

# Obrada audio signala

5. maj 2017

Digitalni audio efekti su danas u osnovi muzičke produkcije. Audio efekti se mogu primjeniti bilo kao dio same sinteze zvuka, bilo na kraju audio lanca kao dio produkcije, odnosno, masteringa. Efekti se mogu primjeniti različitim redoslijedom i u zavisnosti od redoslijeda primjene efekata rezultati mogu biti značajno različiti. Međutim, ne postoji neko pravilo koje bi određivalo redoslijed primjene efekata, već je to ostavljeno korisnicima.

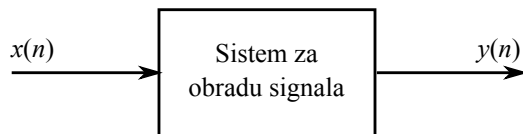
Digitalni audio efekti se realizuju tehnikama digitalne obrade signala. Efekti se mogu klasifikovati prema načinu obrade signala:

- Filtriranje: nisko/visokopropusni filtri, ekvilajzer
- Vremenski promjenljivi filtri: Wah-wah, phaser
- Kašnjenja: Vibrato, flanger, chorus, eho
- Modulatori: Ring modulacija, tremolo, vibrato
- Nelinearna obrada: Kompresija, limiter, distorzija
- Specijalni efekti: Panning, reverb, surround

Multimedijalni sistem za obradu audio signala posmatramo kao proces čiji rezultat je transformacija diskretnog ulaznog audio signala u diskretni izlazni audio signal:

$$x(n) \rightarrow y(n) \quad (1)$$

gdje je sa  $x(n)$  označen ulazni, a sa  $y(n)$  izlazni signal. Sistem za obradu audio signala moguće je prikazati blok-dijagramom kao na Slici 1. Sistemom za digitalnu obradu signala se realizuje algoritam za digitalnu obradu signala. Algoritam za digitalnu obradu signala se može opisati jednačinom diferencija ili blok-dijagramom. Jednačina diferencija daje matematičku relaciju između ulaznog i izlaznog signala, dok je blok-dijagramom predstavljen niz koraka koji se primjenjuju na odmjerke ulaznog signala kako bi se dobili odmjerki



Slika 1: Blok-dijagram sistema za obradu signala.

izlaznog signala. U blok-dijagramima se najčešće koriste blokovi koji predstavljaju instance tri osnovna elementa: elementa za kašnjenje, množača i sabirača.

Diskretni jedinični impuls je dat jednačinom

$$\delta(n) = \begin{cases} 1, & n = 0 \\ 0, & n \neq 0 \end{cases} . \quad (2)$$

Odziv sistema na jedinični impuls se naziva *impulsni odziv* sistema i označava sa  $h(n)$ . U zavisnosti od trajanja impulsnog odziva razlikujemo sisteme sa konačnim (Finite Impulse Response – FIR) i beskonačnim (Infinite Impulse Response – IIR) impulsnim odzivom.

Diskretni sistem je u potpunosti karakterisan svojim impulsnim odzivom u smislu da je, ako je poznat impulsni odziv sistema, moguće izračunati odziv na proizvoljan ulazni signal. Ovaj odziv je *konvolucija* ulaznog signala i impulsnog odziva sistema

$$y(n) = h(n) * x(n) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(k) x(n-k) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(k) h(n-k) . \quad (3)$$

Ukoliko je posmatrani sistem FIR tipa, sa impulsnim odzivom dužine  $N$  prethodni izrazi se pojednostavljuju i glase

$$y(n) = h(n) * x(n) = \sum_{k=0}^{N-1} h(k) x(n-k) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k) h(n-k) . \quad (4)$$

Konvolucija je komutativna operacija. Prema tome, bez gubitka opštosti, u nastavku ćemo se fokusirati na drugi oblik konvolucione sume. Da bismo izračunali izlazni signal u trenutku  $n = n_0$  potrebno je da izračunamo sumu

$$y(n_0) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(k) h(n_0 - k) . \quad (5)$$

Promjenljiva po kojoj se sumira je  $k$  i konvoluciona suma sadrži članove koji su proizvodi članova niza  $x(k)$  i niza  $h(n_0 - k)$ . Niz  $h(n_0 - k)$  dobija se od

niza  $h(k)$  okretanjem u vremenu, čime se dobija niz  $h(-k)$  i pomjeranjem okrenutog niza u  $n_0$ . Dakle, izračunavanje konvolucije signala  $x(k)$  i  $h(k)$  se sastoji iz sljedećih koraka:

1. Okretanje  $h(k)$  u vremenu čime se dobija niz  $h(-k)$ .
2. Pomjeranje  $h(-k)$  u trenutak  $n_0$  čime se dobija niz  $h(n_0 - k)$ .
3. Množenje nizova  $x(k)$  i  $h(n_0 - k)$  čime se dobija niz  $v_{n_0} = x(k) h(n_0 - k)$ .
4. Sumiranje svih elemenata niza  $v_{n_0}$ .

