harmonických složek vyjádřit pomocí zjednodušených průběhů okamžitých frekvencí a amplitud každé harmonické složky. V tomto vyjádření jsou obsaženy nejdůležitější informace z hlediska lidského vnímání hudebních zvuků. Analýza byla uskutečněna pro jednoduché izolované tóny i pro kontinuální polyfonní hudbu. Porovnáváním výsledků analyzované kontinuální hudby se stejně analyzovanými jednoduchými vzorovými tóny je možné nalézt v hudbě jednotlivé tóny.

### 5.1 Míra podobnosti harmonických složek

Harmonická složka, nebo její úsek, je dána dvěma průběhy – průběhem okamžité frekvence a okamžité amplitudy – které je třeba brát v úvahu současně. Zavedme komplexní signál  $\gamma$ , jehož např. reálnou složku tvoří průběh okamžitého kmitočtu  $\mathbf{f}$  a imaginární složku průběh okamžité amplitudy  $\mathbf{a}$ .

$$\gamma = w_f \mathbf{f} + j w_a \mathbf{a}, \quad (5.1)$$

kde  $w_f$  je váha frekvence a  $w_a$  váha amplitudy.

Definujme střední kvadratickou vzdálenost mezi harmonickou složkou získanou analýzou hudby  $\gamma_i$  a harmonickou složkou získanou analýzou jednoduchého tónu (vzoru)  $\gamma_v$  závislou na vzájemném posunutí harmonických složek  $m$

$$msd_{\gamma_i \gamma_v}(m) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |\gamma_i(n) - \gamma_v(n-m)|^2 \quad (5.2)$$

Tato veličina bude dále používána pro vyjádření míry podobnosti dvou harmonických složek. Zjištěním nejmenší hodnoty mezi prvky vektoru  $msd_{\gamma_i \gamma_v}$  se získá hodnota vzdálenosti mezi testovanými harmonickými složkami, která rozhodne o podobnosti či nepodobnosti složek, a také hodnota posunutí  $m$ , při kterém k této podobnosti dochází.

## 5.2 Hledání tónů

### 5.2.1 Rozpoznání tónů v hudbě

Množinu všech harmonických složek analyzované hudby je možno rozdělit na podmnožiny, které obsahují harmonické složky jednotlivých tónů, a jen tyto podmnožiny pak zvlášť porovnávat s vhodnými vzory pro zjištění, o jaký tón se jedná. Rozdělení množiny harmonických složek je založeno na dvou myšlenkách:

- harmonické složky patřící jednomu tónu nebo akordu mají přibližně shodný okamžik začátku znění,
- kmitočty harmonických složek patřících jednomu tónu v akordu tvoří přibližně aritmetickou posloupnost (celočíselné násobky základní frekvence tónu).

### 5.2.2 Přiřazení nástrojů nalezeným tónům

Po rozdělení hudby na tóny nebo akordy podle jejich začátků a po rozložení akordů na jednotlivé tóny je vstupem do další části algoritmu množina všech rozpoznávaných tónů z hudby. Jeden tón je reprezentován sadou průběhů okamžitých amplitud a frekvencí harmonických složek. Stejným způsobem jsou uloženy i vzory všech tónů v databázi vzorů. Je třeba ke každému tónu najít nejbližší vzor z databáze.

Přiřazení nástrojů nalezeným tónům se děje v několika krocích:

#### *Stanovení nejlepšího vzoru z jedné databázové proměnné.*

V jedné databázové proměnné jsou obvykle uloženy vzorové tóny v rozsahu asi jedné oktávy. Z těchto tónů lze spolehlivě vybrat nejbližší vzor k nalezenému tónu z hudby jen s uvažováním středních hodnot frekvencí harmonických složek tónu a vzoru, bez uvažování celých průběhů harmonických složek.

#### *Stanovení vzájemného posunutí vzoru a tónu na časové ose.*

Okamžik začátku znění tónu (attach) je charakteristický prudkým vzestupem amplitudy obálky tónu. Stejně tak se prudký vzestup projeví na okamžité amplitudě každé harmonické složky tónu. Toto místo lze nalézt pro každou harmonickou



složku jak vzoru tak tónu z hudby, jako pozice maxima první derivace (v diskrétním případě difference) průběhu okamžité amplitudy harmonické složky.

