

Softverski paket za obradu i analizu audio signala

Jelena D. Čertić, Dragana S. Šumarac-Pavlović i Iva Salom

Sadržaj — U ovom radu prikazan je originalno razvijen softverski paket za obradu i analizu audio signala. Softverski paket je razvijen u programskom paketu MATLAB®. Bazira se na neuniformnim filtarskim komplementarnim bankama pogodnim za različite tipove audio signala. Parametri filtarske banke se interaktivno zadaju prema spektru ulaznog signala. Audio signal se razdvaja na nekoliko kanala koji mogu da se preslušavaju, čuvaju ili dalje obrađuju kao nezavisni signali. Dodatno, pojedini kanali mogu da se kombinuju i formiraju jedan ili dva zbirna signala.

Gljučne reči — audio signal, banka analize, višekanalna filtarska banka.

I. UVOD

SOFTVERSKI paket prikazan u ovom radu prvenstveno je razvijen za obradu i analizu signala koji se može modelovati kao zbir diskretnih spektralnih komponenata. Frekvencije pojedinih spektralnih komponenata mogu biti u harmonijskom ili nekom drugom međusobnom odnosu. Tipični primer signala sa harmonijskim spektralnim komponentama je zvuk klasičnih muzičkih instrumenata. Kao tipičan primer neharmonijskog odnosa može se posmatrati zvuk zvona. Diskretne frekvencije u spektru zvuka zvona, koje odgovaraju normalnim modovima oscilovanja, takozvani parcijali, nisu u harmonijskom odnosu [1], [2].

Filtarske banke koje se projektuju za obradu audio signala najčešće se definišu za oktavnu ili tercnu analizu prema graničnim frekvencijama definisanim odgovarajućim standardima [3]. Softverski paket realizovan u okviru ovog rada podrazumeva da je potrebno napraviti banku prilagođenu konkretnom signalu, na primer u cilju izdvajanja prvih nekoliko harmonika signala muzičkog instrumenta, za različite visine tonova i različite instrumente. Filtarska banka analize se projektuje na osnovu graničnih frekvencija koje zavise od konkretnog signala i menjaju se od signala do signala, odnosno nisu unapred definisane. Zbog toga standardna rešenja nisu uvek primenjiva. Implementirana je banka koja se zasniva na komplementarnim filtarskim parovima proizvoljne granične (presečne) frekvencije. U radu [4]

Istraživanja na osnovu kojih je napisan ovaj rad sprovedena su u okviru aktivnosti na projektu 23046 koji finansira Ministarstvo za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije.

J. D. Čertić, Elektrotehnički fakultet u Beogradu, Srbija (telefon: +381113218348; e-mail: certic@etf.rs).

D. S. Šumarac-Pavlović, Elektrotehnički fakultet u Beogradu, Srbija (telefon: +381113218361; e-mail: dsumarac@etf.rs).

I. Salom, Institut Mihajlo Pupin, Volgina 15, 11050 Beograd, Srbija; (e-mail: author@kondor.imp.bg.ac.rs).

prikazana je mogućnost za primenu filtarske banke zasnovane na komplementarnim filtarskim parovima za obradu audio signala. U programskom paketu koji smo realizovali korišćena je banka prikazana u [4] s tim da se granične (presečne) frekvencije pojedinih filtera definišu interaktivno, na osnovu spektra signala koji se posmatra. S obzirom na to da je projektovana banka *allpass* komplementarna, signali dobijeni na pojedinim izlazima mogu se sabrati, čime se dobija signal koji je isti kao signal koji bi se dobio filtriranjem ulaznog signala kroz *allpass* filter. Realizovana banka je, pored toga, komplementarna i po snazi (*power* komplementarna). Predložena filtarska banka ne decimira signal, odnosno ne menja frekvenciju odabiranja, što omogućava slušanje signala što je bitno za namenu za koju je sistem razvijen. Filtarska banka analize omogućava da se u spektru izdvoje bitne komponente signala, a da se onda pojedine komponente nezavisno analiziraju. Na primer, može se analizirati anvelopa ili brzina opadanja nivoa pojedinih komponenata. Takođe se mogu, eliminisanjem ili modifikacijom pojedinih kanala, dobiti signali prilagođeni za različite vrste subjektivnih testova.

