DBBT
Digital Broadcasting & Broadband Technologies

Co-funded by the Erasmus+ Programme of the European Union

Procesiranje signala

Profesor dr Miroslav Lutovac

"This project has been funded with support from the European Commission. This publication [communication] reflects the views only of the author, and the Commission cannot be held responsible for any use which may be made of the information contained therein"

Sadržaj predmeta, Teorijska nastava

1. Uvodno predavanje. Upoznavanje sa planom i programom, ciljevima, ishodom i metodama.
2. Šta je procesiranje signala, istorijski pregled obrade signala, primeri primene.
3. Vizuelizacija signala (Python, Excel).
4. Kompleksni ekponencijalni diskretni signali. Primer sinteze muzičkog signala.
5. Furijeova analiza: Diskretna Furijeova transformacija (DFT) i serija (DFS). Brza Furijeova transformacija (Fast Fourier transform, FFT) i primena za spektralne analizatore i osciloskope.
6. Linearani filtri: konvolucija, idealni i realni filtri, dizajn filtra. Primena konvolucije u GPS sistemima.

…

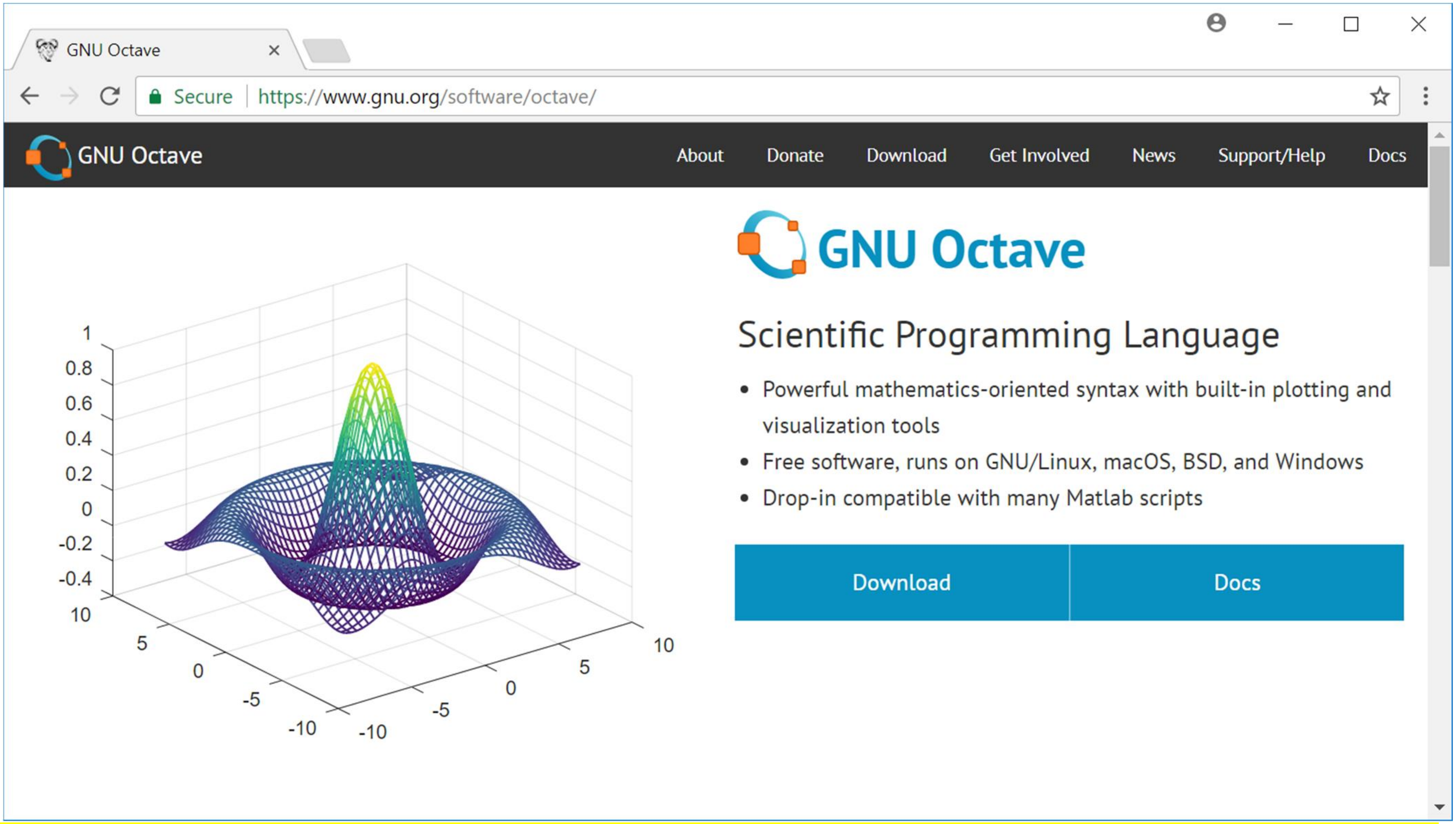
Sadržaj

- Spektralna analiza sinusoidalnih, nestacionarnih i slučajnih signala
- Procesiranje muzičkih signala
- Sinteza digitalnih muzičkih signala
- Kompresija signala
- Trans-multiplekseri
- Discretni višetonski prenos digitalnih podataka
- Konvertori sa oversamplingom

Obrada muzičkih signala

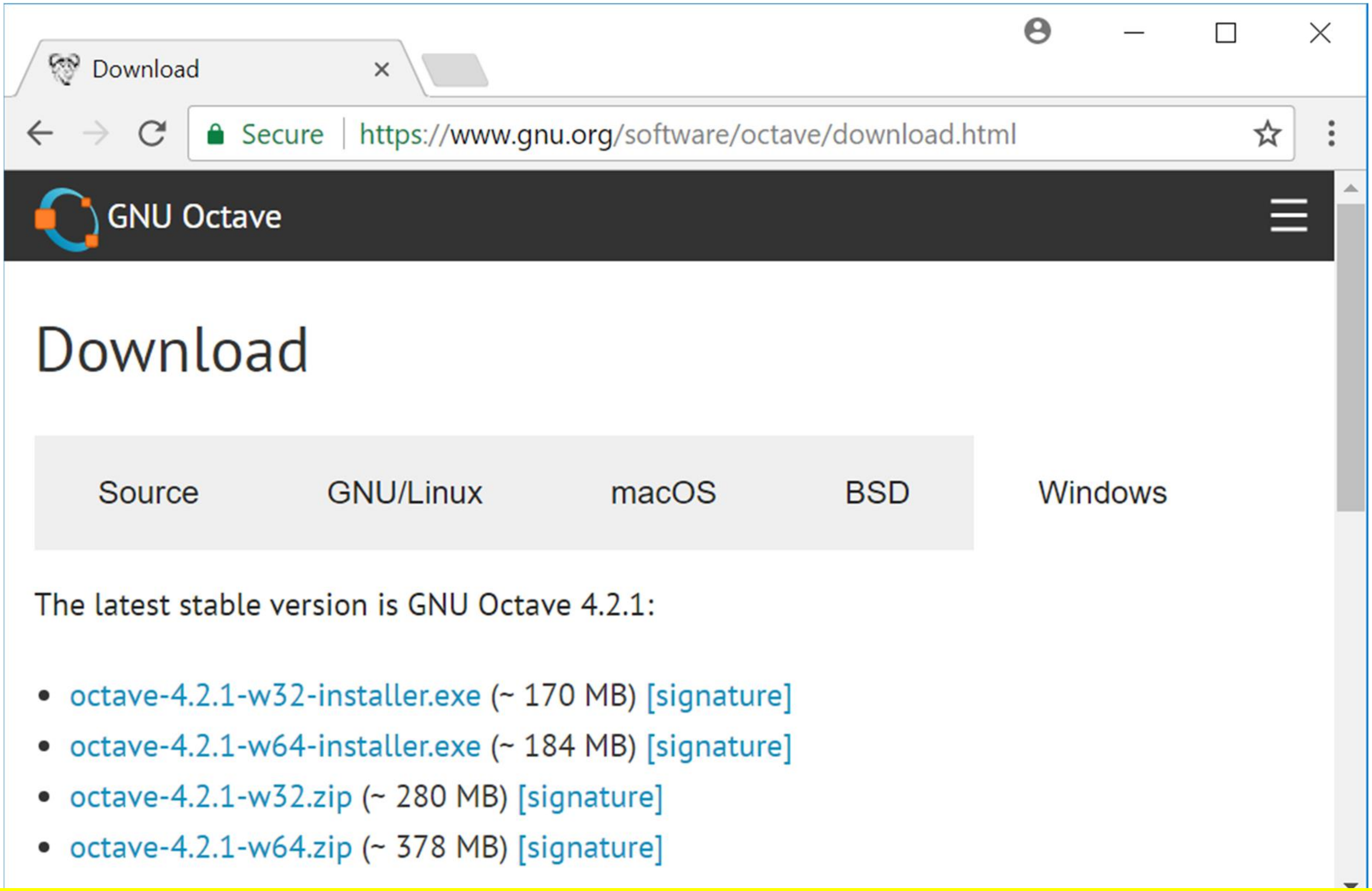
- Muzički signali se generišu u akustičkoj prostoriji za svaki instrument posebno i pamte se kao poseban zapis
- Dodaju se specijalni efekti
- Pravi se miks signala
- Efekti: eho, reverberacija

GNU Octave



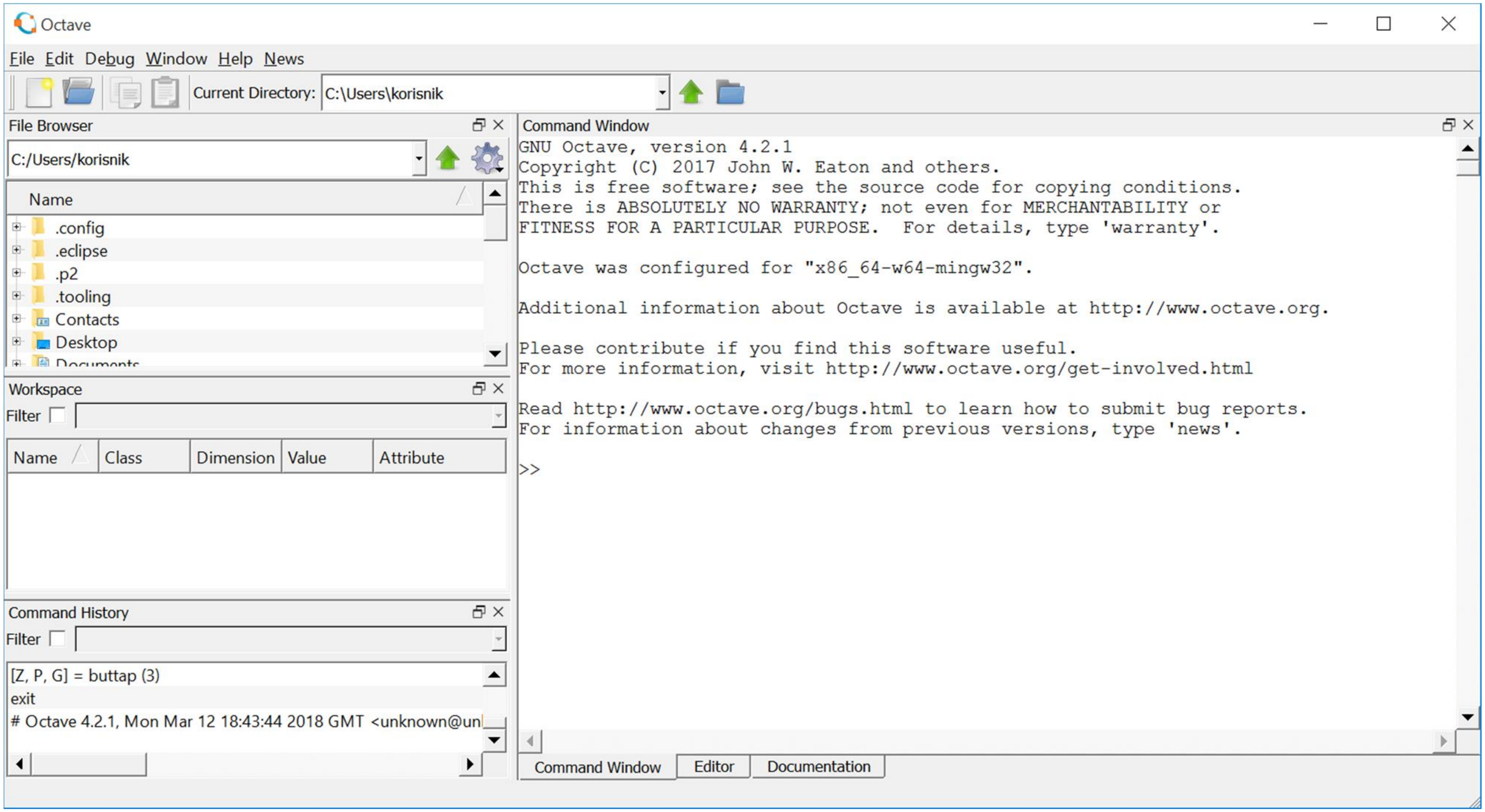
https://www.gnu.org/software/octave/

GNU Octave



https://www.gnu.org/software/octave/download.html

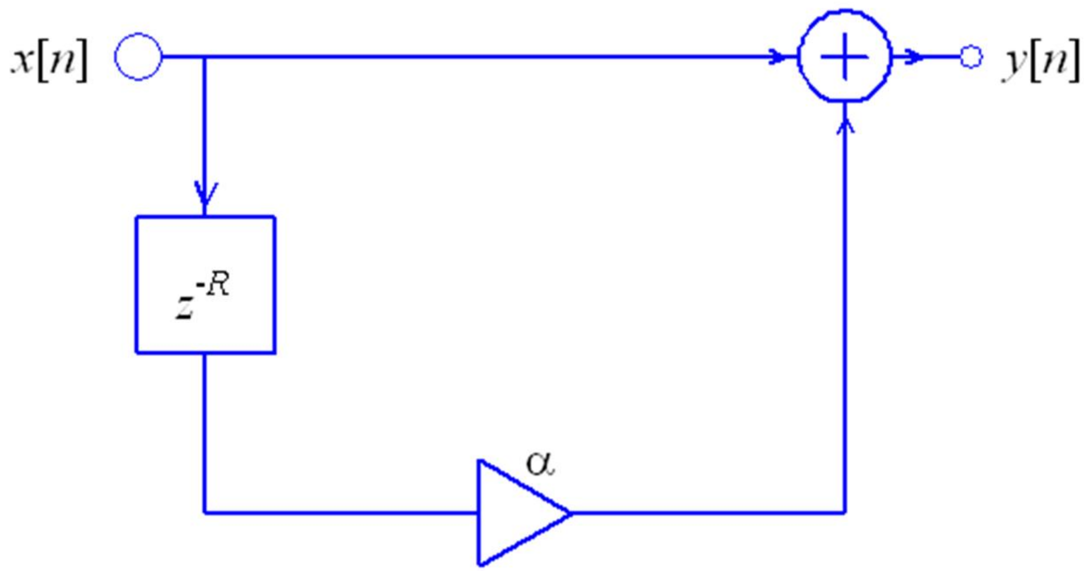
GNU Octave 4.2.1



Filtar za eho

- Eho se generiše kolima za kašnjenje
- Zakašnjeni signal je oslabljen
- Filtar se naziva ***comb*** filtar

Program_echo (1)

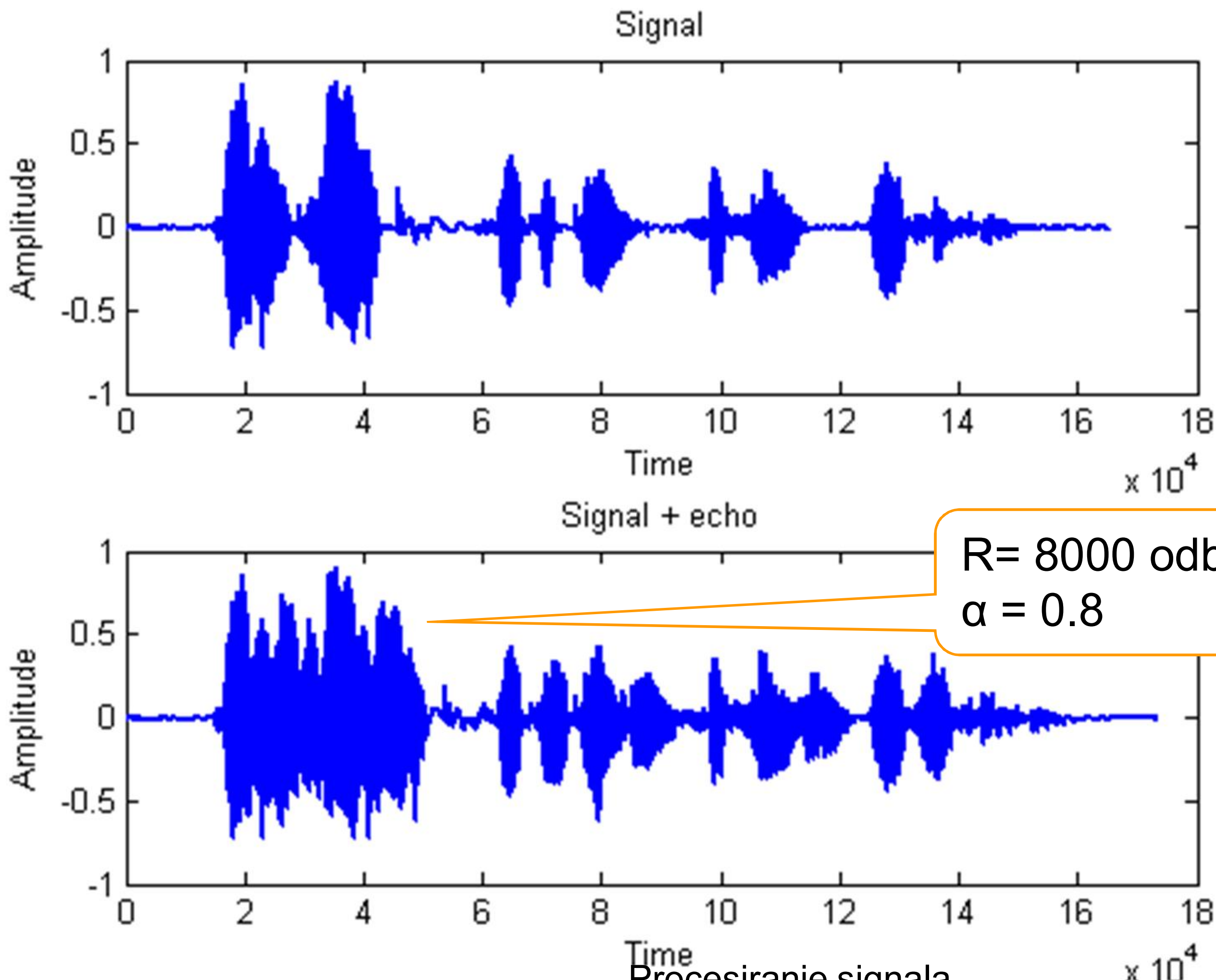


Program_echo (2)

```
[x,fs,nbits] = wavread('dsp01.wav');
wavplay(x,fs);
nDelay = 8000;
aGain = 0.8;
y = singleecho(x,nDelay,aGain);
wavplay(y,fs);
subplot(2,1,1)
plot(1:length(x),x)
xlabel('Time'); ylabel('Amplitude')
title('Signal')
subplot(2,1,2)
plot(1:length(y),y)
xlabel('Time'); ylabel('Amplitude')
title('Signal + echo')
```

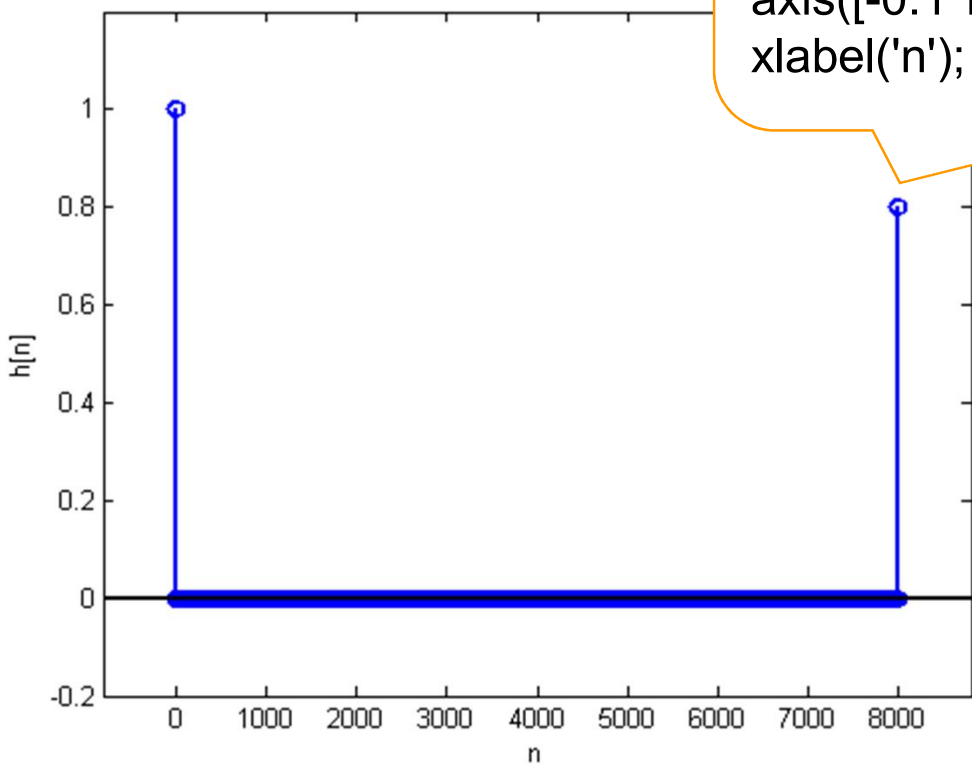
```
function y =  singleecho(x, R, a);
y =x;
y(end+R) = 0;
y(R+1:end) = y(R+1:end) + a*x;
```

Program_echo (3)



R= 8000 odbiraka
α = 0.8

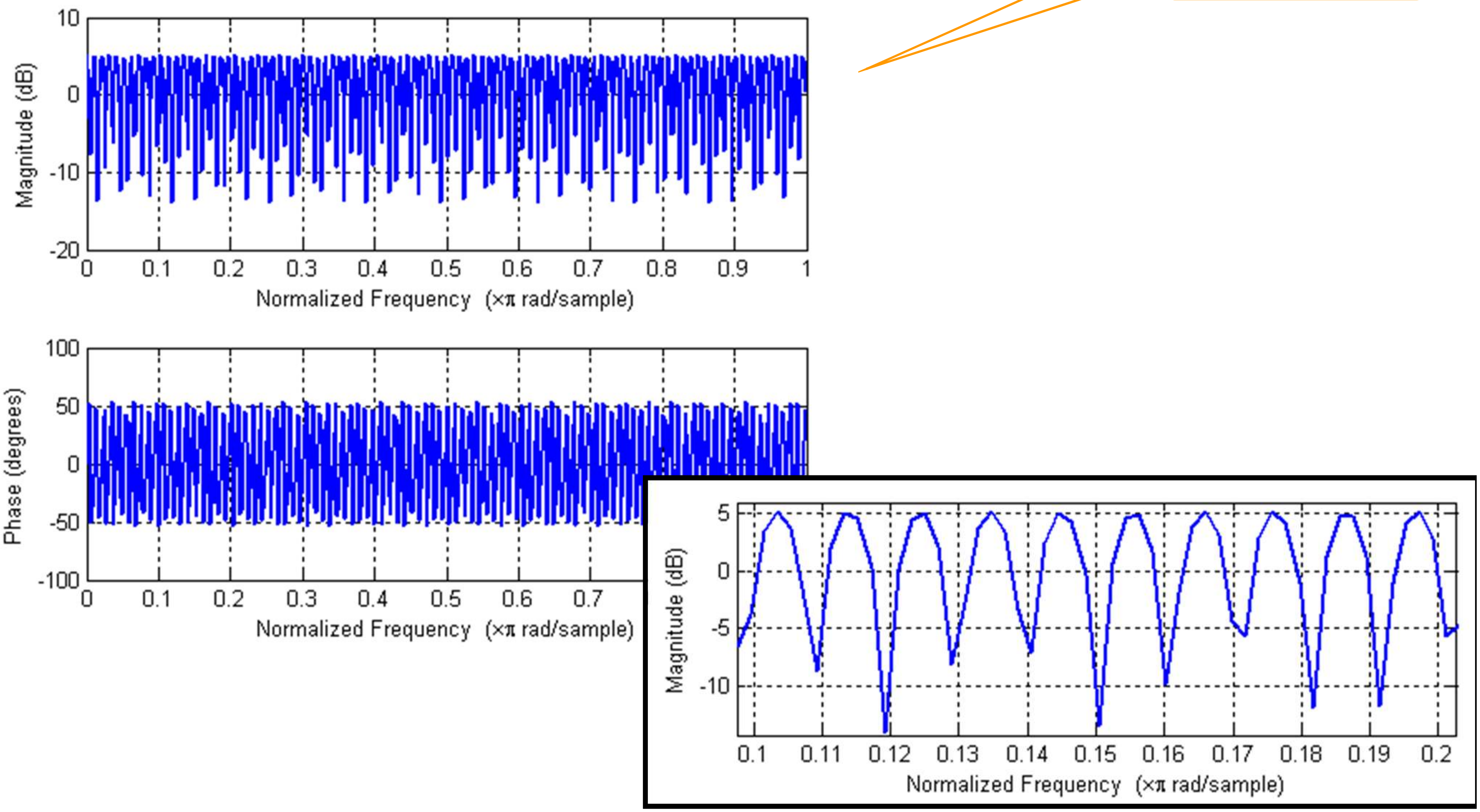
Program_echo (4)



