



# Prediktivno kodiranje medijskih signala

Prof.dr.sc. Davor Petrinović,

09.ožujka 2008.



# Primjeri prediktivnog kodiranja govora

prof.dr.sc. Davor Petrinović



# Prediktivno kodiranje govora

- Koder govornog signala sa Vocoder strukturom odbacuje stvarnu informaciju o pobudnom signalu modela vokalnog trakta
  - pobuđen je sintetičkom pobudom koja samo “grubo” oponaša stvarnu (prirodnu) pobudu.
- Logično je očekivati da bi se kodiranjem informacije o stvarnoj pobudi, mogla ostvariti bolja kvaliteta, tj. prirodniji rekonstruirani govor.
- To se može ostvariti:
  - kodiranjem predikcijske pogreške u otvorenoj petlji, ili
  - korištenjem predikcije unutar zatvorene petlje.





# Prediktivno kodiranje govora

- Iako se radi sličnim strukturama, ponašanje kodera za ova dva prediktivna postupka kodiranja je prilično različito, pa ga je interesantno detaljnije istražiti.
- Postupak će biti ilustriran na samoglasnicima,
  - ... to su dugotrajni glasovi sa sporo promjenjivim korelacijama, pa se isti prediktor može koristiti za duže segmente signala (cca. 0.5 sekunde)
- Prediktivni postupci kodiranja biti će uspoređeni s direktnom kvantizacijom govornog signala s istom izlaznom entropijom indeksa.



# Prediktivno kodiranje govora

- Za kvantizaciju će u oba prediktivna postupka, kao i za potrebe direktne kvantizacije biti korišten skalarni kvantizator s ograničenom entropijom (ECSQ).
- Korak kvantizatora biti će podešen na način da se za svaku od struktura kodiranja ostvari ista (unaprijed odabrana) izlazna entropija.





# Prediktivno kodiranje govora

- U okviru primjera kvaliteta strukture biti će:
  - objektivno mjerena korištenjem SQNR odnosa,
  - odnosno subjektivno ocjenjena slušanjem signala u pojedinim točkama struktura
- Svi karakteristični signali struktura biti će i grafički prikazani u vremenskoj i frekvencijskoj domeni.



# Primjer prediktivnog kodiranja govora u otvorenoj petlji

prof.dr.sc. Davor Petrinović



# Prediktivno kodiranje govora u otvorenoj petlji

- Simulacija kodiranja govora u otvorenoj petlji provodi se korištenjem programa:
  - **MT04\_OLpred\_govor.m**
- Odabir samoglasnika, reda prediktora, i željene izlazne entropije provodi se izbornicima na početku programa.
- Program provodi slijedeće postupke:
  - izdvaja odabrani samoglasnik,
  - određuje optimalni linearni prediktor za taj glas,
  - određuje signal predikcijske pogreške uz primjenu prediktora u otvorenoj petlji, ....



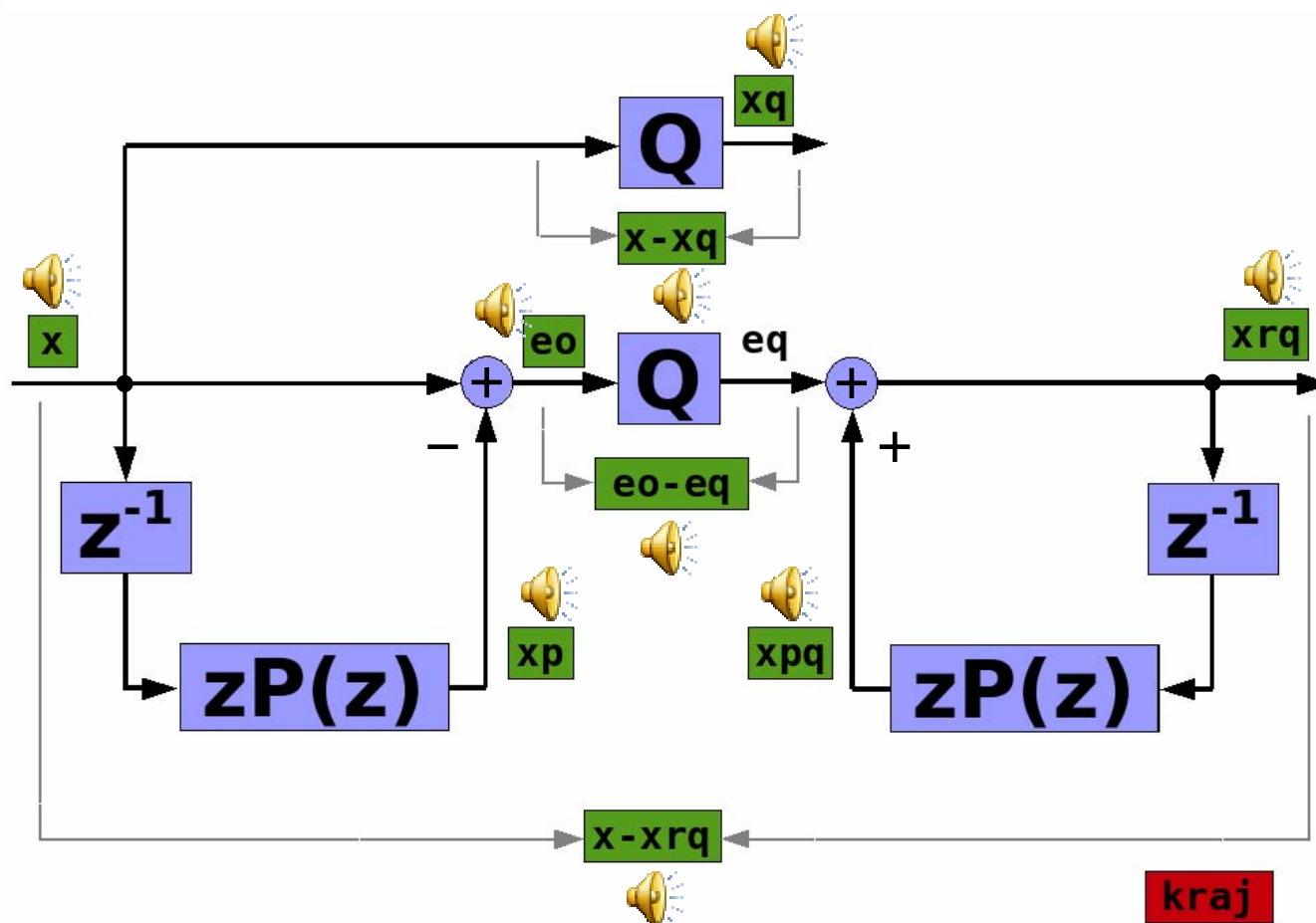


# Prediktivno kodiranje govora u otvorenoj petlji

- ... nastavak:
  - određuje diferencijalne entropije ulaznog signala i signala predikcijske pogreške,
  - određuje kvantizacijske korake za oba signala kojima se ostvaruje ista željena izlazna entropija,
  - provodi skalarnu kvantizaciju uz ograničenu entropiju na oba signala,
  - kvantizirani signal predikcijske pogreške propušta kroz sustav za rekonstrukciju,
  - računa pogreške direktne i prediktivne kvantizacije i pripadne SQNR odnose, te
  - provodi prikaz svih signala.



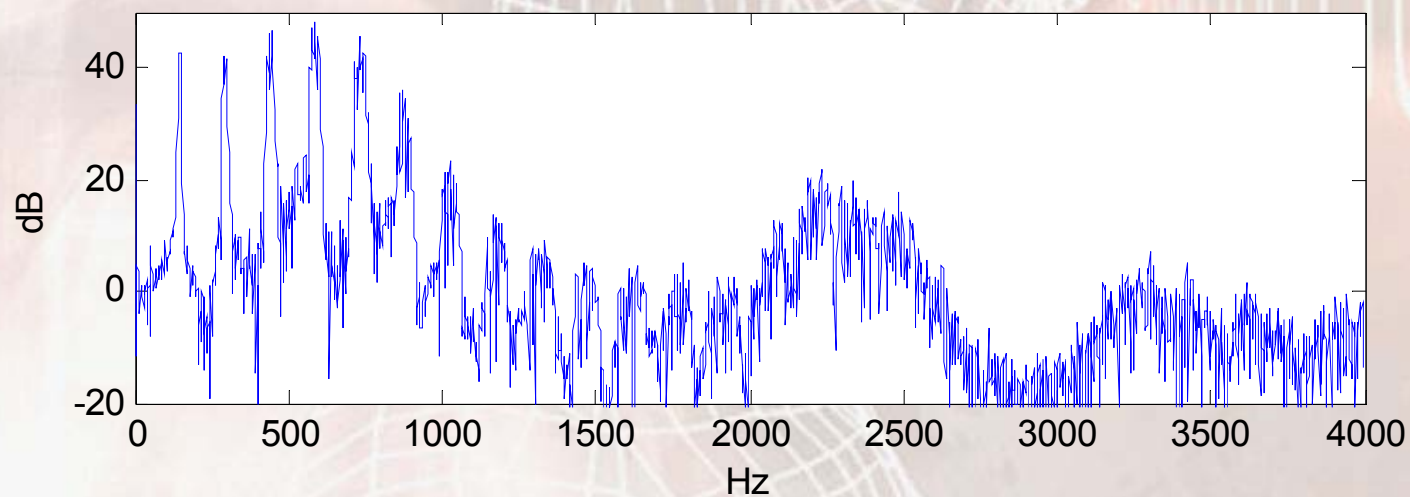
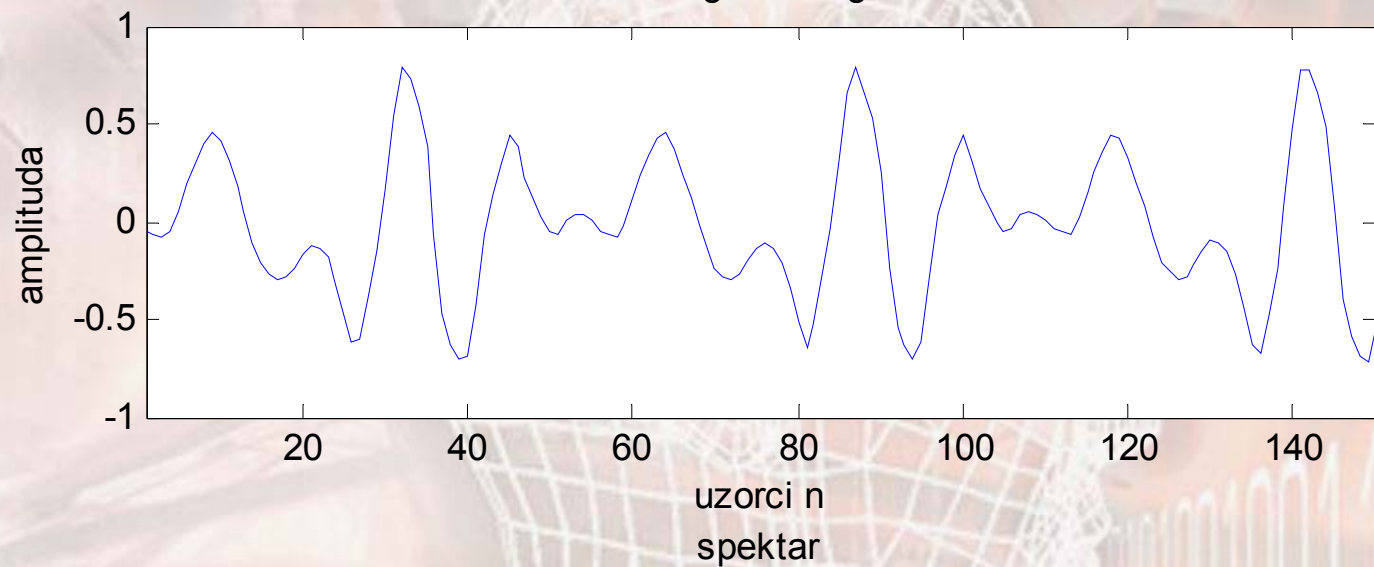
# Kodiranje u otvorenoj petlji glas "o" $p=10$ , $H(l)=2$ bit