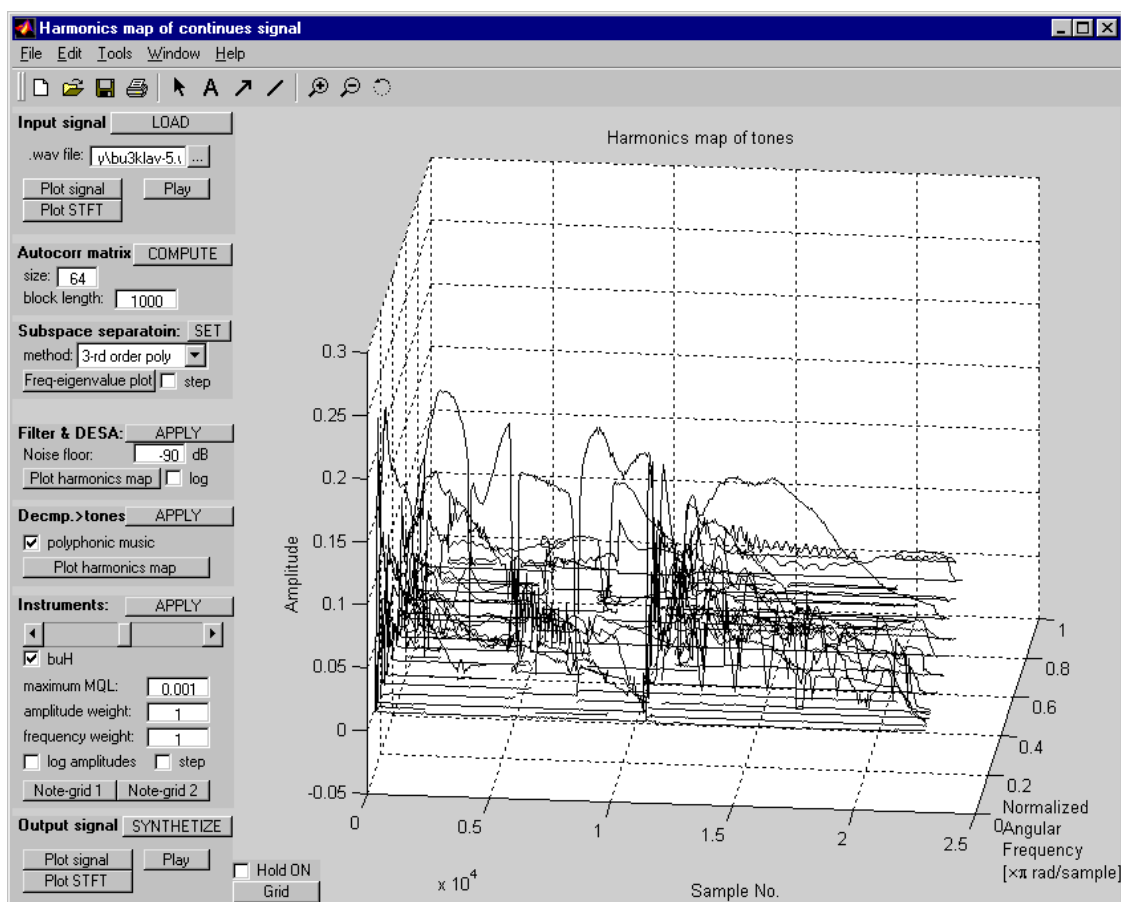
### *Stanovení zesílení vzoru.*

Stanovení takového zesílení vzoru, aby vzdálenost vzoru od tónu byla nejmenší, se děje hledáním nejmenší hodnoty vzdálenosti tónu a vzoru při různých hodnotách zesílení v intervalu od  $10^{-1}$  do 10 logaritmičtě rozděleném na 50 kroků.

Po těchto krocích je k dispozici přesná varianta nejbližšího vzoru z jedné databázové proměnné a hodnota vzdálenosti této varianty vzoru od tónu. Po opakování těchto tří kroků na daném tónu přes všechny nabízené databázové proměnné, porovnáním získaných hodnot vzdáleností vzorů od tónu a vybráním nejmenší je určena nejbližší varianta vzoru k danému tónu –

- o který vzor a ze které databázové proměnné se jedná,
- jaké je jeho časové posunutí vůči tónu a
- při jakém zesílení má k tónu nejmenší vzdálenost.

Toto jsou postačující informace k vygenerování ztracených harmonických složek tónu podle vyšších harmonických složek takto upřesněného vzoru.



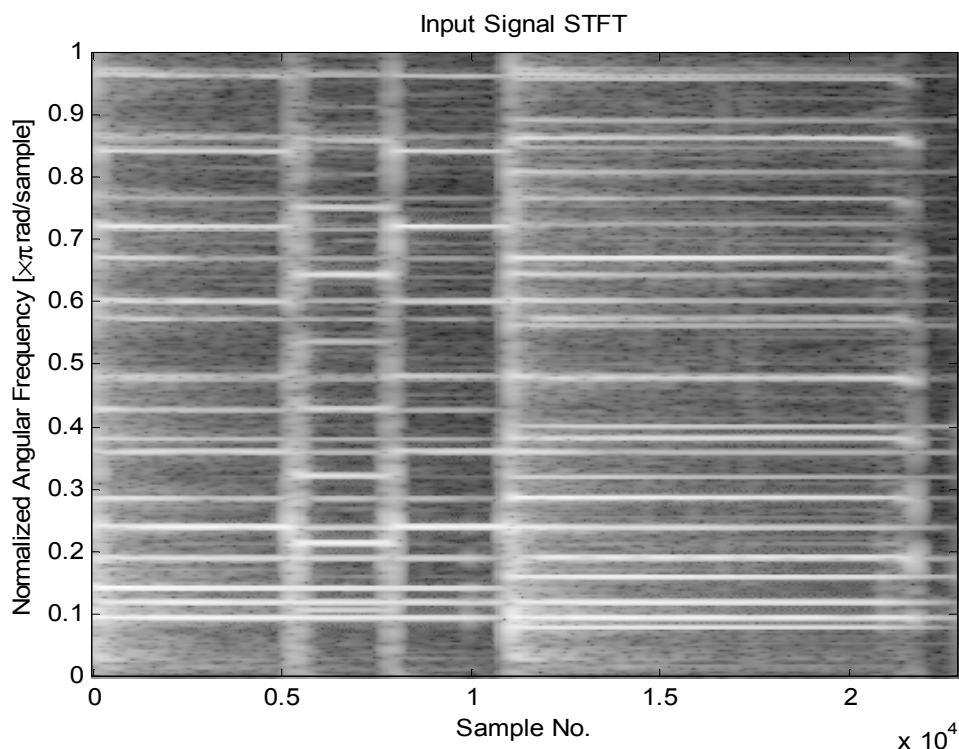
Obr. 5.1 Okna aplikace *HM3* se zobrazenou harmonickou mapou hudby.