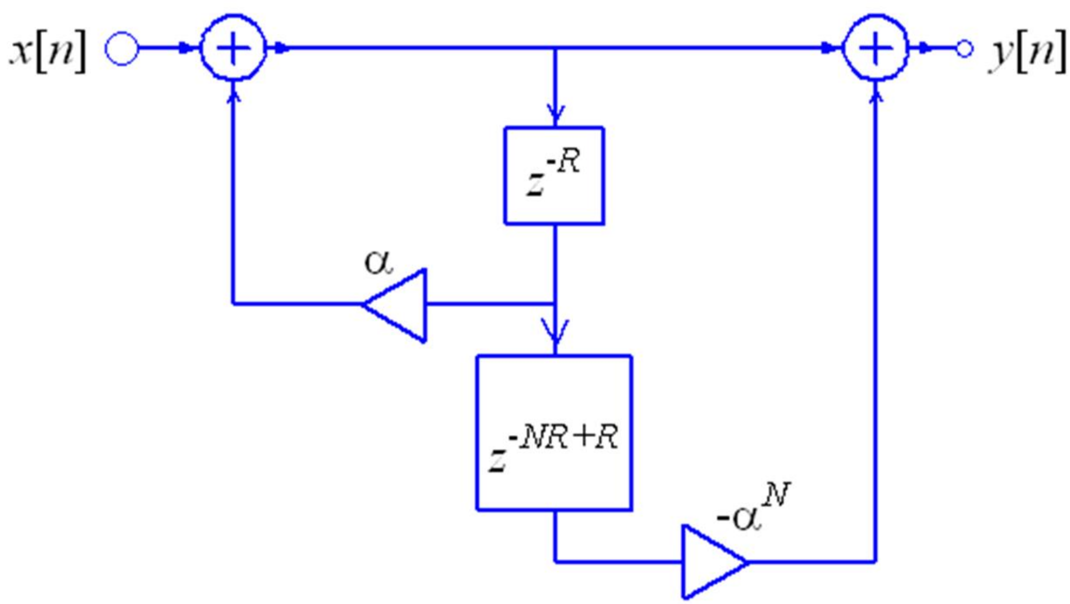

```
h = 1;
h(nDelay)=aGain;
stem(h);
axis([-0.1*nDelay 1.1*nDelay -0.2 1.2]);
xlabel('n'); ylabel('h[n]')
```

Program_echo (5)

figure
freqz(h);



Program_m_echo (1)

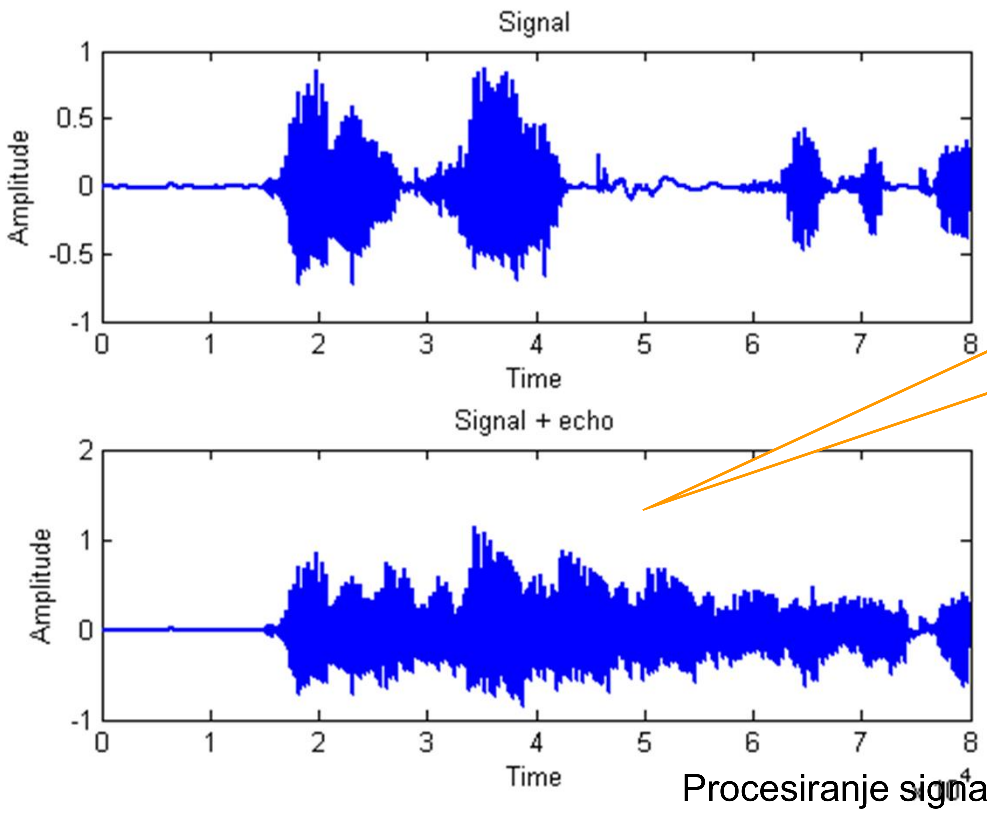


Program_m_echo (2)

```
[x,fs,nbits] = wavread('dsp01.wav');
x(80000:end)=[];
wavplay(x,fs);
nDelay = 8000;
nEcho = 3;
aGain = 0.8;
y = multiecho(x,nDelay,aGain,nEcho);
wavplay(y,fs);
subplot(2,1,1)
plot(1:length(x),x)
subplot(2,1,2)
plot(1:length(y),y)
```

```
function y = multiecho(x,R,a,N);
num = 1;
if N > 0
   num(N*R+1) = -a^N;
end
den = 1;
den(R+1) = -a;
y=filter(num,den,x);
```

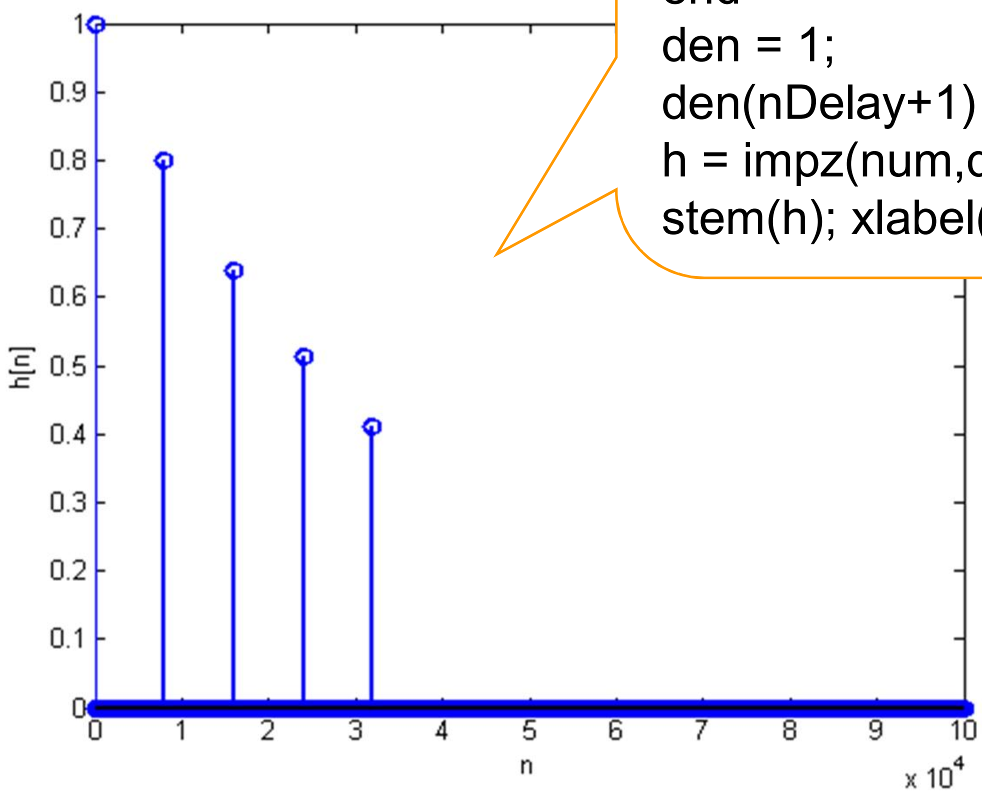
Program_m_echo (3)



R= 8000 odbiraka
$\alpha = 0.8$
N = 5

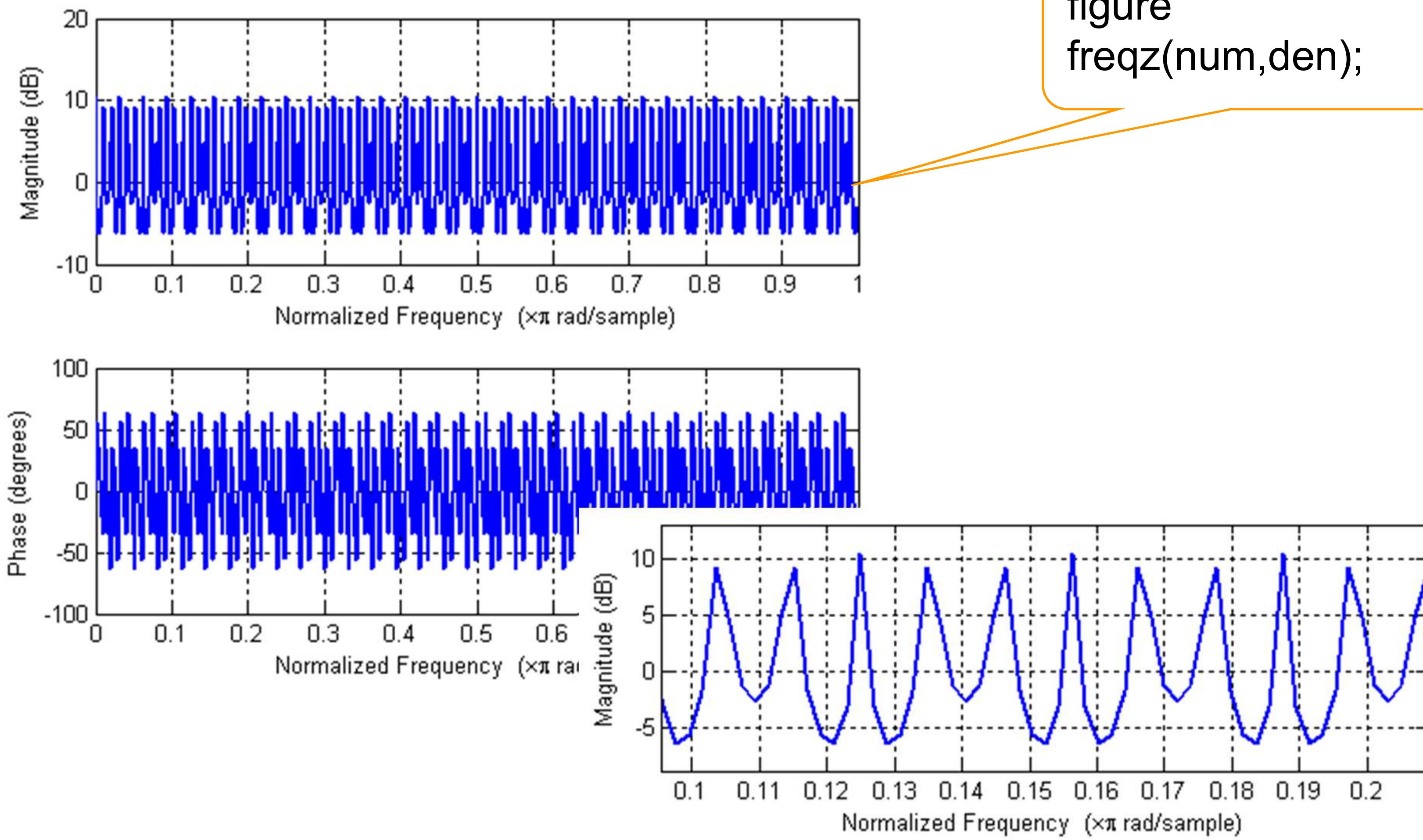
Program_m_echo (4)

```
num = 1;
if nEcho > 0
   num(nEcho*nDelay+1) = -aGain^nEcho;
end
den = 1;
den(nDelay+1) = -aGain;
h = impz(num,den,100000);
stem(h); xlabel('n'); ylabel('h[n]')
```



Program_m_echo (5)

```
figure
freqz(num,den);
```



Sadržaj

- Procesiranje muzičkih signala
- Sinteza digitalnih muzičkih signala
- Kompresija signala
- Trans-multiplekseri
- Discretni višetonski prenos digitalnih podataka
- Konvertori sa oversamplingom

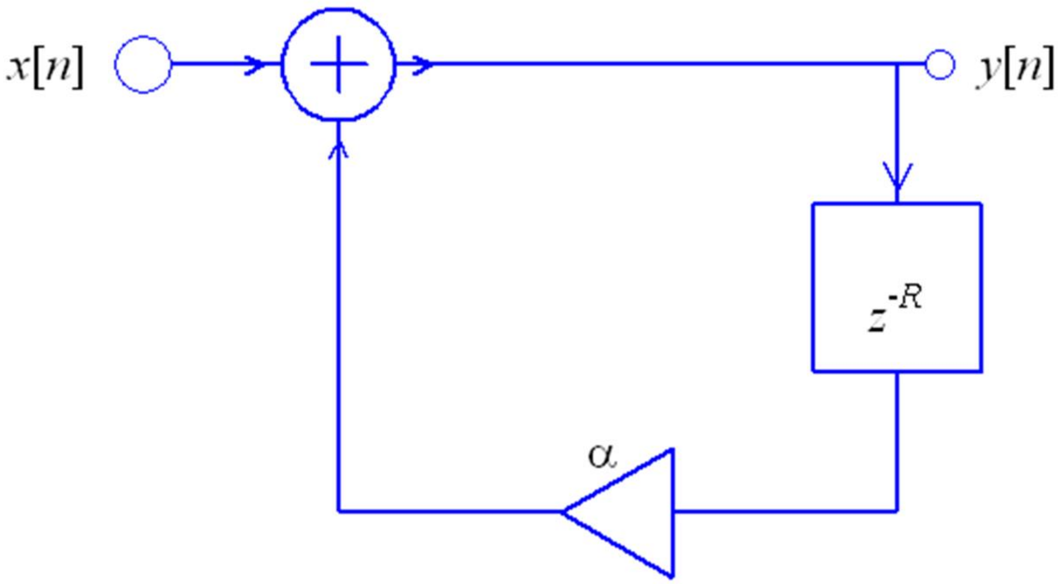
Reverberacija

- **Reverberacija** je niz uzastopnih sve slabijih refleksija koje prate direktan zvuk i koji se ne mogu međusobno razlučiti
- Eho ili odjek se čuju kao izdvojene refleksije – razlika od reverberacije
- Vreme reverberacije je vreme potrebno da akustička energija opadne po isključivanju izvora na milioniti deo prvobitne vrednosti (60 dB)
- Nagib krive opadanja zvuka u dB po jedinici vremena je konstantan
- Zavisi od veličine prostorije i ukupne apsorpcije
- Muzika na otvorenom prostoru, kada nema reverberacije, zvuči *suvo* i *prazno* a orkestar deluje *razbijeno*

Reverberacija i refleksija

- U zatvorenom prostoru, zvuk koji dolazi do slušaoca se satoji od
  (1) **direktnog zvuka**,
  (2) **prve refleksije** i
  (3) **reverberacije**
- Prve refleksije su one koje učestvuju
  u prvih 5 dB (10 dB) pada nivoa
- Zvuk koji se proizvodi u studiju ne zvuči ***prirodno***
- Digitalni filter se koristi da bi zvuk zvučao prirodno

Beskonačan broj ehoa (1)

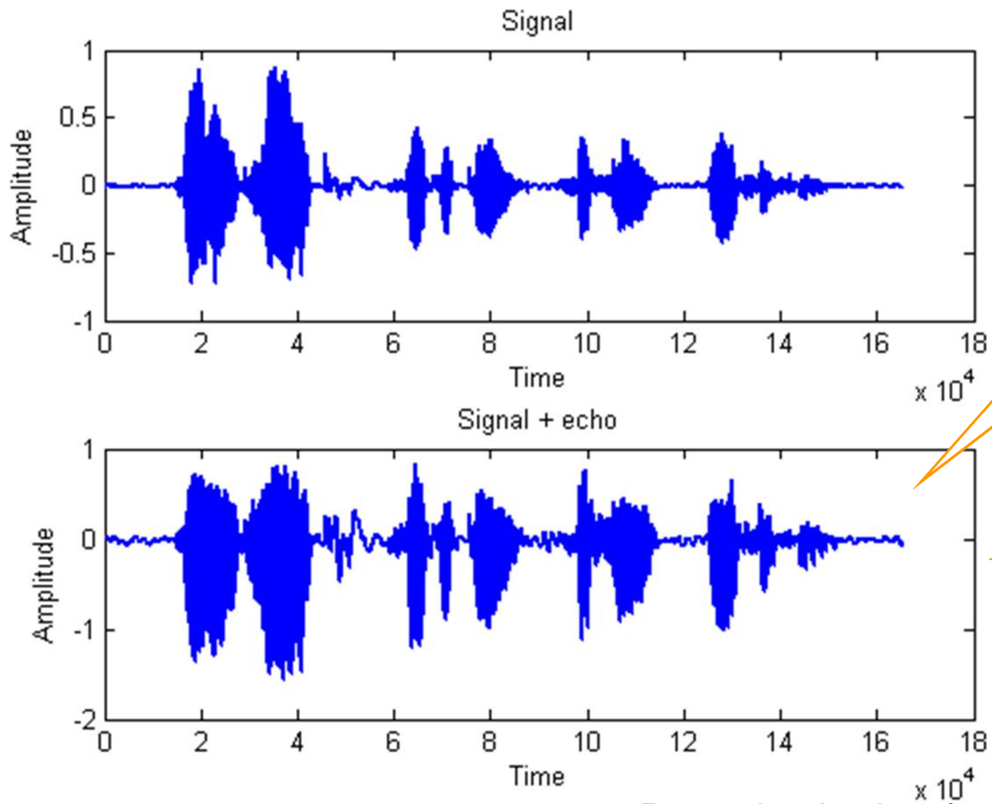


IIR filtar koji generiše beskonačan broj ehoa

Beskonačan broj ehoa (2)

```
[x,fs,nbits] = wavread('dsp01.wav');
wavplay(x,fs);
nDelay = 10;
aGain = 0.8;
nReverb = nDelay*(log(1/1000)/log(aGain));
num = 1;
den = 1;
den(nDelay+1) = -aGain;
y = filter(num,den,x);
wavplay(y,fs);
subplot(2,1,1)
plot(1:length(x),x)
xlabel('Time'); ylabel('Amplitude')
title('Signal')
subplot(2,1,2)
plot(1:length(y),y)
xlabel('Time'); ylabel('Amplitude')
title('Signal + echo')
```

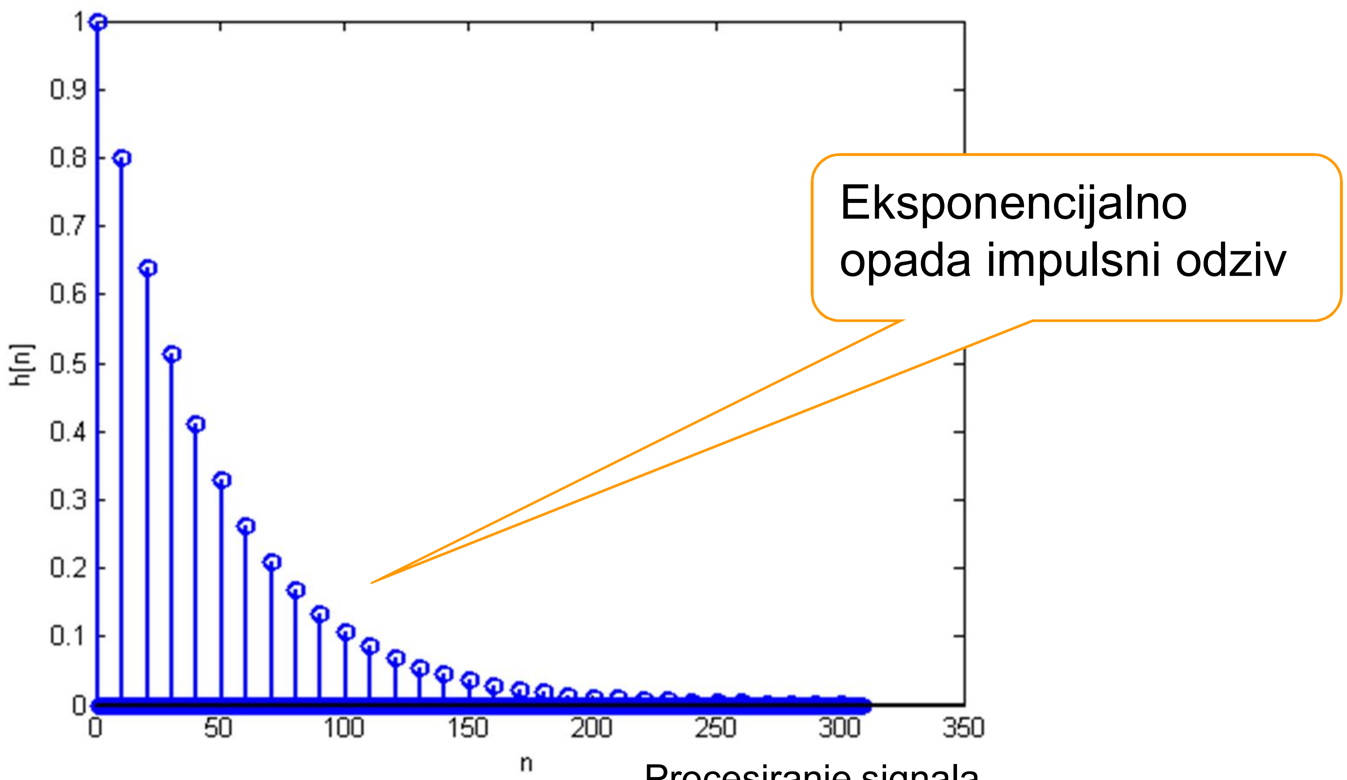
Beskonačan broj ehoa (3)



R= 10 odbiraka
α = 0.8

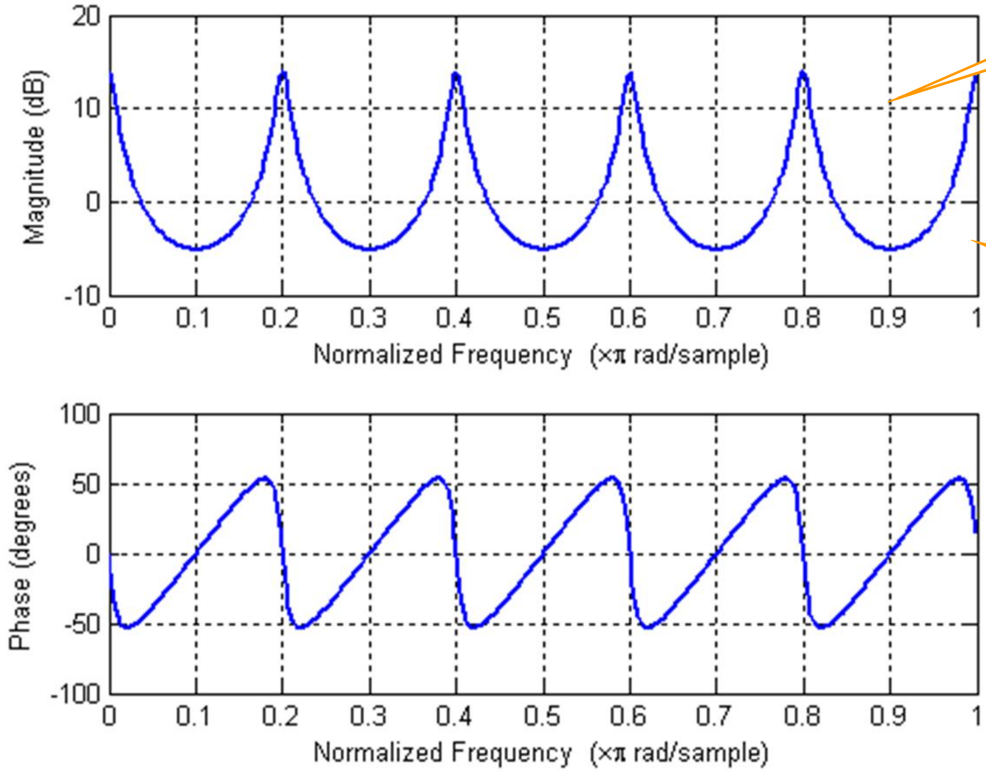
Prirodan zvuk

Beskonačan broj ehoa (4)



Beskonačan broj ehoa (5)

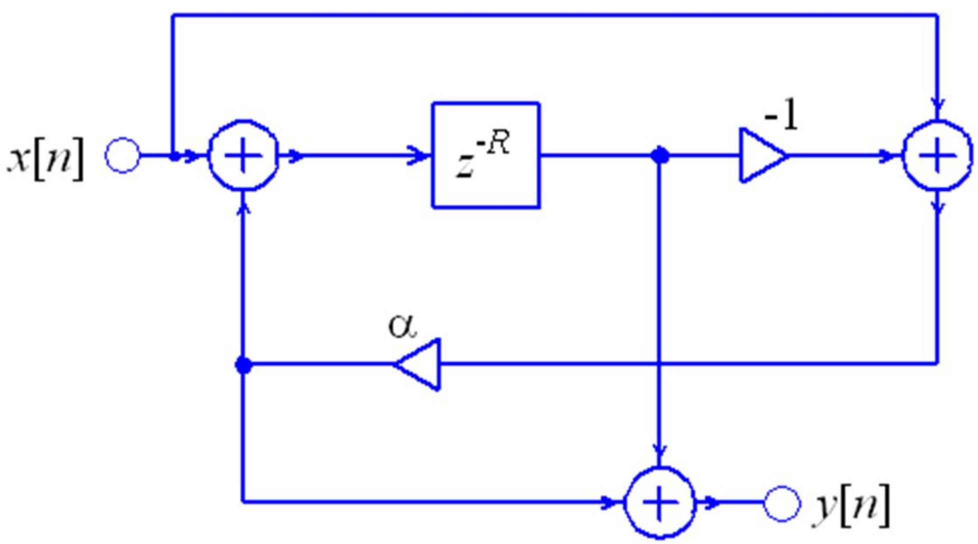
Frekvencijska karakteristika



Spektar je obojen, amplitudska karakteristika nije ravna

Allpass reverberator (1)