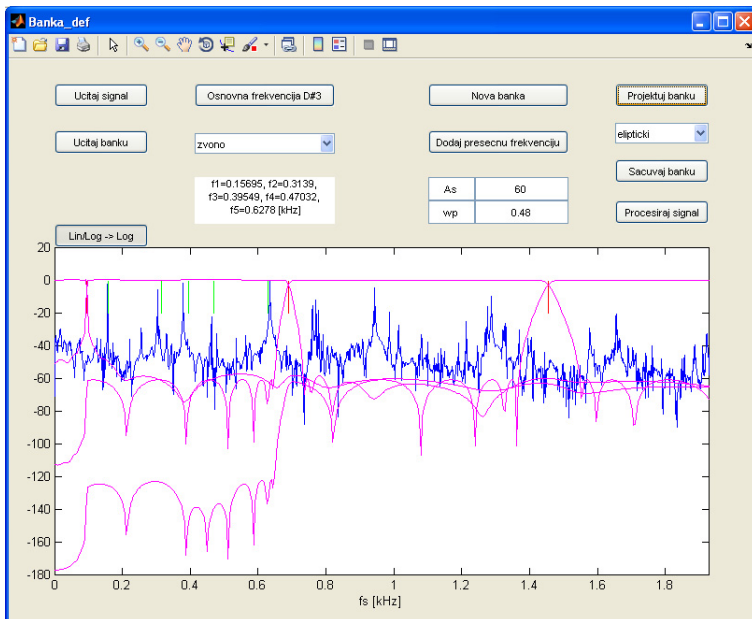
U poglavlju II biće prikazan realizovan softverski paket sa stanovišta mogućnosti i korišćenja. U poglavlju III je dat prikaz filtarske banke koja je osnovni deo programskog paketa. U poglavlju IV dat je jedan primer obrade signala zvona primenom realizovanog paketa. U poglavlju V dat je zaključak.

II. OPIS SOFTVERSKOG PAKETA

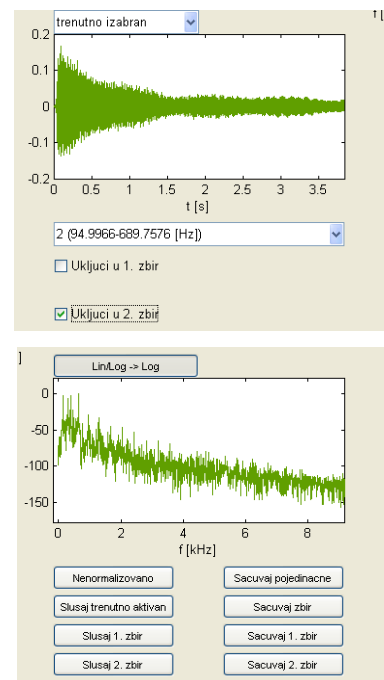
Softverski paket prikazan u ovom radu razvijen je kao MATLAB® GUI (*Graphical User Interface*), što treba da omogući da se prethodno snimljeni signali jednostavno učitavaju i obrađuju pri čemu se od korisnika očekuje poznavanje MATLAB® paketa na elementarnom nivou. Mogu se obrađivati signali prethodno snimljeni kao jednokanalni *.wav zapisi proizvoljne frekvencije odabiranja. Po pokretanju MATLAB® funkcije otvara se inicijalni prozor prikazan na Sl. 1. Osnovni prozor programa se koristi da se definiše komplementarna banka sa proizvoljnim presečnim frekvencijama. U okviru ovog prozora, definisane su kontrole za učitavanje signala i projektovanje komplementarne filtarske banke.