### 5.3 Realizace

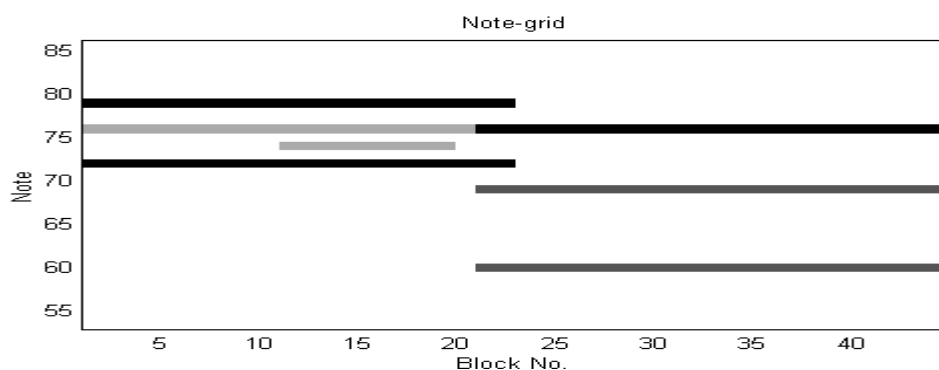
Algoritmus analýzy kontinuální hudby na průběhy okamžitých frekvencí a amplitud harmonických složek všech tónů je realizován v prostředí Matlab.

### 5.4 Výsledky

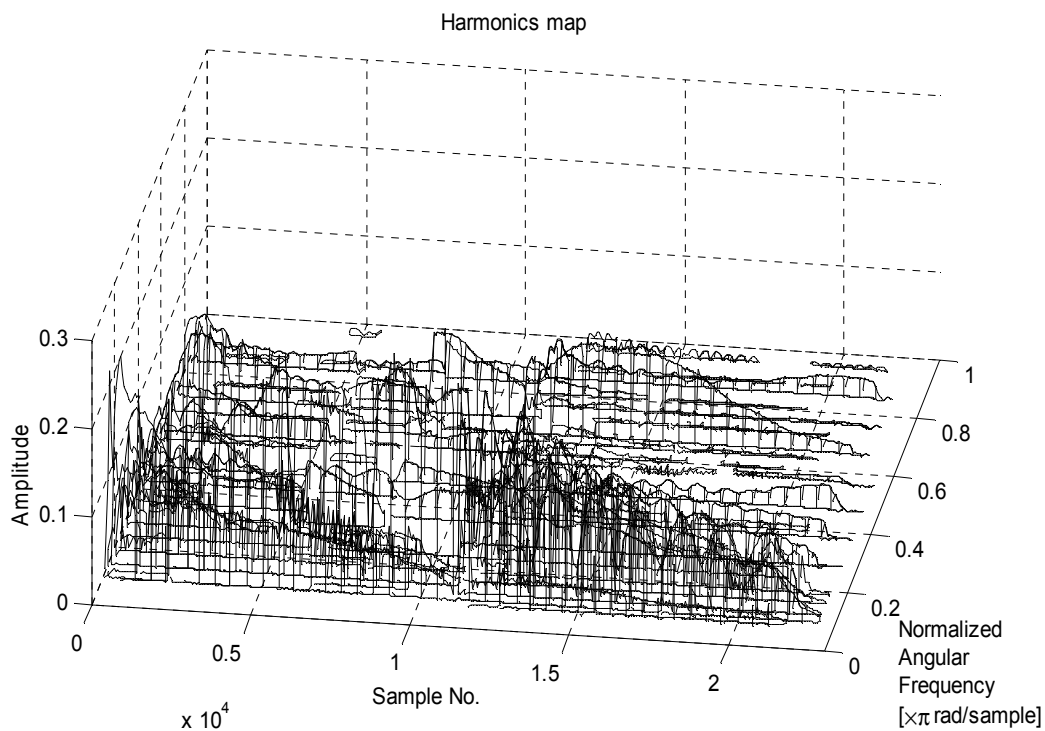
Krátká ukázka polyfonní hudby v níž třítónové akordy klavíru doprovází melodii hranou na elektrickou kytarou. Nejsou správně rozeznány tóny z různých nástrojů, které hrají unisono, ale jen dominantnější z nich. Všechny ostatní tóny jsou rozpoznány zcela správně a přiřazeny ke správným nástrojům. Akordy jsou správně rozděleny na jednotlivé tóny. Výsledný signál zní zcela přirozeně velmi blízce originálnímu signálu.