# Ulazni signal glas "o"

x - Originalni signal

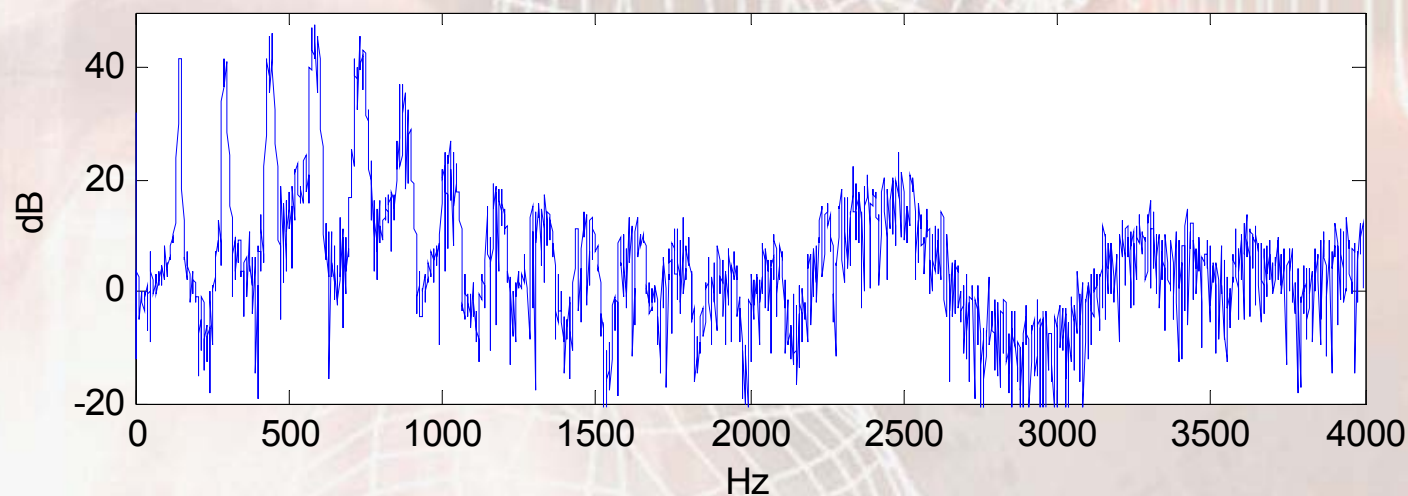
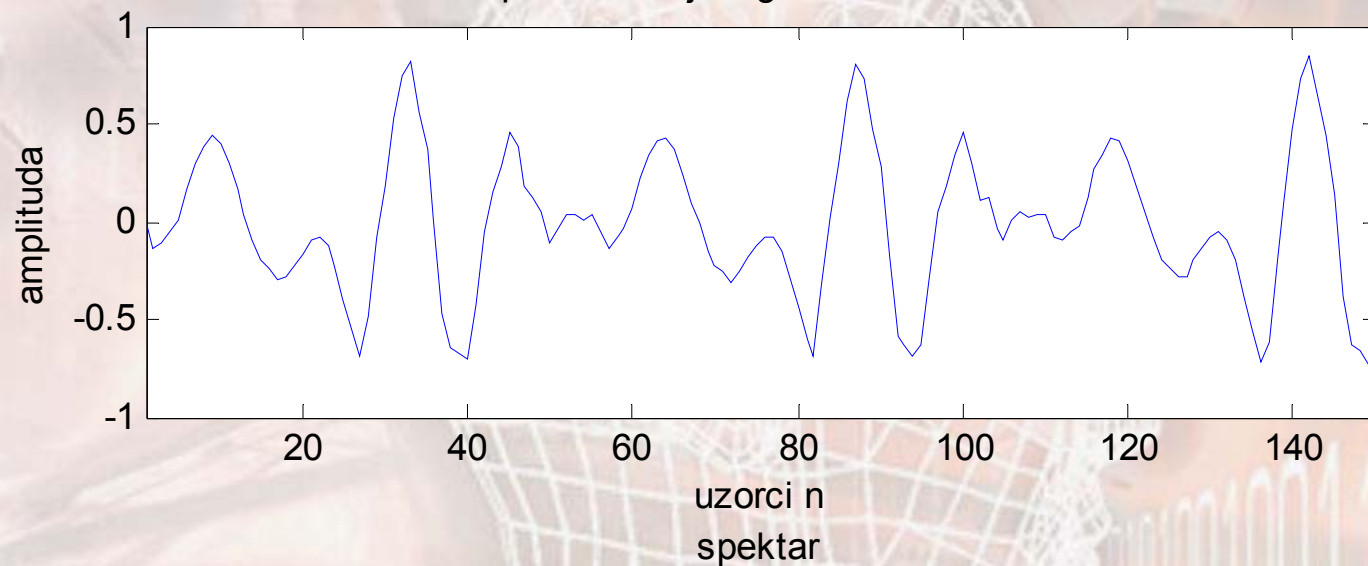






# Predikcija na strani koda (otv. petlja) glas “o”, $p=10$

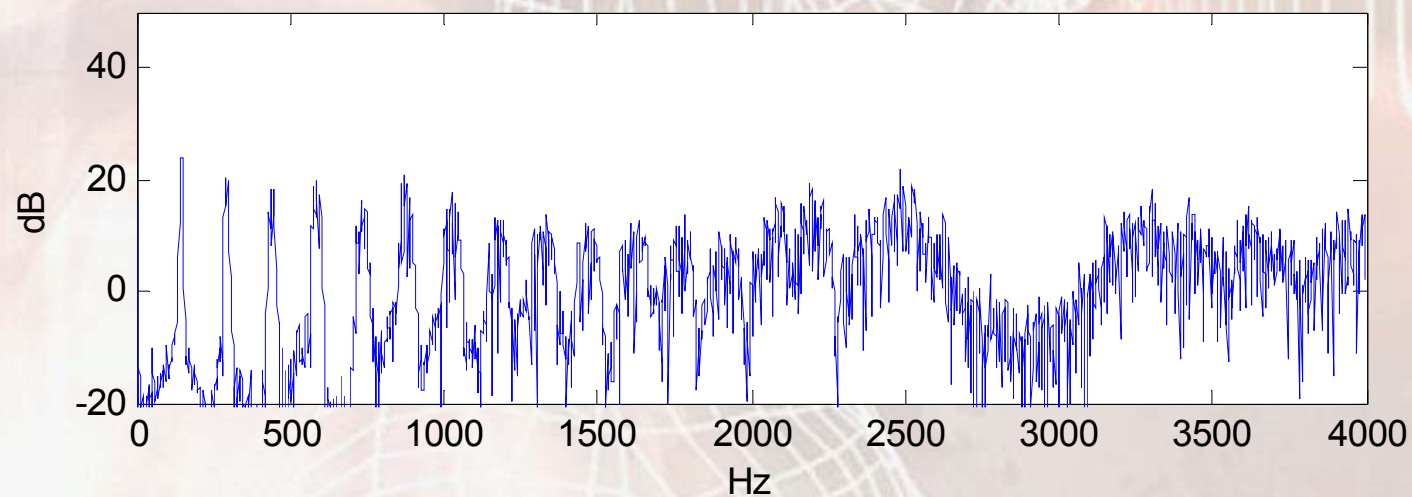
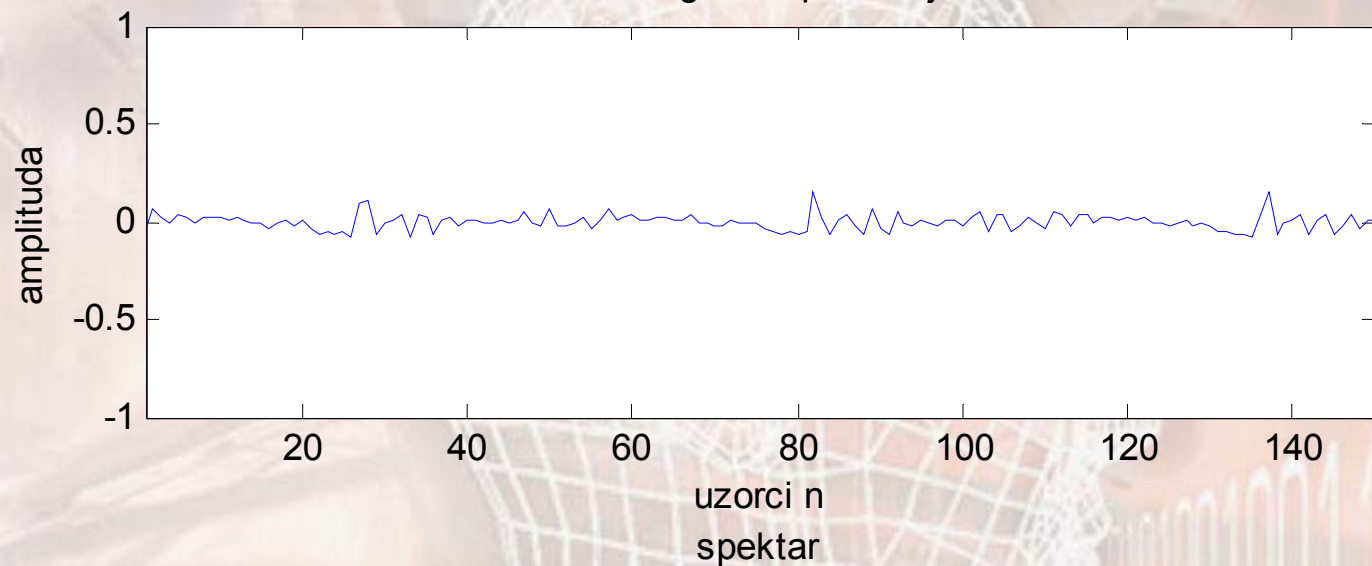
xp - Predikcija signala u enkoderu





# Pogreška predikcije glas "o", $p=10$

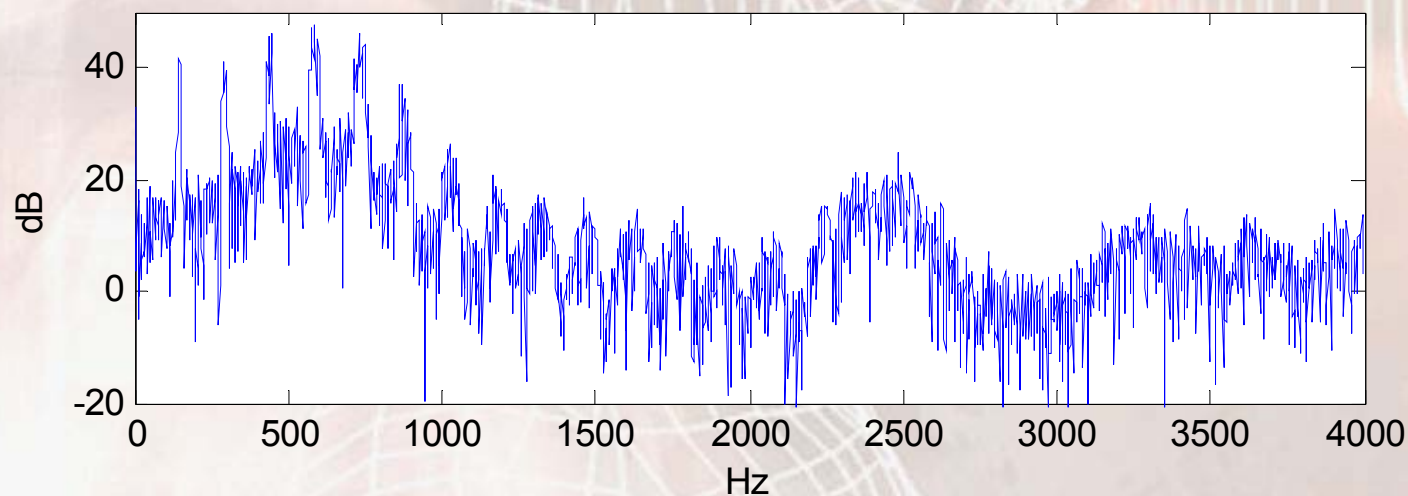
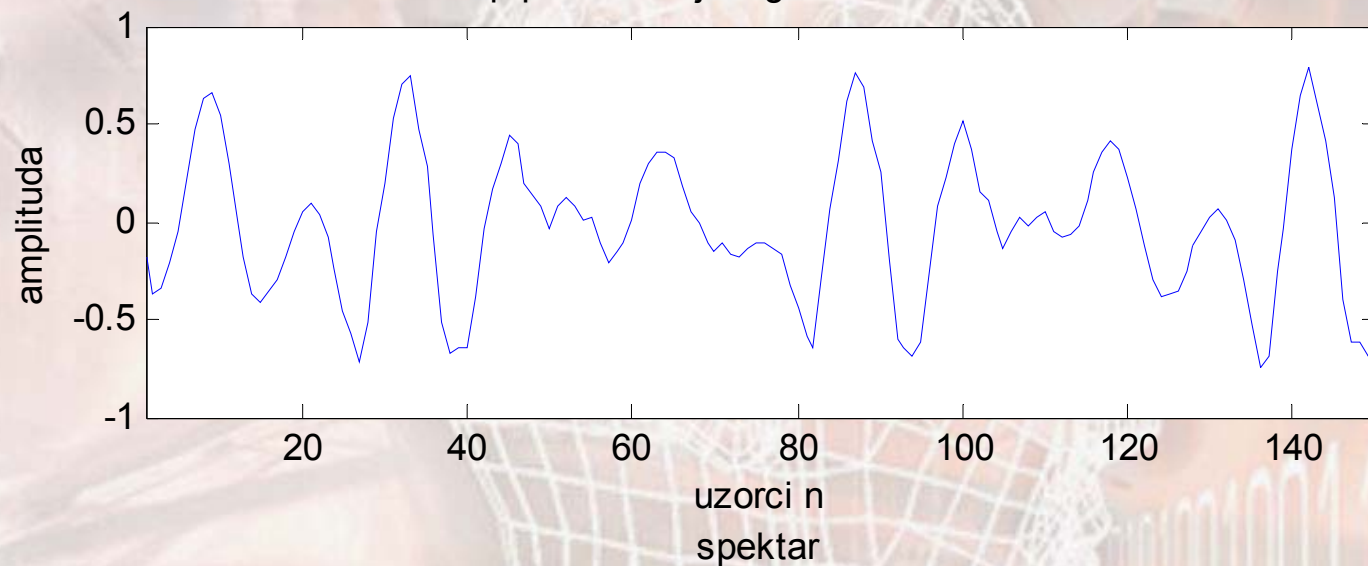
eo - Pogreska predikcije