A. Pregled kontrola koje se nalaze u okviru osnovnog GUI-ja

Učitaj signal – učitava se mono *.wav signal, frekvencija odabiranja se “vezuje” za frekvenciju “pročitano” iz *.wav fajla.



Sl. 1. Slika polaznog ekrana realizovanog softverskog paketa.



Sl. 2. Slika delova ekrana drugog prozora realizovanog softverskog paketa.

Učitaj banku – učitava se prethodno sačuvana banka (mat fajl, generisan istim ovim programom); sama banka se pamti kao struktura:

```
banka=struct('fs','fs','fc','fc','As','As','wp','wp');
```

fs – frekvencija odabiranja, fc – niz presečnih frekvencija, As – slabljenje u nepropusnom opsegu, wp – granica propusnog opsega *halfband* filtra kojim je banka definisana.

Lin/Log – prikaz spektra, slika može da se pomera, zumira i slično, na uobičajen način.

Osnovna frekvencija – kada se „klikne“ dugme korisnik treba da označi na grafiku spektralnu komponentu koju smatra osnovnom frekvencijom. U zavisnosti od toga da li je u **padajućem meniju** izabrano zvono, muzički instrument ili proizvoljan signal, ispisuje se niz frekvencija:

- za zvono se ispisuje niz frekvencija koji odgovara tipičnom nizu frekvencija za zvuk zvana [2]:
f1 : f2 : f3 : f4 : f5 = 1 : 2 : 2.4 : 3 : 4.,
- za muzički instrument se ispisuje prvih pet harmonika, Na grafiku se iscrtavaju pomoćne zelene linije na odgovarajućim frekvencijama.

Nova banka – ako je već definisana neka banka briše se sva podešavanja i počinje se sa projektovanjem nove banke.

Dodaj preseccu frekvenciju – dodaje novu preseccu frekvenciju za banku. Presečne frekvencije se dodaju jedna po jedna tako što korisnik „klikne“ na dugme pa na spektar. Na grafiku se iscrtavaju se pomoćne crvene linije.

Kontole kojima se definiše *halfband* filter kojim je određena komplementarna filterska banka:

- As – slabljenje u nepropusnom opsegu,
- wp – granica propusnog opsega *halfband* filtra kojim

je banka definisana,

- eliptički/Butterworth filter.

Projektuj banku – projektuje se banka bazirana na eliptičkom ili *Butterworth*-ovom filteru (u zavisnosti od padajućeg menija).

Sacuvaj banku – banka se čuva kao *.mat fajl, sama banka se pamti kao struktura:

```
banka=struct('fs','fs','fc','fc','As','As','wp','wp');
```

fs – frekvencija odabiranja, fc – niz presečnih frekvencija, As – slabljenje u nepropusnom opsegu, wp – granica propusnog opsega *halfband* filtra kojim je banka definisana.

Procesiraj signal – otvara se prozor Signali.

B. Pregled kontrola koje se nalaze u okviru drugog prozora

U okviru ovog prozora, Sl. 2, definisane su kontrole koje korisniku omogućavaju da kombinuje izlaze iz pojedinih filtera definisane komplementarne filterske banke. Mogu se posmatrati vremenski oblici i spektri izlaznih signala iz svakog od filtera filterske banke. Izabrani signali mogu da se slušaju ili snime kao *.wav fajlovi za kasniju obradu. Dodatno, signali se mogu grupisati u dve grupe (označene kao „zbir 1“ i „zbir 2“) što bi trebalo da omogući da se kombinacijom slušanja i uvida u vremenski oblik odnosno spektar signala procene „bitne“ komponente.

Prikazuju se vremenski oblik i spektar trenutno izabranog signala (signala koji je izabran u padajućem meniju) ili zbira 1 ili zbira 2.

Padajući meni omogućava da se nezavisno pregledaju svi signali i/ili da se uključuju u zbir 1 i/ili zbir 2. Podrazumevana vrednost je da su oba zbira „prazna“, tj. nijedan signal na početku nije uključen ni u jedan zbir.