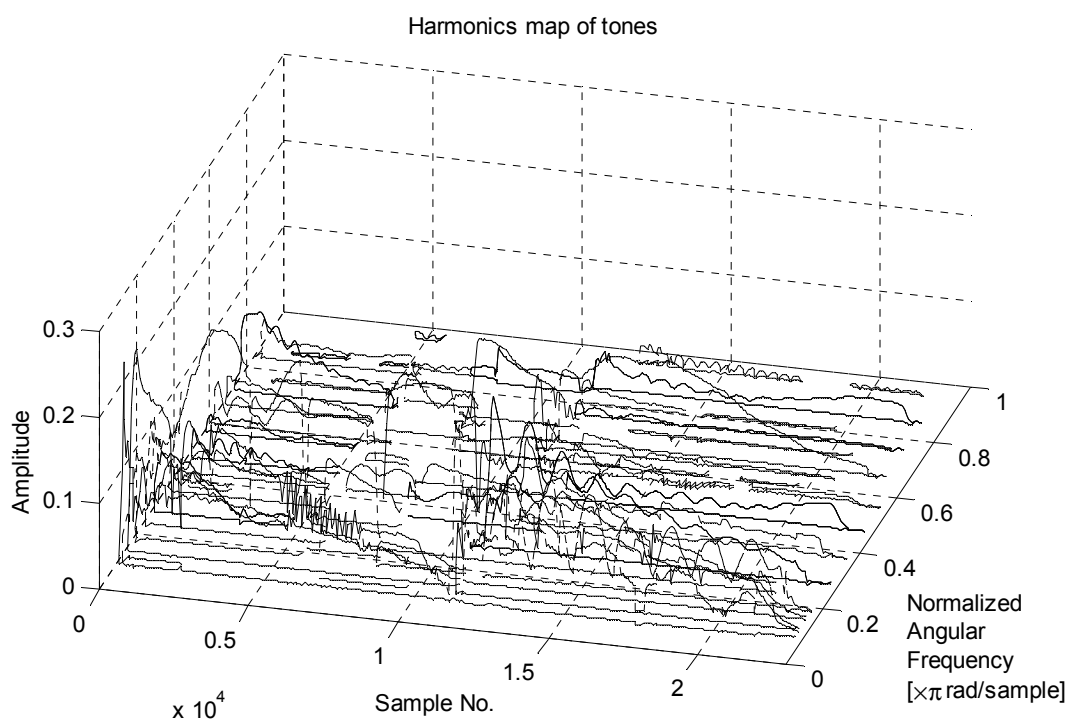
Obr. 5.2 Ukázka: spektrogram frekvenčně omezeného signálu.



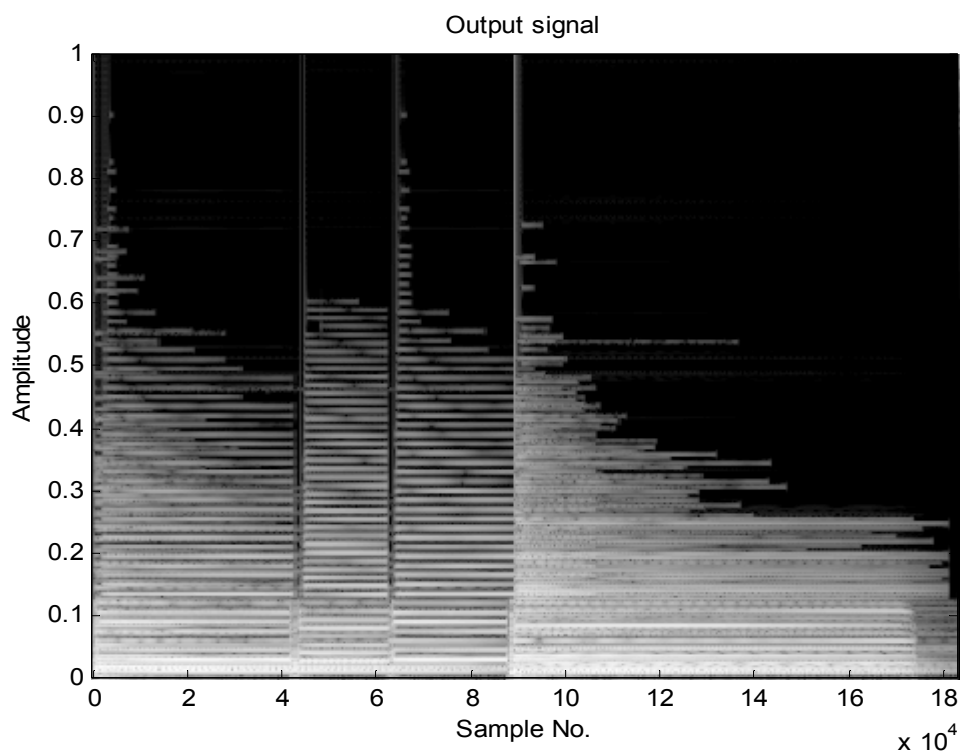
Obr. 5.3 Ukázka: časově-půltónový rastr rozpoznaných tónů.



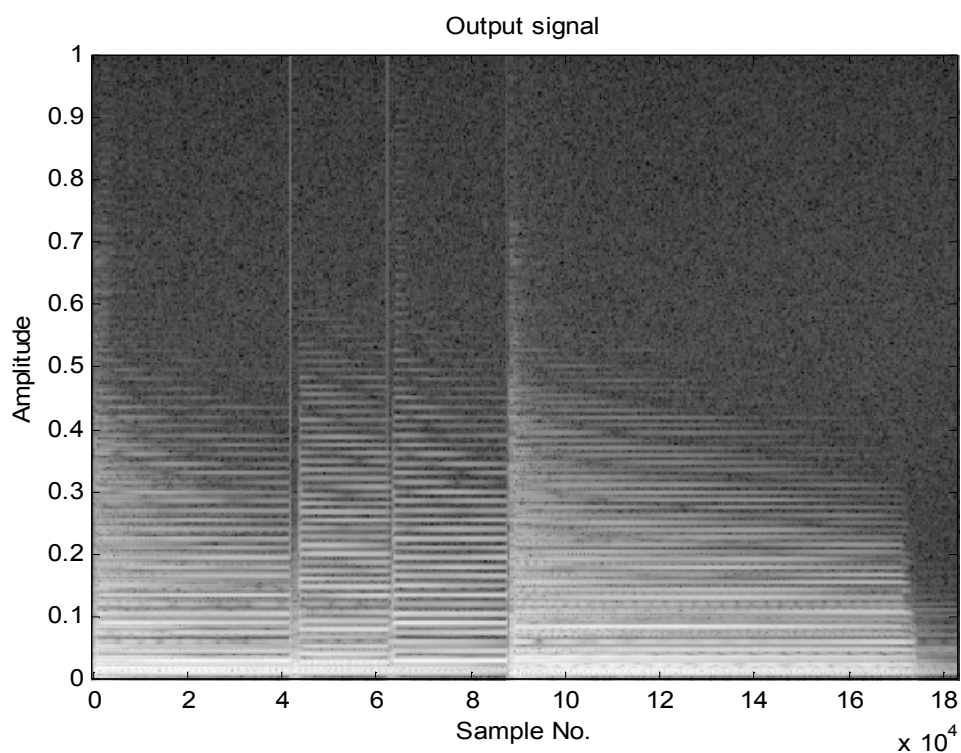
Obr. 5.4 Ukázka: harmonická mapa po blokovém zpracování signálu.



