

MODELOVANJE MUZIČKIH SIGNALA U VREMENSKO-FREKVENCIJSKOM DOMENU

MUSICAL SIGNAL MODELING IN THE TIME-FREQUENCY DOMAIN

Irena Orović, Elektrotehnički fakultet Podgorica, irenao@cg.ac.yu

Darko Nikčević, Muzička Akademija Cetinje, dn@cg.yu

Nikola Žarić, Elektrotehnički fakultet Podgorica, zaric@cg.ac.yu

Srdjan Stanković, Elektrotehnički fakultet Podgorica, srdjan@cg.ac.yu

Sadržaj – U radu je predložena procedura za analizu i modelovanje muzičkih signala. Predložen je novi pristup u obradi muzičkih signala, koji kao osnovno sredstvo koristi vremensko-frekvencijsku reprezentaciju muzičkih signala. Tehnika je zasnovana na upoređivanju vremensko-frekvencijskih karakteristika tonova različitih muzičkih instrumenata, te modelovanju jednih u odnosu na druge. Za vraćanje iz vremensko-frekvencijskog domena iskorišćena je transfer funkcija vremenski-promjenljivog filtra.

Abstract – In this work, the new procedure for musical signal analysis and modeling is proposed. The new method is based on using the time-frequency signal representation for music processing. It is based on the comparison between time-frequency representations of different musical instruments tones that are used in the modeling procedure. The time-varying filter transfer function is used for retrieval musical signal from the time-frequency domain.

Ključne riječi: digitalna obrada muzičkih signala, modelovanje zvuka, vremensko-frekvencijska analiza

Keywords: digital music processing, audio modeling, time-frequency analysis

1. UVOD

Zvučni signali imaju različite oblike u vremenskom domenu u zavisnosti od karakteristika izvora koji ih stvaraju. Oscilovanje zvučne viljuške dovodi do stvaranja periodičnog zvuka sinusoidalnog oblika. Takav zvuk se naziva čist ton i vrlo je rijedak u prirodi. Istovremeno, ovakav ton nije interesantan u muzici i zvučni izvori koji ga proizvode koriste se uglavnom za štimovanje, odnosno usaglašavanje muzičkih instrumenata [1].

Većina muzičkih instrumenata proizvodi periodičan zvuk, ali njihov spektar čini čitav niz sinusoida različitih frekvencija. Ovakvi tonovi se nazivaju složeni. Tonovi koji se dobijaju vibriranjem zategnutih žica ili vibriranjem vazduha u cijevima sadrže sinusoidalne komponente čije se frekvencije nalaze u međusobnom harmonijskom odnosu, odnosno predstavljaju cjelobrojne umnoške najniže frekvencije u spektru, koja se naziva prvi ili osnovni harmonik. Ako najnižu frekvenciju u spektru označimo sa f_0 , onda će komponenta sa frekvencijom nf_0 predstavljati n -ti harmonik. Ovakvi složeni tonovi se uglavnom koriste za izvođenje melodija i harmonija u muzici [1], [2].

Furier-ovom analizom dobijamo frekvencijski sadržaj složenih tonova, ali iz njega ne možemo zaključiti u kojim trenucima nastaju, odnosno nestaju određeni harmonici iz spektra. Kod žičanih instrumenata pobuđivanje žica na vibriranje vrši se samo na početku tona, i u spektrogramima njihovih tonova primjetno je značajno brže nestajanje viših harmonika u spektru, što je logično, imajući u vidu veću apsorpciju vibriranja pri višim frekvencijama. Za razliku od njih svi harmonici prisutni u tonu duvačkih instrumenata traju podjednako dugo. To proizilazi iz činjenice da se

pobuđivanje tona kod duvačkih instrumenata mora vršiti u toku cijelog njegovog trajanja [3].

Elektronski muzički instrumenti, zadnjih decenija, našli su svoje mjesto u svijetu muzike i njihova primjena je danas veoma česta. Oni teže da simuliraju tonove "živih" muzičkih instrumenata i time olakšavaju procese komponovanja i produkcije muzike. Pronalaženje novih, sintetizovanih boja muzičkih tonova je stalna namjera velikog broja inženjera i muzičara. [3], [4]

U ovom radu predložena je procedura korišćenja vremensko-frekvencijske distribucije signala i vremenski-promjenljivog filtriranja za pronalaženje novih, muzički interesantnih boja tonova. Pretpostavka je da će boje tonova, nastale vremensko-frekvencijskim "miješanjem" tonova veoma popularnih muzičkih instrumenata, naići na dobar prijem kod muzičara. Procedura je implementirana na primjeru modelovanja tona klavira na osnovu vremensko-frekvencijske reprezentacije istog tona flaute.