Pri slušanju signala (bilo kog) signal se sluša takav kakav je (nenormalizovano) ili se skaliranjem svodi na opseg (-1,1).

Mogu se čuvati svi izdvojeni kanali posebno ili njihov zbir (da bi se, poređenjem s polaznim signalom uočila moguća fazna izobličenja i procenilo da li su prihvatljiva). Takođe se mogu čuvati formirani signali koji se sastoje od zbira nekoliko kanala.

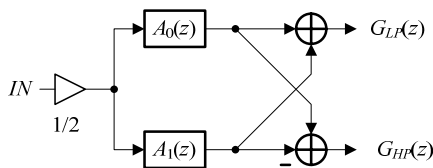
III. PROJEKTOVANA KOMPLEMENTARNA BANKA

Projektovana filtarska banka zasniva se na projektovanju *halfband* filtarskog para određenih karakteristika. Polazeći od tog filtarskog para, varijacijom presečne frekvencije može se formirati komplementarni filtarski par proizvoljne presečne frekvencije. Pogodnim vezivanjem nekoliko etapa filtarskih parova s različitim presečnim frekvencijama formira se komplementarna filtarska banka analize.

IIR *halfband* filtarski par, propusnika niskih frekvencija (LP) i propusnika visokih frekvencija (HP) neparnog reda, može da se realizuje kao paralelna veza dva filtra svepropusnika, Sl. 3 [5]. Prenosne funkcije filtera propusnika niskih frekvencija $G_{LP}(z)$ i propusnika visokih frekvencija $G_{HP}(z)$ dobijaju se na osnovu:

$$G_{LP}(z) = [A_0(z) + A_1(z)]/2, \quad (1a)$$

$$G_{HP}(z) = [A_0(z) - A_1(z)]/2. \quad (1b)$$



Sl. 3. Realizaciona struktura *halfband* komplementarnog filtarskog para.

Filtiri $G_{LP}(z)$ i $G_{HP}(z)$ su *allpass* i *power* komplementarni, što znači da važe relacije:

$$G(e^{j\omega}) + G_c(e^{j\omega}) = A_{AP}(e^{j\omega}), \quad (2)$$

gde je $A_{AP}(e^{j\omega})$ filter svepropusnik i:

$$|G(e^{j\omega})|^2 + |G_c(e^{j\omega})|^2 = 1. \quad (3)$$

Svaka od dve grane filtera može da se realizuje kao kaskadna veza sekcija nižeg reda. Grana označena sa A_0 sastoji se samo od sekcija drugog reda, a grana označena sa A_1 sastoji se od jedne trivijalne sekcije prvog reda i potrebnog broja sekcija drugog reda:

$$A_0^{HB}(z) = \prod_{l=2,4,\dots}^{(N+1)/2} \frac{\beta_l^{HB} + z^{-2}}{1 + \beta_l^{HB} z^{-2}}, \quad (4a)$$

$$A_1^{HB}(z) = z^{-1} \prod_{l=3,5,\dots}^{(N+1)/2} \frac{\beta_l^{HB} + z^{-2}}{1 + \beta_l^{HB} z^{-2}}, \quad (4b)$$

gde je N red filtera, a koeficijenti β_l^{HB} , $l=2, 3, \dots, (N-1)/2$ su određeni položajem konjugovano-kompleksnih polova filtera (r_l moduo pola) koji leže na imaginarnoj osi:

$$\beta_l^{HB} = (r_l)^2, \quad \beta_l^{HB} < \beta_{l+1}^{HB}. \quad (4c)$$

Na osnovu ovog polaznog filtarskog para može se

dobiti komplementarni filtarski par s proizvoljnom graničnom (presečnom) frekvencijom. Sam algoritam za promenu granične frekvencije sastoji se od nekoliko koraka [6]:

1. Na osnovu zadate željene granične frekvencije rezultujućeg LP/HP filtarskog para ω_{3dB} odredi se vrednost parametra α :

$$\alpha = -\cos(\omega_{3dB}). \quad (5)$$

Može se uočiti da je vrednost parametra α određena samo graničnom frekvencijom rezultujućeg filtarskog para i da ne zavisi ni od jednog drugog parametra.