# Predikcija na strani dekodera (otv. petlja) glas “o”, $p=10$ , $H(l)=2$ bit

xpq - Predikcija signala u dekodernu

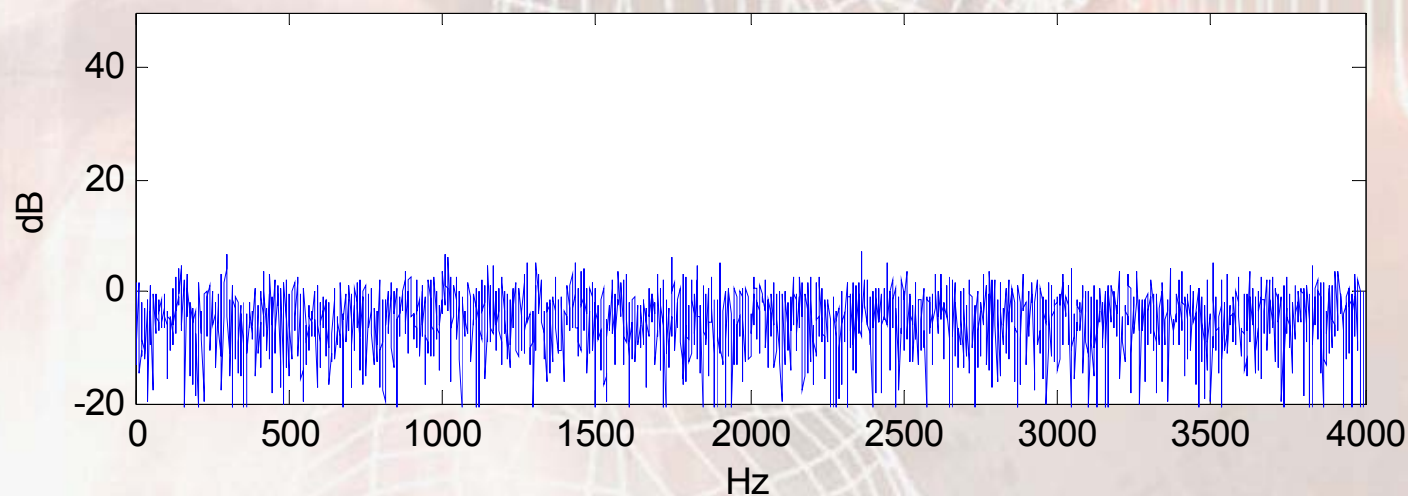
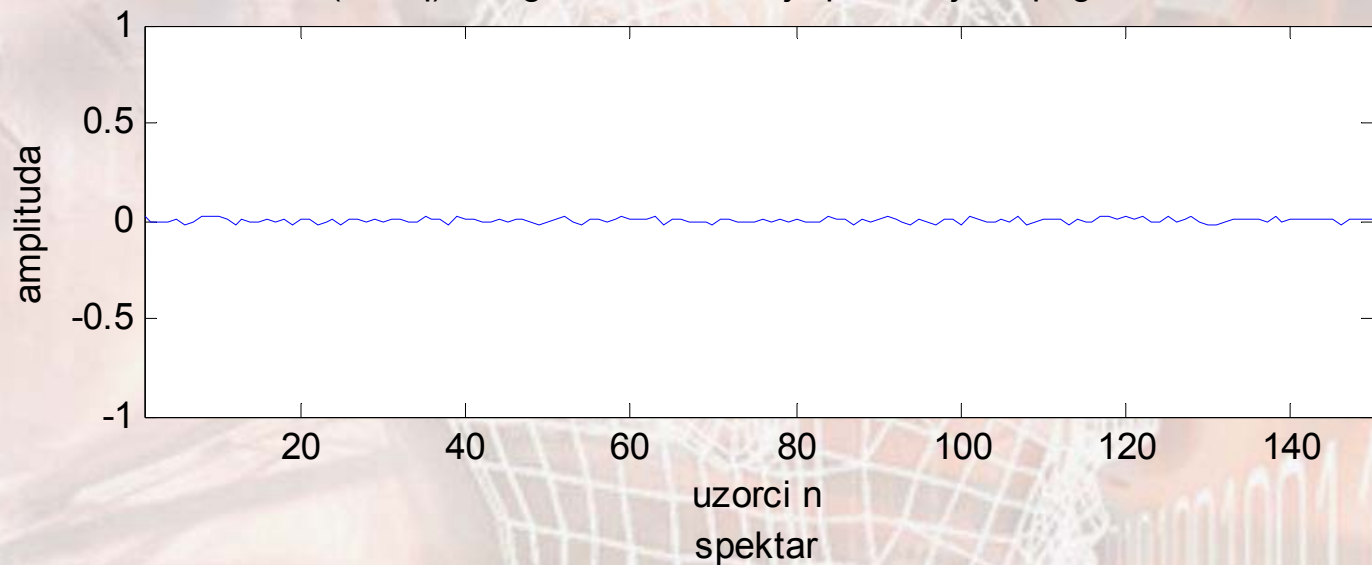






# Pogreška kvantizacije predikcijske pogreške glas “o”, $p=10$ , $H(l)=2$ bit

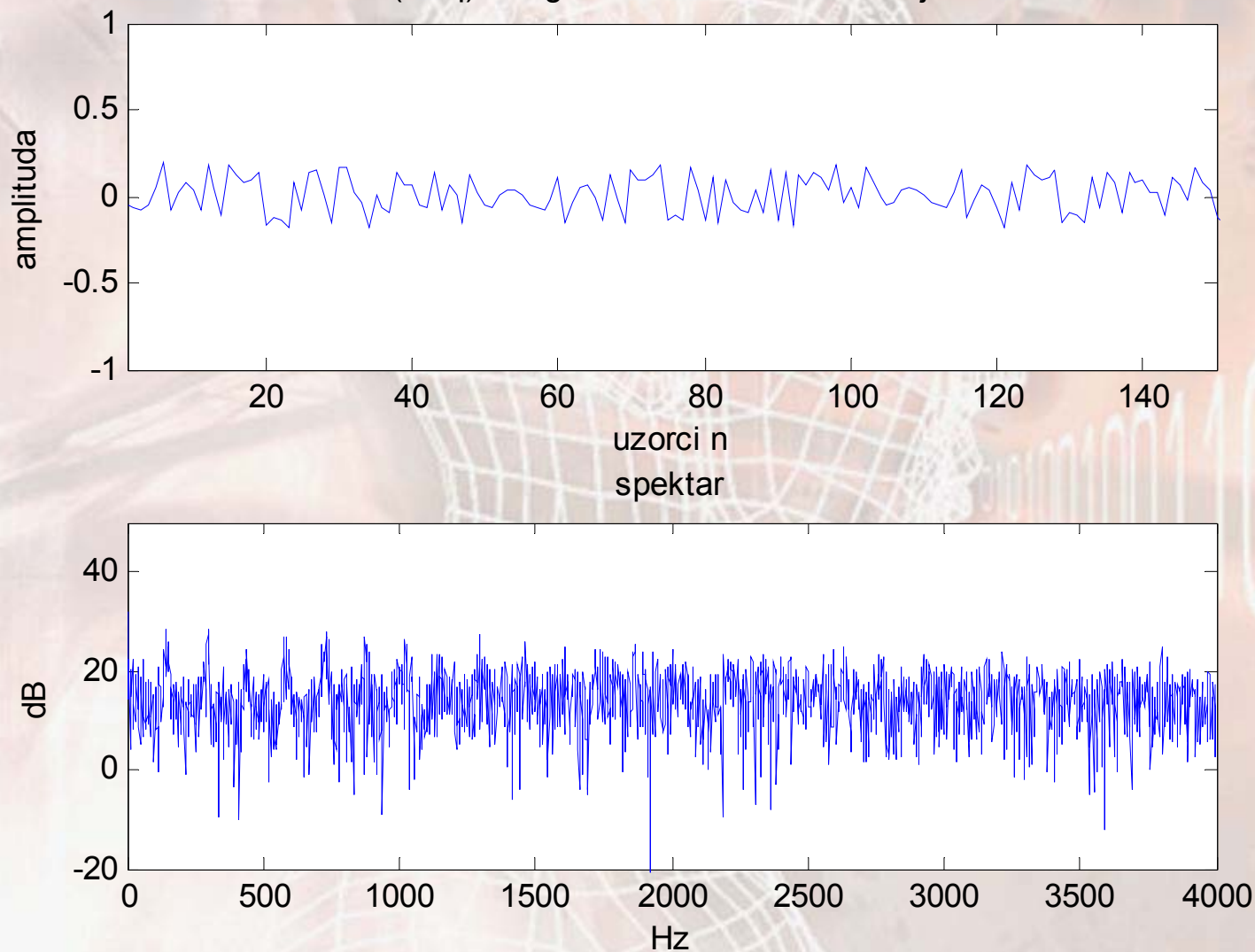
(eo-eq) - Pogreska kvatizacije predikcijske pogreske





# Pogreška direktne kvantizacije signala glas “o”, $H(I)=2$ bit

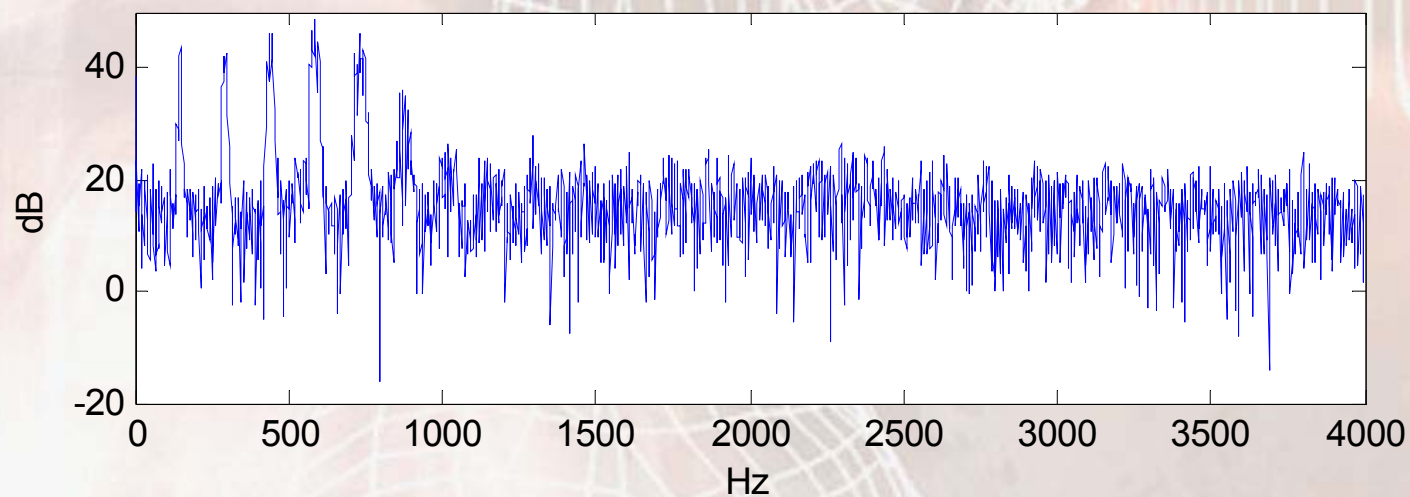
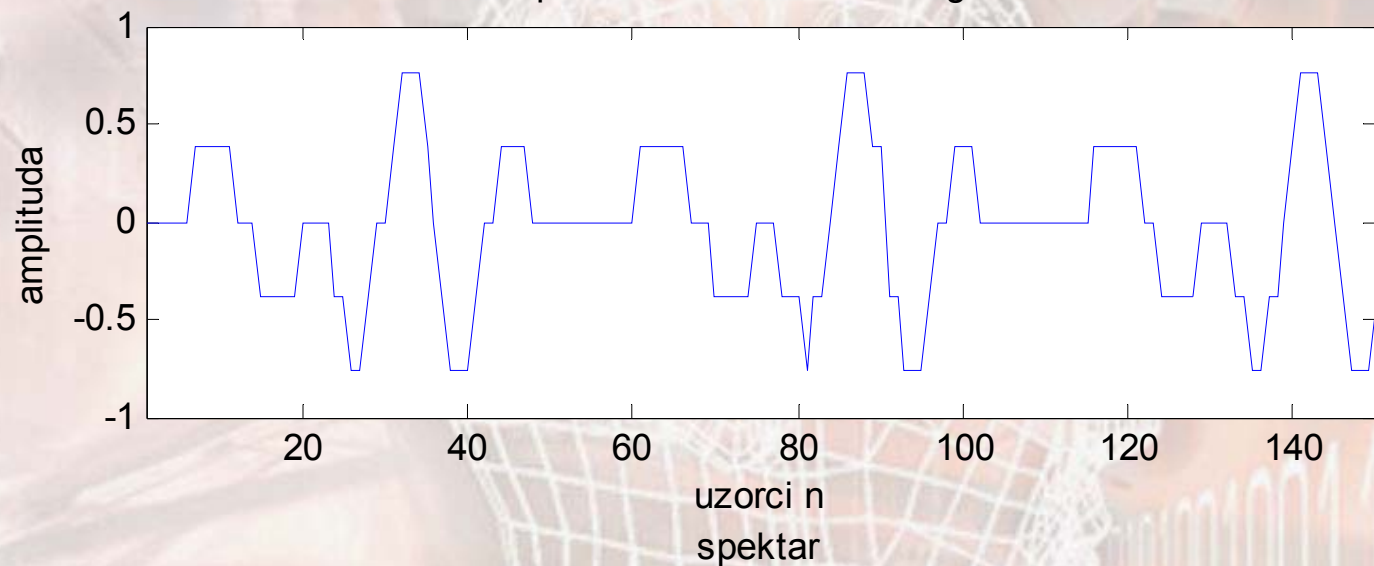
$(x-x_q)$  - Pogreska direktne kvantizacije