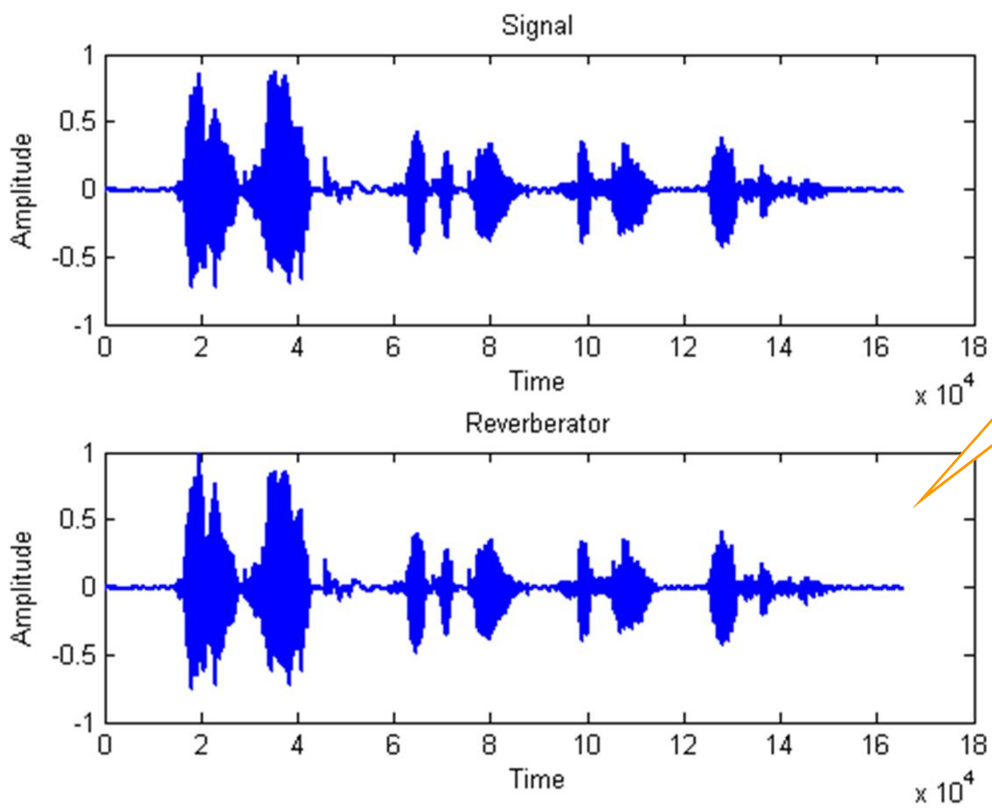
IIR allpass reverberator



Allpass reverberator (2)

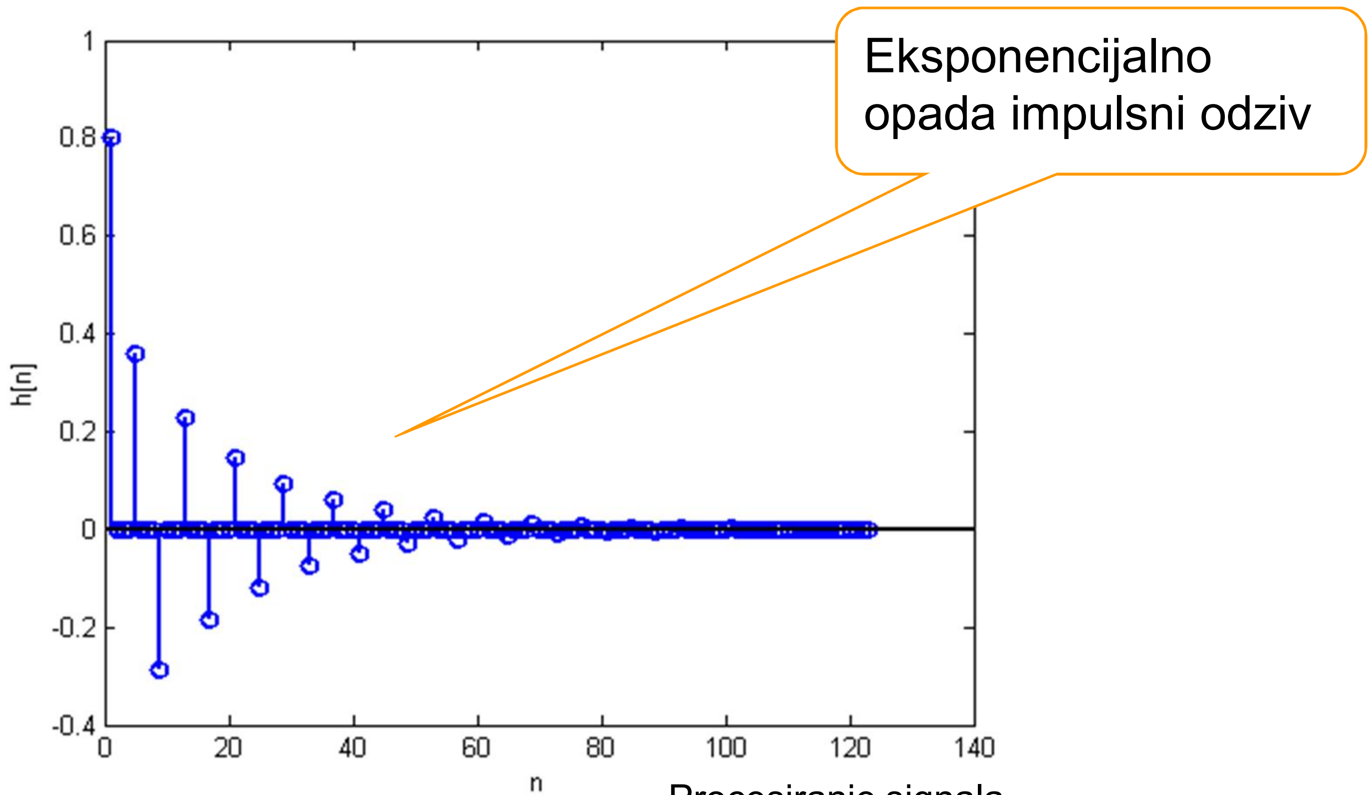
```
[x,fs,nbits] = wavread('dsp01.wav');
wavplay(x,fs);
nDelay = 4;
aGain = 0.8;
nReverb = nDelay*(log(1/1000)/log(aGain));
num = aGain;
num(nDelay+1) = 1;
den = 1;
den(nDelay+1) = aGain;
y = filter(num,den,x);
wavplay(y,fs);
subplot(2,1,1)
plot(1:length(x),x)
xlabel('Time'); ylabel('Amplitude')
title('Signal')
subplot(2,1,2)
plot(1:length(y),y)
xlabel('Time'); ylabel('Amplitude')
title('Reverberator')
```

Allpass reverberator (3)

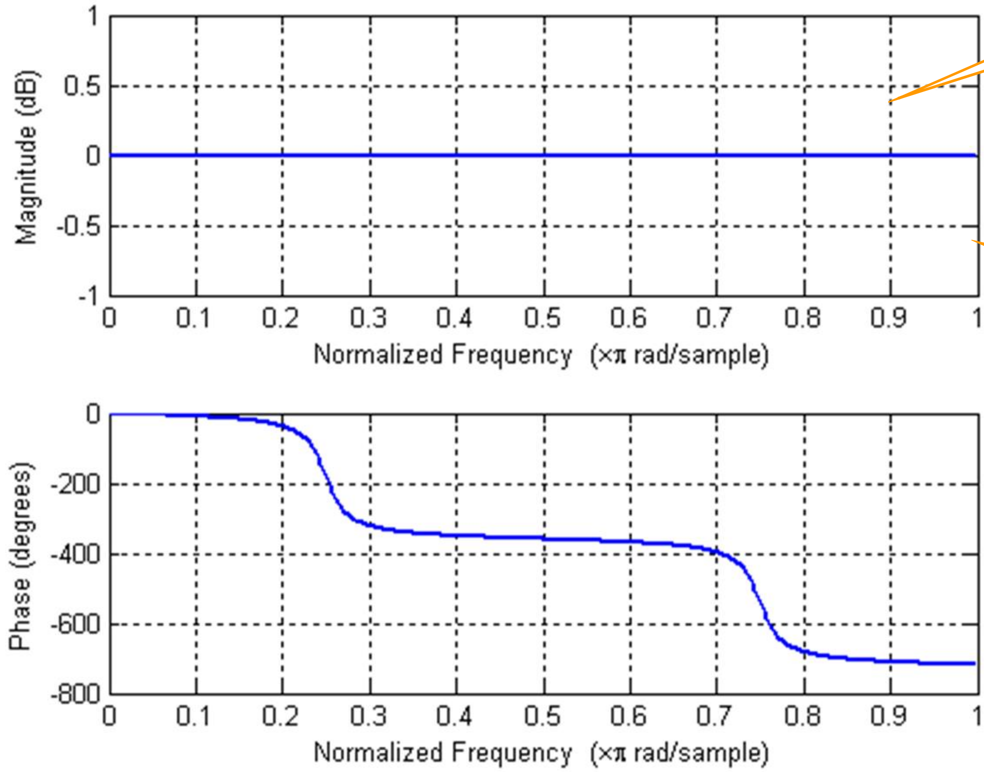


R= 4 odbiraka
α = 0.8

Allpass reverberator (4)



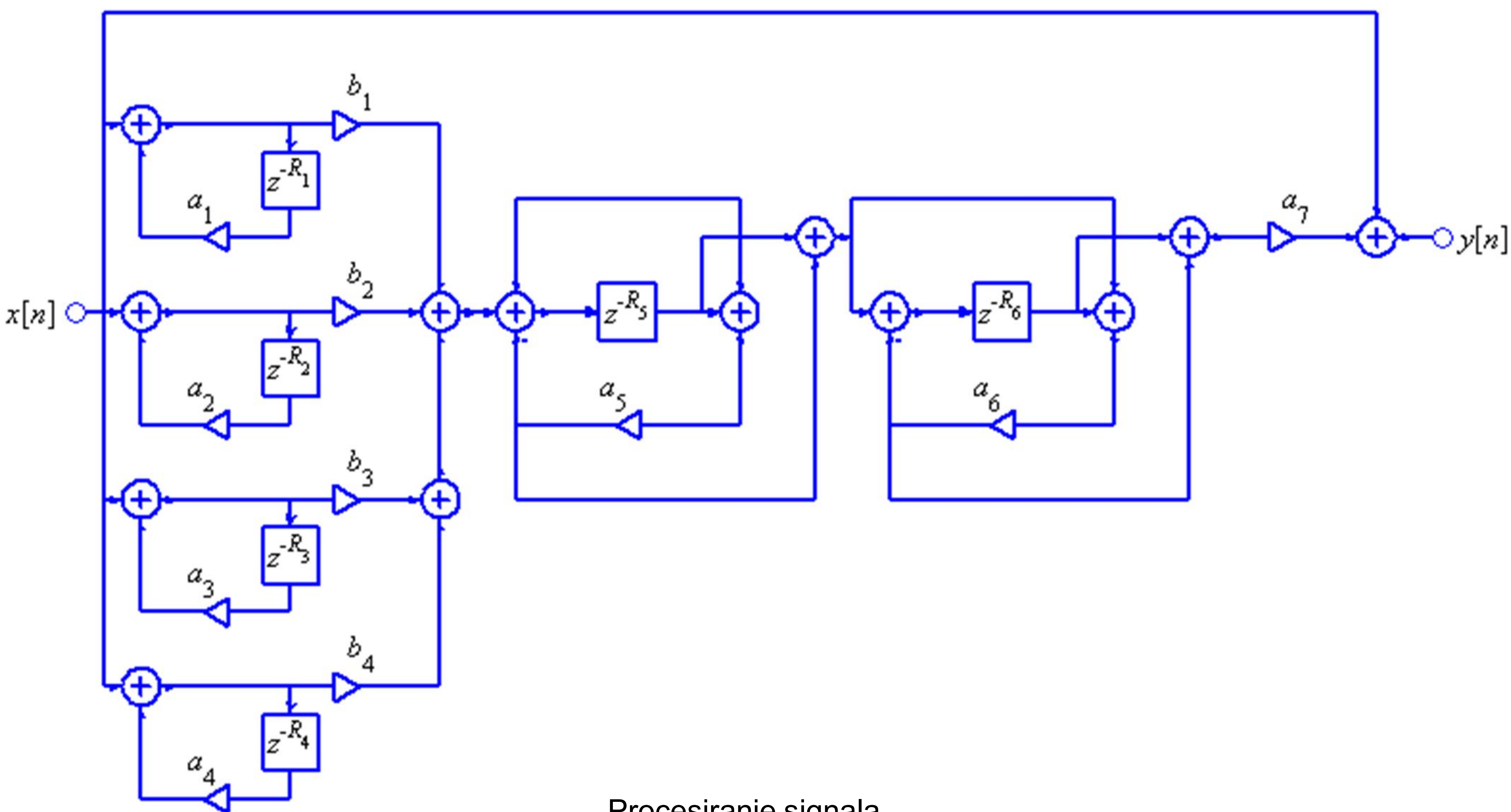
Allpass reverberator (5)



Frekvencijska karakteristika

Spektar je ravan, amplitudska karakteristika je ravna

Eho + allpass reverberator (1)



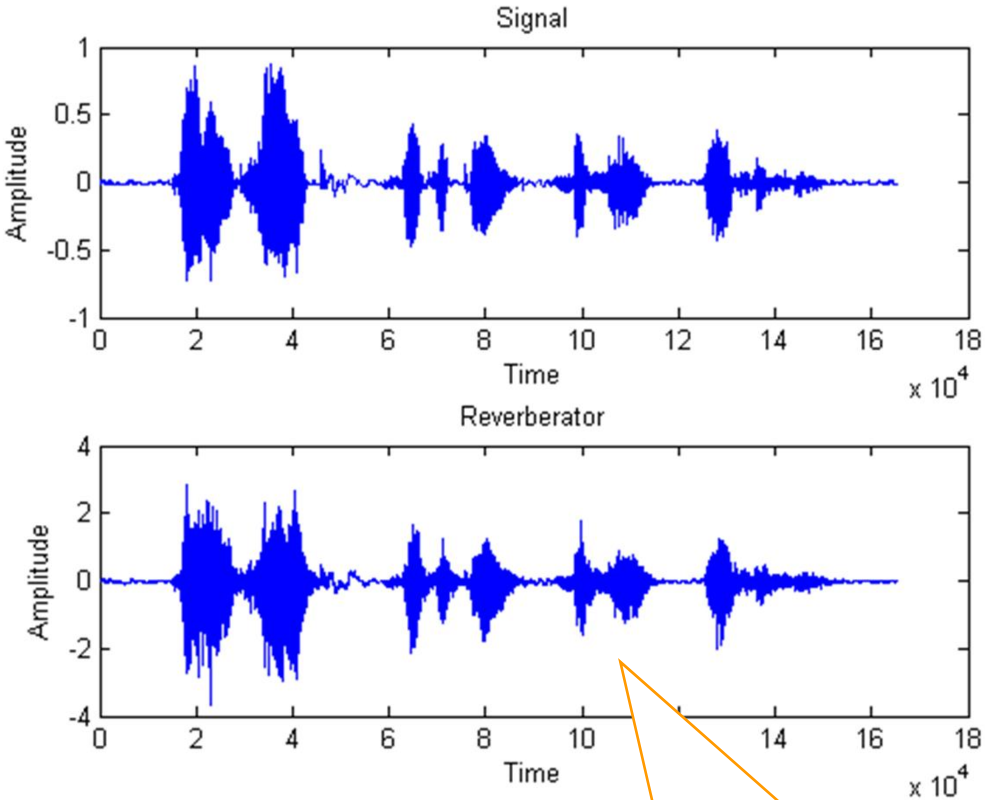
Eho + allpass reverberator (2)

```
a = [0.6 0.4 0.2 0.1 0.7 0.6 0.8];
R = [700 900 600 400 450 390];
[x,fs,nbits] = wavread('dsp01.wav');
wavplay(x,fs);
pause (0.1)

d1 = multiecho(x, R(1), a(1), 0);
d2 = multiecho(x, R(2), a(2), 0);
d3 = multiecho(x, R(3), a(3), 0);
d4 = multiecho(x, R(4), a(4), 0);
d_IIR = d1 + d2 + d3 + d4;  %output of IIR echo
generators
d_ALL1 = alpas(d_IIR, R(5), a(5));
d_ALL2 = alpas(d_ALL1, R(6), a(6));
y = x + a(7)*d_ALL2;
```

Eho + allpass reverberator (3)

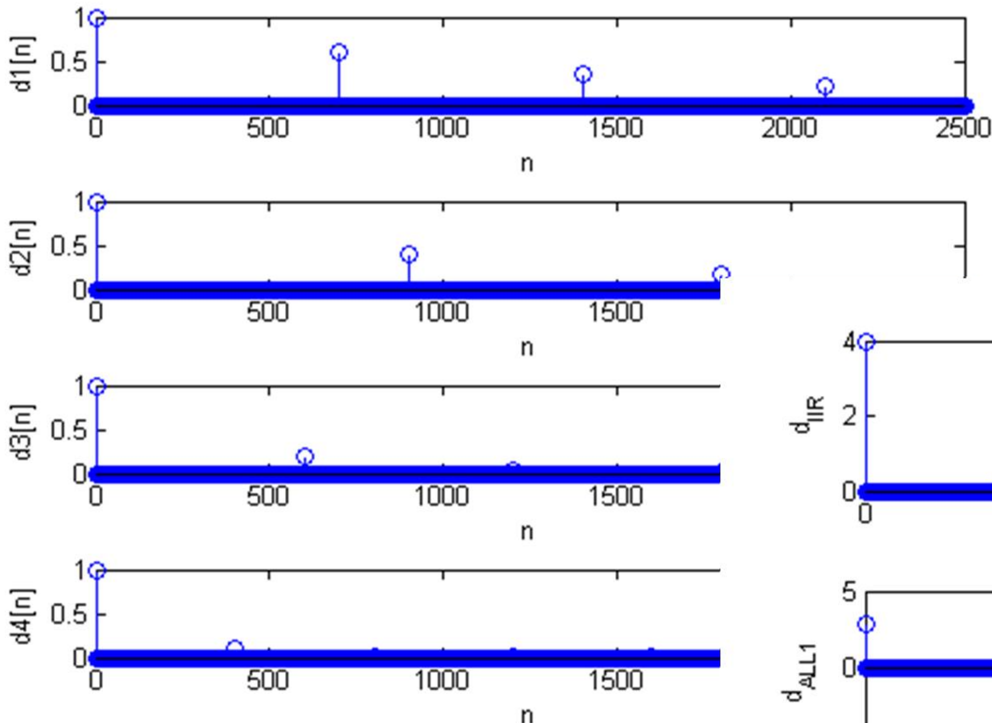
```
x = 0*x; x(1)=1;
d1 = multiecho(x, R(1), a(1), 0);
d2 = multiecho(x, R(2), a(2), 0);
d3 = multiecho(x, R(3), a(3), 0);
d4 = multiecho(x, R(4), a(4), 0);
d_IIR = d1 + d2 + d3 + d4;  %output of IIR echo
generators
d_ALL1 = alpas(d_IIR, R(5), a(5));
d_ALL2 = alpas(d_ALL1, R(6), a(6));
y = x + a(7)*d_ALL2;

freqz(y,1);
```

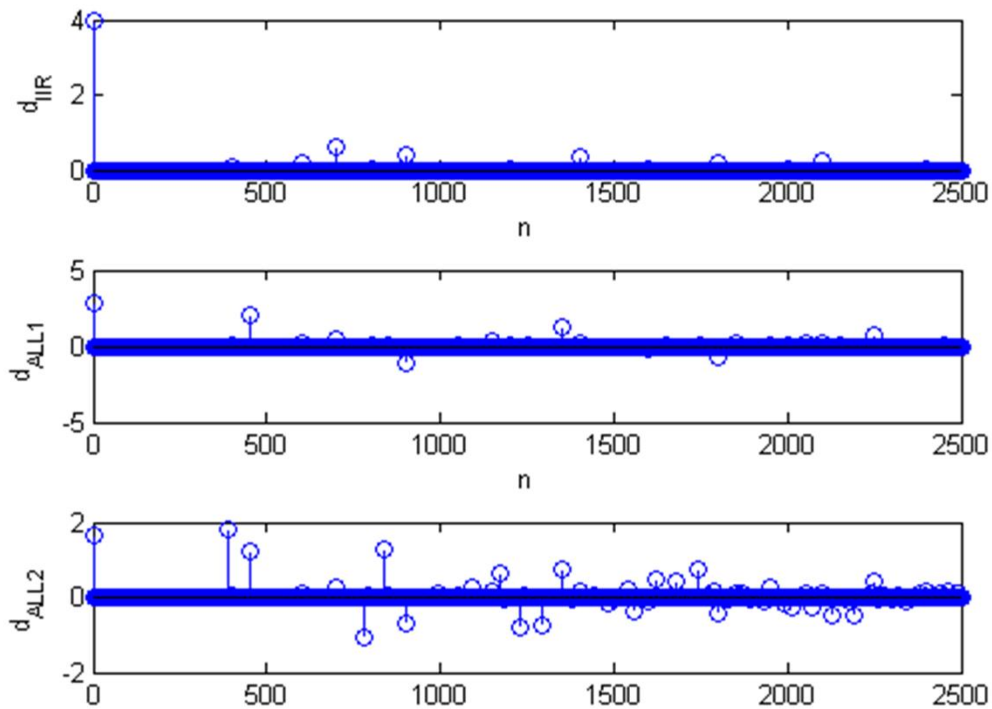
Eho + allpass reverberator (4)



a = [0.6 0.4 0.2 0 .1 0.7 0.6 0.8];
R = [700 900 600 400 450 390];

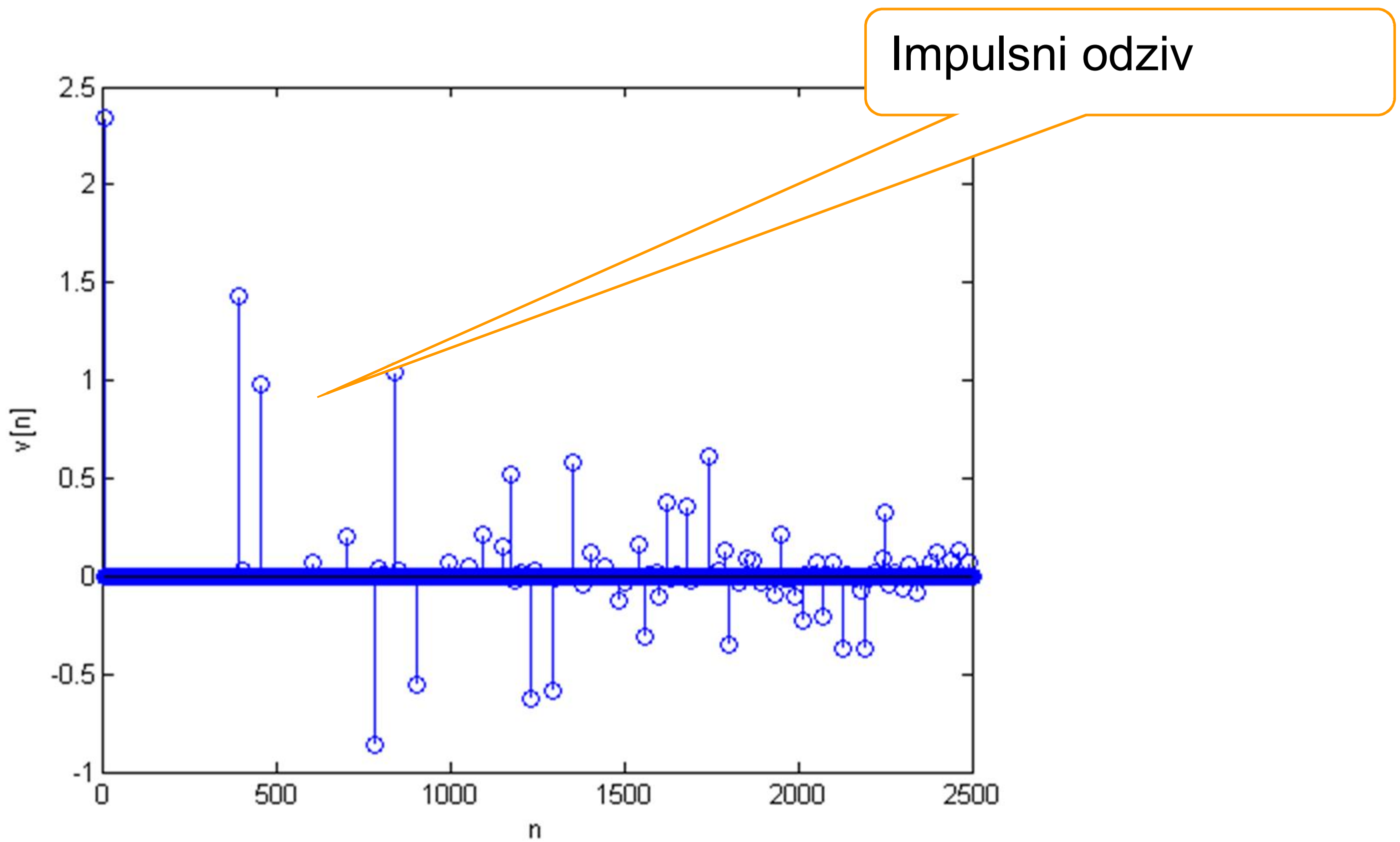
Eho + allpass reverberator (5)