2. Na osnovu dobijene vrednosti parametra α određuje se parametar α_1 :

$$\alpha_1 = \frac{1}{\alpha} \left(1 - \sqrt{1 - \alpha^2} \right). \quad (6)$$

3. Za svaku sekciju drugog reda određuje se nova vrednost parametra β :

$$\beta_l = (\beta_l^{HB} + \alpha_1^2) / (\beta_l^{HB} \alpha_1^2 + 1), \quad (7)$$

$$l = 2, 3, \dots, (N+1)/2.$$

Dobija se filtarski par koji može da se realizuje prema blok šemi sa Sl. 2, i za koji važe izrazi (1)-(3), s tim da se *allpass* grane realizuju prema:

$$A_0(z) = \prod_{l=2,4,\dots}^{(N+1)/2} \frac{\beta_l + \alpha(1 + \beta_l)z^{-1} + z^{-2}}{1 + \alpha(1 + \beta_l)z^{-1} + \beta_l z^{-2}}, \quad (8a)$$

$$A_1(z) = \frac{\alpha_1 + z^{-1}}{1 + \alpha_1 z^{-1}} \prod_{l=3,5,\dots}^{(N+1)/2} \frac{\beta_l + \alpha(1 + \beta_l)z^{-1} + z^{-2}}{1 + \alpha(1 + \beta_l)z^{-1} + \beta_l z^{-2}}, \quad (8b)$$

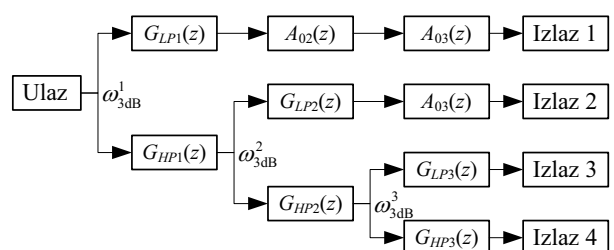
gde je N red filtera, α_1 je parametar određen prema izrazu (6) i odgovara realnom polu, a koeficijenti β_l , $l=2, 3, \dots, (N-1)/2$ dobijeni na osnovu (7) su određeni položajem konjugovano-kompleksnih polova rezultujućeg filtera (r_l moduo pola):

$$\beta_l = (r_l)^2, \quad \beta_l < \beta_{l+1}. \quad (8c)$$

Treba uočiti da su položaji polova pomereni u odnosu na polazni filter.

Kompletna banka analize [4] projektuje se tako što se, na osnovu istog *halfband* polaznog filtarskog para za svaku zadatu graničnu (presečnu) frekvenciju ω_{3dB}^k , $k=1, 2, \dots, K$, $\omega_{3dB}^k < \omega_{3dB}^{k+1}$, projektuje filtarski par prema izrazima (5)-(7). Zatim se pogodnim procesiranjem signala dobija $K+1$ signala na odgovarajućim izlazima banke analize. Na Sl. 4 prikazana je kompletna realizaciona šema za $K=3$. $G_{LPk}(z)$ i $G_{HPk}(z)$ su filter propusnik niskih frekvencija i filter propusnik visokih frekvencija dobijenih za graničnu (presečnu) frekvenciju ω_{3dB}^k , pri čemu važi:

$$G_{LPk}(z) + G_{HPk}(z) = A_{0k}(z). \quad (9)$$

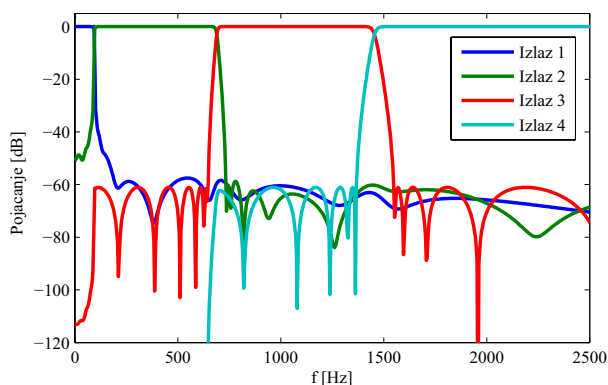


Sl. 4. Blok šema realizovane filtarske banke.