# Direktno kvantizirani signal glas "o", $H(I)=2$ bit

xq - Direktno kvantizirani signal

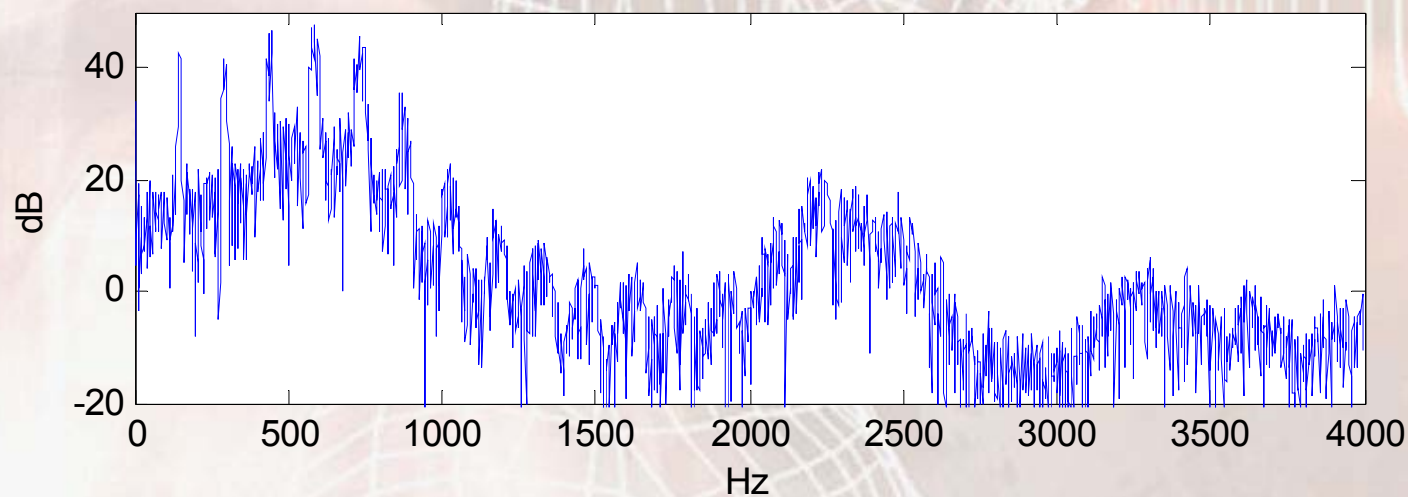
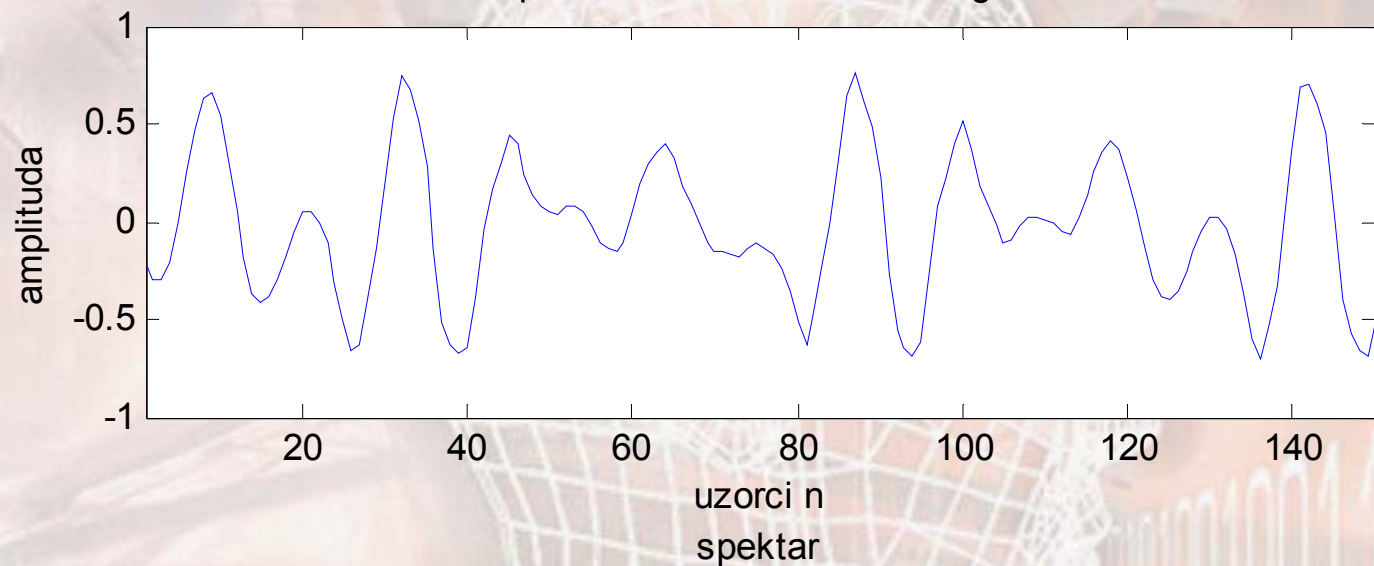






# Prediktivno kodirani signal glas “o”, $p=10$ , $H(l)=2$ bit

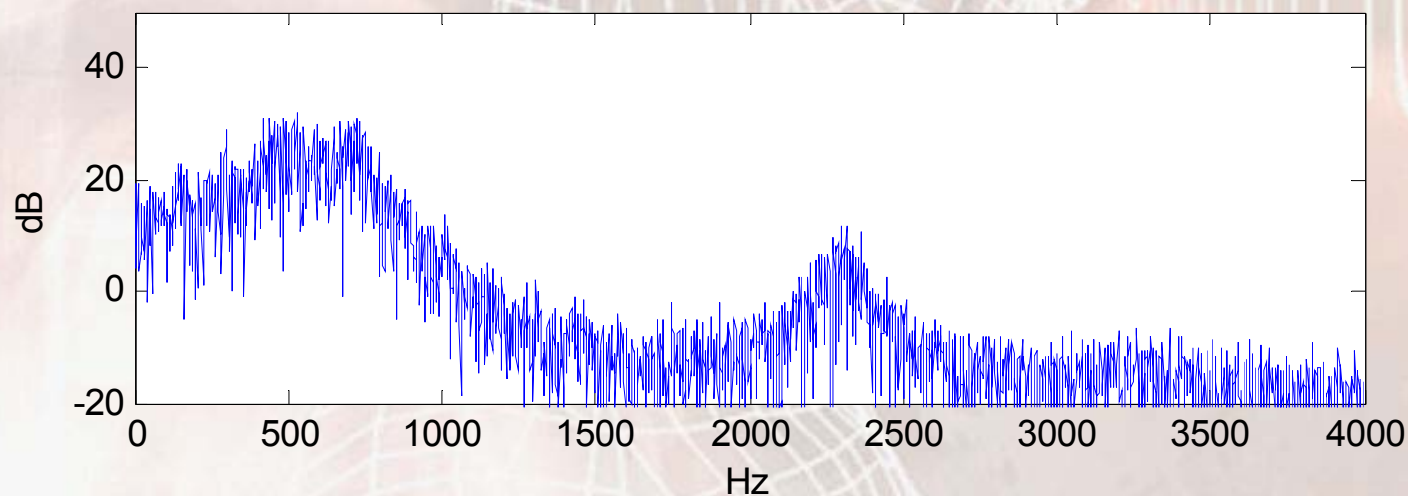
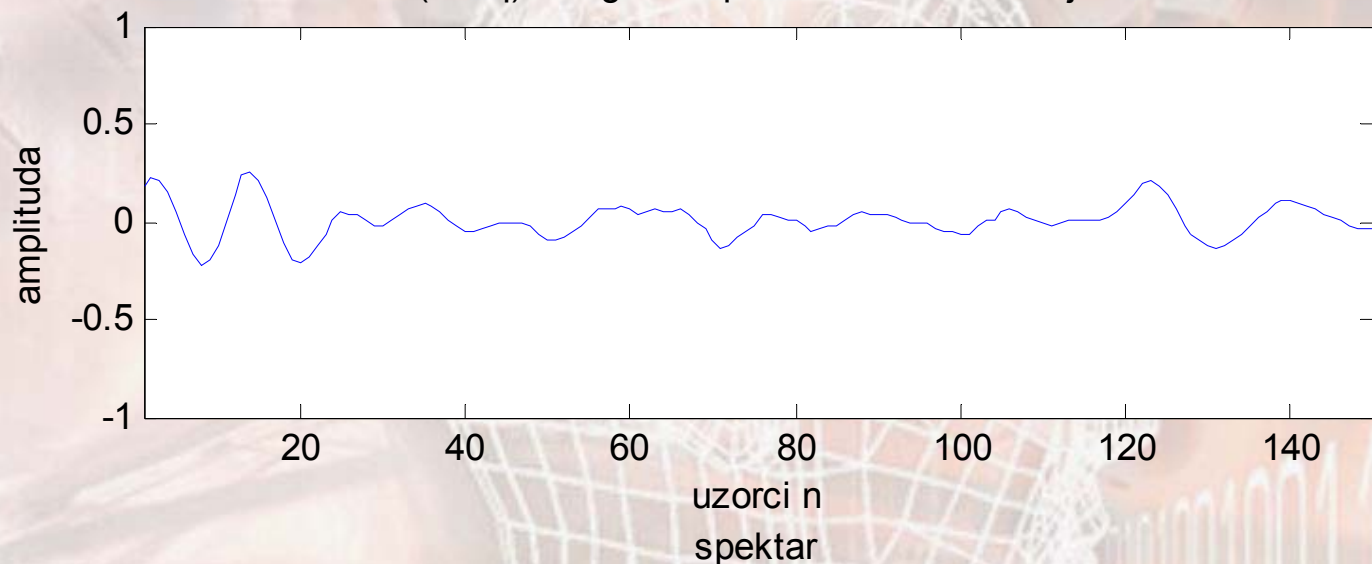
xrq - Prediktivno kvantizirani signal





# Pogreška prediktivne kvantizacije u otv. petlji, glas “o”, $p=10$ , $H(l)=2$ bit

(x-xrq) - Pogreska prediktivne kvantizacije





# Određivanje prediktora

- U ovom primjeru linearni prediktor je određen autokorelacijskim postupkom:

```
% Odredi linearni prediktor (LPC) za odabrani glas
R=xcorr(x,P);           % autokorelacija signala
R=R(P+[1:P+1]);        % samo pozitivni dio 0..P
M=toeplitz(R(1:P));    % formiraj matricu sustava
FI=R(2:P+1);           % slobodni stupac
al=inv(M)*FI;           % koeficijenti prediktora
A=[1 -al'];            % inverzni filter
[HH,om]=freqz(1,A,1024); % frekv. karak. LPC modela
plot(om/pi*fs/2,20*log10(abs(HH)));
```





# Određivanje prediktora

- Koeficijenti optimalnog linearnog prediktora za odabrani samoglasnik 'o' su:

	$-\alpha_1$	$-\alpha_2$	$-\alpha_3$	$-\alpha_4$	$-\alpha_5$
1.0000	-1.9266	1.1861	-0.5402	0.7915	-0.0247
	$-\alpha_6$	$-\alpha_7$	$-\alpha_8$	$-\alpha_9$	$-\alpha_{10}$
-0.4785	-0.3595	0.6138	-0.0477	-0.0849	

- Prijenosna funkcija sustava za rekonstrukciju ima slijedeći oblik:

$$H(z) = \frac{1}{1 - P(z)} = \frac{1}{1 - \sum_{k=1}^p \alpha_k z^{-k}}$$



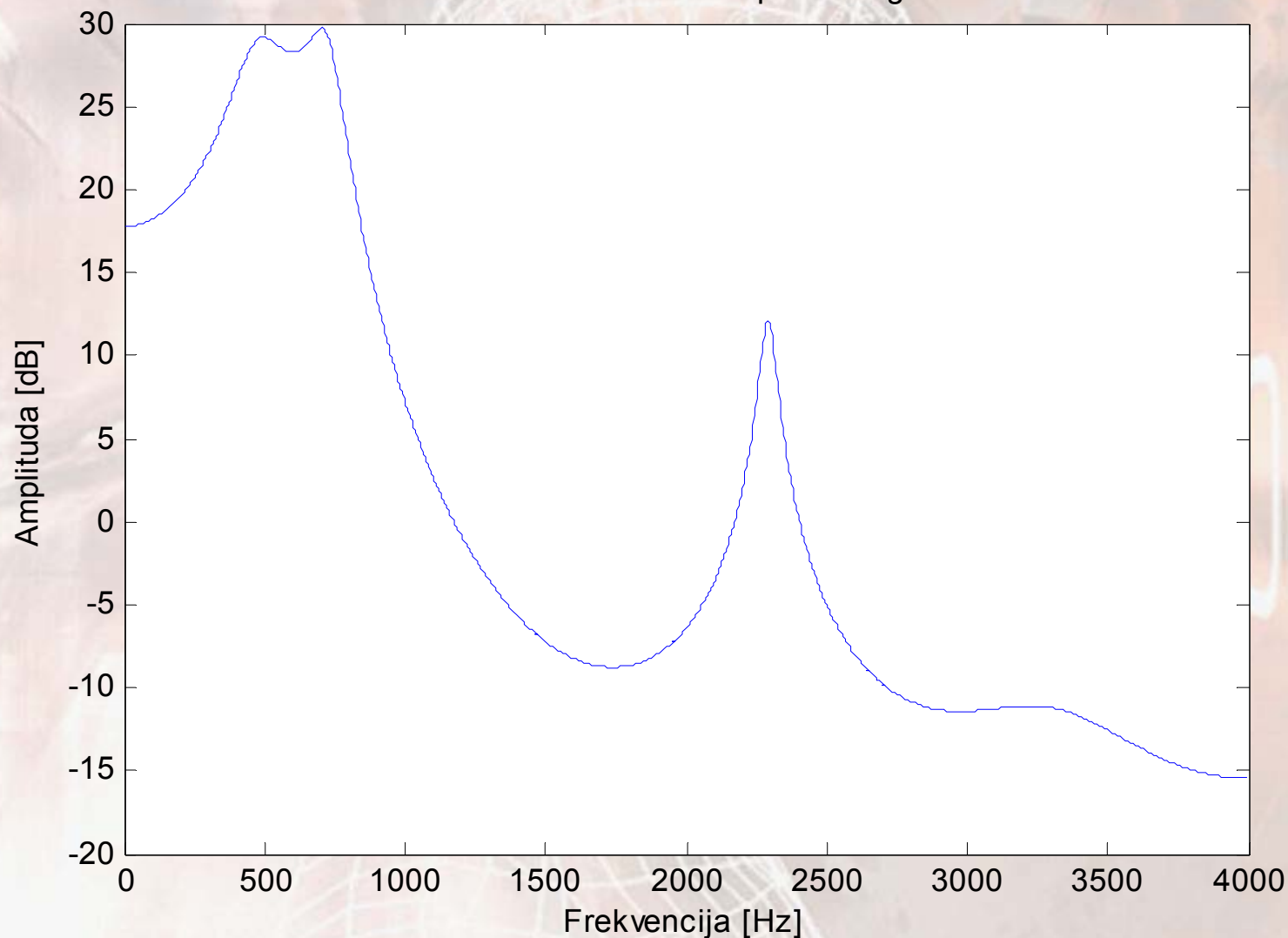
# Prediktivno kodiranje govora u otvorenoj petlji ... diskusija

- Varijanca signala predikcijske pogreške značajno je manja od varijance ulaznog signala ...
  - kvantizator koji kvantizira signal predikcijske pogreške  $e_o$  može imati mnogo manji korak nego kvantizator za direktnu kvantizaciju signala  $x$ , a time i manju varijancu pogreške kvantizacije.
- Nažalost, u sklopu rekonstrukcije na strani dekodera, ...
  - pogreška kvantizatora ( $e_o - e_q$ ) se pojačava s istim sustavom za rekonstrukciju koji idealni (nekvantizirani) signal predikcijske pogreške  $e_o$  pretvara u ciljni  $x$ .