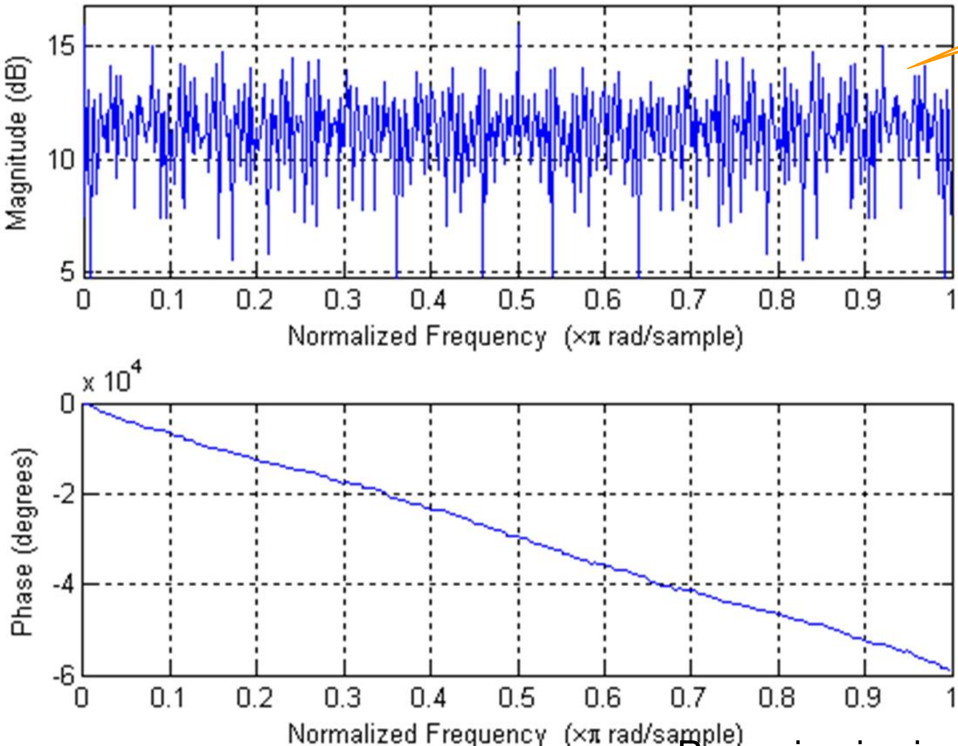
Eksponencijalno opada impulsni odziv

Eho + allpass reverberator (6)

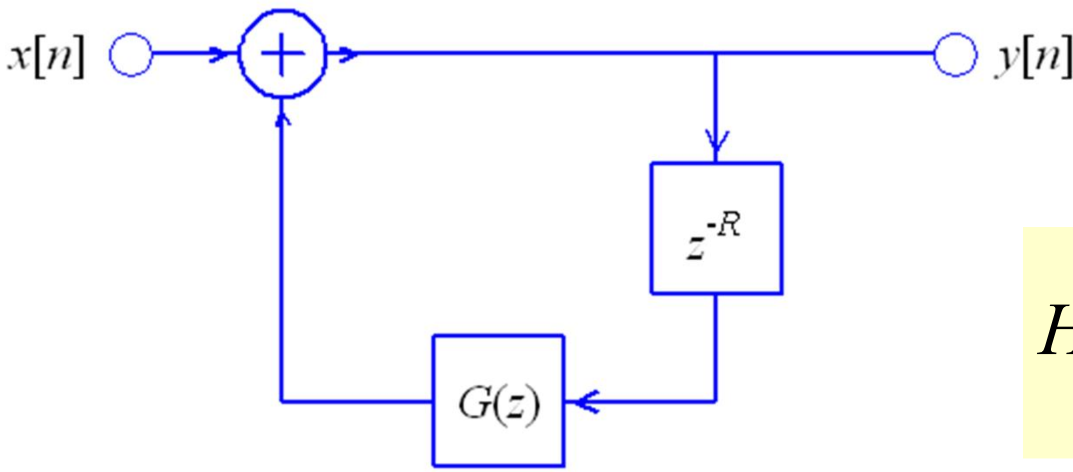


Eho + allpass reverberator (7)

Frekvencijska karakteristika

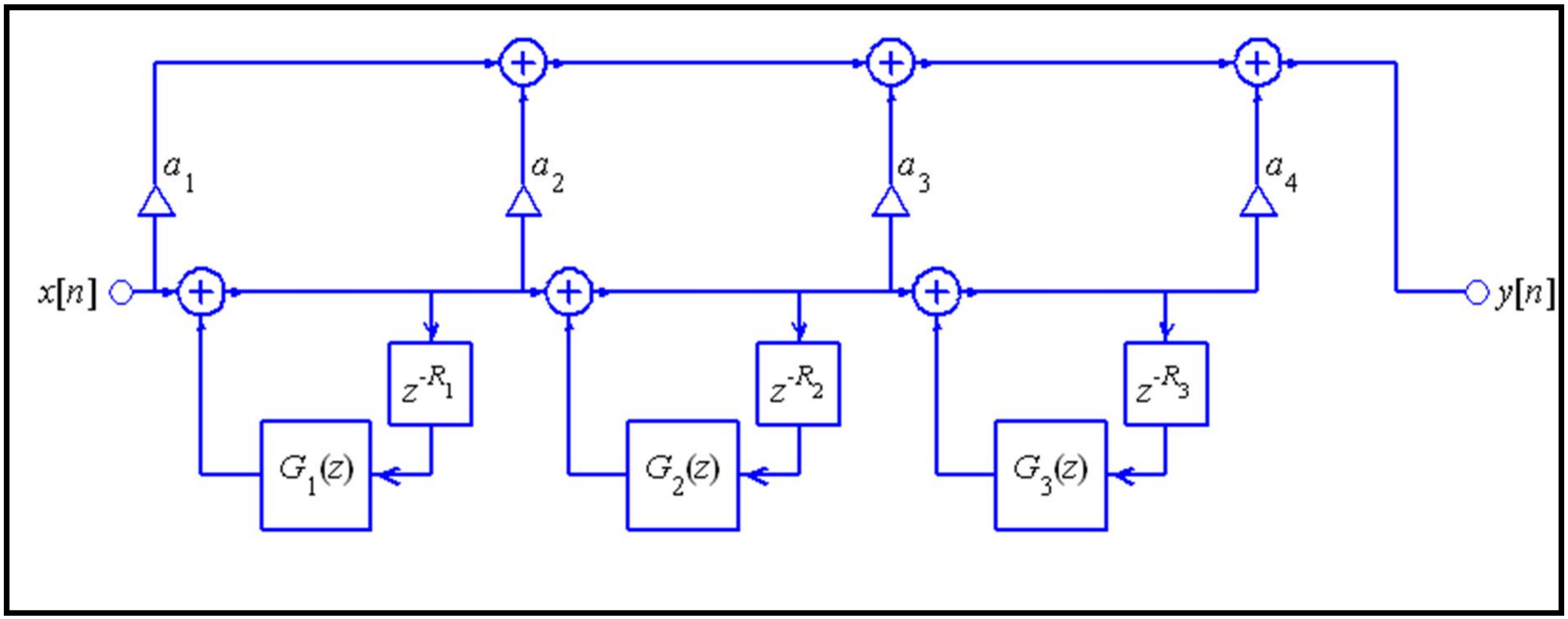


Lowpass reverberator



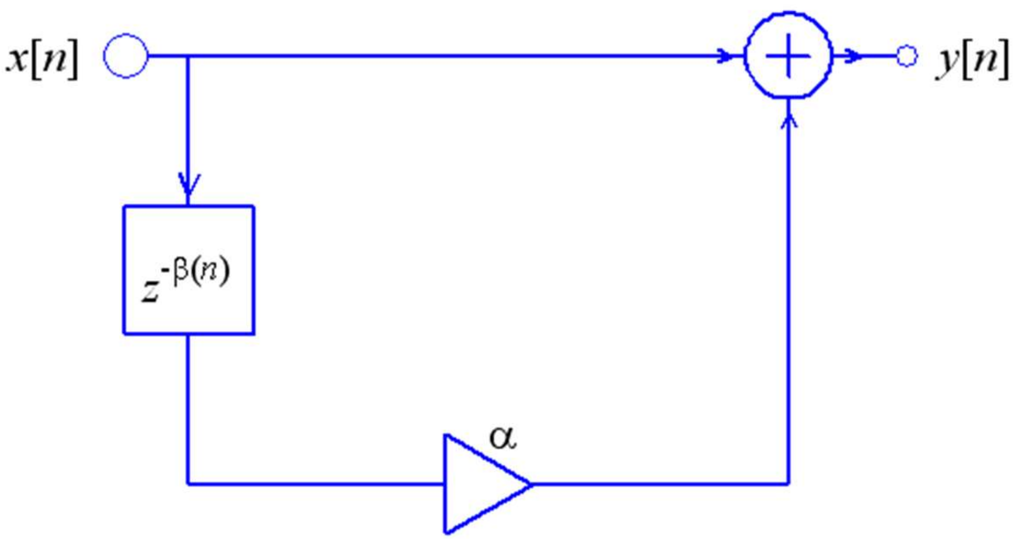
$$H(z) = \frac{1}{1 - z^{-R} G(z)}$$

Multitap reverberator



Flanging efekat

- Flanging efekat se pravi tako što se isti signal dovodi na dva izvora a zatim menja vreme kašnjenja između dva signala
- Promena vremena kašnjenja je kontinualna od 0 do R
- Pošto kašnjenje ne mora da bude ceo broj, primenjuje se interpolacija za izračunavanje vrednosti signala



$$y[n] = x[n] + \alpha\, x[n - \beta(n)]$$

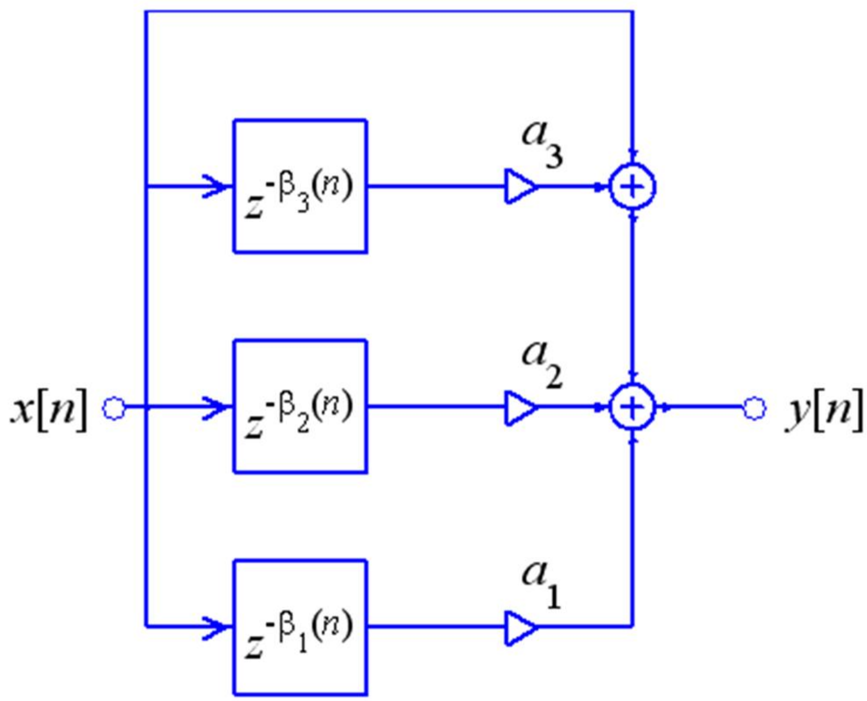
$$\beta(n) = \frac{R}{2}\left(1 - \cos(\omega_0 n)\right)$$

Flanging efekat

```
clear all, close all, clc
[x,fs,nbits] = wavread('dsp01.wav');
wavplay(x,fs);
y = flang(x,1000,0.5,2*pi*6,fs);
wavplay(y,fs);
subplot(2,1,1)
plot(1:length(x),x)
xlabel('Time'); ylabel('Amplitude')
title('Signal')
subplot(2,1,2)
plot(1:length(y),y)
xlabel('Time'); ylabel('Amplitude')
title('Flang')
```

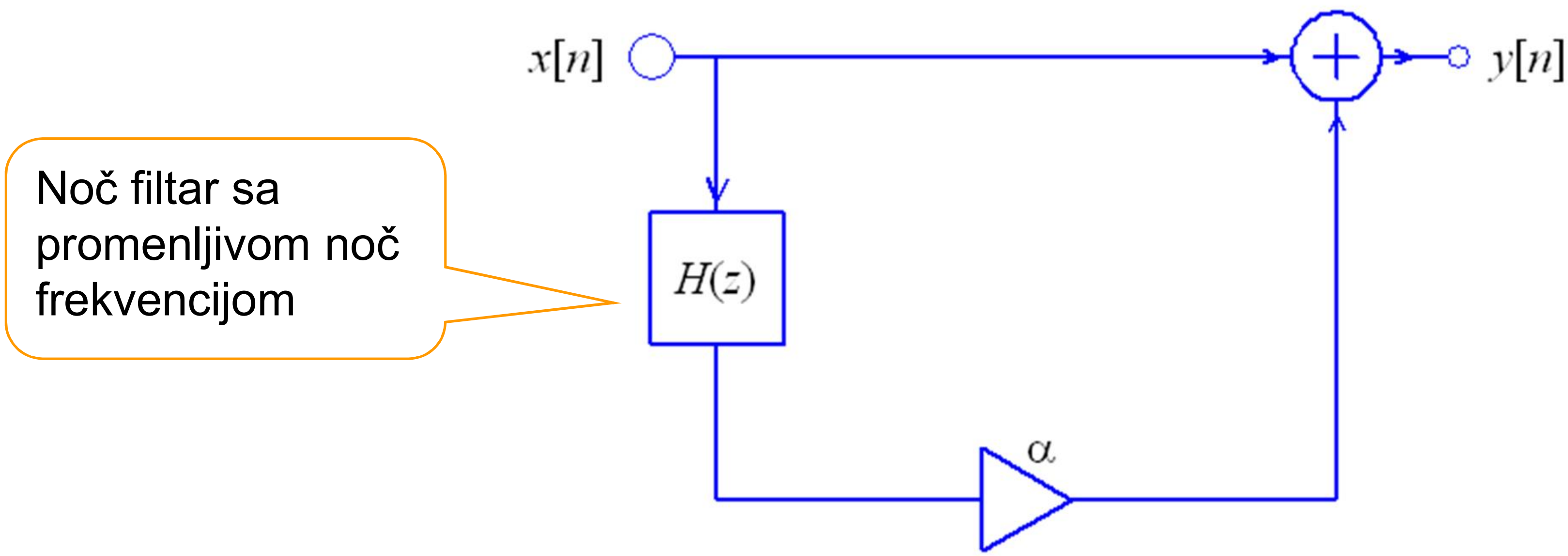
Chorus efekat

- Chorus efekat se dobija kada nekoliko muzičara svira isti instrument u isto vreme ali sa malim razlikama u amplitudi i vremenskom razlikom
- Ovaj efekat može da proizvede jedan muzičar pomoću digitalnog filtra, na slici, kao da svira 4 muzičara
- Kašnjenje je kontinualno, slučajno i sporo promenljivo



Phasing efekat

- Phasing efekat se proizvodi kada se signal propusti uskopojasni noč filtar (ima beskonačno slabljenje na jednoj učestanosti) a zatim dodaje originalnom signalu
- Noč učestanost i propusni opseg se sporo menjaju

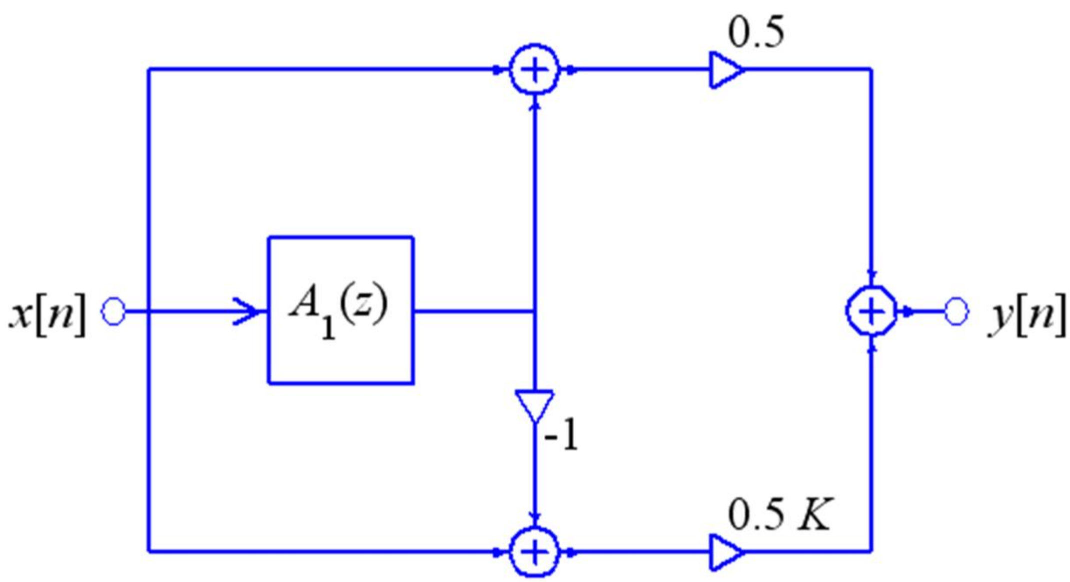


Ekvilajzer

- Ekvilajzer modifikuje frekvencijsku karakteristiku tako da pojačava ili slabi sinusne signale na određenim učestanostima
- (a) filtri propusnici svih učestanosti (allpass),
  (b) izlazni signali allpass filtara se množe konstantom,
  (c) sabiraju se siganli sa ulaznim signalom

Ekvilajzer I reda LP

$$G_{LP}(z) = \frac{K}{2}\left(1 - A_1(z)\right) + \frac{1}{2}\left(1 + A_1(z)\right)$$



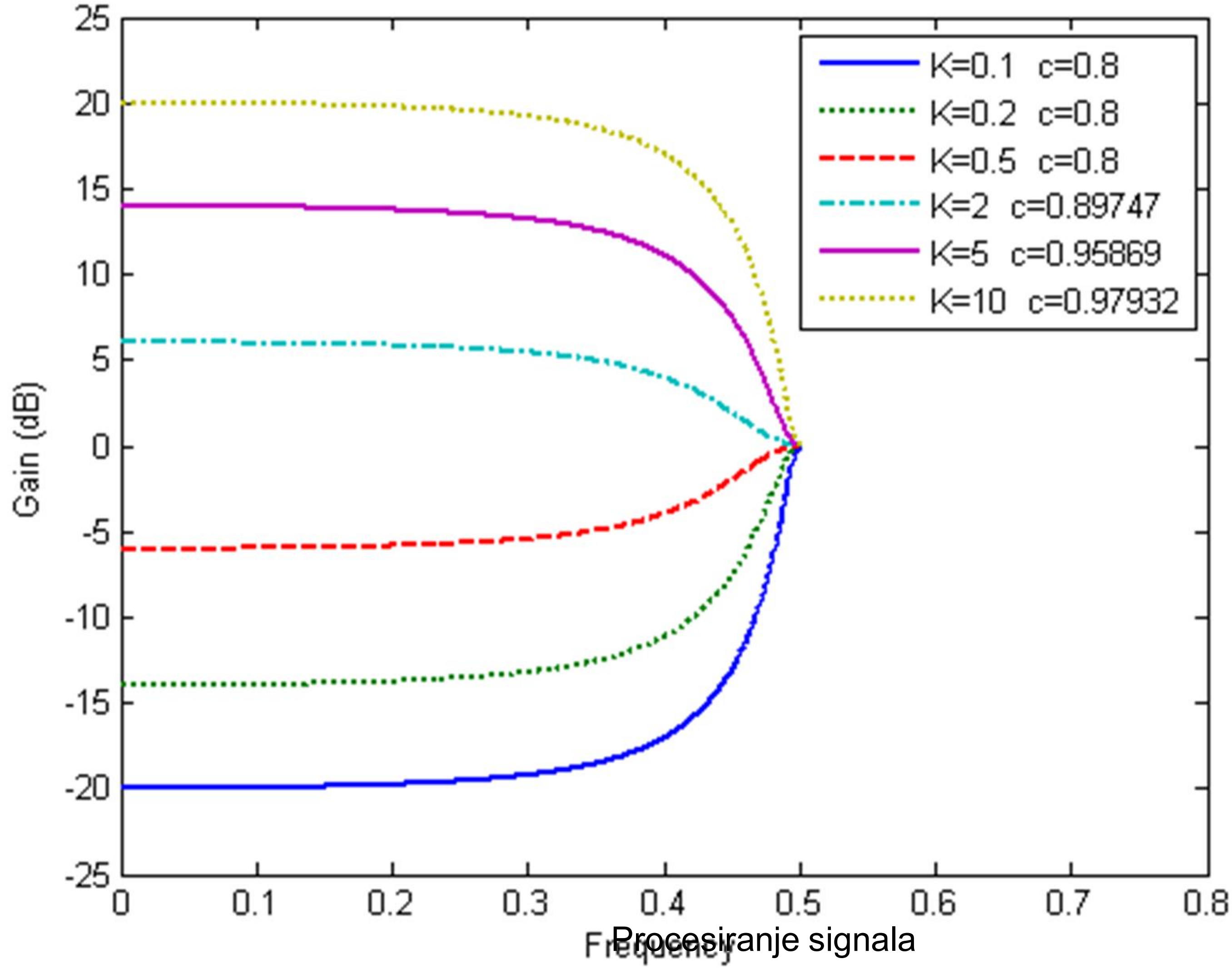
$$A_1(z) = \frac{a_C - z^{-1}}{1 - a_C z^{-1}}$$

$$a_C = \frac{K - \tan(\omega_C T/2)}{K + \tan(\omega_C T/2)}$$

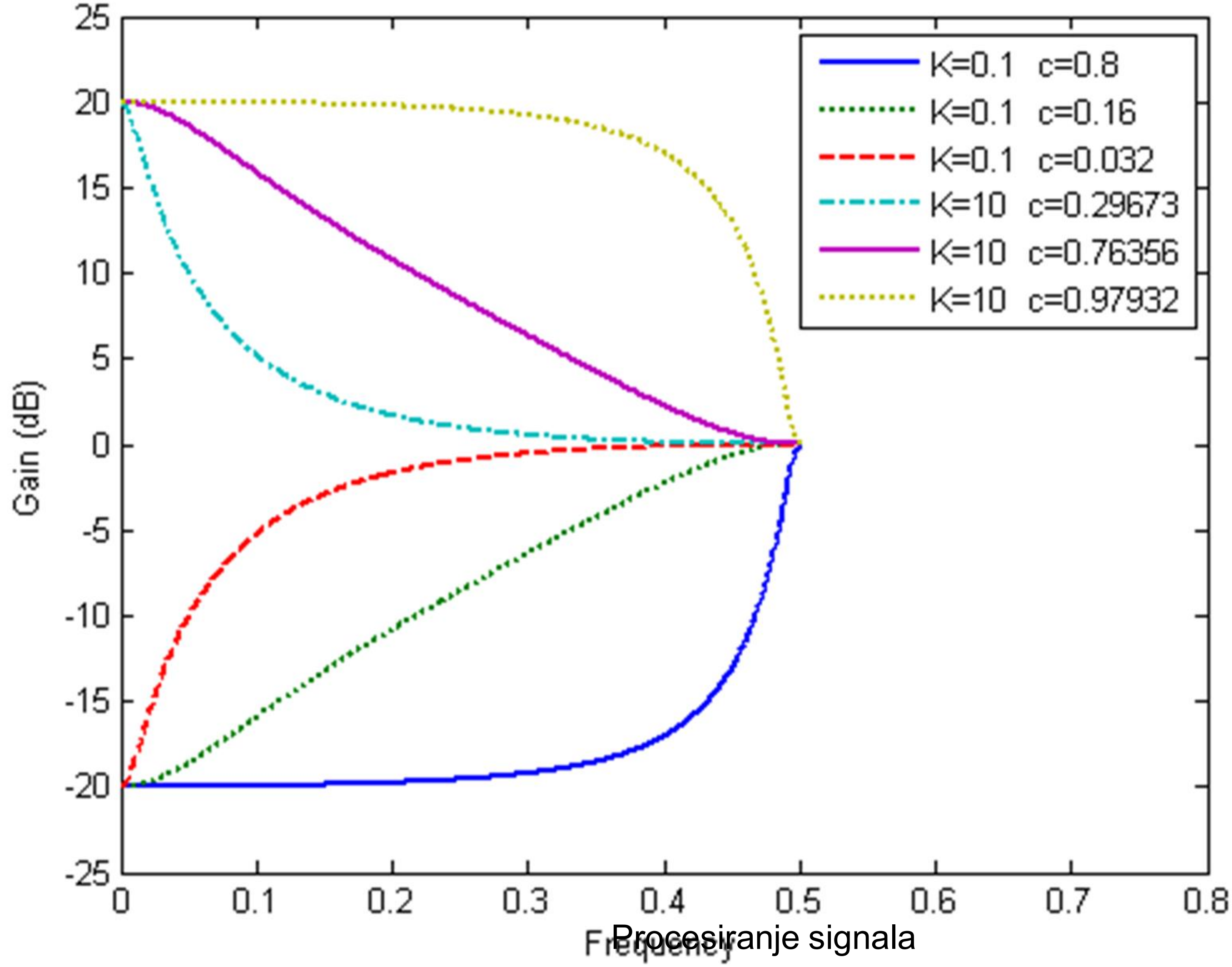
Ekvilajzer I reda LP - kod

```
c = 0.8;
wc = pi*c;
f = 0:0.001:0.5;
T = 1;

K1 = 1/10; c1 = c;
[numGlp11,denGlp11] = filter_g1_lp(wc,K1,T)
h1 = freqz(numGlp11,denGlp11,2*pi*f);
ah1 = 20*log10((abs(h1)));

plot(f,ah1,'-',f,ah2,':',f,ah3,'--',f,ah4,'-.')
xlabel('Frequency'), ylabel('Gain (dB)')
axis([0 0.8 -25 25])
legend(['K=' num2str(K1) '  c=' num2str(c1)],...
```