Obr. 5.5 Ukázka: harmonická mapa po navázání harmonických složek mezi bloky a rozeznání jednotlivých tónů.



Obr. 5.6 Ukázka: spektrogram syntetizovaného signálu s doplněnými vysokofrekvenčními složkami.



Obr. 5.7 Ukázka: spektrogram originálního signálu před ztrátou vysokofrekvenčních složek.

## 6. ZÁVĚR

Téma této práce Obnovení ztracených vysokofrekvenčních složek v hudebních signálech představuje novou oblast dosud neřešenou. Stejně téma pro řečové signály již bylo několikrát řešeno, ale tato řešení vycházejí z principů specifických pro řečové signály a nejsou aplikovatelná na hudební signály.

Řešení, které je předvedené v této práci, předcházelo několik odlišných řešení od stejného autora. Na základě zkušeností z předchozích řešení byl navržen algoritmus nový, jehož realizace zahrnovala tyto kroky:

1. Vytvořit metodu analýzy jednoduchých vzorových tónů hudebních nástrojů.
2. Sestavit databázi takto analyzovaných vzorových tónů.
3. Rozšířit metodu analýzy jednoduchých tónů na analýzu kontinuální hudby.
4. Vytvořit algoritmus rozpoznání jednotlivých tónů v takto analyzované hudbě.
5. Nalézt metodu vyhledání nejbližších vzorů z databáze, která je z hlediska objemu výpočtů přijatelná, a doplnit vysokofrekvenční složky pro každý tón zvlášť.

Ad 1. Byl vytvořen spolehlivý algoritmus, který rozpozná v hudebním signálu jednoduchého tónu všechny harmonické složky, dokáže jednotlivé složky ze signálu vyčlenit a určit průběh okamžité frekvence a okamžité amplitudy každé harmonické složky.

Známé metody pro vyčlenění harmonických složek z hudebního signálu používají pro prvotní frekvenční analýzu signálu Fourierovské metody s pevným frekvenčním rastrem. V této práci byla použita metoda založená na analýze vlastních čísel autokorelační matice, která dokáže určit frekvence harmonických složek spojitě, nezávisle na jakémkoliv rastru. Na obdobné metodě je založena například PCA analýza [17]. **Novým prvkem v metodě je způsob oddělení signálového a šumového podprostoru po projekci vlastních čísel do frekvenčně-amplitudové roviny.** Tento způsob zpracování odráží vlastnosti lidského sluchu a vystihuje potřeby zpracování hudebního signálu.

K vyčlenění harmonických složek a určení průběhů jejich okamžitých hodnot amplitudy a frekvence byly použity Gaborovy filtry a algoritmus DESA-1. Obdobné řešení je již použito v [35]. **Výhodnost použití Gaborových filtrů** oproti např. filtrům z prvků vlastních vektorů autokorelační matice, **a DESA-1 algoritmu** oproti ostatním existujícím algoritmům, **byla ověřena.**

Ad 2. Vytvořenou metodou analýzy jednoduchého tónu bylo analyzováno více jak 500 tónů různých hudebních nástrojů, různých výšek a různých hlasitostí. Nahrávky vzorových tónů byly pořízeny v digitálním studiu. Výsledky analýzy všech tónů byly uloženy do databáze. **Vzniklá databáze sloužila jako znalostní banka nejen pro aplikaci obnovení ztracených vysokofrekvenčních složek, ale i pro studium vlastností harmonických složek tónů hudebních nástrojů.**

Ukázalo se, že průběhy harmonických složek tvoří jedinečnost barvy zvuku daného hudebního nástroje. Studium inharmonicity harmonických složek (odchylky frekvence od celočíselného násobku základní frekvence) se potvrdilo, že přesná analýza harmonických složek vyžaduje nezávislost na jakémkoliv frekvenčním rastru (viz. Ad. 1.). **Výsledky zpětné syntézy analyzovaných tónů ukázaly, že metoda pracuje správně, a potvrdily, že získané průběhy harmonických složek tvoří podstatnou informaci v hudbě vzhledem k lidskému vnímání zvuků.** Význam harmonických a šumových složek tónů byl diskutován.

Odhady objemu dat uložených v databázi a objemu výpočtů při používání této databáze ukázaly, že vzhledem k možnostem dnešní výpočetní techniky je nutné objemy dat redukovat. Proto se přistoupilo k decimaci průběhů okamžitých hodnot harmonických složek v poměru 1:500 při vzorkovací frekvenci 44 100 Hz.