Navedeni koraci se izvršavaju da bi se dobila vrijednost odziva u jednom trenutku  $n = n_0$ . Ukoliko želimo da odredimo odziv u svakom trenutku  $-\infty < n < \infty$ , potrebno je da ponovimo korake 2-4 za svaki vremenski pomak  $n$ .

Kao ilustraciju ovog procesa izračunaćemo konvoluciju signala  $h(n) = \{1, \underline{2}, 1, -1\}$  i  $x(n) = \{\underline{1}, 2, 3, 1\}$ . Podvučeni su odmjerci koji odgovaraju trenutku  $n = 0$ .

Na Slici 2 ilustrovani su osnovni koraci izračunavanja konvolucije ova dva signala. Prvi korak je okretanje niza  $h(k)$  u vremenu čime se dobija signal  $h(-k)$ . Vrijednost konvolucije u  $n = 0$  je

$$y(0) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(k) h(-k). \quad (6)$$

Dakle, formiramo niz  $v_0(k) = x(k) h(-k)$  i sumiramo njegove elemente

$$y(0) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} v_0(k) = 4. \quad (7)$$

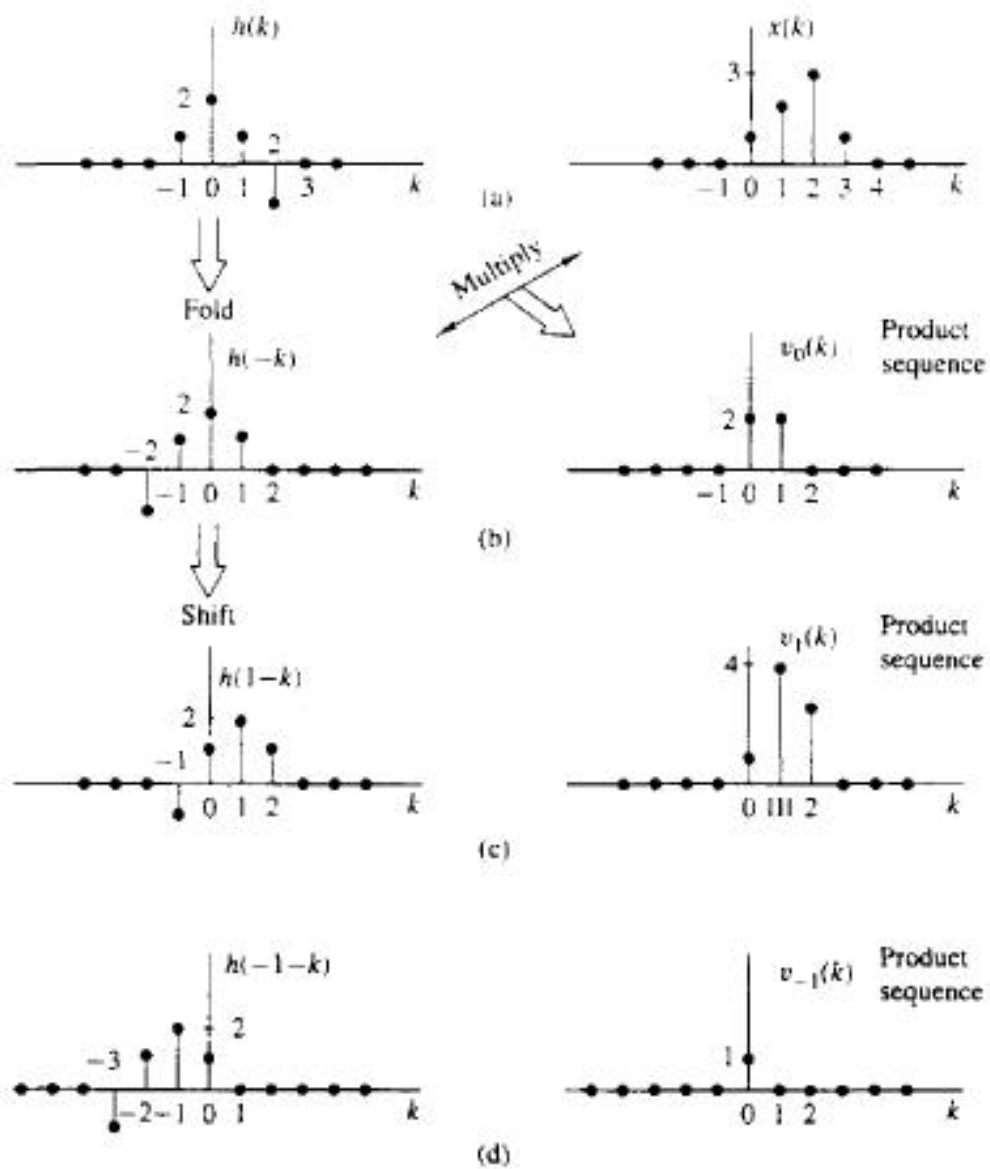
Nakon toga pomjeramo signal  $h(-k)$  u  $n = 1$ . Vrijednost konvolucije u  $n = 1$  je