Ekvilajzer I reda LP (2)

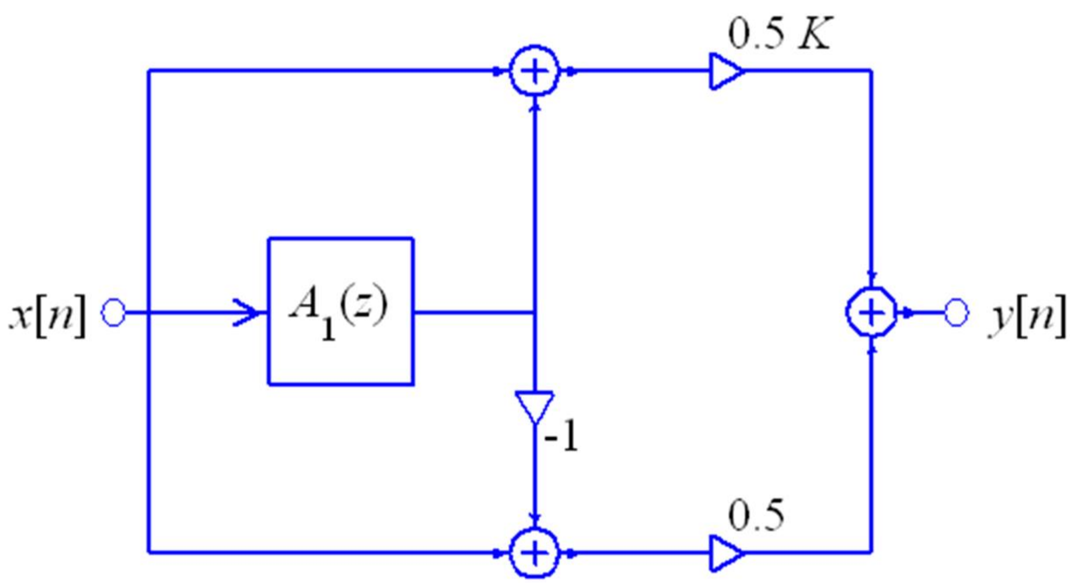


Ekvilajzer I reda LP (3)



Ekvilajzer I reda HP

$$G_{HP}(z) = \frac{1}{2}\left(1 - A_1(z)\right) + \frac{K}{2}\left(1 + A_1(z)\right)$$



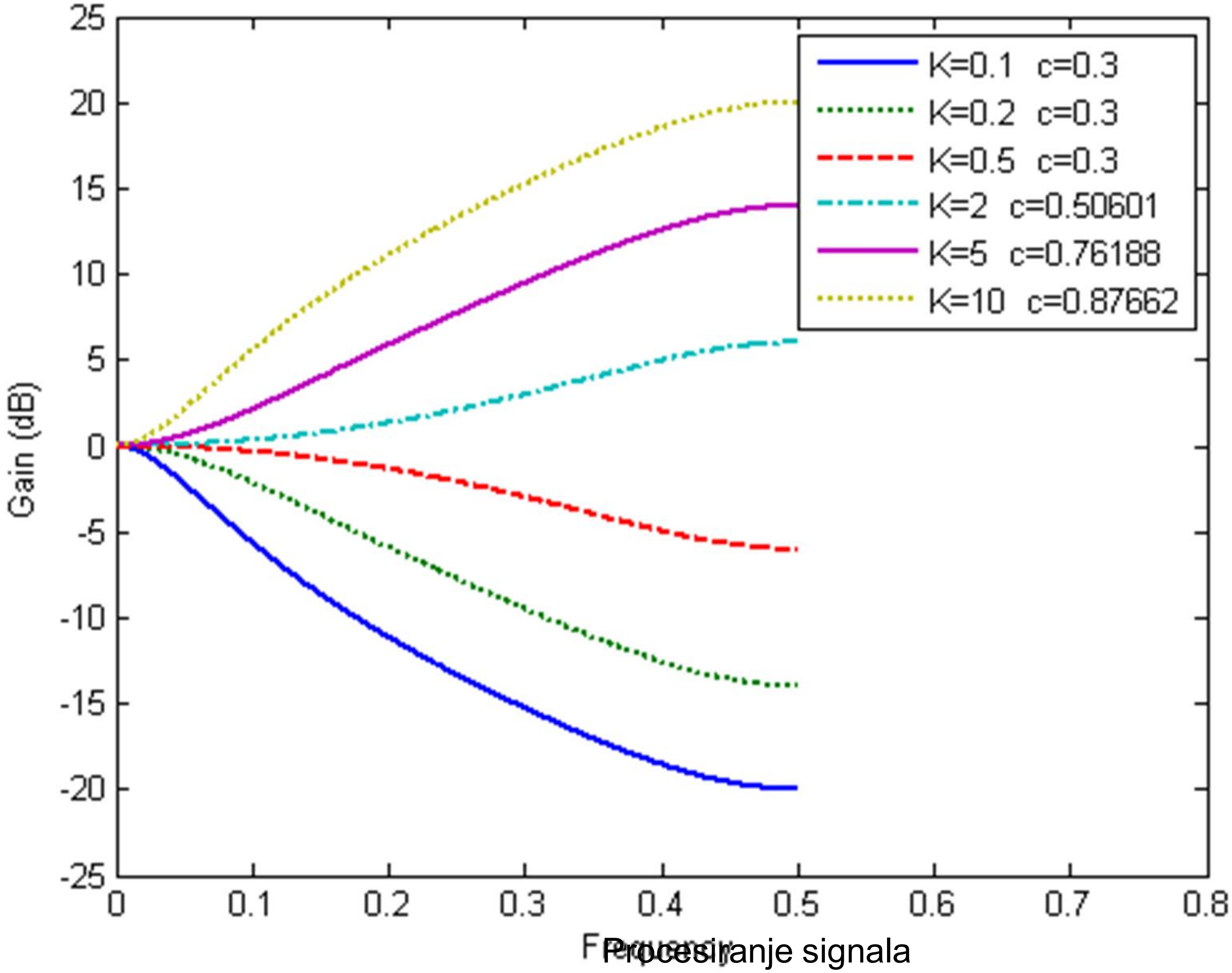
$$A_1(z) = \frac{a_C - z^{-1}}{1 - a_C z^{-1}}$$

$$a_C = \frac{1 - K\tan(\omega_C T/2)}{1 + K\tan(\omega_C T/2)}$$

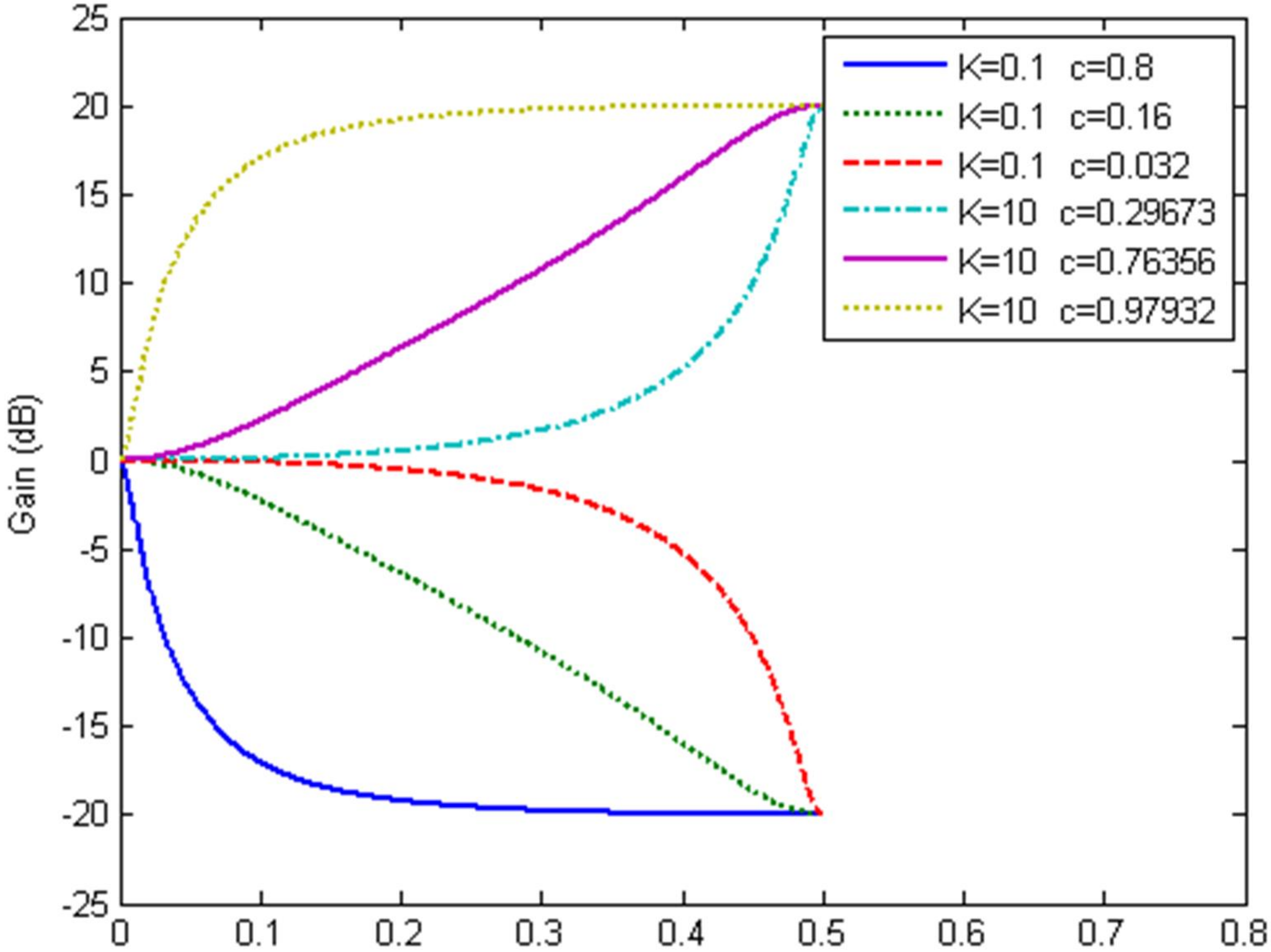
Ekvilajzer I reda HP - kod

```
c = 0.3;
wc = pi*c;
f = 0:0.001:0.5;
T = 1;

K1 = 1/10; c1 = c;
[numGlp11,denGlp11] = filter_g1_hp(wc,K1,T)
h1 = freqz(numGlp11,denGlp11,2*pi*f);
ah1 = 20*log10((abs(h1)));

plot(f,ah1,'-',f,ah2,':',f,ah3,'--',f,ah4,'-.')
xlabel('Frequency'), ylabel('Gain (dB)')
axis([0 0.8 -25 25])
legend(['K=' num2str(K1) '  c=' num2str(c1)],...
```

Ekvilajzer I reda HP (2)



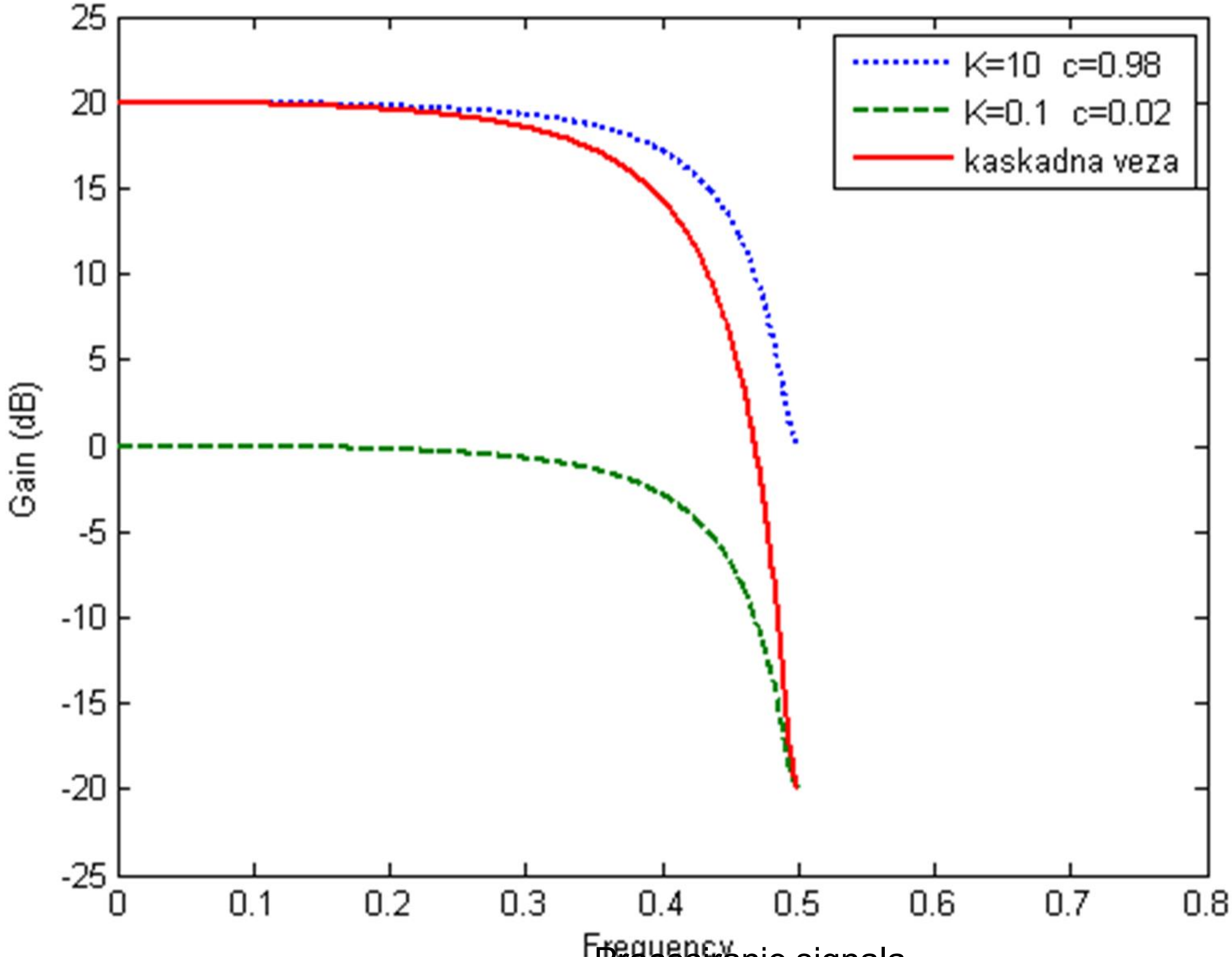
Ekvilajzer I reda HP (3)



Ekvilajzer I reda LP + HP

```
c = 0.98;
wc = pi*c;
f = 0:0.001:0.5;
T = 1;
K1 = 10; c1 = c;
[numGlp11,denGlp11] = filter_g1_lp(wc,K1,T)
h1 = freqz(numGlp11,denGlp11,2*pi*f);
ah1 = 20*log10((abs(h1)));
K2 = 1/10; c2 = 0.02;
wc = pi*c2;
[numGlp12,denGlp12] = filter_g1_hp(wc,K2,T)
h2 = freqz(numGlp12,denGlp12,2*pi*f);
ah2 = 20*log10((abs(h2)));
numGlp13 = conv(numGlp11,numGlp12);
denGlp13 = conv(denGlp11,denGlp12);
h3 = freqz(numGlp13,denGlp13,2*pi*f);
ah3 = 20*log10((abs(h3)));
```

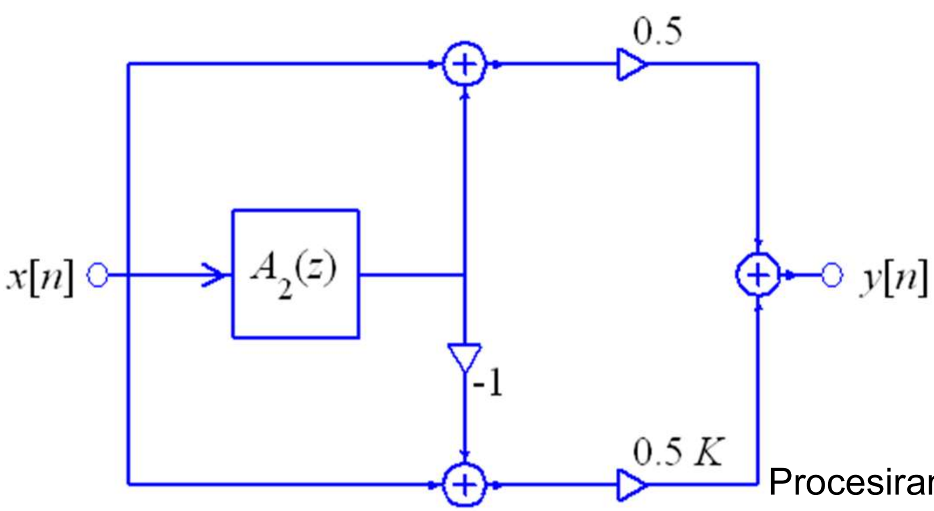
Ekvilajzer I reda LP + HP



Ekvilajzer II reda LP

$$G_{LP}(z) = \frac{K}{2}\left(1 - A_2(z)\right) + \frac{1}{2}\left(1 + A_2(z)\right)$$

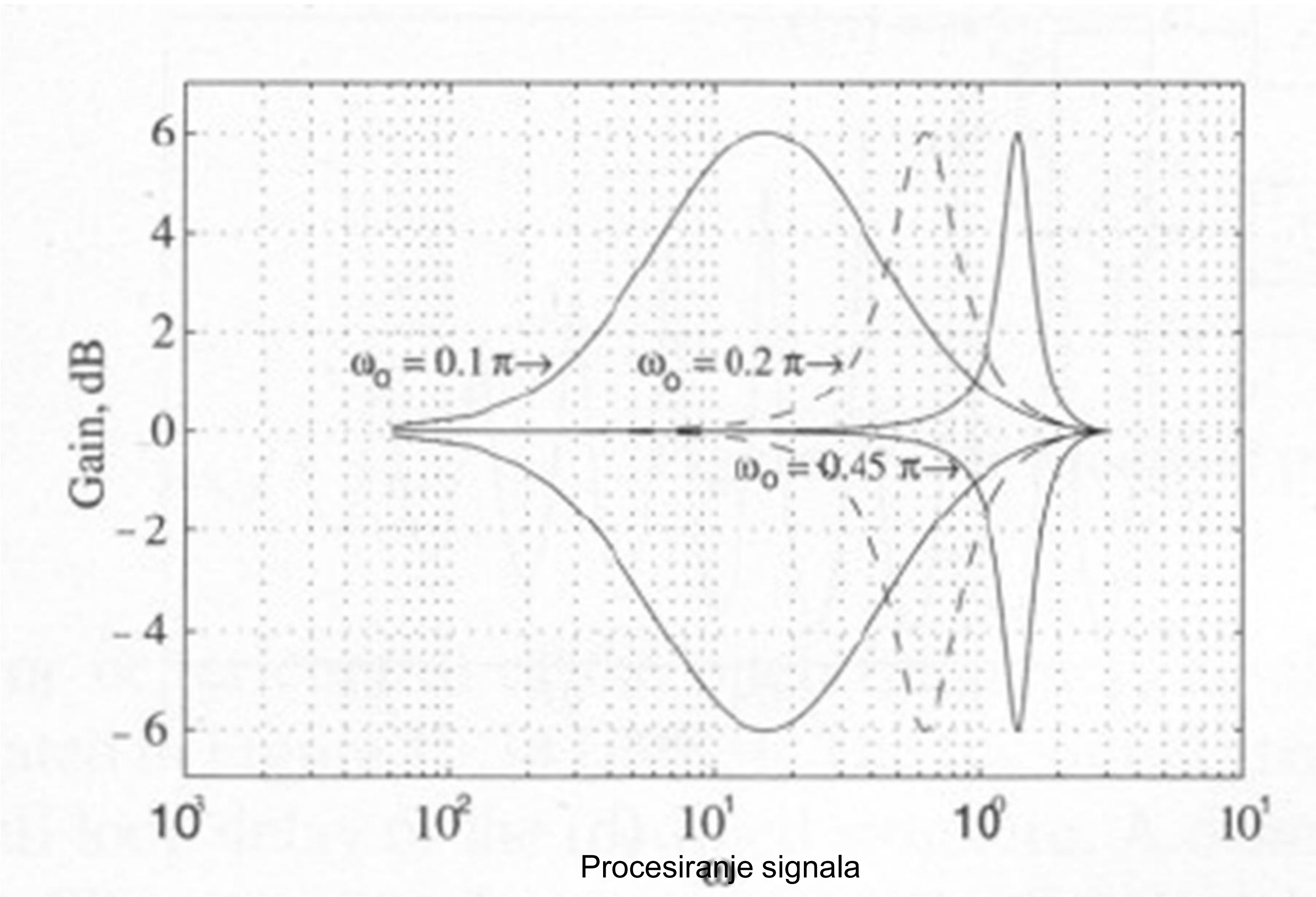
$$A_2(z) = \frac{a_C - \beta(1 + a_C)z^{-1} + z^{-2}}{1 - \beta(1 + a_C)z^{-1} + a_C z^{-2}}$$



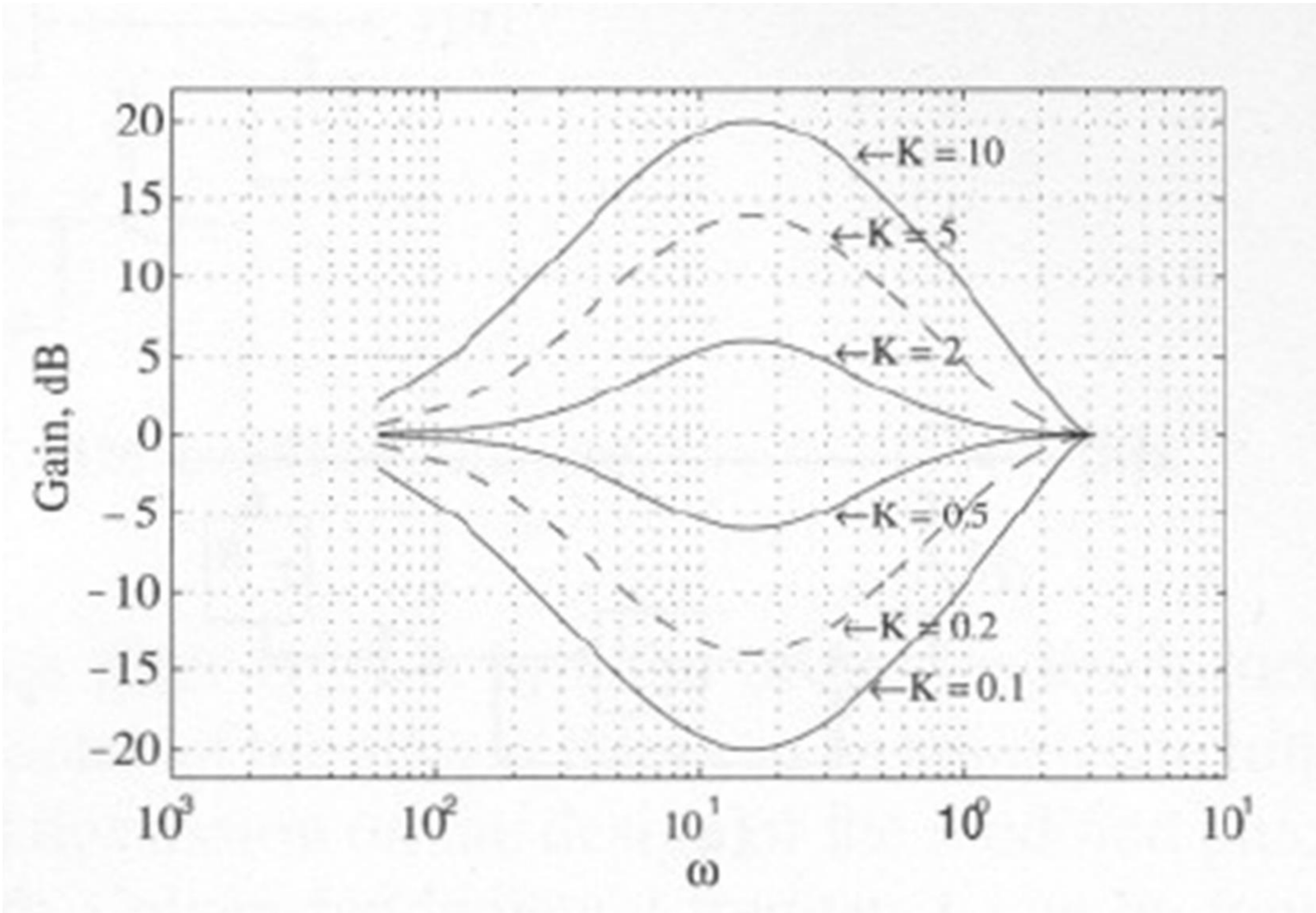
$$\beta = \cos(\omega_0)$$

$$a_C = \frac{K - \tan(B_C T / 2)}{K + \tan(B_C T / 2)}$$

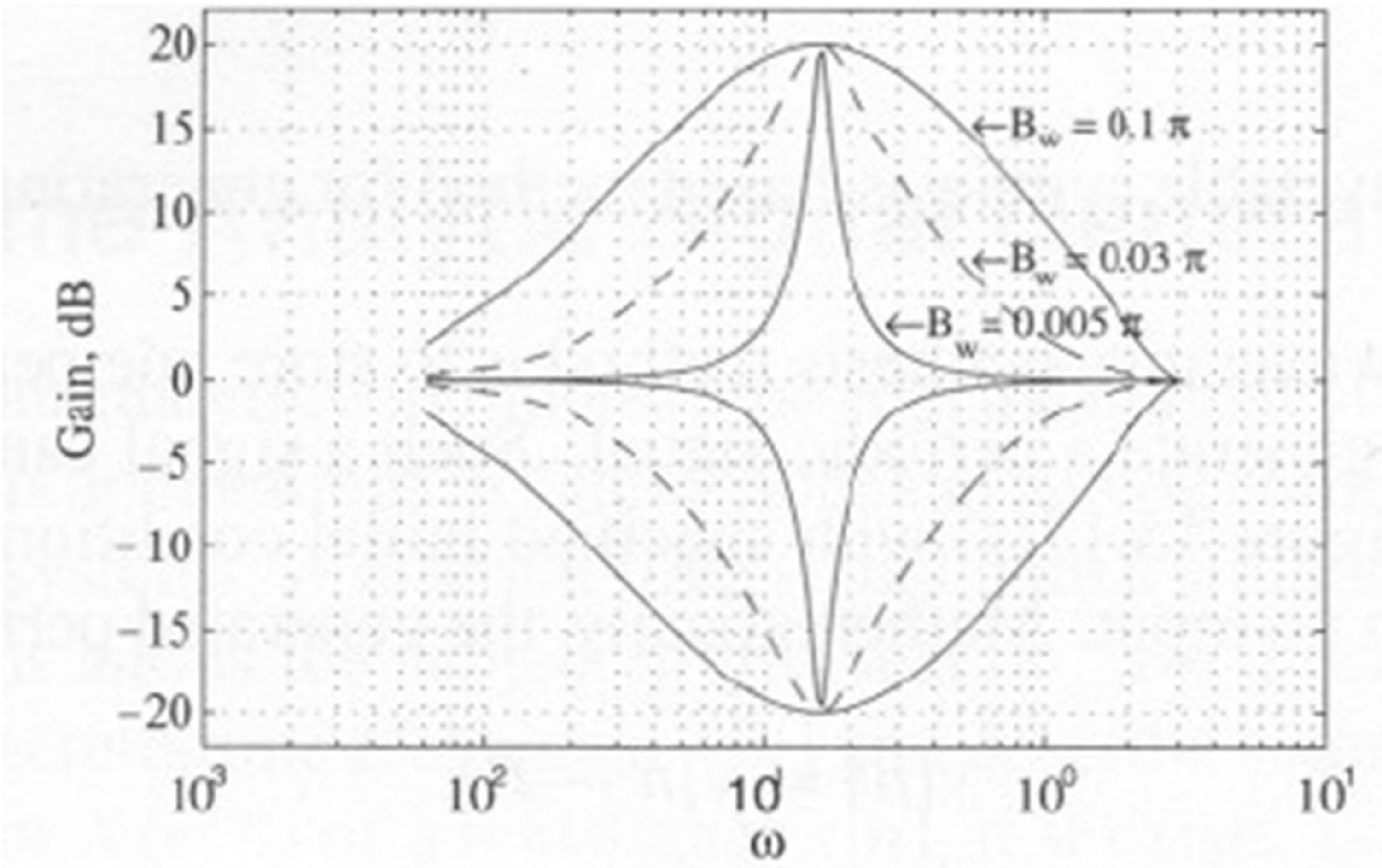
Ekvilajzer II reda (2)