2. TEORIJSKA OSNOVA

Imajući u vidu da je pri analizi muzičkih signala bitno imati kompletnu predstavu o prostiranju svih harmonika tona simultano po vremenu i frekvenciji, združena vremensko-frekvencijska reprezentacija pokazala se kao najbolje sredstvo za analizu signala. U ovom poglavlju biće dat kratak osvrt na osnovne koncepte vremensko-frekvencijske reprezentacije signala korišćene u radu.

Vremensko-frekvencijska distribucija koja je korišćena u ovom radu je spektrogram. Ona je istovremeno i

najjednostavnija dvodimenziona distribucija koja se pokazala pogodnom za analizu muzičkih signala, i definiše kao [5]:

$$SPEC(n,k) = |STFT(n,k)|^2 \quad (1)$$

Relacija (1), predstavlja diskretnu formu spektograma, gdje je sa $STFT(n,k)$ označena diskretna Short Time Fourier-ova Transformacija (STFT).

STFT je osnova mnogih vremensko-frekvencijskih distribucija, i definiše se korišćenjem funkcije prozora u vremenskom domenu kao [5]:

$$STFT(n,k) = \sum_{m=-N/2}^{N/2} w(m)x(n+m)e^{-j2\pi mk/N} \quad (2)$$

gdje su n i k diskretne promjenljive vremena i frekvencije, a $w(m)$ predstavlja funkciju prozora širine m .

Imajući u vidu da su u radu korišćeni čisti pojedinačni tonovi različitih muzičkih instrumenata, spektrogram se i pored svojih ograničenja u pogledu vremensko-frekvencijske rezolucije, pokazao kao idealno rješenje za reprezentaciju ovih signala.

Modifikacijom spektograma muzičkih tonova, moguće je vršiti modelovanje tonova. Da bi na osnovu modifikovanog spektograma bilo moguće dobiti modelovani signal u vremenskom domenu, korišćen je koncept vremenski-promjenljivog filtriranja, definisanog formulom [6]:

$$f_M(n) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} h(n + \frac{m}{2}, n - \frac{m}{2})f(n+m) \quad (3)$$

gdje je sa $h(n+m/2, n-m/2)$ označen impulsni odziv vremenski-promjenljivog filtra, f je ulazni signal, a sa f_M je označen modelovani signal koji se dobija na izlazu. Impulsni odziv h se može definisati korišćenjem prenosne funkcije L [6], [7]:

$$h(n + \frac{m}{2}, n - \frac{m}{2}) = \sum_{\theta=-\infty}^{\infty} L(n, \theta)e^{jm\theta} \quad (4)$$

Definisanjem prenosne funkcije L tako da oslikava željene karakteristike muzičkog tona, vrši se njegovo modelovanje.

3. VREMENSKO-FREKVENCIJSKO MODELOVANJE MUZIČKIH TONOVA

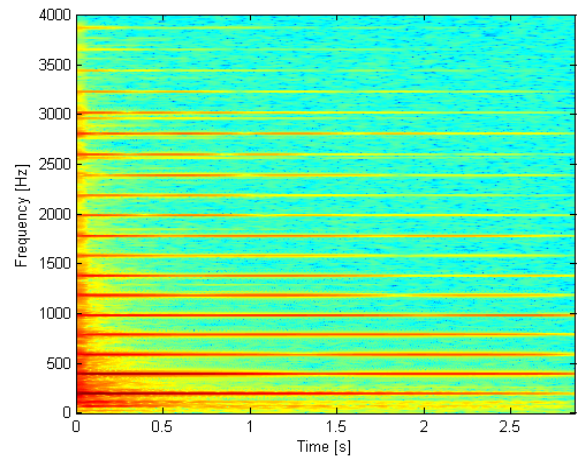
Spektrogram istog muzičkog tona generisanog pomoću dva različita instrumenta sadrži različite informacije o obliku, trajanju i naglašenosti pojedinih harmonika. Navedeni parametri sadržani u vremensko-frekvencijskoj reprezentaciji tonova čine osnovne karakteristike koje određuju boju tona pojedinih instrumenata.