# Frekvencijska karakteristika sustava za rekonstrukciju u dekoderu $H(e^{j\omega})=1/(1-P(e^{j\omega}))$

Prediktivni LPC model spektra signala







# Prediktivno kodiranje govora u otvorenoj petlji ... diskusija

- Dakle, ...
  - pogreška rekonstrukcije prediktivnog koda u otvorenoj petlji ( $x-xrq$ ) jednaka je kvantizacijskoj pogrešci signala predikcijske pogreške ( $e-eq$ ) propuštеноj kroz sustav za rekonstrukciju  $H(z)=1/(1-P(z))$ .
- Dekoder predikciju izračunava iz prijašnjih rekonstruiranih uzoraka  $xrq$ , pa je stoga njegova predikcija  $xpq$  različita od predikcije  $xp$  koju koristi enkoder.
- Iz sheme strukture je očito da vrijedi slijedeći odnos:

$$(x-xrq)=(e-eq) + (xp-xpq)$$



# Prediktivno kodiranje govora u otvorenoj petlji ... diskusija

- Zaključujemo da se pogreška rekonstrukcije prediktivnog koda u otvorenoj petlji **sastoji od dva izvora**:
  - pogreške kvantizacije signala predikcijske pogreške ( $eo-eq$ ) i
  - razlike između predikcija na strani enkodera i dekodera ( $xp-xpq$ ).
- Povećanje entropije  $H(l)$  smanjuje pogrešku ( $eo-eq$ ), ali obzirom da time rekonstruirani uzorci postaju točniji, smanjuje ujedno i razliku predikcija ( $xp-xpq$ ), a time i ukupnu pogrešku reprodukcije ( $x-xrq$ ).





# Prediktivno kodiranje govora u otvorenoj petlji ... diskusija

- Pogreška kvantizacije ( $e_o - e_q$ ) ima približno uniformnu gustoću vjerojatnosti na intervalu  $-\Delta/2$  do  $\Delta/2$ , ali ima i amplitudno ravni spektar, tj. ima svojstva bijelog (spektralno neobojenog) šuma, (engl. **white noise**).
- Prolaskom kroz sustav  $H(z)$  dobiva se pogreška rekonstrukcije ( $x - x_{rq}$ ), koja je spektralno obojena upravo jednako kao i sam signal ...
  - to je ekvivalentno kao da je izvor bijelog šuma pribrojen idealnom pobudnom signalu na ulazu u vokalni trakt, tj. na glasnicama, pa se dobiva malo “hrapaviji” glas!





# Prediktivno kodiranje govora u otvorenoj petlji ... diskusija

- Za slučaj samoglasnika, pogreška rekonstrukcije ( $x-xrq$ ) zvuči vrlo slično kao i originalni glas, ali izgovoren šaptom (bezvučno), tj. bez titranja glasnica.
- Zbog spektralne sličnosti korisnog signala i signala pogreške, pogreška će biti teže čujna i manje nam smeta nego za slučaj direktne kvantizacije kod koje je pogreška ( $x-xq$ ) sličnija bijelom šumu.
- Ova pojava se naziva “frekvencijskim maskiranjem”, (engl. ***frequency masking***).



# Prediktivno kodiranje govora u otvorenoj petlji ... diskusija

- Prediktivni koder u otvorenoj petlji zvuči bolje nego direktno kvantizirani signal upravo radi povoljnije spektralne razdiobe kvantizacijske pogreške!
- Obzirom da koder **spektralno uobličuje kvantizacijski šum** sa ciljem da ga prikrije “iza” spektra signala, takovi postupci se nazivaju engl. ***noise shaping***.



# Prediktivno kodiranje govora u otvorenoj petlji ... diskusija

- Interesantno je uočiti da prediktivno kodiranje u otvorenoj petlji u pravilu **neće povećati SQNR** odnos, već će samo istu energiju pogreške bolje preraspodijeliti.
- Rezultati za primjer glasa “o” sa  $p=10$

Stvarne izlazne entropije:  $H(I_X)=2.001$   $H(I_E)=2.000$

Stvarni izlazni SNR:  $SNR(X)=10.139$  dB  $SNR(E)=10.742$  dB

Stvarni izlazni SNR nakon rekonstrukcije:  $SNR(X_r)=11.486$  dB

Predikcijski dobitak:  $P_{Gotv} = 19.305$  dB

Povećanje kvalitete:  $SNR(X_r)-SNR(X)=1.347$  dB





# Što smo naučili

- određivanje prediktora autokorelacijskim postupkom (primjer)
- sustav za rekonstrukciju u dekoderu
- pogreška rekonstrukcije i njeni izvori
- spektralna svojstva pogreške kvantizacije za signal predikcijske pogreške i konačnu rekonstrukciju na strani dekodera
- frekvencijsko maskiranje
- spektralno uoblič enje kvantizacijskog šuma
- SQNR odnos koda u otvorenoj petlji



# Primjer prediktivnog kodiranja govora u zatvorenoj petlji

prof.dr.sc. Davor Petrinović



# Prediktivno kodiranje govora u zatvorenoj petlji

- Kako riješiti problem razlike između predikcija na strani enkodera i dekodera?
- Potrebno je predikciju na obje strane izračunati iz istog signala ...
  - iz prethodnih uzoraka rekonstruiranog signala ...
  - predikcija je lošija nego za otvorenu petlju, ali barem više nema razlike između predikcija!
- Simulacija kodiranja govora u zatvorenoj petlji provodi se korištenjem programa:
  - **MT04\_ADPCM\_govor.m**





# Prediktivno kodiranje govora u zatvorenoj petlji

- Prvi dio programa radi identične postupke kao i koder u otvorenoj petlji:
  - odabire željeni glas, red prediktora i izlaznu entropiju,
  - izdvaja glas i određuje optimalni linearni prediktor za slučaj predikcije u otvorenoj petlji,
  - izračunava signal predikcijske pogreške za slučaj otvorene petlje,
  - određuje diferencijalne entropije ulaznog signala i signala predikcijske pogreške, te
  - određuje inicijalne kvantizacijske korake za oba signala kojima se ostvaruje ista željena izlazna entropija,



# Prediktivno kodiranje govora u zatvorenoj petlji

- ... u drugom dijelu programa provodi stvarnu kvantizaciju signala u zatvorenoj predikcijskoj petlji (uzorak po uzorak):
  - računa predikciju  $x_p[n]$  trenutnog uzorka  $x[n]$  iz prošlih rekonstruiranih uzoraka  $x_{rq}[n-i]$ ,  $i=1, 2, \dots, p$ ,
  - predikciju odbija od uzorka ulaznog signala, čime dobiva pogrešku predikcije  $ec[n]$
  - kvantizira je projektiranim kvantizatorom u  $ecq[n]$ , te
  - na  $ecq[n]$  nazad pribraja predikciju  $x_p[n]$  čime dobiva rekonstruirani izlazni uzorak  $x_{rq}[n]$ , a
  - identični postupak provodi i udaljeni dekodier.





# Prediktivno kodiranje govora u zatvorenoj petlji

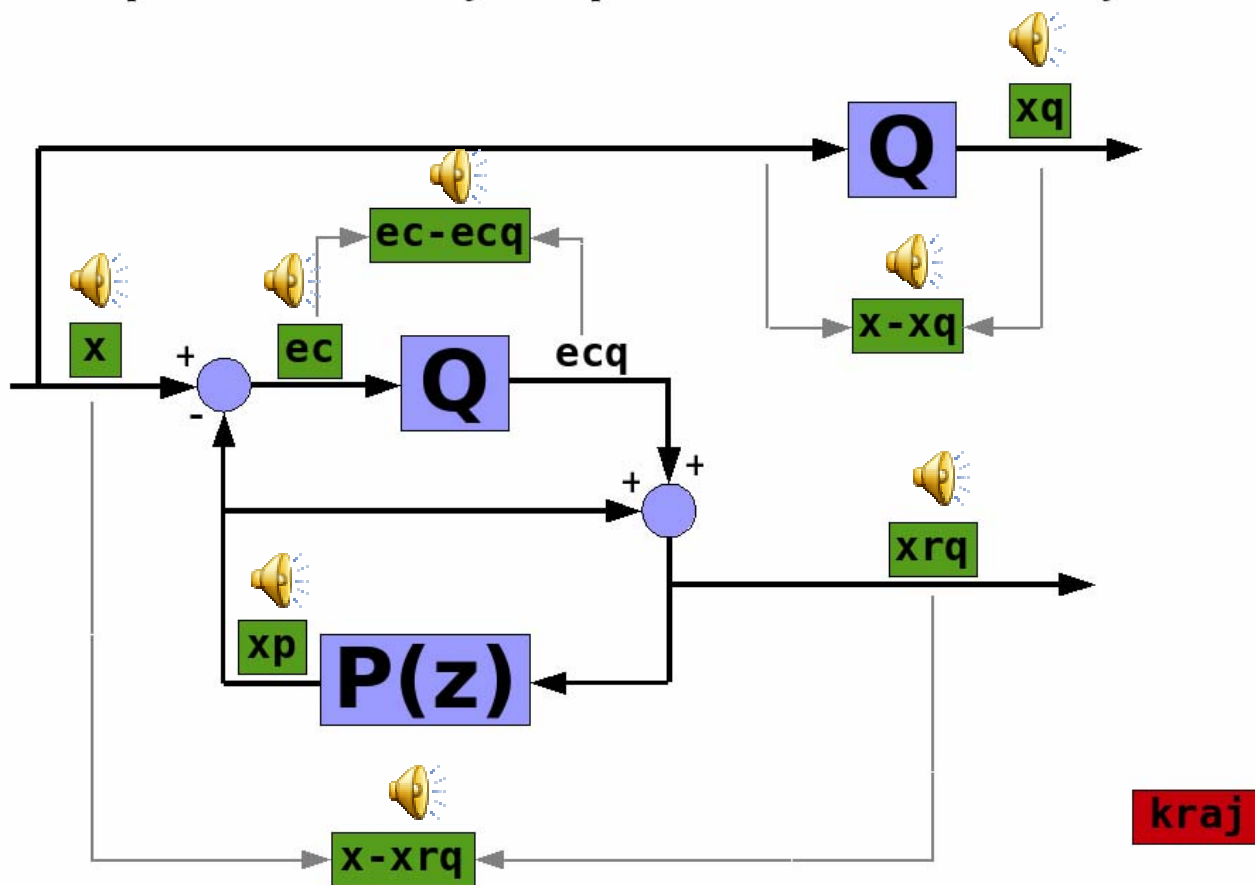
- konačno ...
  - izračunava stvarnu entropiju izlaznih indeksa kvantizatora u zatvorenoj petlji, te ...
  - u slučaju da se razlikuje u odnosu na željenu entropiju, izračunava novi korak  $\Delta$  i provodi još jedan kvantizacijski prolaz za cijeli signal, a
  - ako treba ovo ponavlja više puta, ... te
  - na kraju izračunava  $SQNR$  odnose u svim karakterističnim točkama strukture:
    - $(x-xq)$ ,  $(x-xrq)$ ,  $(ec-ecq)$ .





# Kodiranje u zatvorenoj petlji glas "o" $p=10$ , $H(I)=3$ bit

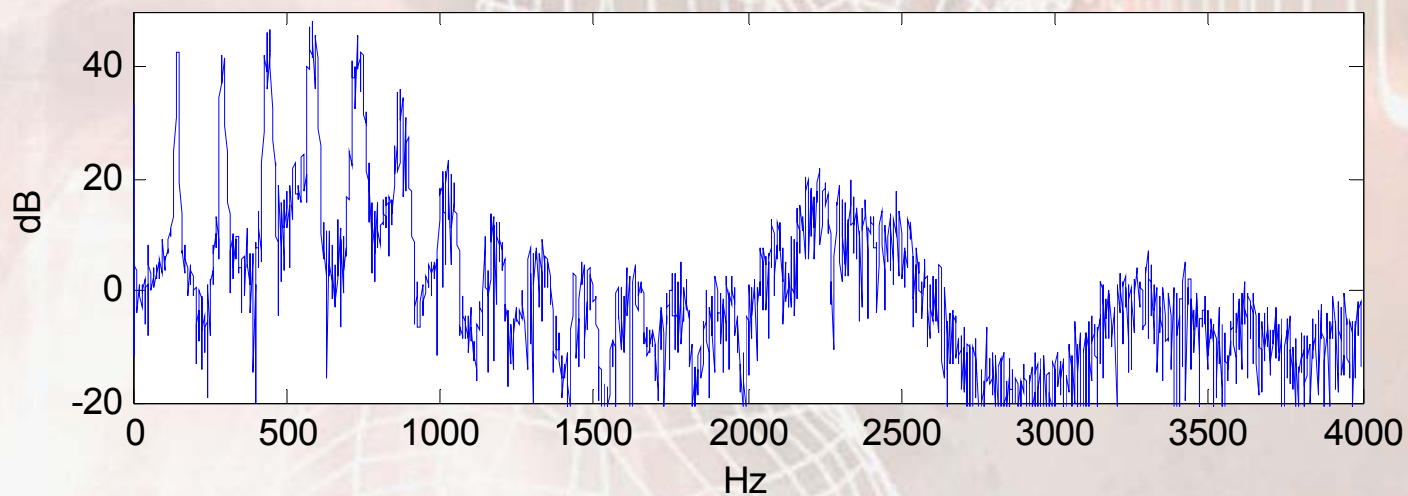
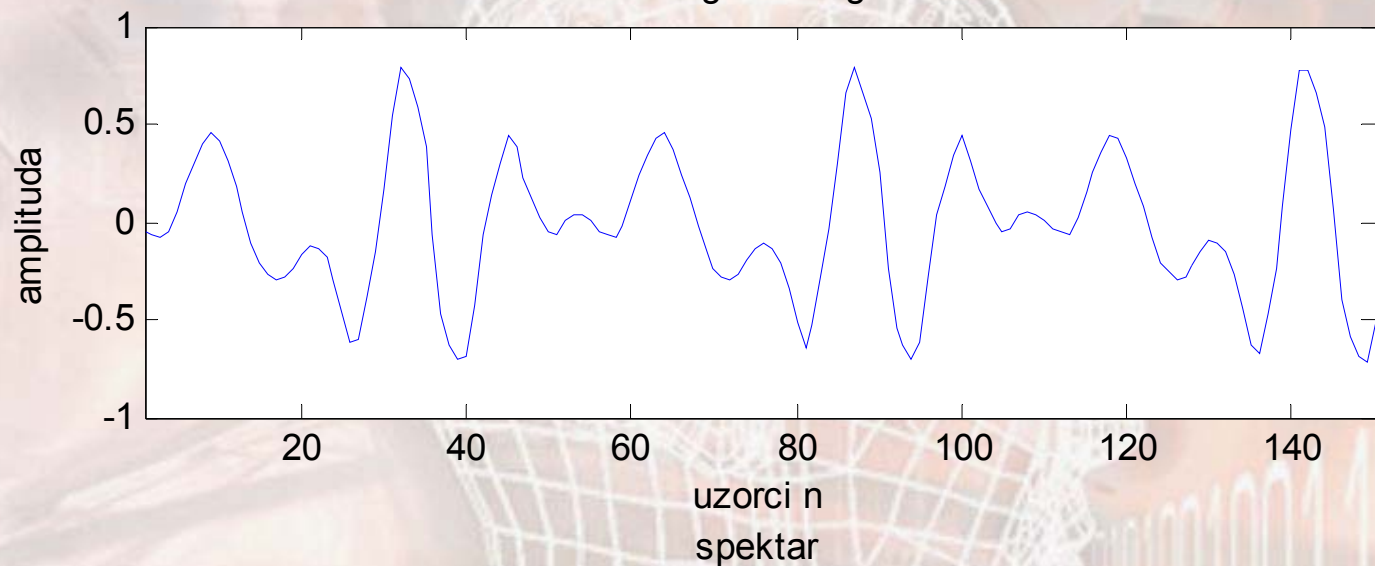
## Adaptivna diferencijalna pulsno kodna modulacija