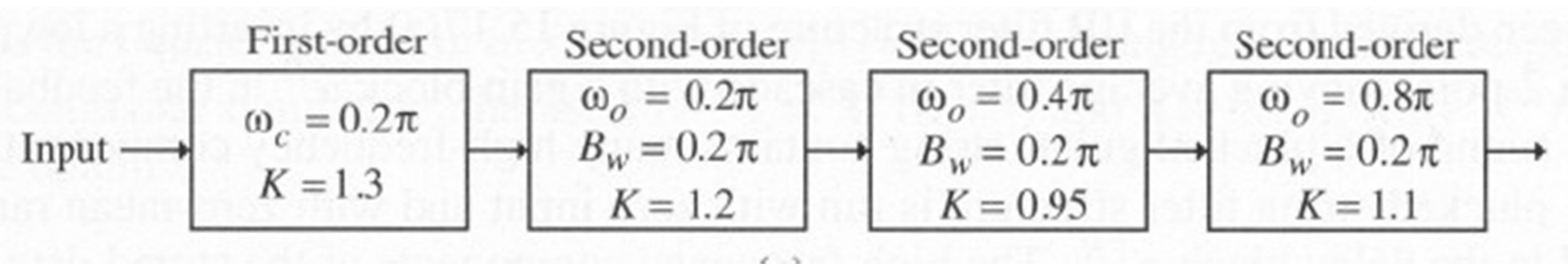
Ekvilajzer II reda (3)



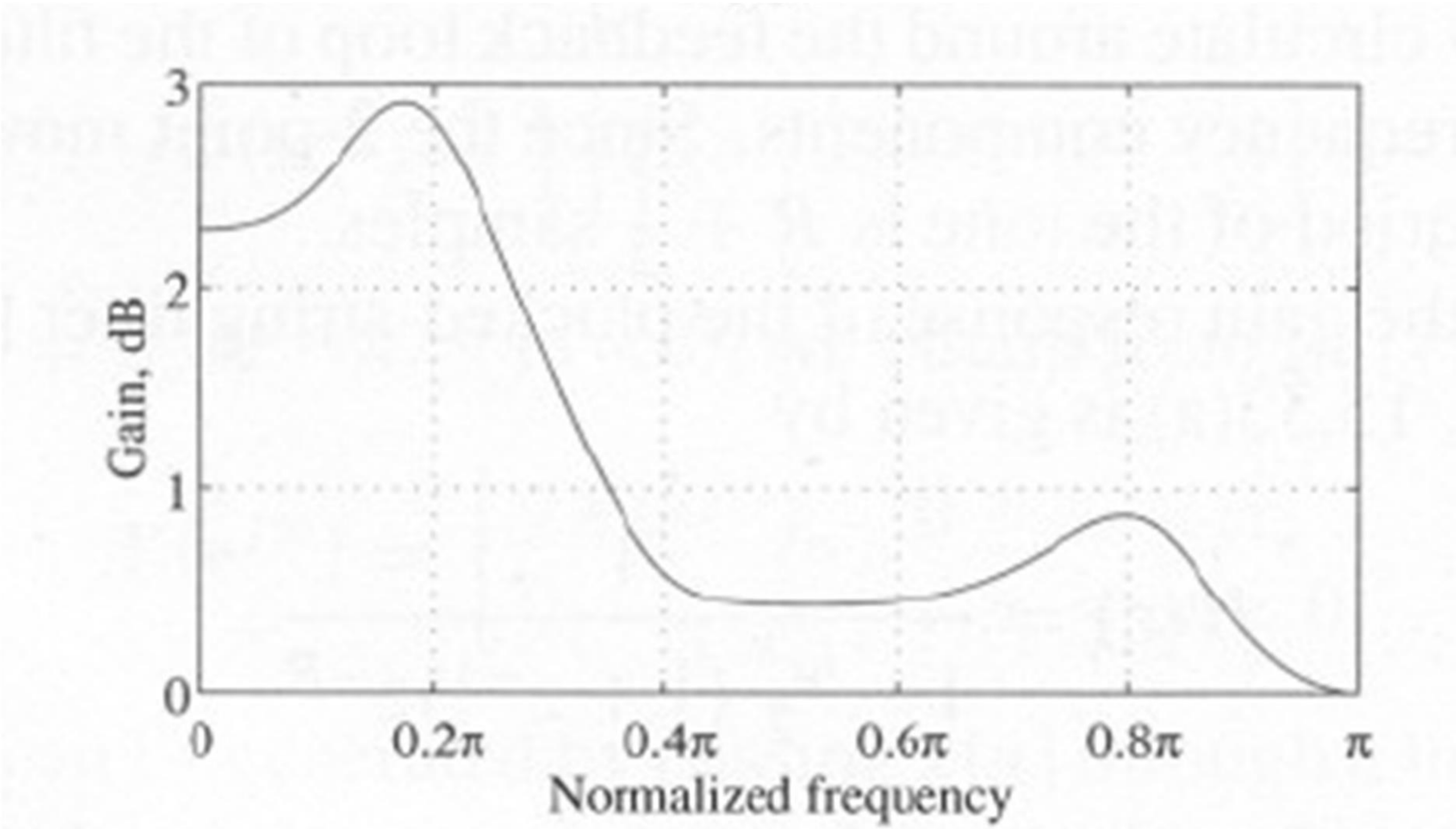
Ekvilajzer II reda (4)



Ekvilajzer višeg reda



Ekvilajzer višeg reda (2)

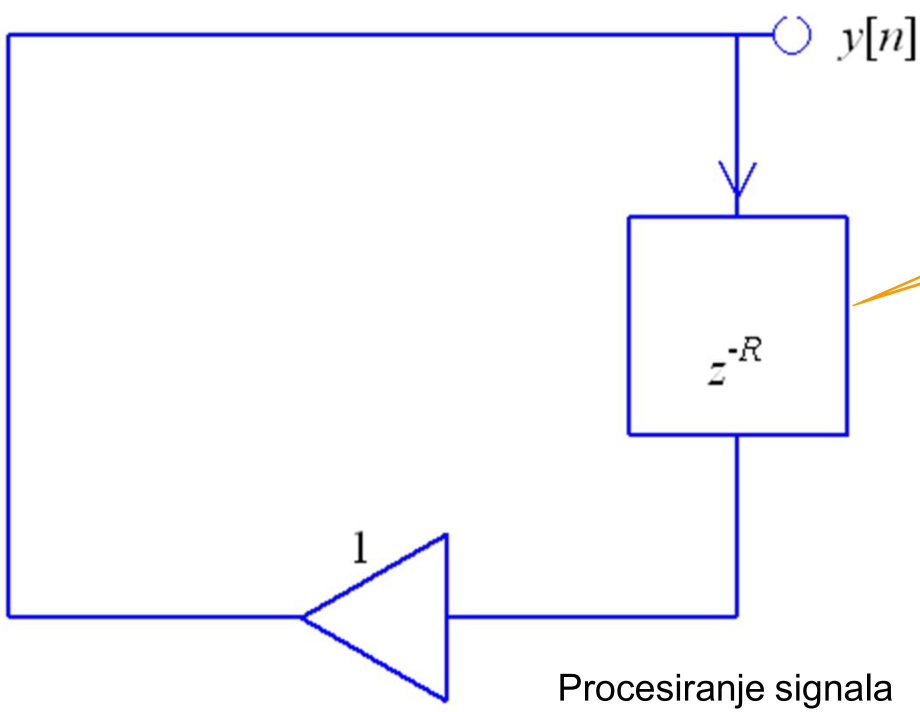


Sinteza muzičkih signala

- Korišćenjem tabela
- Modelovanjem spektra
- Nelinearne metode
- Modelovanjem fizičkih pojava

Sinteza korišćenjem tabela

- U tabeli se čuva jedna perioda željenog muzičkog signala
- Ponavlja se isčitavanjem iz tabele periodičnog signala



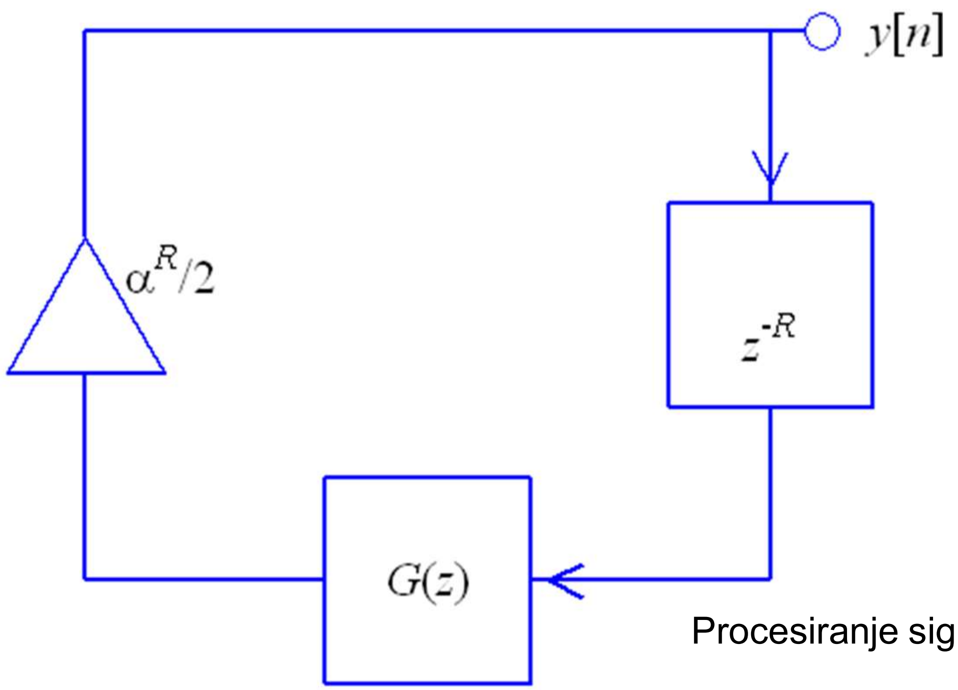
Početna stanja sadrže jednu periodu signala

$$y[n] = y[n-R]$$

R je perioda

Sinteza korišćenjem tabela

$$y[n] = \frac{\alpha^R}{2}\left[y[n-R] + y[n-R-1]\right]$$

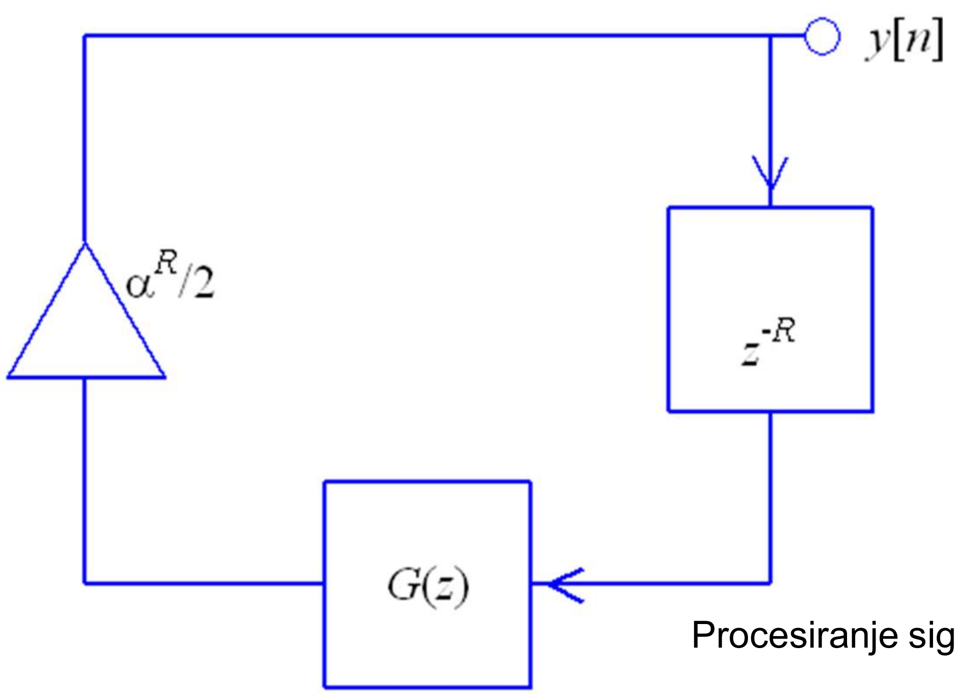


Početna stanja sadrže jednu periodu signala

Sinteza korišćenjem lowpass filtra

$$y[n] = \frac{\alpha^R}{2}\left[y[n-R] + y[n-R-1]\right]$$

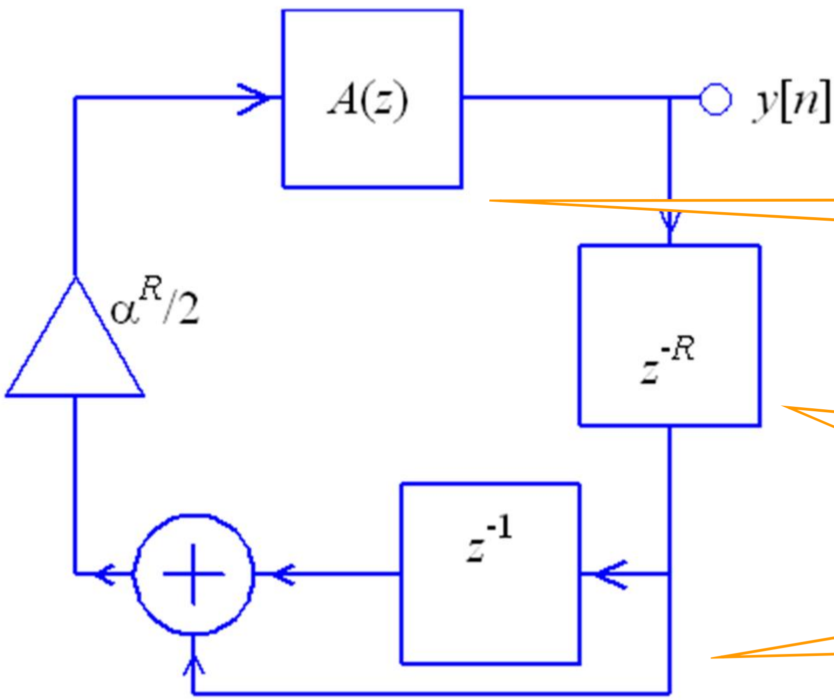
Početna stanja sadrže jednu periodu signala



Plucked-string filtar

$$y[n] = \frac{\alpha^R}{2}\left[y[n-R] + y[n-R-1]\right]$$

Početni zvuk gitare sadrži više visokofrekvencijskih komponenti



Allpass filtar za kontrolu tona

Srednja vrednost u registru je 0.

Grupno kašnjenje je 1/2

Transmultiplekseri - FDM

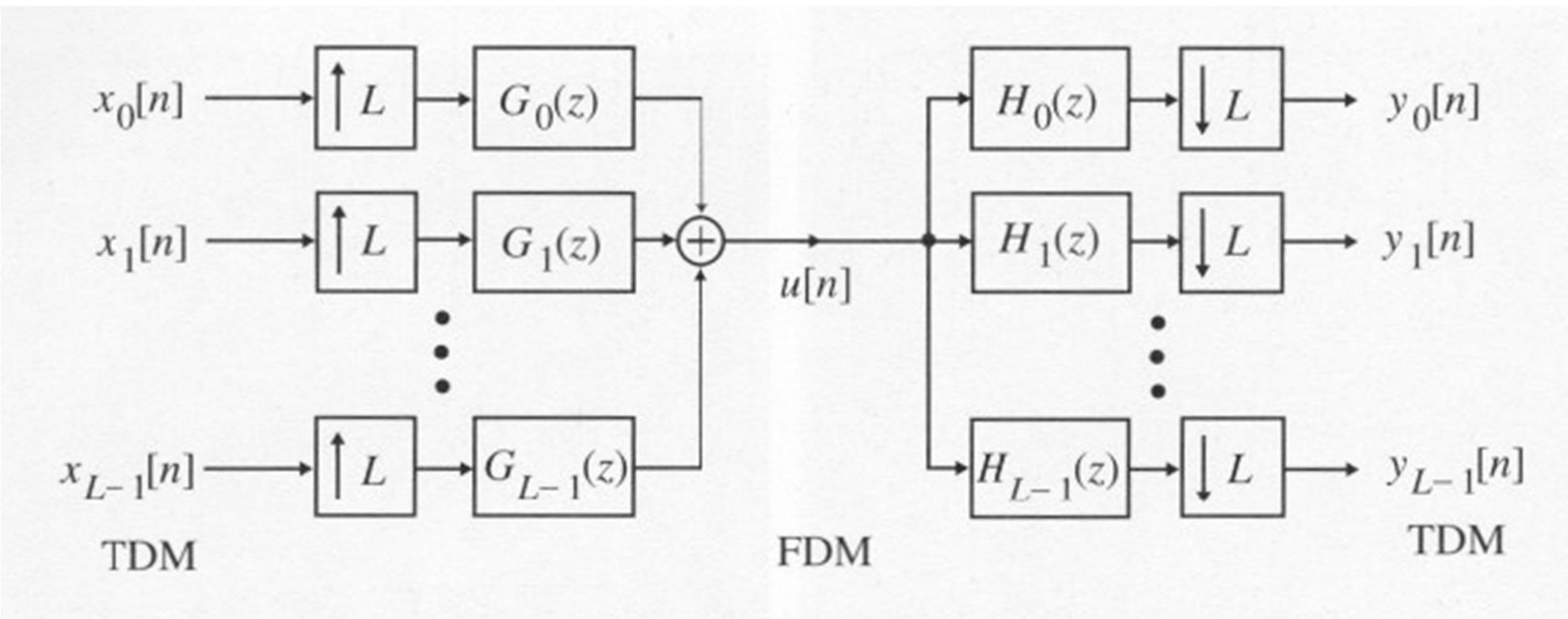
- FDM - Frequency Division Multiplex
- Više analognih signala se moduliše modulacijom SSB (single-side-band) a zatim se zajedno istovremeno prenosi jednim širokopojasnim kanalom
- U prijemniku, pojedini signali se razdvajaju filtrima propusnicima opsega a zatim se demodulišu

TDM

- TDM – Time Division Multiplex
- Analogni signal se digitalizuje, odbirci se pakuju redom iz svakog kanala i zajedno prenose
- U prijemniku, prvo se izdvajaju odbirci koji pripadaju jednom kanalu

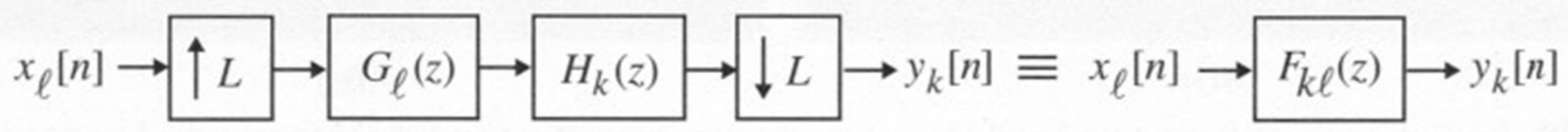
Transmultiplekseri

- Transmultiplekser je struktura sa više ulaza i više izlaza



Ulazno-izlazne relacije

- Tipičan put jednog ulaznog signla do izlaznog signala



(a) (b)

