

Ondřej Moravec

Metodika analýzy šumových složek zvuků hudebních nástrojů

In the example of violin tone the process of analysis of noise components in musical instrument sound is presented. Specific problems relating to signal acquisition and processing with respect to a combination of a high level (tone) and low level (noise) components of a musical signal are described. Two basic tone + noise models are presented. There is also discussion of methods used for separating individual signal components and for a separate analysis of these components.

1. ÚVOD

Tón hudebních nástrojů obsahuje značné množství tzv. tónových složek, většinou harmonických, často amplitudově a kmitočtově modulovaných. Kromě těchto složek jsou součástí hudebního signálu též šumové složky, které mohou mít výrazný vliv na barvu zvuku a výslednou kvalitu jeho vnímání. Zaměříme-li se při analýze na šumové složky tónu, pak velký poměr mezi amplitudami tónových a šumových složek přináší specifické požadavky na způsob záznamu, uchování a zpracování zvuku hudebního nástroje. Na příkladu analýzy šumu tónu houslí jsou popsány tyto specifické problémy a uvedeny některé způsoby jejich řešení.

2. METODA

2.1. Záznam signálu

Pro účely analýzy šumových složek hudebních nástrojů byly použity záznamy signálu snímané v bezodrazové místnosti, která umožňuje vyloučit vliv akustiky prostoru, tj. odrazů a dozvuku. Bezodrazová místnost HAMU vyhovuje požadavkům normy ČSN ISO 3745 od kmitočtu 125 Hz. Způsob záznamu signálů je popsán v příspěvku [1].

Značnou pozornost bylo nutno věnovat velikosti hlukového pozadí při měření, které má vliv zejména na nízkourovňové složky snímaného signálu a na průběh zaznamenaného signálu v oblasti doznívání. Hlukové pozadí, které se při měření vyskytovalo, bylo způsobeno převážně přenosem energie stavební konstrukcí budovy. V hlukovém pozadí lze identifikovat dvě složky – stálou a náhodnou. Stálá složka hluku je způsobena obvyklým provozem v budově a jejím bezprostředním okolí. Hladina akustického tlaku této složky se v uvažovaném pásmu kmitočtů pohybovala pod 14 dB. Náhodná složka je způsobena vibracemi např. od okolo projíždějících vozidel. Dosahuje

poměrně významných hladin akustického tlaku, zaujímá však oblast velmi nízkých kmitočtů v pásmu $0 \div 15$ Hz, což umožňuje tuto složku účinně odfiltrovat. V případě opakovaných měření lze vybrat záznam, který není náhodnou složkou hlukového pozadí ovlivněn.

Kvalita záznamu signálu je zásadně ovlivněna kvalitou záznamového řetězce. Při záznamu signálů s nízkou úrovní vystupují do popředí požadavky na odolnost zařízení jako celku vůči elektromagnetickému rušení (odrušení, filtrace síťového kmitočtu) a na šumové vlastnosti jeho jednotlivých částí.

Použití šestnáctibitového číslicového záznamu signálu dává dobré předpoklady pro zajištění dostatečného dynamického rozsahu a odstupu signálu od šumu ve fázi uchování záznamu signálu.

2.2. Zpracování a analýza signálu

Zaznamenané signály jsou uloženy do souborů ve formátu WAV. Při zpracování jsou hodnoty vzorků převedeny do formátu reálných čísel s pohyblivou desetinnou čárkou. V tomto formátu probíhají veškeré výpočty, což významně snižuje vliv chyb plynoucích ze zpracování dat (zaokrouhlování, omezený číselný obor). Zpracované signály je možno převést zpět do formátu WAV.

Kmitočtové spektrum zvuku hudebního nástroje lze pro účely analýzy rozdělit podle obsahu tónových a šumových složek na tři oblasti (Obr. 1):

- subharmonické pásmo
- pásmo harmonických složek
- pásmo vysokofrekvenčních šumů

Každé z výše uvedených pásem je analyzováno samostatně za použití rozdílných analytických postupů. Jsou hledány význačné rysy chování šumových složek v jednotlivých pásmech, vzájemné vztahy mezi nimi a vztahy vůči chování harmonických složek tónu.

V dalším výkladu se omezíme na pásmo harmonických složek. Jeho analýza je nejsložitější, protože kromě harmonických obsahuje i šumové složky a je nutno hledat prostředky pro jejich oddělení. Při procesu separace můžeme použít dva základní modely vzniku tónu.