Během práce s touto databází se potvrdilo správné navržení struktury a formátu databáze.

Ad. 3. Pro analýzu kontinuální hudby se podařilo vytvořit metodu založenou na stejných principech jako je metoda analýzy jednoduchého tónu. Signál byl zpracováván nejprve po jednotlivých blocích a výsledky analýzy jednotlivých bloků byly následně napojeny, takže **výsledek je kontinuální, zbavený možného nepříznivého vlivu segmentace.**

Ad. 4. **Metoda rozpoznání jednotlivých tónů v hudbě po předchozí analýze je zcela nová.** Ukazuje, že principy vnímání zvuků lidským sluchem lze uplatnit na hudbu analyzovanou předvedeným způsobem.

Tato metoda může být aplikována i na automatický přepis hudby do not.

Ad. 5. Byla diskutována a **vybrána vhodná míra podobnosti tónu nalezeného v analyzované hudbě a vzorového tónu z databáze.** Byl vyřešen způsob, jak **maximálně omezit počet porovnání tónů a vzorů pro stanovení nejbližšího vzoru** a tím snížit nutnou výpočetní náročnost algoritmu.

Frekvenčně omezený signál se restauroval pomocí přičtení nově vygenerovaných vysokofrekvenčních harmonických. Nové harmonické složky byly generovány jako frekvenčně a amplitudově modulované harmonické signály. Modulace je dána průběhy okamžitých hodnot amplitud a frekvencí harmonických složek vzorových tónů.

Výsledky restaurace frekvenčně omezených hudebních signálů ukázaly, že algoritmus je funkční a vychází ze správných principů. Bylo podrobně předvedeno několik výsledků algoritmu, postupně od nejjednodušších signálů ke složitějším. Algoritmus není použitelný pro hudbu z velkých orchestrů, je koncipován pro hudbu s menším nástrojovým obsazením, komorní orchestry apod. V ukázkách se objevilo několik nedostatků. Několikrát nebyl zcela přesně určen okamžik začátku znění tónu a vysokofrekvenční složky byly generovány s mírným časovým posunem, který je

uchu patrný jako pozměněný neostrý nástup znění tónu. Velký vliv na přesnost určení začátků znění tónů má decimace průběhů okamžitých hodnot harmonických složek. Zvolený poměr 1:500 se v těchto případech ukázal jako příliš velký. Poměr nelze dodatečně změnit, protože celá databáze analyzovaných tónů byla vytvořena s použitím tohoto decimačního poměru. Velikost decimace má vliv i na přesnost určení nejbližšího vzorového tónu z databáze. Přesnější informace o harmonických složkách by umožnily přesnější porovnávání. V předvedených jednoduchých ukázkách však byla přesnost porovnání se vzory dostačující.

Princip této metody neumožňuje oddělit dva stejně vysoké tóny různých nástrojů znějících současně, jejichž harmonické složky se frekvenčně překrývají. Dvě harmonické složky znějící na stejných frekvencích nelze filtrací oddělit. Vystupují jako jedna harmonická složka vzniklá jejich součtem. Pro aplikaci automatického převodu hudby do not by nemožnost oddělení dvou stejně vysokých tónů různých nástrojů byla nedostatkem, ale v algoritmu obnovení vysokofrekvenčních složek nikoli. Jako vzorový tón k součtu dvou stejně vysokých tónů různých nástrojů je nalezen tón hlasitějšího nástroje z obou tónů a ten je restaurován. Chybějící vysokofrekvenční složky slabšího z obou tónů by i při restauraci obou tónů byly zamaskovány pod vysokofrekvenčními složkami hlasitějšího tónu. Restaurovaná dvojice tónů s vysokofrekvenčními složkami jen hlasitějšího z nich má mírně jinou barvu zvuku než originální souzvuk, ale výsledek je přijatelný.

Předvedený způsob práce s hudebními signály ukázal správnost dynamického pojetí vlastností hudebního signálu. Dynamické pojetí je vyjádřeno sledováním okamžitých průběhů amplitud a frekvencí harmonických složek všech tónů. Ukázalo se, že právě tyto informace získané analýzou hudby představují nejpodstatnější informace obsažené v hudbě z hlediska lidského sluchu a s těmito informacemi je potřeba pracovat, pokud chceme, aby náš algoritmus odrážel vlastnosti lidského vnímání zvuku.