# Ulazni signal glas "o"

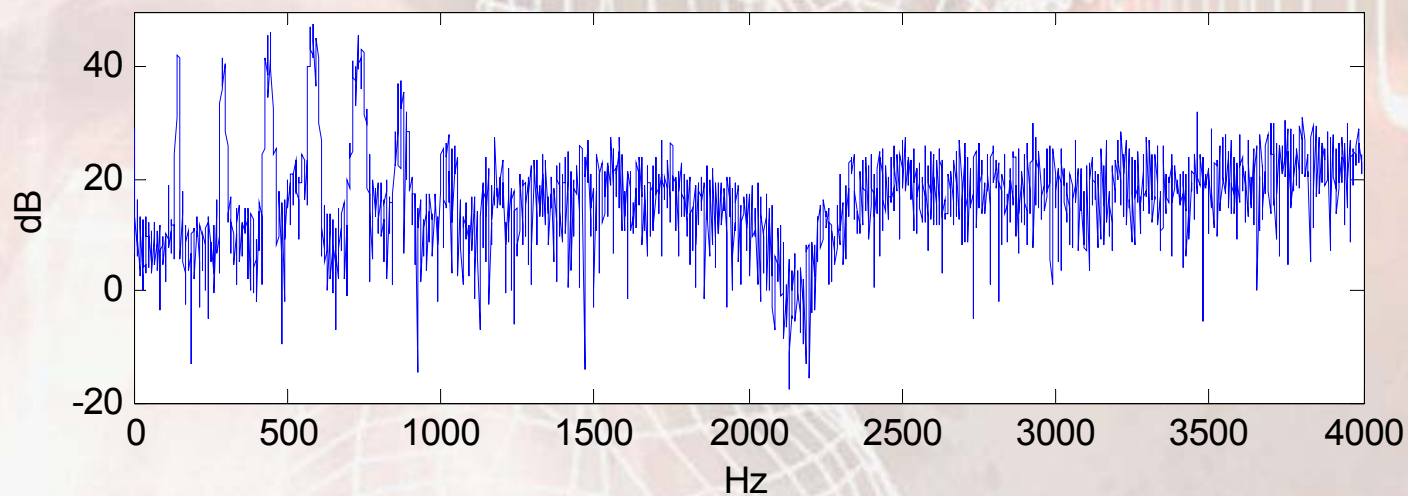
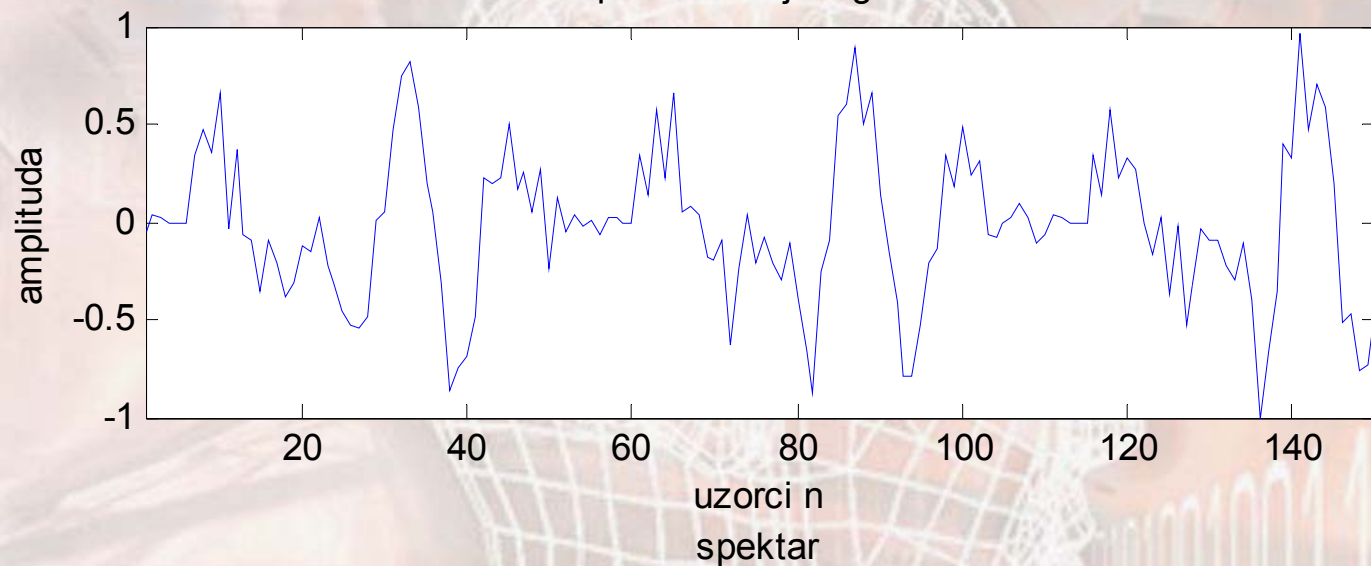
x - Originalni signal





# Predikcija na obje strane (zatv. petlja) glas "o", $p=10$

xp - Predikcija signala

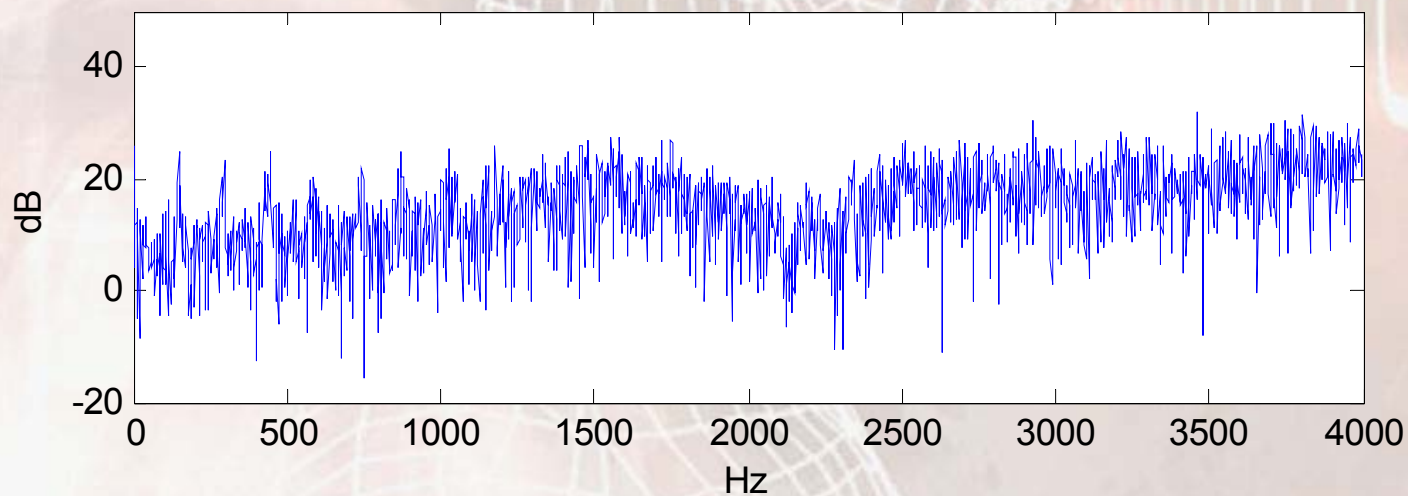
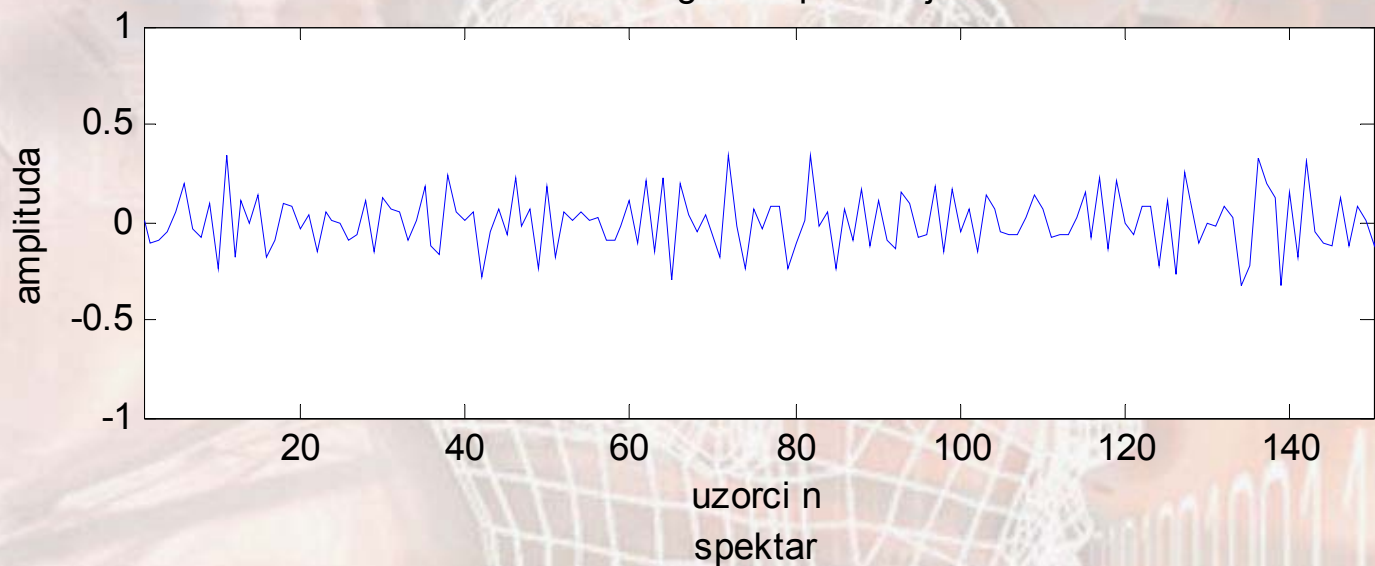






# Pogreška predikcije u zatv. petlji glas “o”, $p=10$

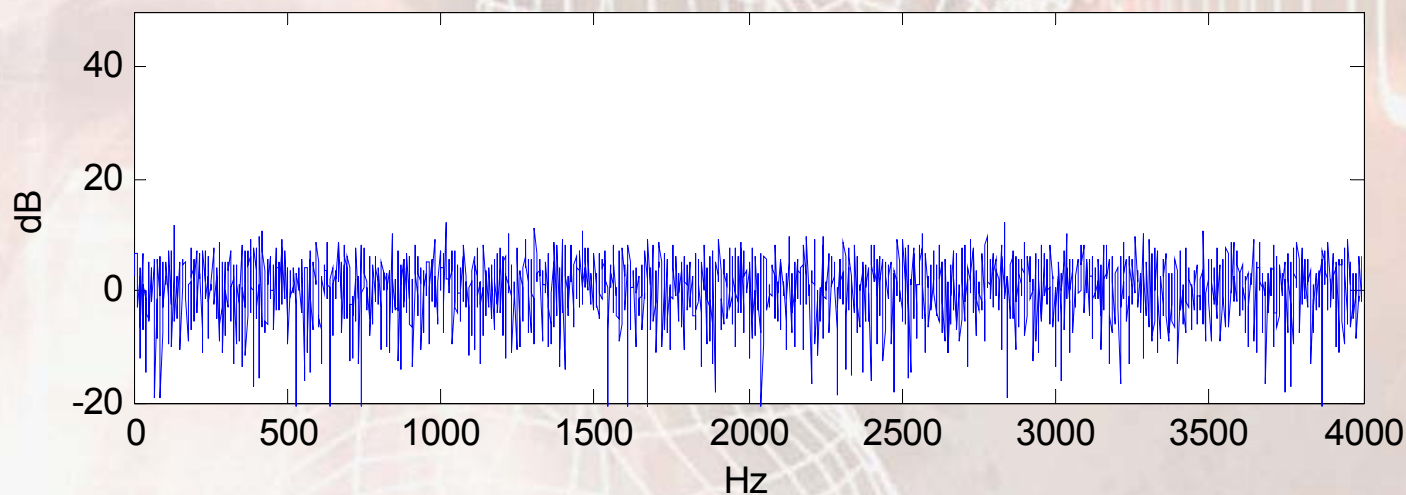
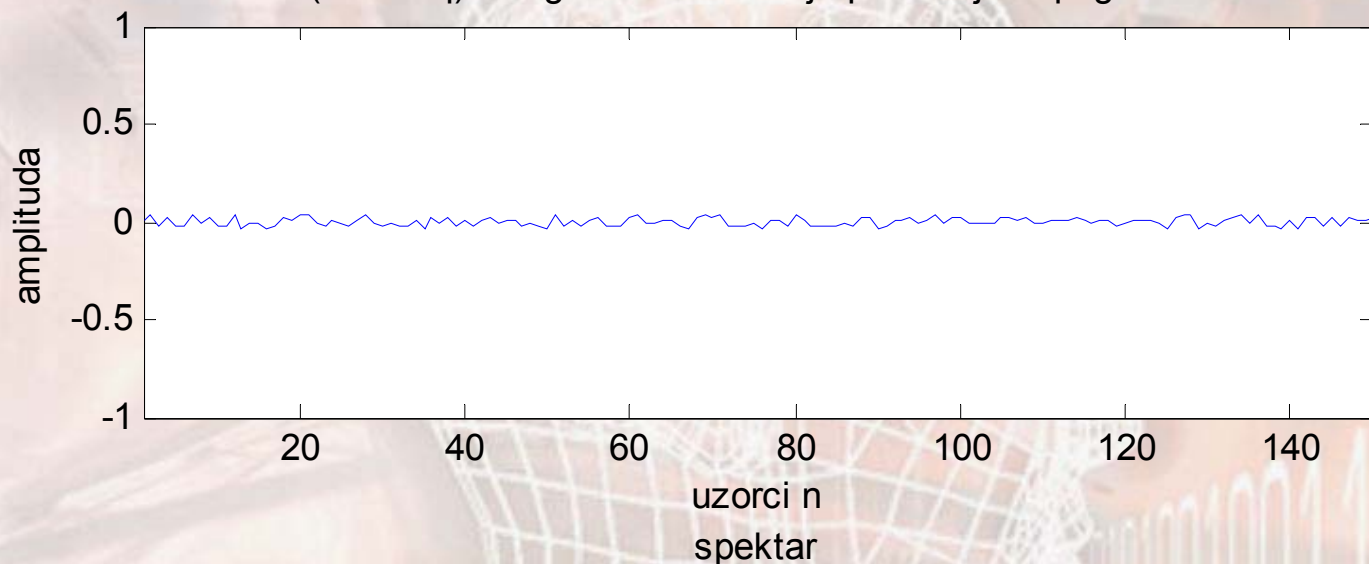
ec - Pogreska predikcije