Osnovna ideja ovog rada je da se vremensko-frekvencijski sadržaji tona proizvedenog jednim muzičkim instrumentom, modeluju kako bi poprimili karakteristike

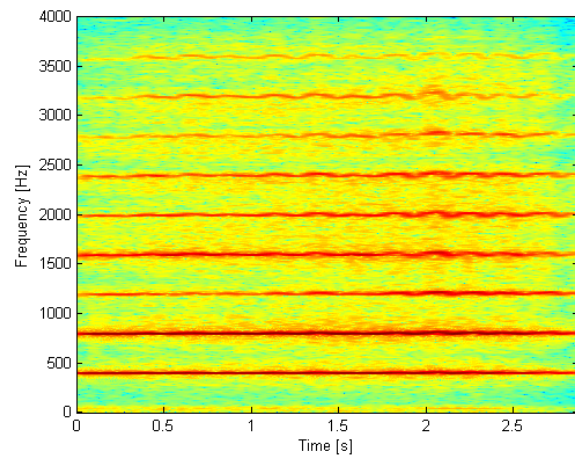
vremensko-frekvencijskih sadržaja tona drugog instrumenta. Time se boja tona jednog instrumenta modifikuje bojom tona drugog instrumenta, što kao rezultat daje sintetizovani ton koji sadrži karakteristike oba instrumenta.

Da bi se pristupilo proceduri modelovanja, potrebno je koristeći spektrogram tona jednog muzičkog instrumenta definisati prenosnu funkciju L , koja će u nastavku procedure imati ključnu ulogu u dobijanju modelovanog tona drugog instrumenta.

Na slikama 1. i 2. prikazani su spektrogrami istog tona generisanog na klaviru i flauti, respektivno. Može se uočiti da isti tonovi proizvedeni na dva različita muzička instrumenta, istog trajanja i iste maksimalne frekvencije, imaju potpuno različit spektralni sadržaj, u pogledu oblika harmonika, njihovog broja, i frekvencija na kojima se javljaju.



Sl.1. Spektrogram tona klavira



Sl.2. Spektrogram tona flaute

Međusobni odnosi amplituda harmonika u složenim tonovima zavise od karakteristika zvučnog izvora i načina pobuđivanja vibracija. Naime, kod žičanih muzičkih instrumenata mogu se istaći neparni harmonici, tako što će se žica pobuditi na vibriranje na sredini, gdje se nalaze maksimumi amplituda neparnih harmonika. Uobičajeno se

žice pobuđuju tako da vibriraju na jednom od krajeva, čime se dobija puniji ton, odnosno bogatiji frekvencijski sadržaj sastavljen i od neparnih i od parnih harmonika. Veliki uticaj na amplitude harmonika kod žičanih instrumenata imaju i rezonatorske kutije koje ističu, odnosno potiskuju određene frekvencije u spektru složenih tonova. Kod duvačkih instrumenata frekvencije osnovnih harmonika zavise od toga da li se radi o cijevi zatvorenoj na jednom i otvorenoj na drugom kraju (npr. klarinet) ili o cijevi otvorenoj na oba kraja (npr. flauta).

Boju složenih tonova, između ostalog, određuje brojnost harmonika i njihove relativne amplitude. Usljed različitih boja tonova, ljudsko uho pravi razliku između istih nota odsviranih na različitim instrumentima. Veoma važan parametar koji utiče na percepciju boje je vremenski dio tona koji se nalazi na njegovom samom početku.

S tim u vezi, kako bi efekti modelovanja bili što uočljiviji, u daljoj analizi uzet je u obzir ton G proizveden od strane dva instrumenta koji pripadaju različitim familijama, jednog žičanog (klavir) i jednog duvačkog instrumenta (flauta).

Na osnovu postojećih spektograma definišu se funkcije oslonca K i Φ , za ton klavira i flaute, respektivno, kao:

$$K \subset R^2, \text{za } SPEC_k(t, \omega) > 0, \quad (5)$$

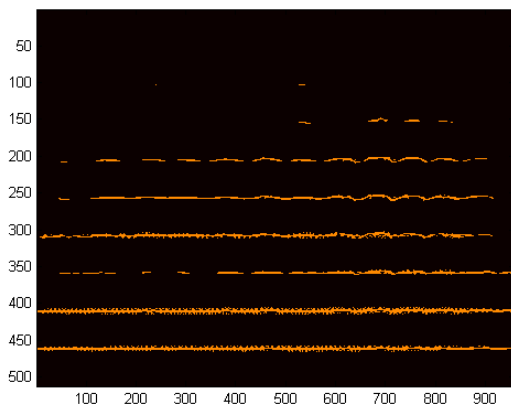
$$\Phi \subset R^2, \text{za } SPEC_f(t, \omega) > 0, \quad (6)$$

gdje je sa R^2 označen cjelokupan region vremensko-frekvencijskog plana, $SPEC_k(t, \omega)$ predstavlja spektrogram tona klavira, a $SPEC_f(t, \omega)$ spektrogram tona flaute. Funkcije oslonca K i Φ , sadrže kompletnu informaciju o pozicijama komponenti tona u vremensko-frekvencijskoj ravni.