## BIBLIOGRAFIE

- [1] AVENDANO, Carlos - HERMANSKY, Hynak - WAN, Eric A. 1995. Beyond Nyquist: Towards the Recovery of Broad-Bandwidth Speech from Narrow-Bandwidth Speech. In: EUROSPEECH'95 Proceedings. 4th European Conference on Speech Communication and Technology, Madrid, September 1995: pp. 165-168. ISSN 1018-4074.
- [2] BREJL, Milan - ROZSYPAL, Petr 2000. Tón = souznění harmonických složek. In: Proceedings of the 1st Conference of Czech Student AES Section on Audio Technologies and Processing, APT'2000. Brno, May 2000: pp. 45-51. ISBN 80-214-1602-5.
- [3] BREJL, Milan – ŠEBESTA, Vladimír. 1999. Analýza zvuku hudebních nástrojů. Elektrovue - [www.elektrovue.cz](http://www.elektrovue.cz), 17.12.1999.
- [4] BREJL, Milan – ŠEBESTA, Vladimír. 1999. High Frequency Components Recovery in Music Signals. Radioengineering (8, 1) April 1999: pp. 32–33. ISSN 1210-2512.
- [5] BREJL, Milan – ŠEBESTA, Vladimír. 1999. Music Signals Listening Quality Enhancement by Recovery of Lost High Frequency Components. In: Proc. 9th International Czech-Slovak Scientific Conference Radioelektronika 99, Brno, April 1999. ISBN 80-214-1327-1.
- [6] BREJL, Milan – ŠEBESTA, Vladimír. 1999. Restaurace hudebních signálů obnovením ztracených vysokofrekvenčních složek. Elektrovue - [www.elektrovue.cz](http://www.elektrovue.cz), 12.10.1999.
- [7] BREJL, Milan – ŠEBESTA, Vladimír. 1999. Restoration of Music Signals Degraded by Frequency Limited Transmission Band. In: Proc. International Scientific Conference on Digital Signal Processing DSP'99, Herľany, Slovak Republic, September 1999: pp. 79–83. ISBN 80-88896-40-1.
- [8] BREJL, Milan - ŠEBESTA, Vladimír. 2000. Decomposition of Music to Single Tones, Instrument Affiliation and High Frequency Components Reconstruction. In: 10th International Scientific Conference Radioelektronika 2000. Slovak Republic, Bratislava, September 2000: pp. III-68 - III-71. ISBN 80-227-1389-9.
- [9] BREJL, Milan - ŠEBESTA, Vladimír. 2000. High Frequency Music Components Reconstruction Based on Music Signal Decomposition into Single Tones. In: Applied Electronics 2000 Conference Proceedings. Plzeň, September 2000: pp. 35-38. ISBN 80-7082-650-9.
- [10] BREJL, Milan. 1996. Restoration of Local Degradations in Audio Signals, Radioengineering, September 1996, Vol. 5, No. 3, pp. 6–8, ISSN 1210-2512.
- [11] BREJL, Milan. 1997. Potlačení impulsového rušení akustického signálu. Diplomová práce. FEI VUT v Brně, 1997.
- [12] BREJL, Milan. 1999. Restoration of Music Signals After a Lost of High Frequency Components. Sborník prací studentů a doktorandů FEI VUT, FEI VUT Brno, 1999: pp.137–138, ISBN 80-214-1155-4.



- [13] BREJL, Milan. 2000. Vyšší harmonické složky. Sborník prací studentů a doktorandů FEI VUT, FEI VUT Brno, 2000: pp.316–319. ISBN 80-7204-115-X.
- [14] CASEGHI, S. V. 1996. Advanced Signal Processing and Digital Noise Reduction. 1996, John Wiley & Sons Ltd. ISBN 0 471 95875 1, Teubner, ISBN 3 519 06451 0.
- [15] FANCOURT, C. L. - PRINCIPE, J. C. 1996. A Neighborhood Map of Competing One Step Predictors for Piecewise Segmentasation and Identification of Time Series. In: ICNN'96 Proceedings, Vol. 4, 1996: pp. 1906-1911.
- [16] FANCOURT, C. L. - PRINCIPE, J. C. 1997. Temporal Self-Organization Through Competitive Prediction. In: ICASSP'97 Proceedings, Vol. 4, 1997: pp. 3325-3328.
- [17] FANCOURT, C. L. - PRINCIPE, J. C. 1998. Competitive Principal Component Analysis for Locally Stationary Time Series. IEEE Transaction On Signal Processing, Vol. 49, No. 11, November 1998: pp. 3068-3081.
- [18] FERTIG, L. B. – McCLELLANS, J. H. 1996. Instantaneous Frequency Estimation Using Linear Prediction with Comparison to the DESAs, *IEEE Signal Processing Letters*, Vol. 3, No. 2., February 1996: pp. 54-56.
- [19] GADE, Svend - GRAM-\*HANSEN, Klaus, 1997. The Analysis of Nonstationary Signals. Sound And Vibration. January 1997: pp. 40-46. ISSN 0038-1810.
- [20] GALEMBO, Alexander – ASKENFELT, Anders. 1999. Signal Representation and Estimation of Spectral Parameters by Inharmonic Comb Filters with Application to the Piano. IEEE Transactions On Speech and Audio Processing (7, 2) March 1999: pp. 197–203.
- [21] GODSHILL, Simon J. - RAYNER, Peter J. W. 1995. A Bayesian Approach to the Restoration of Degraded Audio Signals. *IEEE Transactions on Speech And Audio Processing*, Vol. 3, No. 4, July 1995: pp. 267-278.
- [22] GOH, Zenton - TAN, Kah Chye - TAN, B. T. G. 1998. Postprocessing Method for Suppressing Musical Noise Generated by Spectral Subtraction. IEEE Transactions On Speech and Audio Processing, Vol. 6, No. 3, October 1998: pp. 287-292.
- [23] GUSTAFSSON, Fredrik 1996. Determining the Initial States in Forward-Backward Filtering, IEEE Transactions on Signal Processing, Vol. 44, No. 4., April 1996: pp. 988-992.
- [24] CHENG, Yan Ming - O'SHAUGHNESSY, Douglas - MERMELSTEIN, Paul. 1994. Statistical Recovery of Wideband Speech from Narrowband Speech. IEEE Transactions On Speech and Audio Processing, Vol. 2, No. 4, October 1994: pp. 544-548.
- [25] JOLLIFFE, I. 1986. Principal Component Analysis. New-York: Springer-Verlag, 1986.