$$Y_k = \sum_{l=0}^{L-1} F_{kl}(z) X_l(z), \quad 0 \le k \le L-1$$

Ulazno-izlazne relacije

$$\mathbf{Y}(z) = [Y_0(z) \quad Y_1(z) \quad \cdots \quad Y_{L-1}(z)\ ]^t$$

$$\mathbf{X}(z) = [X_0(z) \quad X_1(z) \quad \cdots \quad X_{L-1}(z)\ ]^t$$

$$\mathbf{Y}(z) = \mathbf{F}(z)\mathbf{X}(z)$$

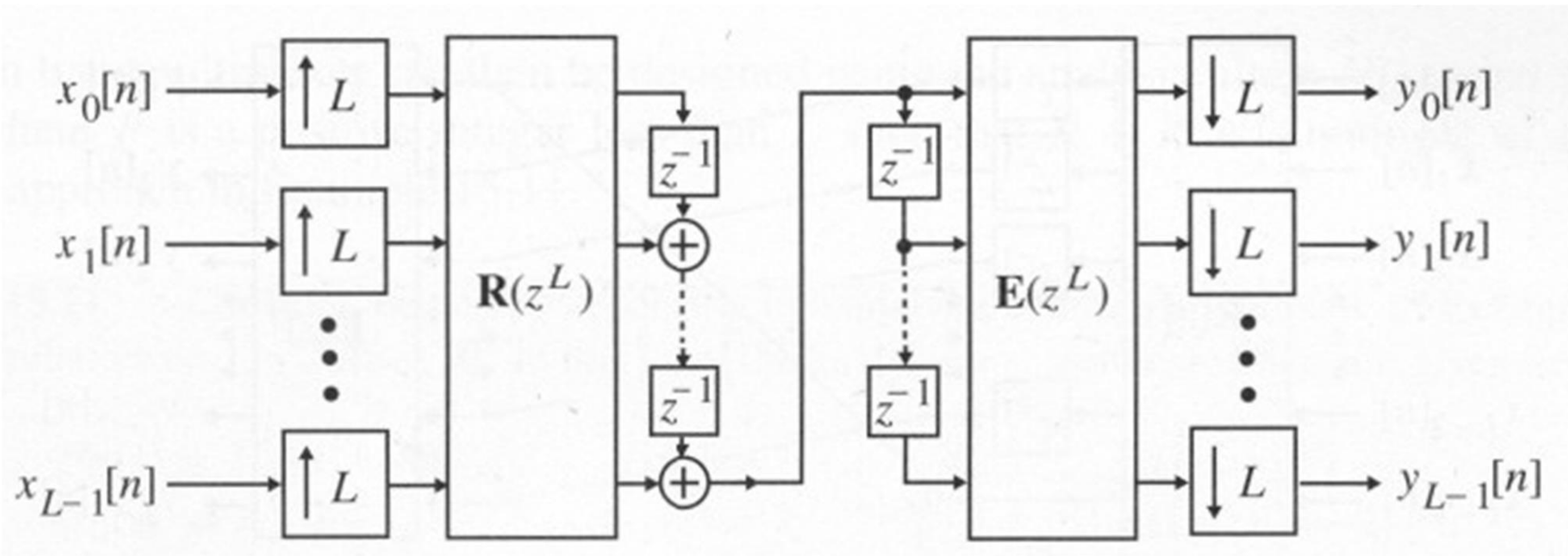
Nema preslušavanja

$$Y_k(z) = F_{kk}(z)X_k(z), \quad 0 \le k \le L-1$$

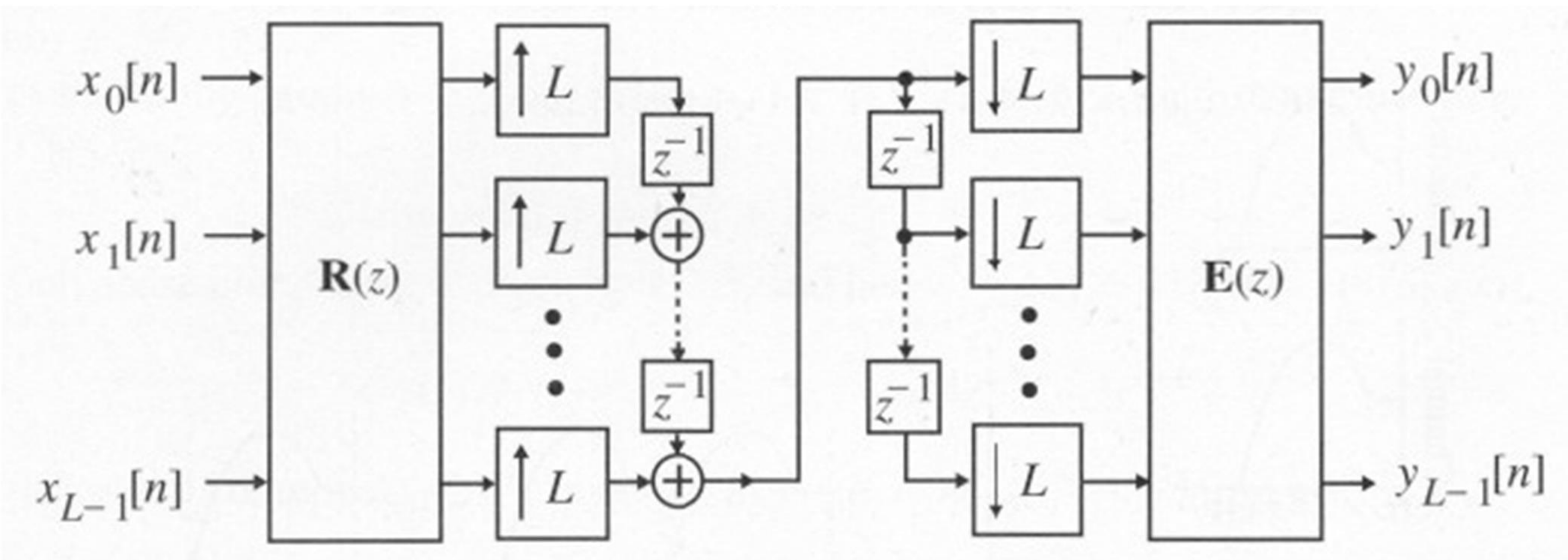
Perfektna rekonstrukcija

$$Y_k(z) = a_k z^{-n_k}, \quad 0 \le k \le L-1$$

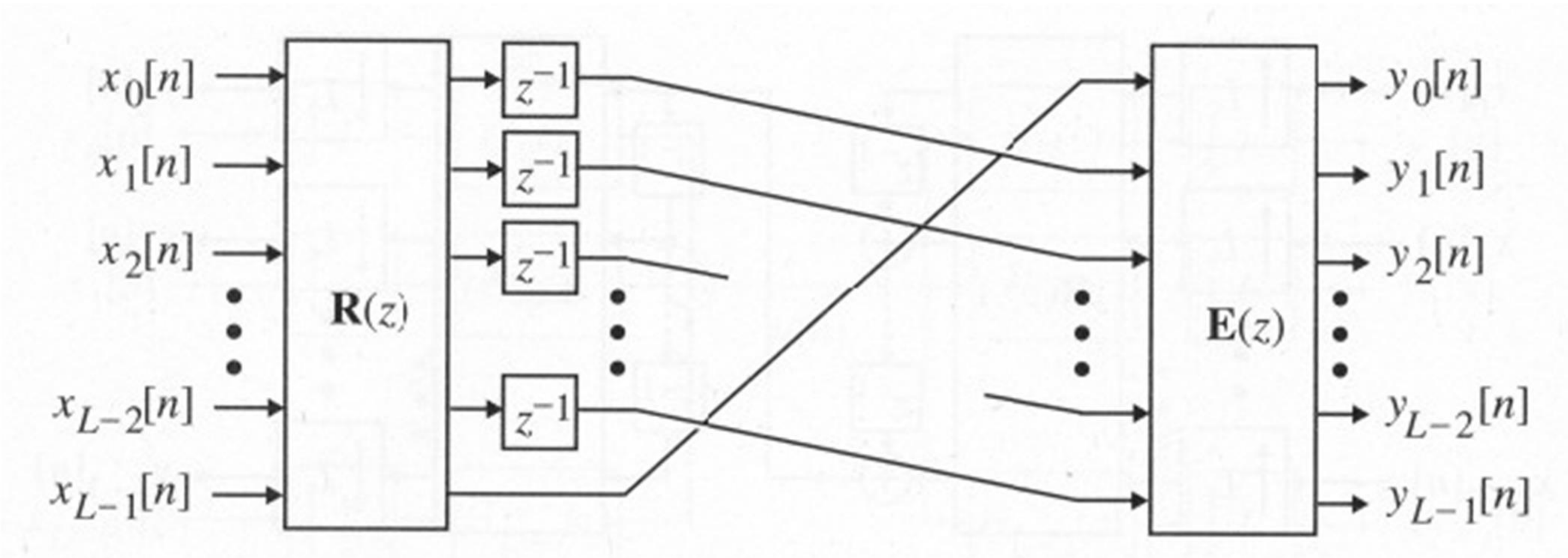
Polifazna reprezentacija *L*-kanalnog transmultipleksera



Efikasna realizacija *L*-kanalnog transmultipleksera

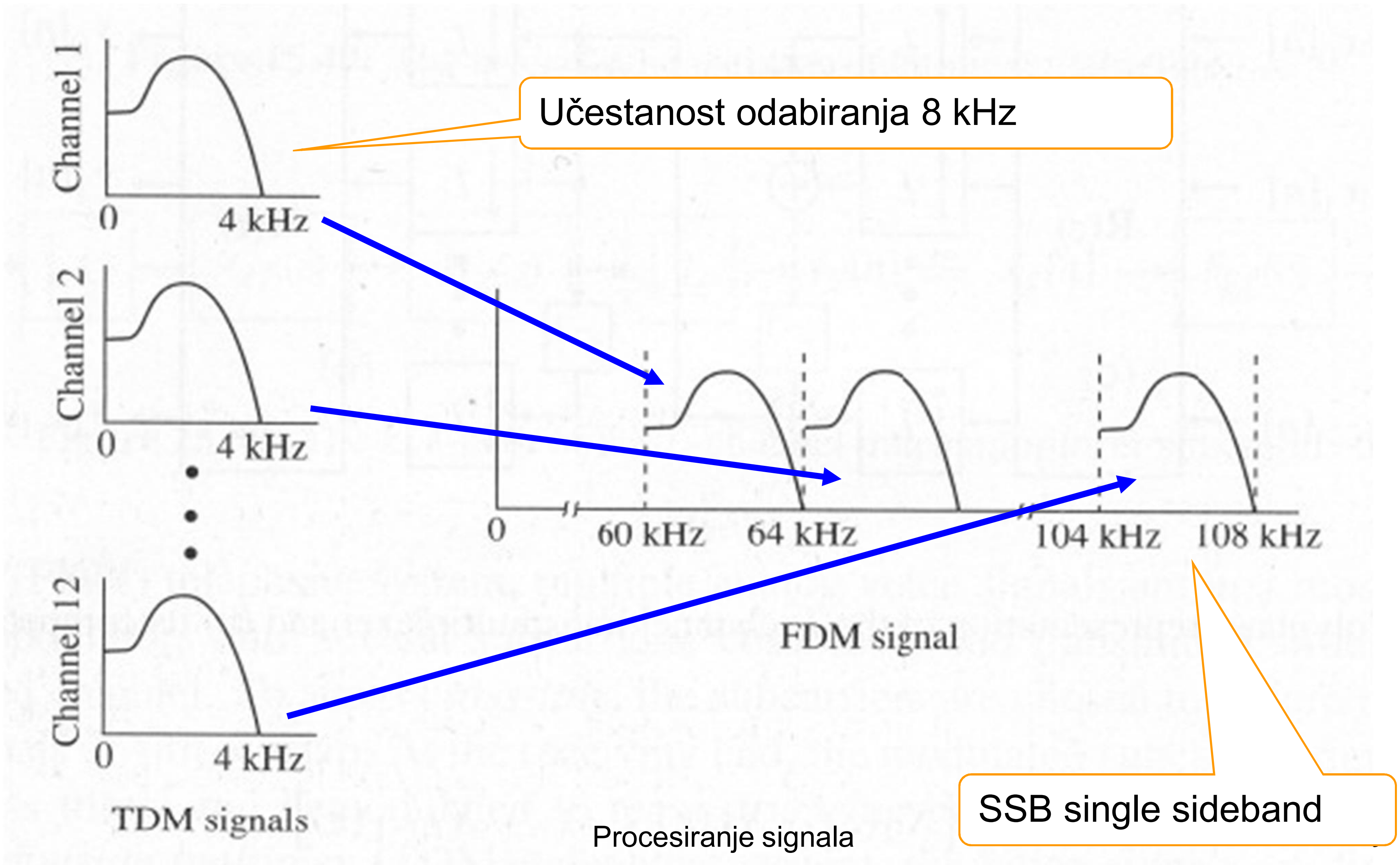


Ekvivalentna realizacija
L-kanalnog transmultipleksera



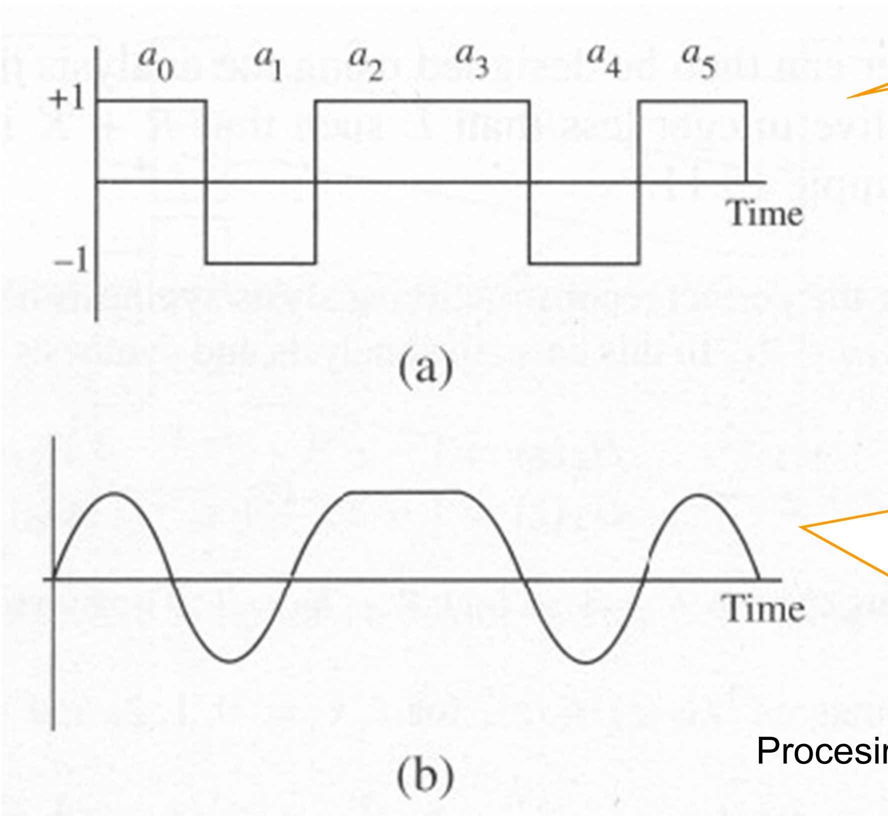
$$\mathbf{F}(z) = \mathbf{E}(z)\begin{bmatrix} \mathbf{0} & 1 \\ z^{-1}\mathbf{I}_{L-1} & \mathbf{0} \end{bmatrix}\mathbf{R}(z)$$

Spektri TDM i FDM



Prenos binarnih digitalnih podataka

- Binarni podaci mogu da se prenose serijski signalima koji imaju vrednosti +1 i -1

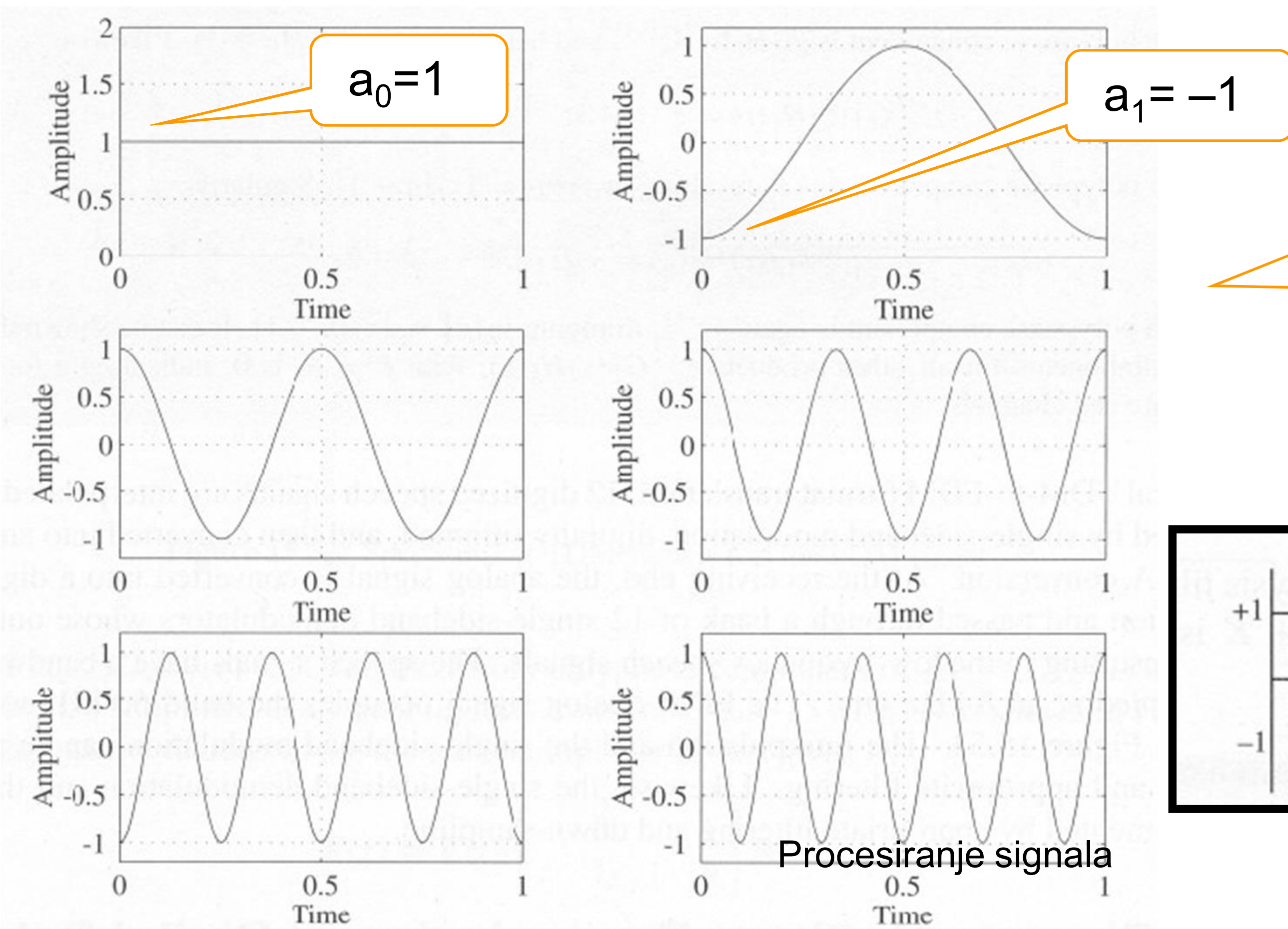


Poslat signal

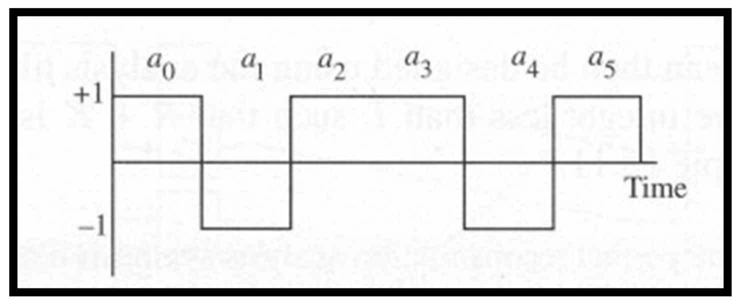
Primljen signal je drugačiji zbog nesavršenosti kanala i ograničenog frekvencijskog opsega.
Potrebna složena procedura ekvilizacije funkcije prenosa kanala.

Višetonski prenos digitalnih podataka

- N binarnih cifara se moduliše svojim nosiocem i sabira
- Prijemnik – koherentni demodulatori



DMT
Discrete
Multitone
Transmition



DMT - discrete multitone transmition

$$\{a_k[n]\}, \{b_k[n]\}, \quad 0 \le k \le M-1$$

Realni signali (sekvence) učestanost odabiranja F_T

$$\alpha_k[n] = \begin{cases} a_0[n] & k = 0 \\ a_k[n] + jb_k[n] & 1 \le k \le N/2-1 \\ b_0[n] & k = N/2 \\ a_k[n] - jb_k[n] & N/2+1 \le k \le N-1 \end{cases}$$

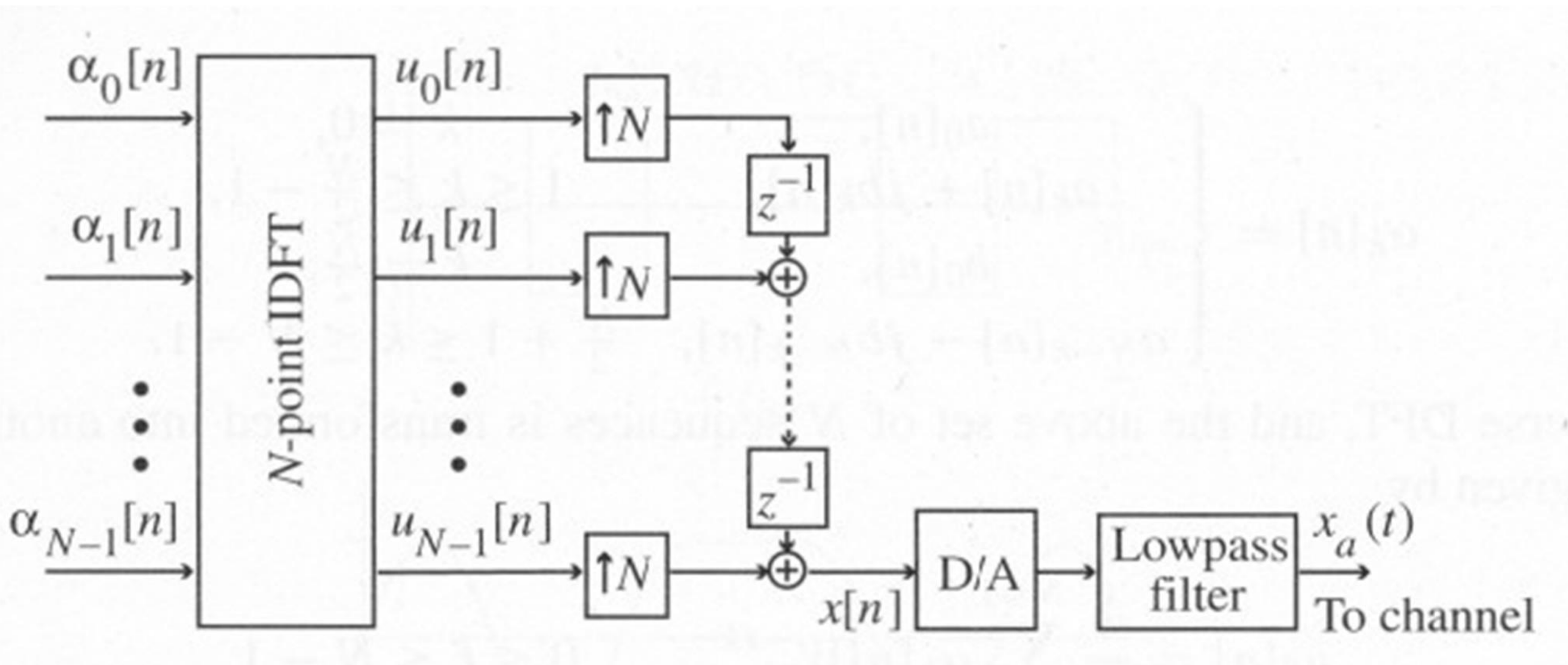
$$N = 2M$$

IDFT

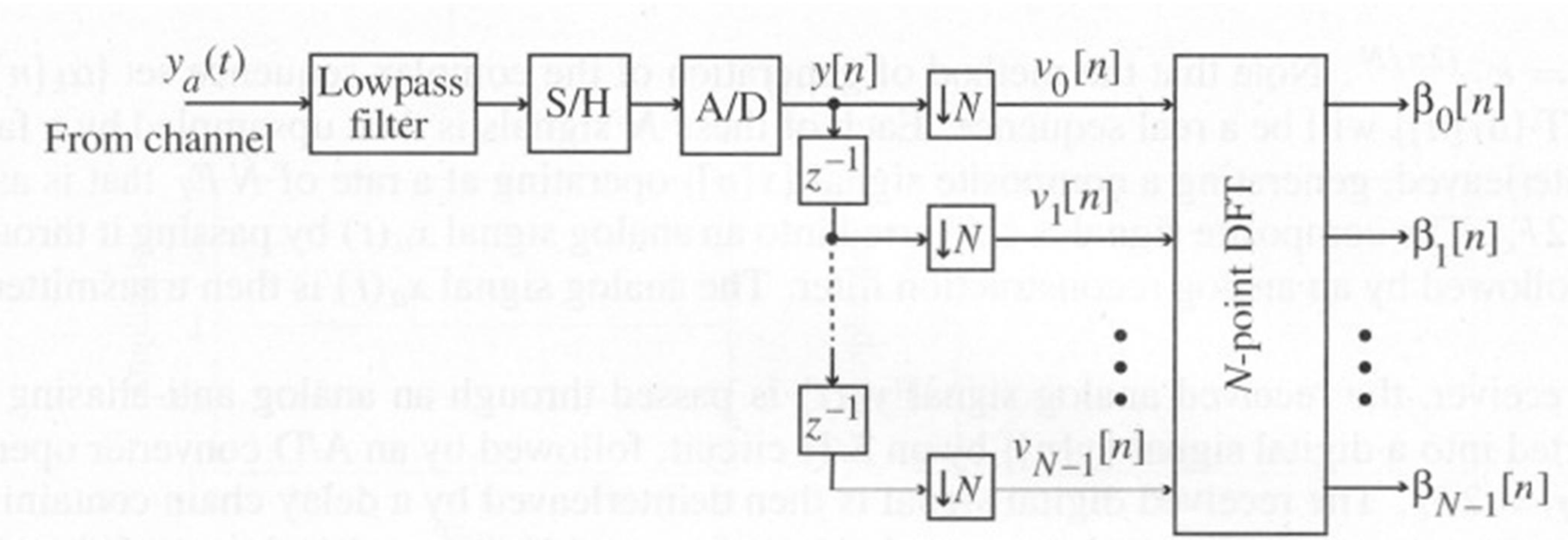
$$u_l[n] = \frac{1}{N}\sum_{k=0}^{N-1} \alpha_k[n] W_N^{-lk}, \quad 0 \le l \le N-1$$

$$W_N = e^{-j2\pi/N}$$

DMT - predajnik



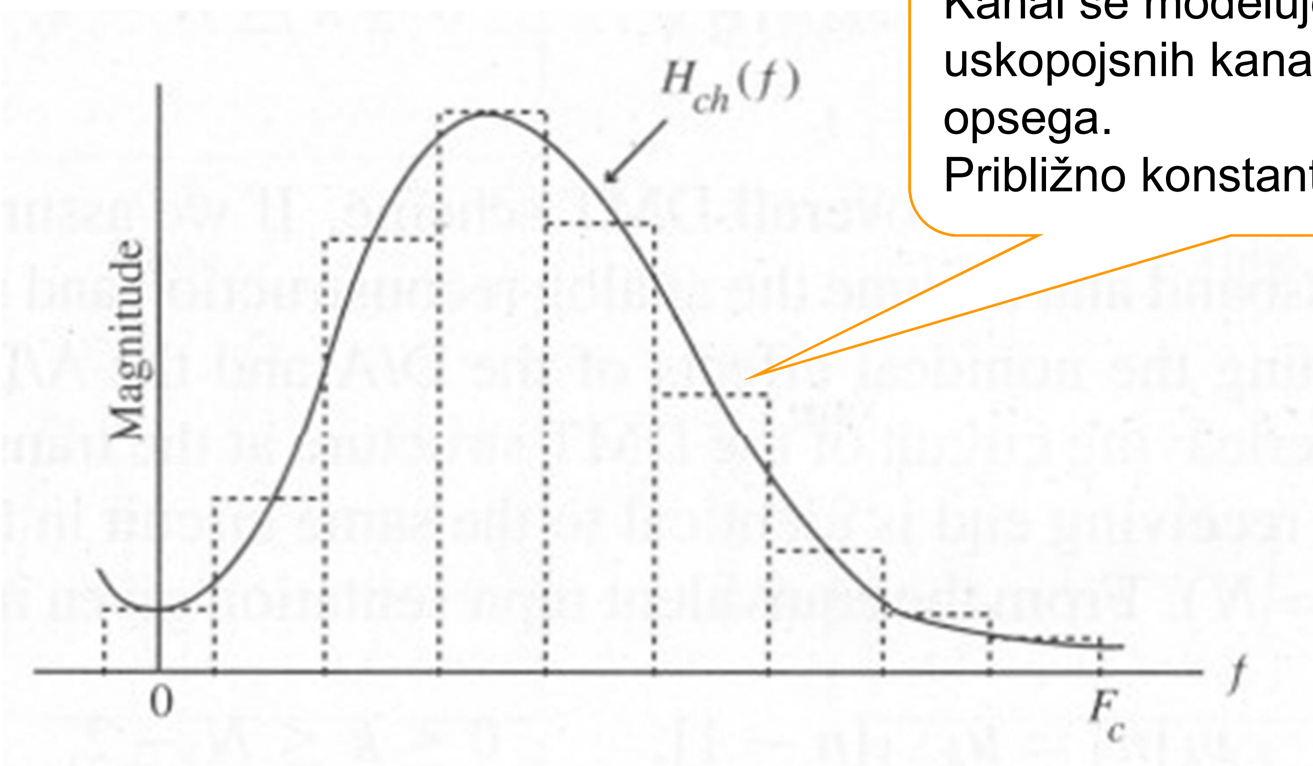
DMT - prijemnik



$$\beta_k[n] = \alpha_{k-1}[n], \quad 1 \le k \le N-1$$

$$\beta_0[n] = \alpha_{N-1}[n]$$

Karakteristika prenosnog kanala



Kanal se modeluje kao više uskopojsnih kanala propusnika opsega.
Približno konstantan u opsegu.