$$y(1) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(k) h(1 - k). \quad (8)$$

U ovom slučaju se formira niz  $v_1(k) = x(k) h(1 - k)$  i sumiraju se njegovi elementi

$$y(1) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} v_1(k) = 8. \quad (9)$$

Analogno, za  $n = 2$ , niz  $h(-k)$  se pomjera udesno za dva mjesta, formira se niz  $v_2(k) = x(k) h(2 - k)$  i sumiraju njegovi elementi što daje  $y(2) = 8$ .



Slika 2: Izračunavanje konvolucije.

Daljim pomjeranjem  $h(-k)$  udesno dobijaju se vrijednosti  $y(3) = 3$ ,  $y(4) = -2$  i  $y(5) = -1$ . Za  $n > 5$ , nizovi  $v_n(k)$  sadrže samo nule, pa je i  $y(n) = 0$ .

Kada je  $n < 0$ , niz  $h(-k)$  se pomjera ulijevo. Odziv u trenutku  $n = -1$  je

$$y(-1) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(k) h(-1-k). \quad (10)$$

Formira se niz  $v_{-1} = x(k) h(-1-k)$  i sumiraju se njegovi elementi

$$y(-1) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} v_{-1}(k) = 8. \quad (11)$$

Za  $n \leq -2$ , vidimo da će nizovi  $v_n(k)$  sadržati samo nule, pa je i odziv  $y(n) = 0$ .

Dakle, odziv posmatranog sistema je

$$y(n) = \{\dots, 0, 0, 1, \underline{4}, 8, 8, 3, -2, -1, 0, 0, \dots\}. \quad (12)$$

Ukoliko su signali čija se konvolucija računa konačnih trajanja i imaju  $M$ , odnosno,  $N$  odmjeraka, njihova konvolucija je takođe konačnog trajanja i ima  $M + N - 1$  odmjeraka. U prethodnom primjeru  $M = N = 4$  pa je dužina izlaznog signala 7 odmjeraka.

Složenost računanja konvolucije je  $O(N^2)$  tako da se dosta napora ulaže u ubrzanje ove operacije. Sa jedne strane, ubrzanje je moguće postići korištenjem specijalizovanih hardverskih arhitektura, ali zanimljiv način za ubrzanje nudi konvoluciona teorema. Naime može se pokazati da je Furijeova transformacija konvolucije dva signala jednaka proizvodu Furijeovih transformacija pojedinih signala. Formalno zapisano, ako je

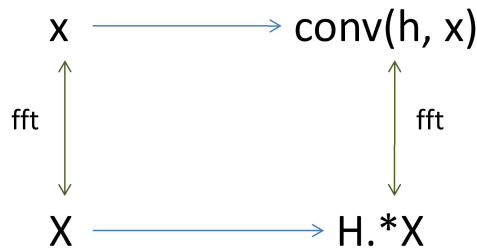
$$y(n) = x(n) * h(n), \quad (13)$$

i ako su  $X(\omega)$ ,  $H(\omega)$  i  $Y(\omega)$ , Furijeove transformacije signala  $x(n)$ ,  $h(n)$  i  $y(n)$ , respektivno, tada vrijedi

$$Y(\omega) = X(\omega) H(\omega). \quad (14)$$

Kada su u pitanju diskretni signali i za izračunavanje spektra se koristi DFT potrebno je obezbijediti da broj tačaka u kojima se računa DFT bude bar jednak dužini rezultujućeg niza, odnosno,  $M + N - 1$ , gdje su  $M$  i  $N$  dužine polaznih nizova. Ova relacija je ilustrovana na Slici 3.