Na isti način je moguće realizovati banku za proizvoljno K . U šemi postoje *allpass* blokovi koji su neophodni da bi kompletna filtarska banka zadržala osobine komplementarnosti koje ima polazni *halfband* filtarski par.

IV. PRIMER

Kao primer korišćenja programa biće prikazana obrada signala zvona. Projektuje se banka prilagođena spektru ulaznog signala, Sl. 1. Granične frekvencije su približno 95 Hz, 690 Hz, 1455 Hz. Na Sl. 5 prikazana je karakteristika projektovane banke.



Sl. 5. Karakteristika projektovane banke.

Banka je projektovana tako da se na izlazu 2 dobija signal koji odgovara spektralnoj šemi koju bi zvuk zvona trebalo da ima. Kao primer moguće dalje obrade dobijenih signala određeni su doprinosi po energiji svakog od kanala u ukupnom signalu. Rezultati su prikazani u tabeli 1. Snimljeni signali, posebni kanali ili pogodno izabrani zbir nekoliko kanala mogu se dalje koristiti za subjektivne testove ili neku složeniju obradu signala.

TABELA 1: PRIMER ANALIZE SIGNALA ZVONA.

Izlaz	Udeo u ukupnom signalu [%]
Izlaz1	0.7
Izlaz2	72.3
Izlaz3	25.2
Izlaz4	1.8
Izlaz2+ Izlaz3	97.5

V. ZAKLJUČAK

Prikazani softverski paket može se dalje unaprediti. U delu definisanja specifikacija može se donekle automatizovati postupak tako što bi se definisale neke početne vrednosti koje bi korisnik onda mogao da menja. U fazi prikaza rezultata mogu se dodati specifične nove obrade potrebne za konkretne tipove signala.

LITERATURA

- [1] N.H. Fletcher, T.D. Rossing, *The Physics of Musical Instruments* Springer; 2nd ed. 1998.
- [2] T.D. Rossing (editor), *Acoustics of Bells*, Van Nostrand Reinhold 1984.
- [3] Z. Cvetkovic, J.D. Johnston, "Nonuniform oversampled filter banks for audio signal processing," *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing*, vol. 11, no. 5, pp. 393-399, Sep. 2003.
- [4] R.J. Cassidy, J.O. Smith, "A tunable, nonsubsampling, non-uniform filter bank for multi-band audition and level modification of audio signals," *Conf. Rec. of the Thirty-Eight Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, 7-10 Nov. 2004, vol. 2, pp. 2228-2232.
- [5] L. Milić, T. Saramäki, "Three classes of IIR complementary filter pairs with an adjustable crossover frequency," in *Proc. of the 2003 Int. Symp. on Circuits and Systems*, May 2003, vol. 4, pp. IV-145-IV-148.
- [6] J. Čertić, L. Milić, "Signal processor implementation of a low-pass/high-pass IIR digital filter with variable cut-off frequency," in *Proc. IEEE Region 8 EUROCON 2005*, Belgrade, Serbia, Nov., 2005, pp. 1618-1621.

ABSTRACT

In this paper a software package for the processing and analysis of audio signals is presented. The software package developed in MATLAB[®] is based on the nonuniform complementary filter bank suitable for different types of audio signals. The filter bank can be adjusted interactively based on the spectrum of the input signal. An audio signal is split into several channels that can be listened to or further processed as separate signals. In addition, some of the channel data streams can be regrouped into one or two new signals.

SOFTWARE PACKAGE FOR THE PROCESSING AND ANALYSIS OF AUDIO SIGNALS

Jelena Čertić, Dragana Šumarac-Pavlović, Iva Salom