Oversampling AD konverzija

- Učestanost odabiranja treba da bude 2 puta veća od najviše učestanosti korisnog signala
- Pre AD konverzije mora da se koristi filtar propusnik niskih učestanosti čija je učestanost granice propusnog opsega jednaka najvišoj učestanosti korisnog signala, učestanost granice nepropusnog opsega neznatno veća od granice propusnog opsega
- Analogni filtar mora da bude visokog reda sa kvalitetnim komponentama (visoka cena)
- Filtar sa oštrom karakteristikom unosi fazna izobličenja u propusnom opsegu
- Alternativa – učestanost odabiranja je znatno veća, filtar nema strmu karakteristiku, digitalnim filtrom se realizuje oštra karakteristika, smanji se učestanost odbiranja

Analiza šuma (1)

- AD konvertor sa b bita i učestanost odabiranja F_T
- Full-scale peack-to-peack ulazni signal (napon) je R_{FS}
- Najmanji opseg vrednosti koji se predstavlja binarno ΔV

$$\Delta V = \frac{R_{FS}}{2^b - 1} \approx \frac{R_{FS}}{2^b}$$

Analiza šuma (2)

- Snaga kvantizacionog šuma je σ_e^2
- Podrazumeva se uniformna distribucija greške u opsegu između $-\Delta V/2$ i $\Delta V/2$
- Gustina šuma je snaga šuma po jedinici frekvencijskog opsega (*noise density*)
- Snaga (ukupna) u korisnom opsegu (*in-band noise power*)

$$\sigma_e^2 = \frac{(\Delta V)^2}{12}$$

$$P_{e,n} = \frac{\sigma_e^2}{F_T/2} = \frac{(\Delta V)^2}{6F_T}$$

$$P_{\text{total}} = \frac{\sigma_e^2}{F_T/2} = \frac{\left(R_{FS}/2^b\right)^2/12}{12}\frac{F_m}{F_T/2}$$

Analiza šuma (3)

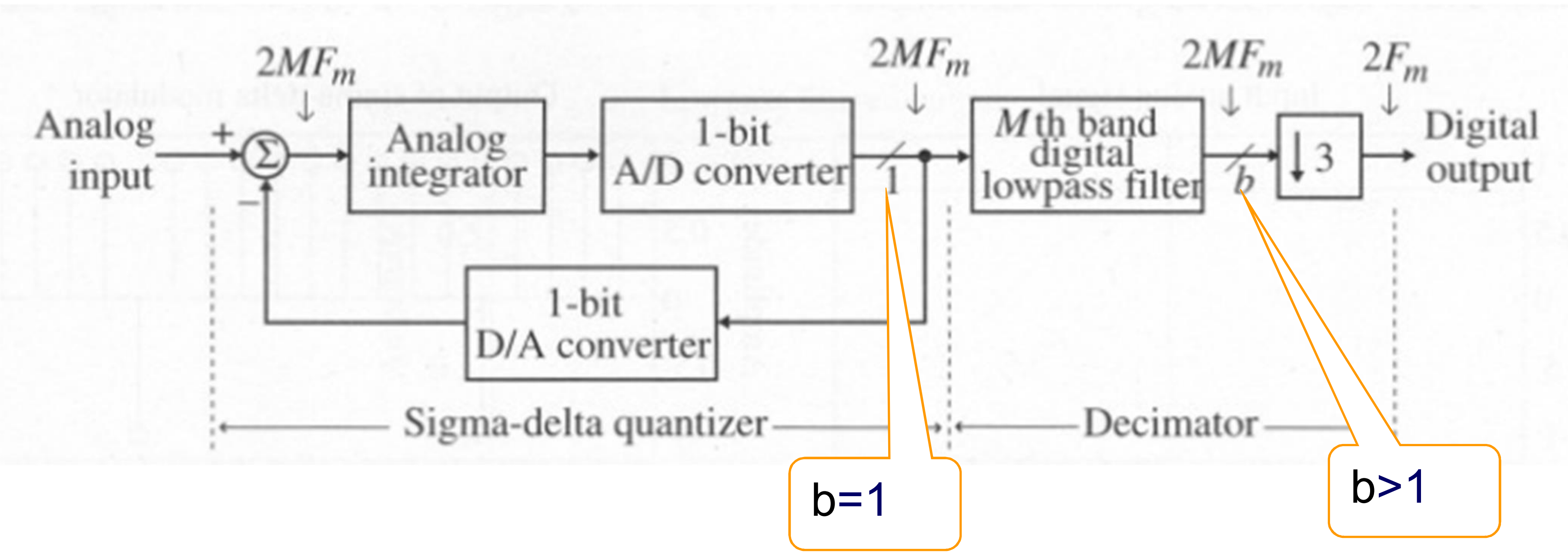
- Za učestanost odabiranja $F_T=2F_m$, broj bita β
- Za učestanost odabiranja $F_T=2MF_m$, broj bita je b
- Oversampling ratio (OSR) $M=F_T/2F_m$
- Koristi se idealni filtar propusnik niskih učestanosti
- Koliko bita treba manje za veće M?

$$\beta = b + \frac{1}{2}\log_2 M$$

Brži a manje tačan AD konvertor – ekonomičnije rešenje

M=1000, b=8
isto kao da se koristi
M=1, b=13

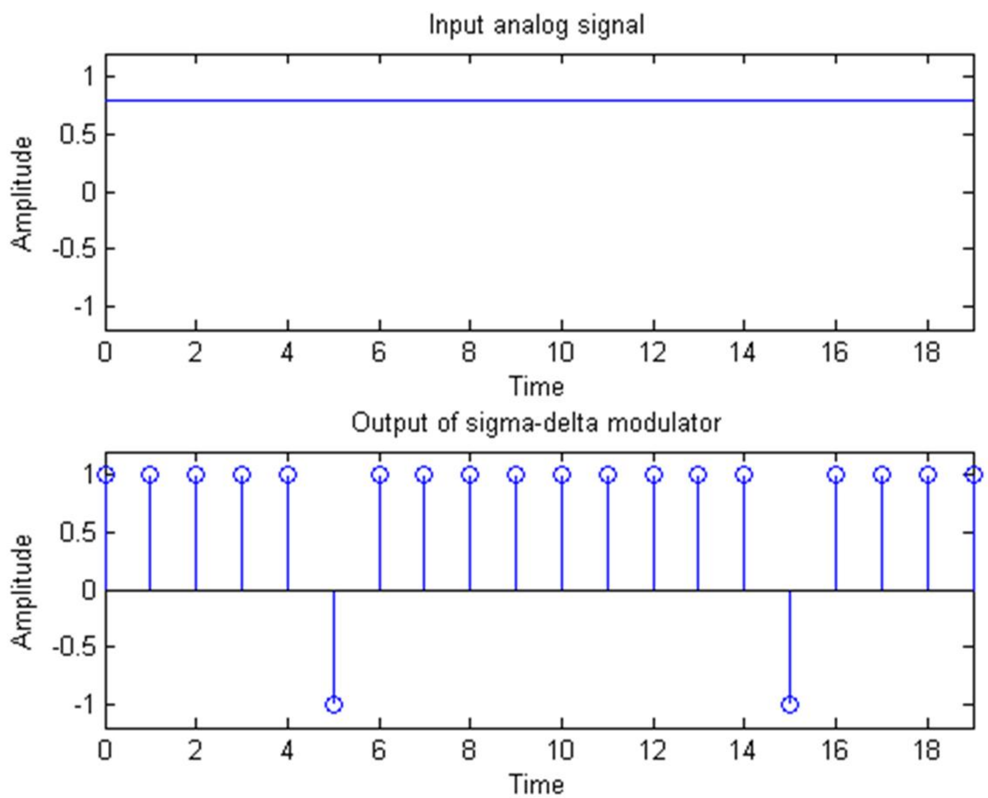
Sigma-delta (ΣΔ) AD konvertor



Sigma-delta konvertor (1)

```
N = 20;
n = 1:1:N;
m = n-1;
A = 0.8;
x = A*ones(1,N);
subplot(2,1,1),
plot(m,x);
subplot(2,1,2)
y = zeros(1,N+1);
v0 = 0;
   for k = 2:1:N+1;
        v1 = x(k-1) - y(k-1) + v0;
        y(k) = sign(v1);
        v0 = v1;
   end
yn = y(2:N+1);
stem(m, yn);
```

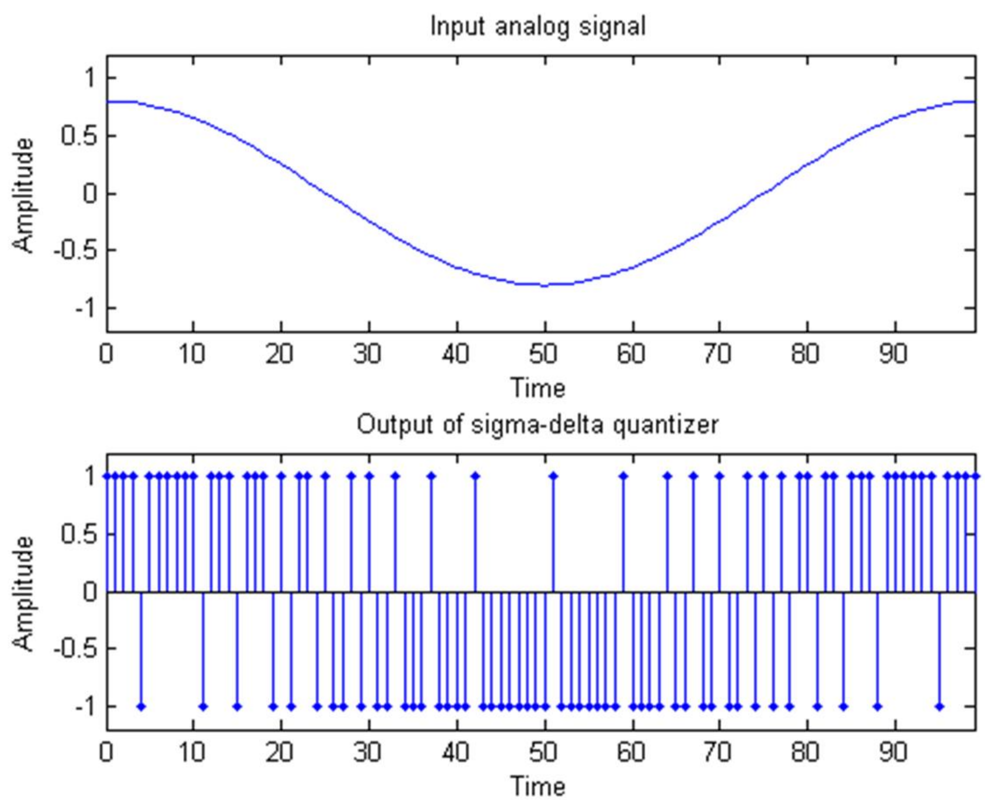
Sigma-delta konvertor (2)



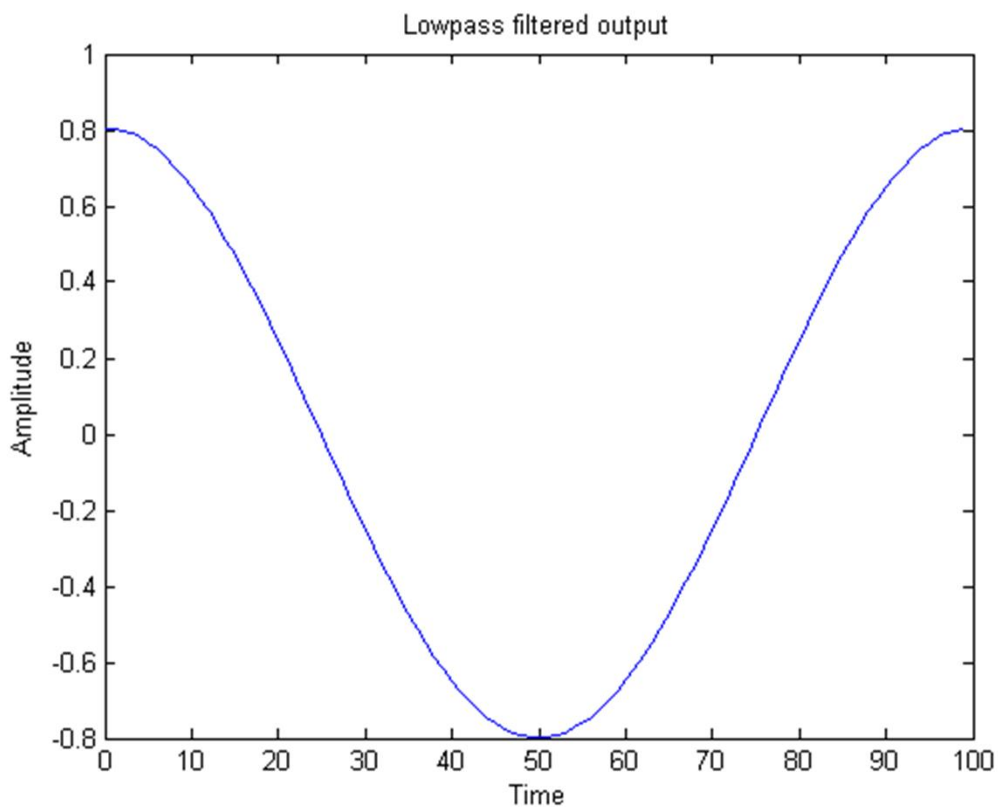
Sigma-delta konvertor (3)

```
wo = 2*pi*0.01;
sequence = ');
N = 100;
n = 1:1:N;
m = n-1;
A = 0.8;
x = A*cos(wo*m);

. . .

figure
H = [1 1 0.5 zeros(1,N-5) 0.5 1];
YF = Y.*H;
out = ifft(YF);
axis([0 N-1 -1.2 1.2]);
plot(m,out);
xlabel('Time'); ylabel('Amplitude');
title('Lowpass filtered output');
```

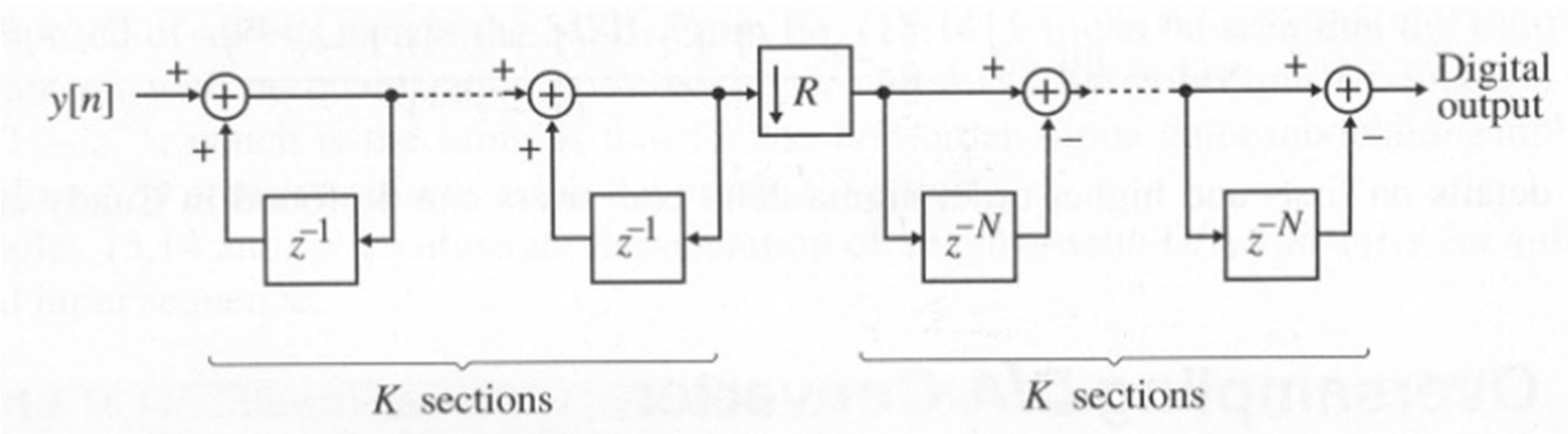
Sigma-delta konvertor (4)



Sigma-delta konvertor (5)



CIC decimator

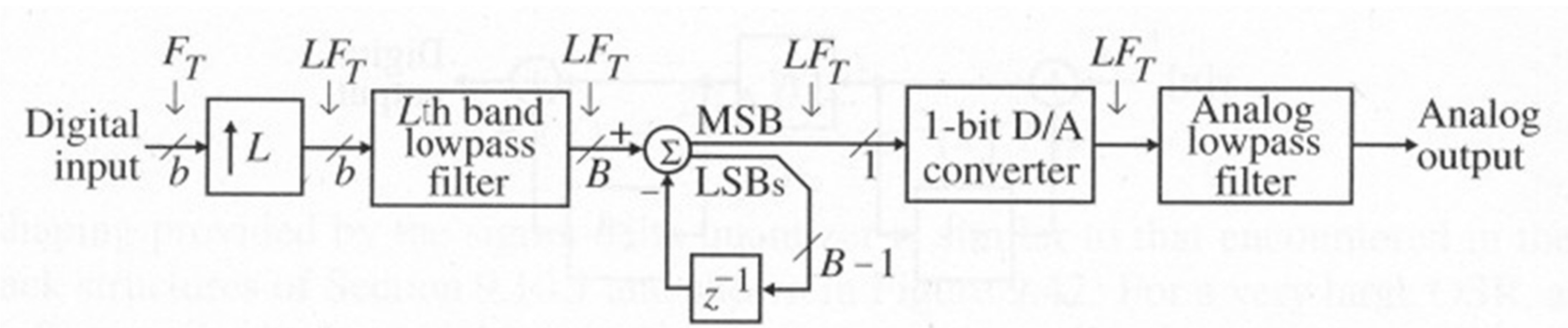


$$H(z)=\left(\frac{1-z^{-RN}}{1-z^{-1}}\right)^{K}$$

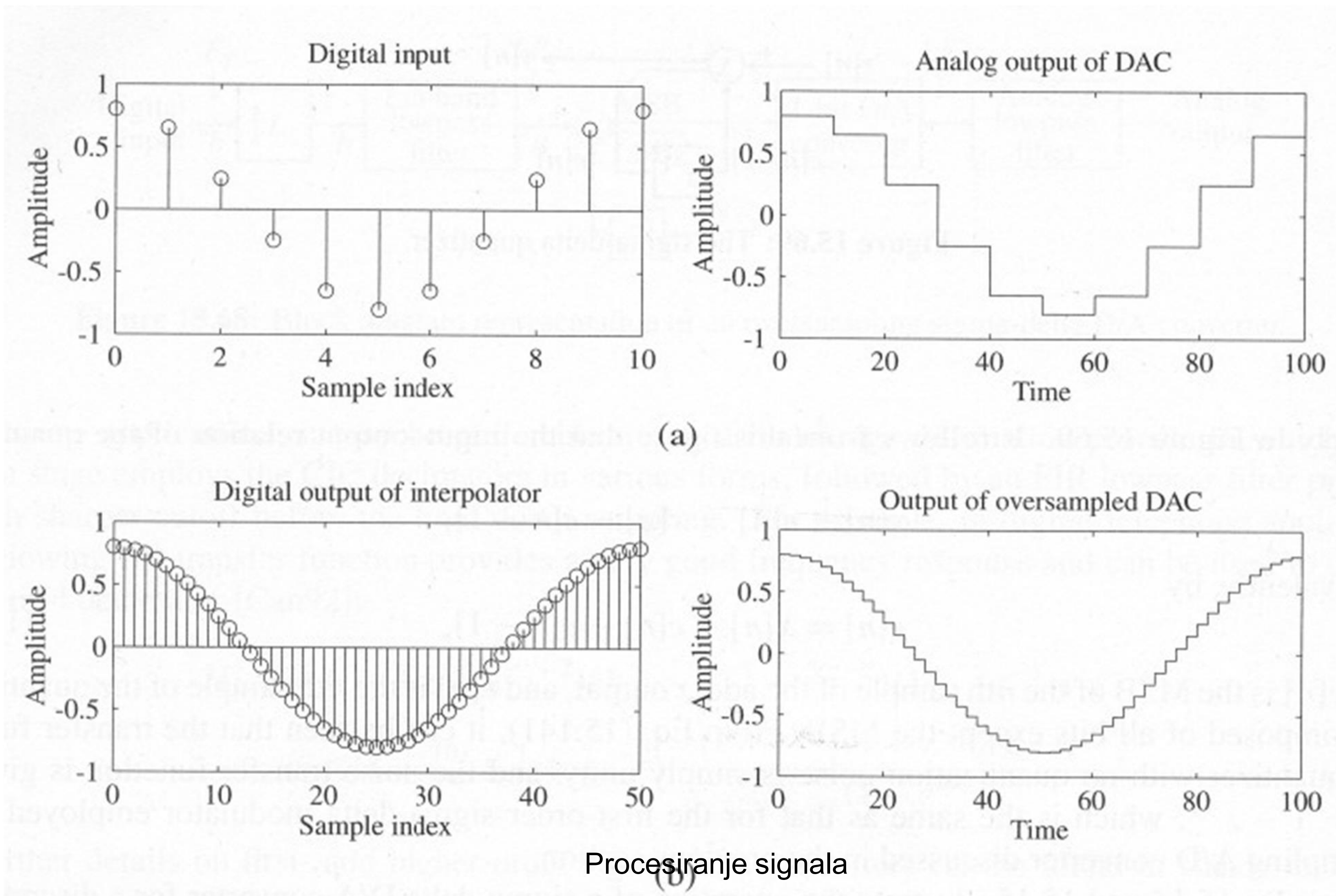
Oversampling DA konverzija

- DA konverzija se sastoji od konverzije u kontinualni signal i analognog filtra
- Ako je učestanost odabiranja blizu dvostrukoj najvećoj učestanosti korisnog sgnala, filtar mora da ima oštru karakteristiku, da bude visokog reda, od skupih komponenti
- Da se značajno poveća učestanost odabiranja, digitalnim filtrom potisnu neželjene komponente, upotrebi ekonomičan analogni filtar (niskog reda od komponenti koje nisu skupe) koji ima široku prelaznu zonu

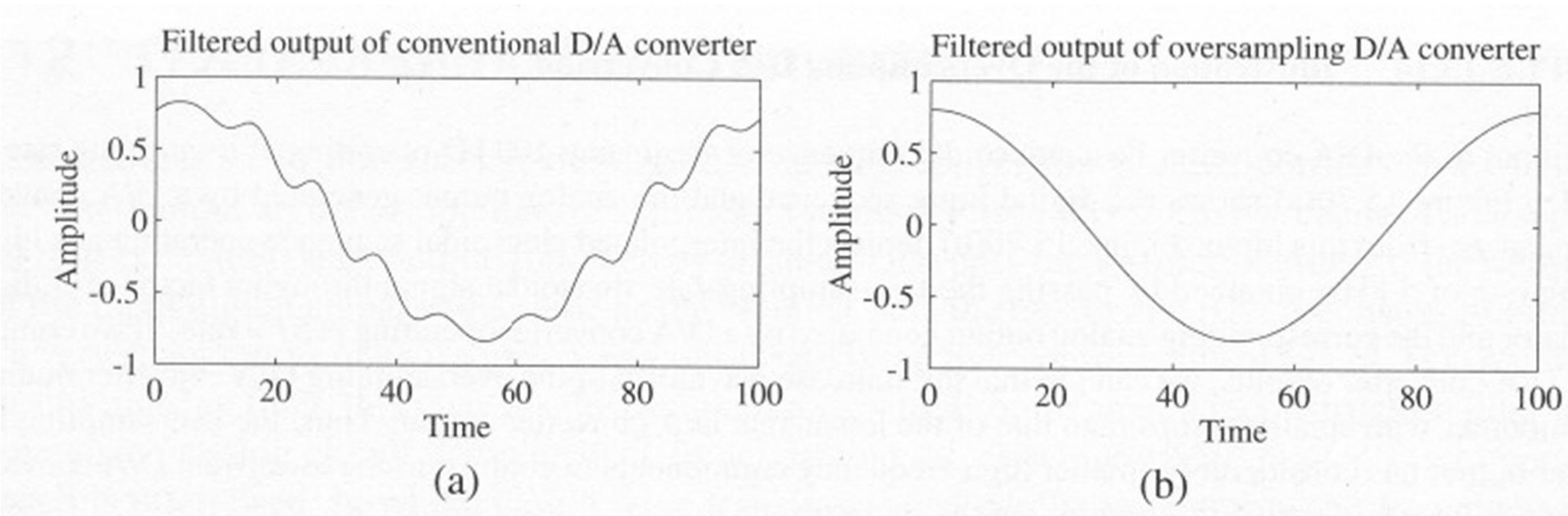
Realizacija DA konverzije



Ulazni i izlazni signal DA konvertora



Filtrirani signal



Profesor dr Miroslav Lutovac
mlutovac@viser.edu.rs