# Pogreška kvantizacije predikcijske pogreške glas “o”, $p=10$ , $H(l)=3$ bit

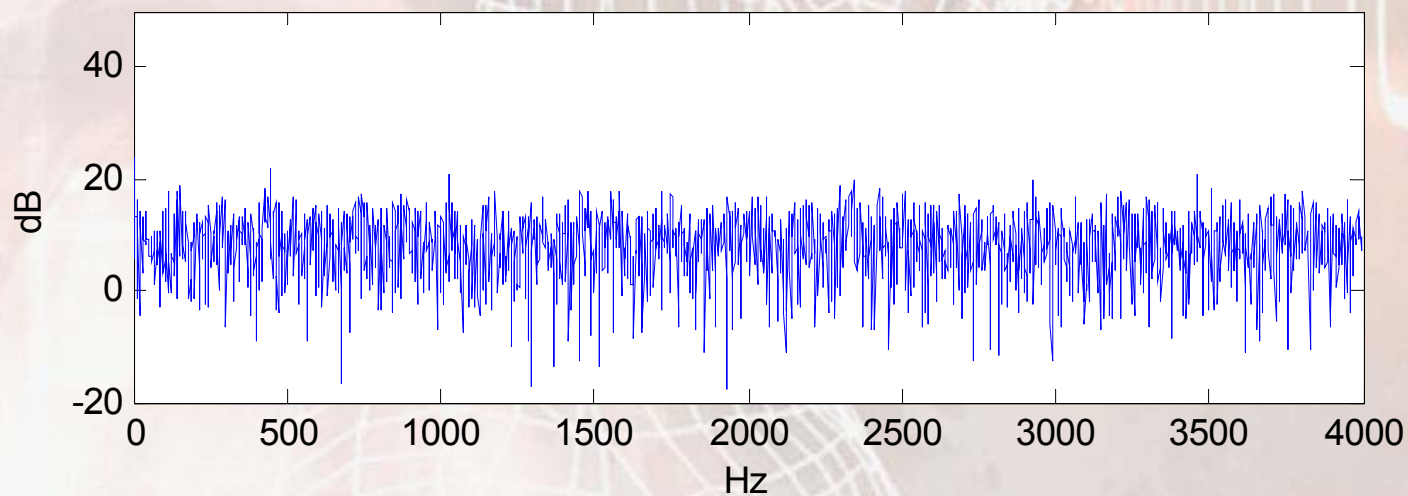
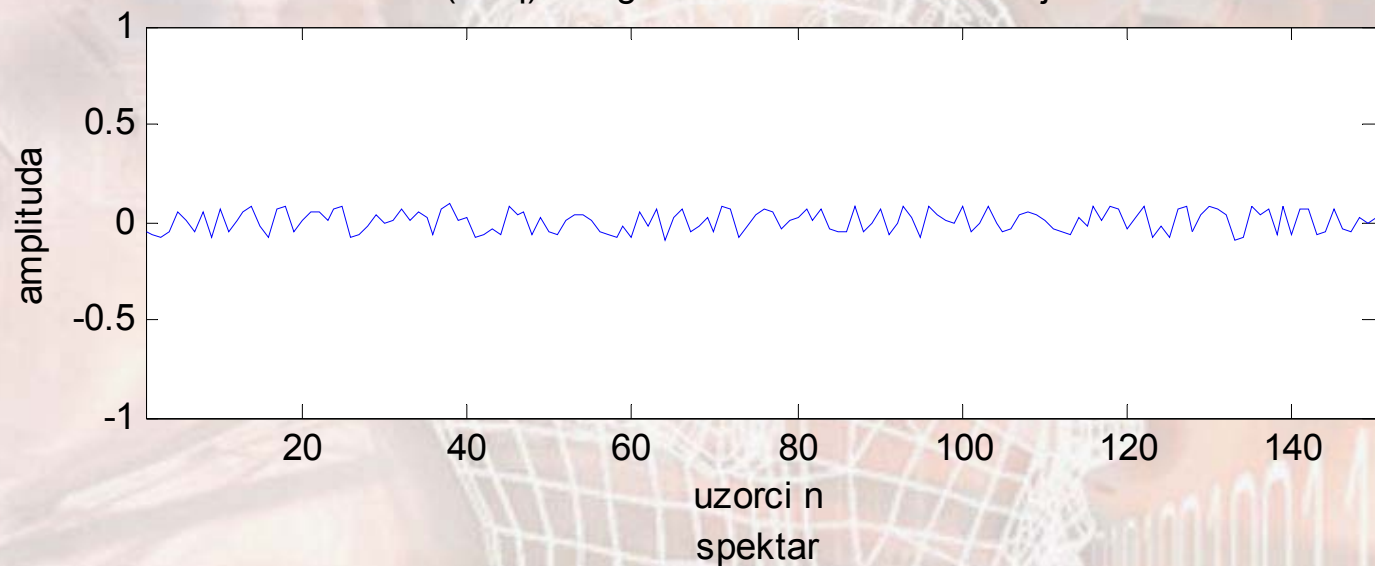
(ec - ecq) - Pogreska kvatizacije predikcijske pogreske





# Pogreška direktne kvantizacije signala glas "o", $H(I)=3$ bit

(x-xq) - Pogreska direktne kvantizacije

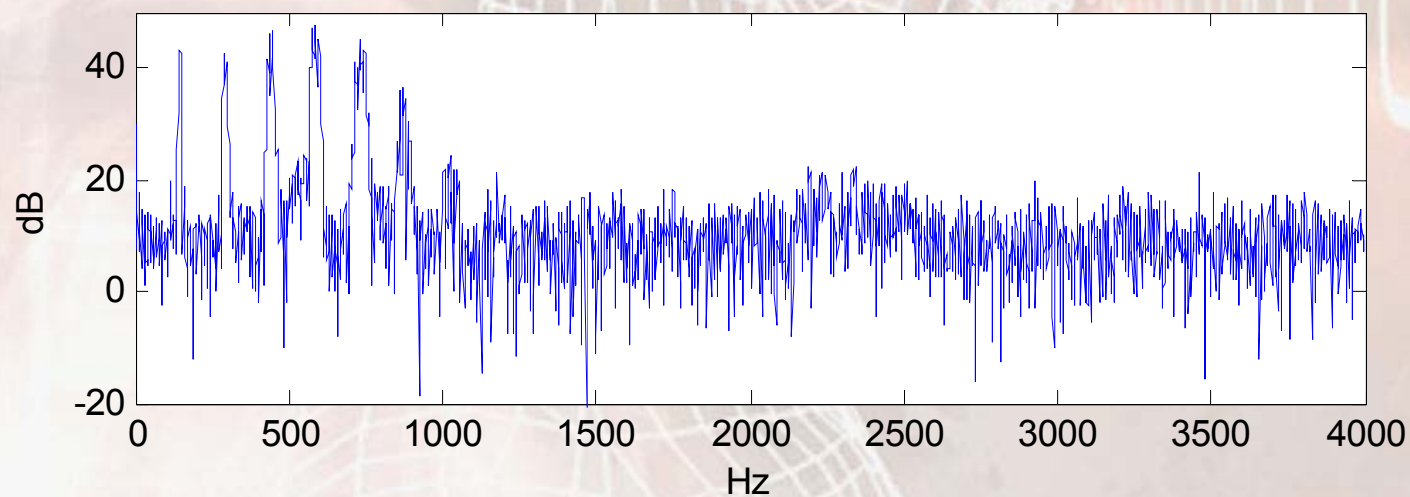
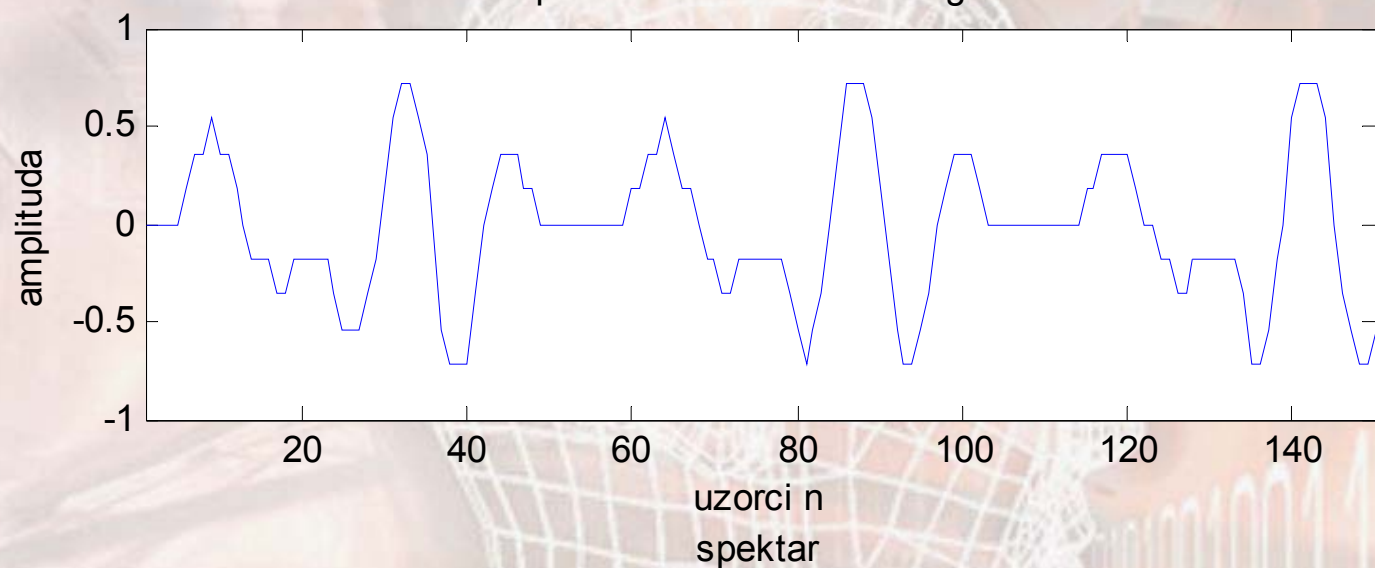