Aditivní model uvažuje tón jako prostý součet stacionárních harmonických složek $\Sigma(\cdot)$ a šumu $n(t)$, zahrnujícího všechny nestacionární děje obsažené v signálu

$$s(t) = \sum_{i=1}^n A_i e^{j\omega_i t + \varphi_i} + n(t) \quad (1)$$

Modulační model uvažuje proces vzniku tónu, při kterém jsou harmonické složky amplitudově a kmitočtově modulovány jednak záměrně - použitou technikou hry, jednak nepravidelnostmi v buzení oscilátoru nástroje

$$s(t) = \sum_{i=1}^n A_i (f_{i1}(t), f_{i2}(t)) e^{j\omega_i (g_{i1}(t), g_{i2}(t))t + \varphi_i} + n(t) \quad (2)$$

kde

$f_{i1}(t), g_{i1}(t)$ = modulační funkce určené technikou hry

$f_{i2}(t), g_{i2}(t)$ = modulační funkce určené buzením oscilátoru

Modulační model přesněji vystihuje fyzikální podstatu vzniku tónu, jeho použití při analýze je však mnohem náročnější.

Pro separaci tónových a šumových složek byla nejprve aplikována metoda McAuly-Quatieri [3]. Tato metoda je příkladem použití modulačního modelu. V první fázi jsou spočtena okamžitá kmitočtová spektra v jednotlivých časových řezech průběhu signálu a z nich jsou určeny parametry harmonických složek (amplituda, kmitočet, fáze). Ze získaných parametrů je pak resyntézou získán signál obsahující pouze harmonické. Subtrakcí resyntetizovaného signálu od signálu původního lze získat samotné šumové složky. Implementace algoritmu této metody však nedokázala změny parametrů sledovat s dostatečnou přesností a resyntetizovaný signál harmonických složek nebyl pro oddělení šumových složek z původního signálu použitelný.

Jako úspěšná se ukázala metoda separace tónových a šumových složek filtrací. Harmonické složky jsou potlačeny sadou pásmových filtrů pevně naladěných na jejich střední kmitočty získané z dlouhodobého spektra analyzovaného signálu. Filtrovaný signál obsahuje pouze meziharmonické složky, které je možno dále studovat. Při tomto způsobu separace signálu je tedy použit aditivní model tónu.

3. VÝSLEDKY

Pro účely analýzy šumových složek tónu houslí byl vybrán záznam signálu ze směru, který je považován za optimální pro snímání zvuku nástroje [2]. Osa mikrofону leží v rovině kobylky a protíná horní desku houslí ve středu mezi nožkami kobylky pod úhlem 45° od kolmice k horní desce houslí směrem k vyšším strunám houslí.

Použití metody je ilustrováno na tónu e'' hraného *mezzoforte* technikou *détaché*. Ze zaznamenaného signálu bylo vybráno pásmo harmonických složek ohraničené 1. harmonickou - 663,5 Hz a 21. harmonickou - 13 936 Hz, (Obr. 1). Výběr pásma byl proveden postupnou filtrací signálu dolní a horní propustí. Byly použity FIR filtry s lineární fází řádu $n=1600$; minimální potlačení signálu v nepropustném pásmu bylo 45 dB. Pro omezení přechodových jevů při filtraci byl použit speciální algoritmus prodloužení signálu za jeho okraje. Filtrace byla provedena na prodlouženém signálu, z filtrovaného signálu pak byl vybrán interval odpovídající původnímu signálu.

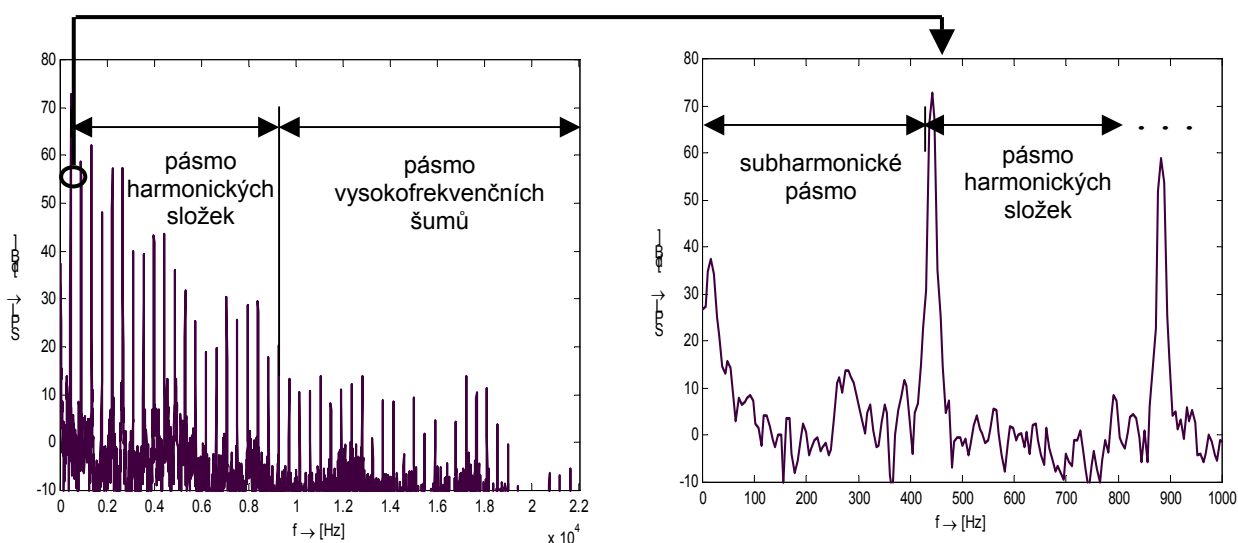
Následně byly z vybraného pásma hřebenovým filtrem separovány harmonické složky. Pro návrh FIR filtru byl použit algoritmus minimalizující střední kvadratickou odchylku mezi výslednou a navrženou charakteristikou filtru. Z praktických důvodů (doba výpočtu koeficientů filtru) byly při návrhu filtru zadány poměrně mírné požadavky - šířka nepropustných pásem 40 Hz, potlačení v nepropustných pásmech 40 dB. Byl použit filtr řádu $n=1600$. Výsledná charakteristika filtru je na Obr. 2. Pro dostatečné potlačení harmonických složek byla použita dvojí filtrace. Kmitočtové spektrum meziharmonických složek spolu s kmitočtovým spektrem původního signálu je na Obr. 3.