Na osnovu relacija (5) i (6), prenosna funkcija L se definiše kao:

$$L = 1, \text{za } \Phi \cap K. \quad (7)$$

Funkcija L ilustrovana je na Slici 3.



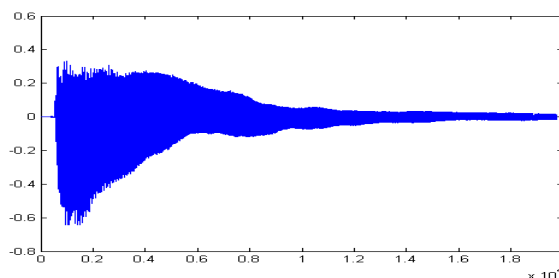
Sl.3. Fucnija prenosa L

Ovako definisana funkcija L predstavlja osnovu za modeliranje tona. Korišćenjem koncepta vremenski-promjenljivog filtriranja, opisanog u poglavlju 2., modifikovani ton klavira moguće je dobiti kao [8]:

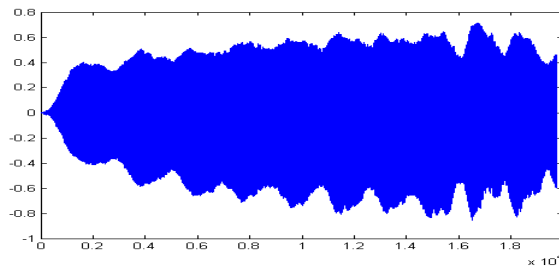
$$y_k(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=-N/2}^{N/2} L(n, k) * STFT_k(n, k) \quad (8)$$

gdje je sa $y_k(n)$ označen modifikovani ton klavira, N je ukupan broj odbiraka koji čine ton, a $STFT_k(n, k)$ je njegova Short Time Fourier-ova Transformacija. Naime, ton klavira biće modelovan funkcijom L koja sadrži informacije o spektralnom sadržaju tona flaute.

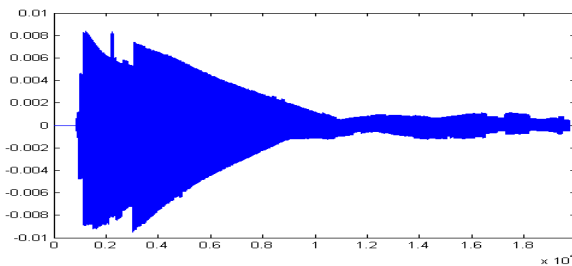
Slike 3., 4. i 5. ilustruju vremenske oblike tonova klavira, flaute i sintetizovanog tona (modelovani ton klavira), respektivno.



Sl.3. Vremenski oblik čistog tona klavira



Sl.4. Vremenski oblik čistog tona flaute



Sl.5. Vremenski oblik sintetizovanog tona

Na osnovu oblika sintetizovanog tona, može se zaključiti da je nastala promjena uveliko uticala na način javljanja pojedinih komponenti kako u vremenskom domenu tako i u spektru, što ima za posljedicu promijenjenu boju sintetizovanog tona u odnosu na boju tona klavira.

4. ZAKLJUČAK

U radu je prezentovana procedura modelovanja muzičkog tona u vremensko-frekvencijskom domenu. Princip vremenski-promjenljivog filtriranja korišćen je za vraćanje modelovanog tona iz vremensko-frekvencijskog u vremenski domen. Ovakav pristup omogućava efikasno dobijanje sintetizovanih tonova željenih karakteristika.

REFERENCE

[1] Howard D.M., Agnus J. (2001.), *Acoustics and Psychoacoustics (Music Technology Series)*, Oxford: Focal Press

[2] Everest F.A. (2001.), *The Master Handbook of Acoustics*, New York: McGraw-Hill

[3] Steiglitz K. (1996.), *A Digital Signal Processing Primer, With Applications to Digital Audio and Computer Music*, Upper Saddle River: Prentice-Hall

[4] Pressnitzer D., McAdams S. (2000.), *Acoustics, Psychoacoustics, and Spectral Music*, Contemporary Music Review, Vol.19

[5] LJ.Stanković, "Introduction to time-frequency analysis", *Time-Frequency Signal Analysis*, research monograph, 1993-2003.

[7] G.Matz, F.Hlawatsch, W.Kozek, "Generalized Evolutionary Spectral Analysis and the Weyl Spectrum of Nonstationary Random Processes", *IEEE Transaction on Signal Processing*, Vol.45, No.6, Jun 1997, pp.1520-1534.

[8] S.Stanković, "About Time-Variant Filtering of Speech Signals with Time-Frequency Distributions for Hands-Free Telephone Systems", *Signal processing*, Vol.80, No.9, 2000.