Konvoluciona teorema omogućava uvid u princip funkcionisanja frekvencijski selektivnih filtara. Frekvencijski selektivni filtri mijenjaju spektar ulaznog signala tako što mijenjaju amplitude frekvencijskih komponenata (harmonika, u slučaju periodičnog signala) iz nekog dijela spektra signala. Često



Slika 3: Ilustracija konvolucione teoreme.

se frekvencijski selektivni filtri koriste za uklanjanje frekvencijskih komponenta iz nekog dijela spektra signala. U zavisnosti od opsega frekvencija koji filter uklanja, odnosno, zadržava razlikujemo:

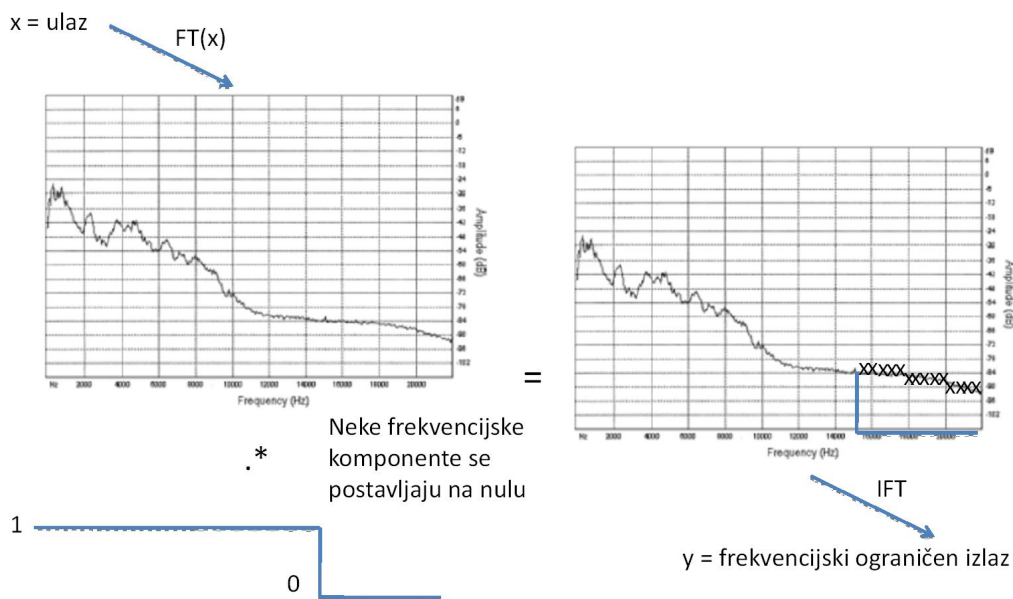
- niskopropusne filtre – uklanjaju visoke frekvencije, a zadržavaju (propuštaju) niske,
- visokopropusne filtre – uklanjaju niske frekvencije, a zadržavaju (propuštaju) visoke,
- filtre propusnike opsega – zadržavaju frekvencije iz određenog opsega,
- filtre nepropusnike opsega – uklanjaju frekvencije iz određenog opsega.

Frekvencijske komponente najčešće nisu u potpunosti uklonjene već samo oslabljene u dovoljnoj mjeri da budu npr. perceptualno neprimjetne.

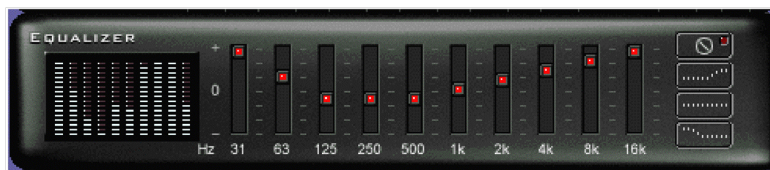
Pošto se filtriranje signala realizuje konvolucijom ulaznog signala i impulsnog odziva filtra, na osnovu konvolucione teoreme slijedi da je spektar izlaznog signala jednak proizvodu spektra ulaznog signala i Furijeove transformacije impulsnog odziva filtra. Dakle oblik Furijeove transformacije impulsnog odziva filtra određuje oblik spektra izlaznog signala. Iz tog razloga se Furijeova transformacija impulsnog odziva filtra naziva *frekvencijska karakteristika* filtra.

Na Slici 4 ilustrovana je promjena spektra ulaznog signala pod dejstvom idealnog niskopropusnog filtra čija je frekvencijska karakteristika prikazana u donjem lijevom uglu. Množenjem spektra sa frekvencijskom karakteristikom, komponente na visokim frekvencijama se postavljaju na nulu čime spektar izlaznog signala postaje frekvencijski ograničen, odnosno signal više ne sadrži komponente na visokim frekvencijama.