- [26] KAHRS, Mark – BRANDENBURG, Karlheinz. 1998. Application of Digital Signal Processing to Audio and Acoustics. Kluwer Academic Publishers, ISBN 0-7923-8130-0.
- [27] KATAYOSE, Haruhiro - INOKUCHI, Seiji. 1989. The Kanasei Music System. Computer Music Journal, Vol. 13, No. 4, Winter 1989: 72-77.
- [28] KOCÚR, Dušan - ZETÍK, Rudolf, 1999. Wigner Distribution, Spektrogram and L-Wigner Distributiion. In: Proc. 9th International Czech-Slovak Scientific Conference Radioelektronika 99, Brno, April 1999. ISBN 80-214-1327-1.
- [29] KUO, Sen M. - TAHERNEZHADI, Mansour - JI, Li. 1997. Frequency-Domain Periodic Active Noise Control and Equalization. IEEE Transactions On Audio Processing, Vol. 5, No. 4, July 1997: pp. 348-358.
- [30] MARAGOS, Petros – KAISER, James F., – QUATIERI, Thomas F. 1992. On Separation Amplitude from Frequency Modulation Using Energy Separation. . In: Proc. International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1992: Vol. 2 pp. 1-4.
- [31] McADAMS, Stephen – BEAUCHAMP, James W. – MENEGUZZI, Suzzana. 1999. Discrimination of musical instrument sounds resynthesized with simplified spectrotemporal parameters, J. Acoust. Soc. Am. 105 (2), February 1999: pp. 882-897.
- [32] RAPHAEL, Christopher. 1999. Automatic Segmentation of Acoustic Musical Signal Using Markov Models. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 21, No. 4, April 1999: pp. 360-370.
- [33] RIFE, D.C. - BOORSTYN, R. R. 1976. Multiple Tone Parameter Estimation From Discrete-Time Observations. The Bell System Technical Journal, Vol. 55, No. 9, November 1976.
- [34] SETHARES, William A. - STALEY, Thomas W. 1999. Periodicity Transforms. IEEE Transactions od Signal Processing, Vol. 47, No. 11, November 1999: 2953-2964.
- [35] SUSSMANN, Robert B. – KAHRS, Mark. 1996. Analysis and Resynthesis of Musical Instrument Sounds using Energy Separation. In: Proc. International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Atlanta, Geogria, USA, 1996: Vol. 2 pp. 997-1000.
- [36] SZEGÖ, G. 1920. Beiträge zur theorie det Toeplitzchen formen. Math. Zeitschr., Vol. 6, 1920: pp. 167-202.
- [37] The Digital Signal Processing Handbook, editors: Vijay K. Madisetti, Douglas B. Williams, IEEE Press & CRC Press, 1998, ISBN 0-8493-8572-5.
- [38] TSUI, James. 1995. Digital Techniques for Wideband Recievers. Boston MA, Artech House, Inc. ISBN 0-89006-808-9: pp. 379-439.

# CURRICULUM VITAE

## Ing. Milan Brejl

Kulturní 1766, 756 61 Rožnov p.Radh., Czech Republic

E-mail: milan.brejl@motorola.com

### PROFILE

Extensive experience in digital signal processing. Strong analytical, academic, and learning skills. Independent, achievement oriented. Additional experience includes design and development of database applications.

### EDUCATION

- Ph.D. candidate, November 2000  
Brno University of Technology, Czech Republic  
Institute of Radio Electronics  
GPA: 1.00
- Engineer (M.S.), June 1997  
University of Technology, Czech Republic  
Department of Electrical Engineering and Computer Science  
GPA: 1.19  
Thesis subject: "Suppression of Impulse Interference in Audio Signals"
- Grammar school, June 1992  
Tř. Kpt. Jaroše, Brno - #1 school in the region  
Class with extended education in mathematics and physics

### PROFESSIONAL EXPERIENCES

**Motorola, s.r.o** (2000-present)

*Motorola Czech System Laboratories - System Application Engineer, software*

Member of the motor control and simulations development team.

**Brno University of Technology, Czech Republic** (1997-2000)

**Research areas:**

- Digital signal processing, signal restoration, lost samples replacement, impulse noise removing, noise suppression, spectrum analysis, archive recordings restoration, audio signal enhancement.

**Research projects:**

- "Signal Processing Laboratory", granted by Ministry of Education of the Czech Republic.

Performed independent research and participated in the projects of the Signal Processing Laboratory research team.

- "Degraded Signals Restoration And Its Application in Automatic Speaker Verification", granted by Brno University of Technology.

Member of the research team working on signal restoration methods suitable for consequential speaker verification

- "Signal Spectrum Reconstruction in The High-Frequency Band", granted by Department of Electrical Engineering and Computer Science, Brno University of Technology.

Initiated and independently led research resulting in the thesis project.

### ***Teaching:***

Taught advanced undergraduate level courses "Systems and Signals" and "Electronic Circuits Theory".

### **Personal consulting business**

(1995-1999)

Database design and development; software engineering.

## **LANGUAGE ABILITIES**

Czech: Native language

English: Excellent reading, good oral and written skills

Russian: Good reading, fair oral and written skills

German: Fair oral, reading and written skills

## **COMPUTER SKILLS**

Computer Languages: Delphi, Pascal, C, Visual Basic, HTML, JavaScript, Perl,

Database Systems: Interbase SQL, MS Access, Paradox, dBase

Other: Matlab, MS-Word, MS-Excel, graphic design systems, etc.

## **HONORS**

- Graduated with First Honors (1997)
- The Dean's award for excellent thesis on the subject "Suppression of Impulse Interference in Audio Signals" (1997)
- Award of the Chair of the Department for outstanding academic performance (1997)
- Received Brno University of Technology Scholarship (1993-1997)
- 2<sup>nd</sup> place in nation-wide competition in physics (1988)