4. ZÁVĚR

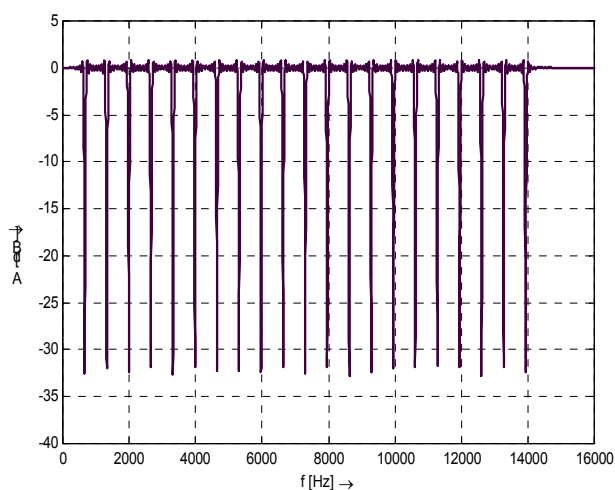
Pro analýzu šumových složek zvuku hudebního nástroje je nutno získat technicky vysoce kvalitní záznam zvuku nástroje. Důležitou podmínkou získání takového záznamu je použití záznamového řetězce s odpovídajícími parametry a vyloučení vlivů okolí.

Pro analýzu je nutno od sebe oddělit šumové složky od tónových. Separaci je možno provést např. pomocí resyntézy tónových složek a jejich následnou subtrakcí od původního signálu. Jednodušším a účinnějším způsobem separace se ukázalo potlačení tónových složek filtrací.

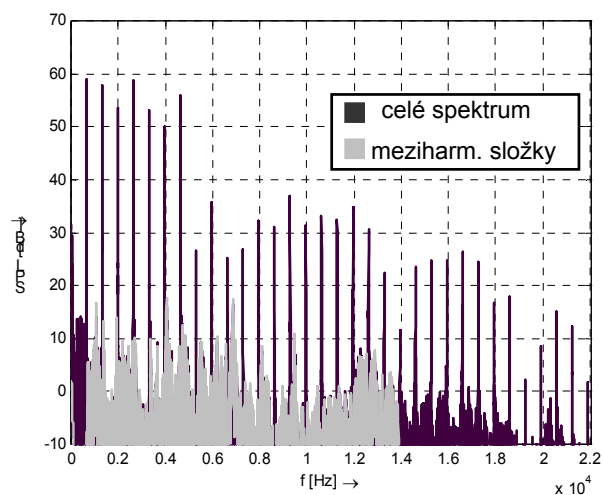
Při studiu šumových složek lze rozdělit kmitočtové spektrum na vhodně zvolená kmitočtová pásma (např. třetiny oktáv, kritická pásma) a sledovat jejich časové a spektrální vlastnosti.



Obr. 1: Rozdělení kmitočtového spektra tónu houslí pro účely analýzy šumových složek (tón a', celek a detail dolní části spektra)



Obr. 2: Kmitočtová charakteristika hřebenového filtru pro filtraci harmonických složek



Obr. 3: Spektrum tónu e" před filtrací a po filtraci (pouze meziharmonické složky)

UZNÁNÍ

Výzkum se uskutečňuje v rámci výzkumného projektu č. VS 96031, financovaného MŠMT ČR.

LITERATURA

- [1] Jakeš, V., Otčenášek, Z.: Šestnáctikanálový záznam zvuku hudebních nástrojů. *Tento sborník*
- [2] Otčenášek, Z., Srový, V.: Directivity of violin radiation. *In: Collected papers from the Joint Meeting „Berlin 99“, Berlin, 1999*
- [3] McAuly, J. R., Quatieri, T. F.: Speech Analysis/Synthesis Based on a Sinusoidal Representation. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing*, vol. ASSP-34, 1986, pp. 744 - 754