Primjer frekvencijski selektivnog filtriranja u obradi audio signala je (grafički) ekvilajzer. Karakterističan korisnički interfejs grafičkog ekvilajzera je prikazan na Slici 5. Grafički ekvilajzer posjeduje kontrole pomoću kojih je



Slika 4: Ilustracija frekvencijski selektivnog filtriranja.

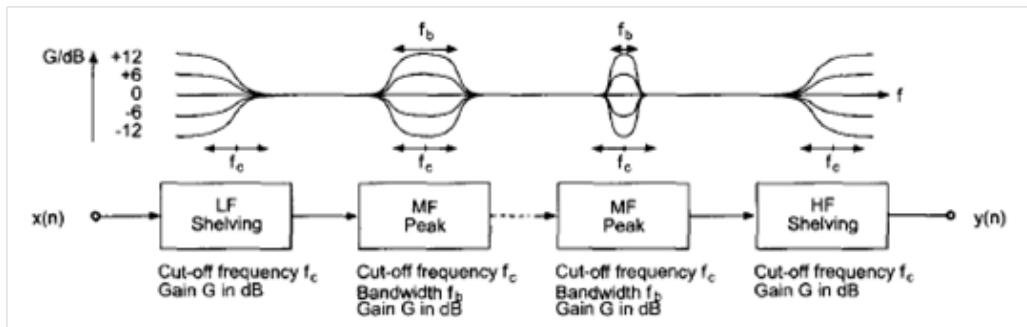


Slika 5: Grafički ekvilajzer.

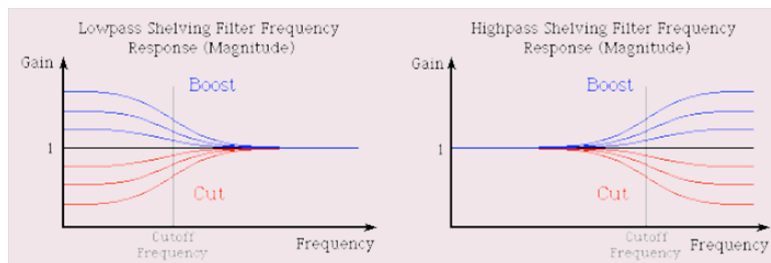
moguće pojačati ili utišati tonove iz određenog frekvencijskog opsega. Da bi se omogućila ova funkcionalnost grafički ekvilajzer se sastoji od kaskadne veze frekvencijski selektivnih filtara, kao što je prikazano na Slici 6. Za razliku od ranije razmatranih frekvencijski selektivnih filtara, frekvencijske karakteristike filtara u ekvilajzeru su takve da u određenom opsegu frekvencija pojačavaju ili slabe odgovarajuće komponente signala, dok komponente van tog opsega prolaze kroz filter neizmjenjene. Ovi filtri su poznati pod nazivom *shelving* i *peaking* filtri.

Frekvencijske karakteristike niskopropusnog i visokopropusnog shelving filtra date su na Slici 7. Ovi filtri su određeni graničnom frekvencijom i pojačanjem. Kod jednostavnijih ekvilajzera (u većini potrošačke, neprofesionalne, opreme) su granične frekvencije filtara fiksirane, a korisnik može da podešava pojačanje filtra.

Frekvencijska karakteristika peaking filtra propusnika opsega data je na



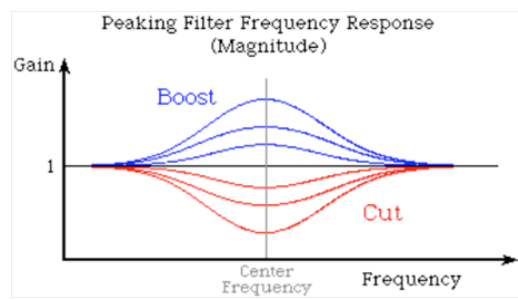
Slika 6: Grafički ekvilajzer se sastoji od kaskadne veze frekvencijski selektivnih filtara. U gornjem redu su prikazane frekvencijske karakteristike pojedinih filtara na zajedničkoj frekvencijskoj osi.



Slika 7: Frekvencijske karakteristike nisko i visokopropusnog shelving filtra. [h]

Slici 8. Ovaj filtar je određen centralnom frekvencijom, širinom propusnog opsega i pojačanjem. Kod jednostavnijih ekvilajzera su centralne frekvencije i širine propusnih opsega peaking filtara fiksirane, a korisnik može da podešava pojačanje filtra.





Slika 8: Frekvencijska karakteristika peaking filtra propusnika opsega.