# Direktno kvantizirani signal glas "o", $H(I)=3$ bit

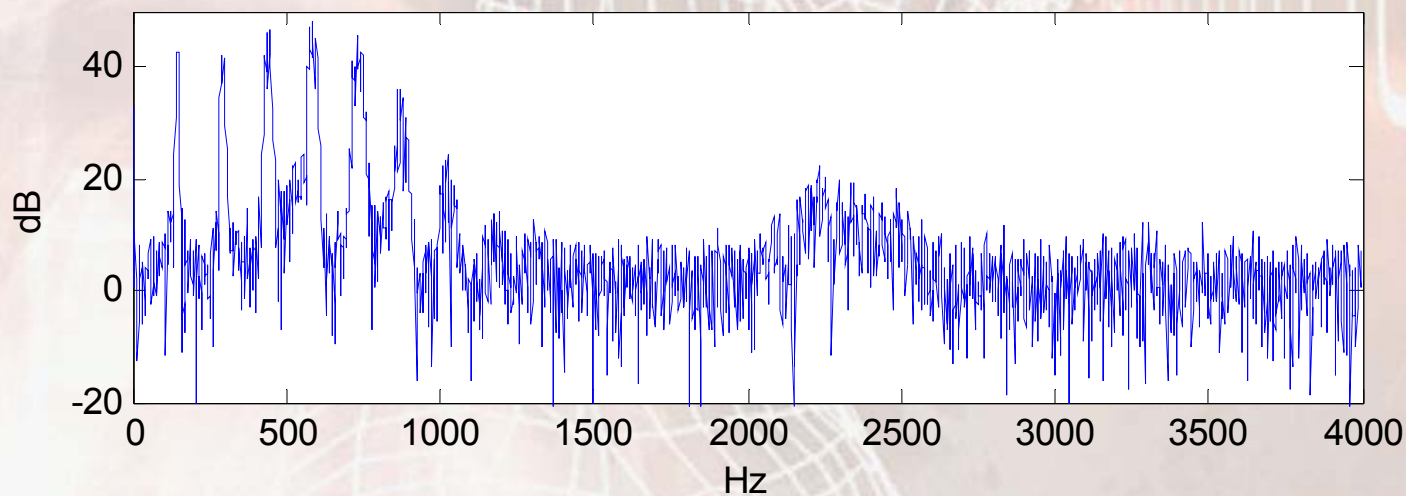
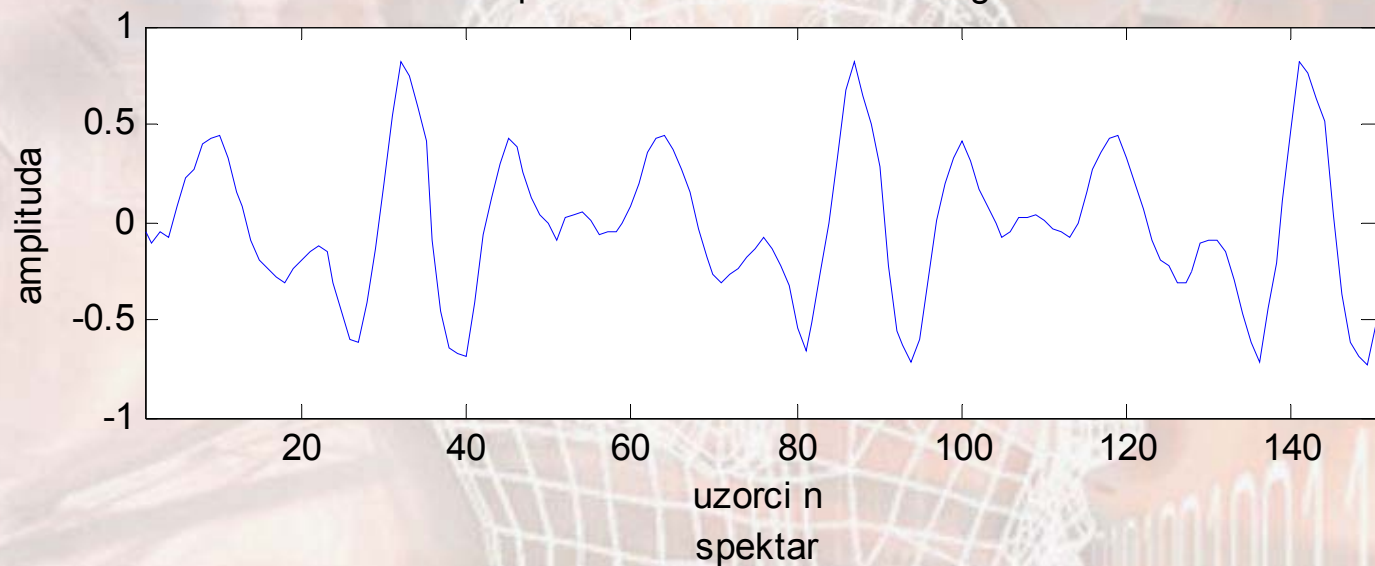
xq - Direktno kvantizirani signal





# Prediktivno kodirani signal glas "o", $p=10$ , $H(I)=3$ bit

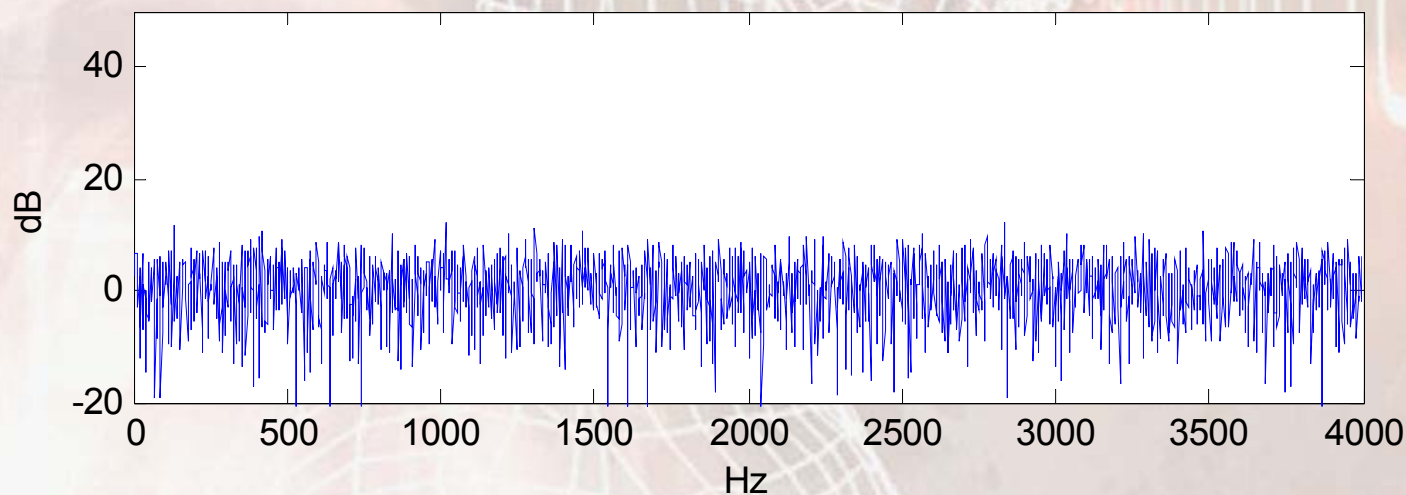
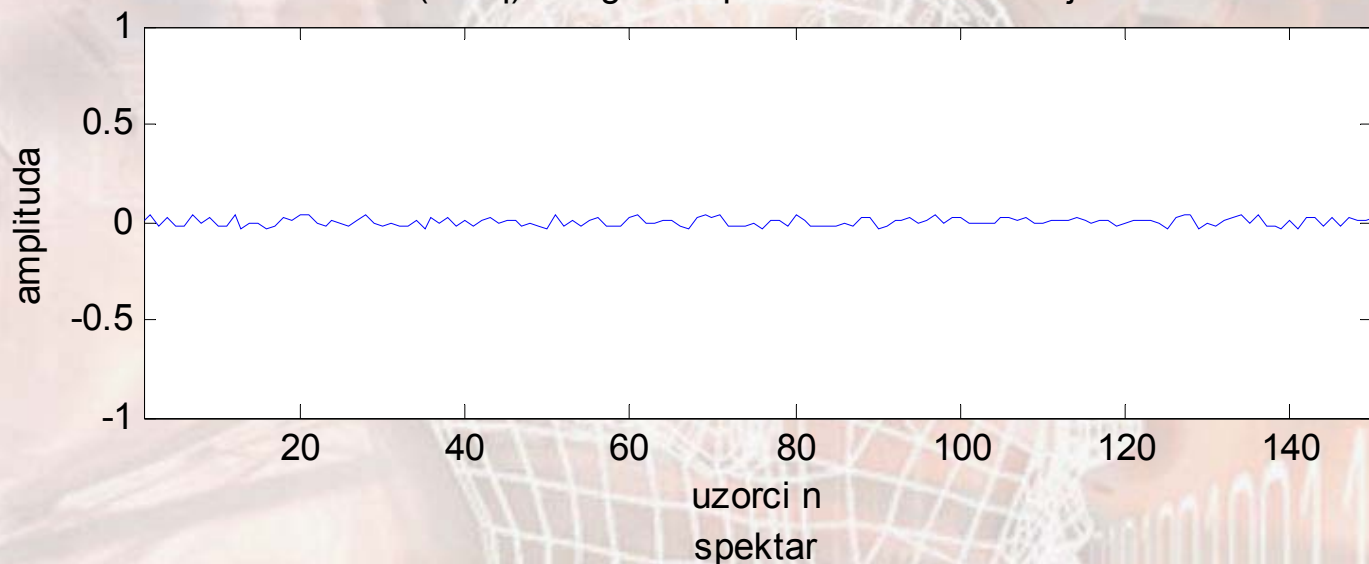
xrq - Prediktivno kvantizirani signal





# Pogreška prediktivne kvantizacije u zatv. petlji, glas "o", $p=10$ , $H(l)=3$ bit

(x-xrq) - Pogreska prediktivne kvantizacije







# Prediktivno kodiranje govora u zatvorenoj petlji ... diskusija

- Analizom blok sheme prediktivnog koda sa zatvorenom petljom, uočava se važna činjenica:
  - pogreška rekonstrukcije ( $x-xr_q$ ) identična je kvantizacijskoj pogrešci signala predikcijske pogreške ( $ec-ec_q$ ), jer se
  - identična predikcija  $x_p$  prvo odbija, a zatim nadodaje nakon kvantizacije signala  $ec$ !
- Kvantizacija signala  $ec$  je jednostavnija nego signala  $x$ , jer mu je varijanca manja!
  - dobitak predikcije je to veći što je veća redukcija varijance signala koji se kvantizira ... dokažimo to ...



# Dobitak prediktivnog kodiranja u zatvorenoj petlji

- Primjer ...

- ulazni proces  $X$  ima Gaussovu razdiobu varijance  $\sigma_x^2$ , pa ...
- korak ECSQ kvantizatora direktne kvantizacije ( $xq$ ) mora biti ...

$$\Delta_{xq} = \sqrt{2\pi e \sigma_x^2} \cdot 2^{-H(I)}$$

- Za proces predikcijske pogreške zatvorene petlje  $EC$  također pretpostavljamo da ima Gaussovu razdiobu, ali varijance  $\sigma_{ec}^2$ , pa
- njegov ECSQ kvantizator za istu izlaznu entropiju ima korak ....

$$\Delta_{ecq} = \sqrt{2\pi e \sigma_{ec}^2} \cdot 2^{-H(I)}$$



# Dobitak prediktivnog kodiranja u zatvorenoj petlji

- Primjer ... nastavak
  - srednja kvadratna pogreška kvantizacije za direktno kvantizirani proces je:

$$D_{xq} = \frac{1}{12} \Delta_{xq}^2 = \frac{\pi e \sigma_x^2}{6} \cdot 2^{-2H(I)}$$

- a srednja kvadratna pogreška prediktivno kodiranog procesa ( $x$ - $x_{rq}$ ),  $D_{xrq}$ , identična je kvadratnoj pogrešci kvantizacije signala predikcijske pogreške  $D_{ecq}$ :

$$D_{xrq} = D_{ecq} = \frac{1}{12} \Delta_{ecq}^2 = \frac{\pi e \sigma_{ec}^2}{6} \cdot 2^{-2H(I)}$$





# Dobitak prediktivnog kodiranja u zatvorenoj petlji

- Primjer ... nastavak
  - uvrštavanjem ovih distorzija u izraze za odnos signala i kvantizacijske pogreške  $SQNR$  slijedi:

$$\begin{aligned} SQNR_{xrq} - SQNR_{xq} &= 10 \cdot \log_{10} \frac{\sigma_x^2}{D_{xrq}} - 10 \cdot \log_{10} \frac{\sigma_x^2}{D_{xq}} \\ &= 10 \cdot \log_{10} \frac{D_{xq}}{D_{xrq}} = 10 \cdot \log_{10} \frac{\sigma_x^2}{\sigma_{ec}^2} \end{aligned}$$

- Dobivena razlika  $SQNR$  odnosa prediktivne i direktne kvantizacije naziva se predikcijskim dobitkom kodera (engl. ***prediction gain***) i izražava u [dB].



# Dobitak prediktivnog kodiranja u zatvorenoj petlji

- Predikcijski dobitak:

$$PG = 10 \cdot \log_{10} \frac{\sigma_x^2}{\sigma_{ec}^2} \quad [dB]$$

- Izraz pokazuje da je odabir prediktora koji minimizira varijancu predikcijske pogreške sukladan sa maksimizacijom predikcijskog dobitka kodiranja!
- Nažalost, uoči da u izrazu figurira pogreška predikcije zatvorene petlje, koja se ne može odrediti bez prediktora i kvantizatora, jer ...
- da bi našli prediktor moramo imati kvantizator, a da bi projektirali kvantizator moramo imati prediktor.



# Dobitak prediktivnog kodiranja u zatvorenoj petlji

- Određivanje prediktora ...
  - Da bi se prekinuo ovaj začarani krug, prediktor se prvo izračunava uz pretpostavku idealnog kvantizatora ( $ecq=ec$ ).
  - To odgovara prediktoru otvorene petlje, jer u slučaju idealne kvantizacije ulaz u prediktor jednak uzorcima ulaznog signala ( $xrq=x$ ).
  - Stoga, prediktor se optimira da minimizira varijancu predikcijske pogreške otvorene petlje  $\sigma_e^2$ .





# Dobitak prediktivnog kodiranja u zatvorenoj petlji

- Određivanje prediktora ... nastavak
  - Može se definirati i pripadni idealni predikcijski dobitak koji se ostvaruje uz beskonačnu entropiju  $H(I)=\infty$

$$PG_{\infty} = 10 \cdot \log_{10} \frac{\sigma_x^2}{\sigma_e^2} \quad [dB]$$

- On se ponekad naziva i predikcijskim dobitkom otvorene petlje (engl. ***open-loop prediction gain***)
  - Predikcijski dobitak zatvorene petlje  $PG$ , težiti će ovoj vrijednosti  $PG_{\infty}$  s povećanjem entropije.



# Prediktivno kodiranje govora u zatvorenoj petlji ... diskusija

- Rezultati za primjer glasa “o” sa prediktivnim kodiranjem u zatvorenoj petlji sa  $p=10$  i  $H(I)=3$ :

Stvarne izlazne entropije:  $H(I_X)=3.001$   $H(I_E)=3.000$

Stvarni izlazni SNR:  $SNR(X)=16.609$  dB  $SNR(E)=16.467$  dB

Stvarni izlazni SNR nakon rekonstrukcije:  $SNR(X_r)=24.539$  dB

Predikcijski dobitak:  $PG_{otv} = 19.305$  dB i  $PG_{zatv} = 8.072$  dB

Povećanje kvalitete:  $SNR(X_r)-SNR(X)=7.930$  dB

- Uočiti poklapanje očekivanog predikcijskog dobitka zatvorene petlje ( $PG_{zatv}$ ) i stvarnog povećanja kvalitete  $SNR(X_r)-SNR(X)$ .



# Prediktivno kodiranje govora u zatvorenoj petlji ... diskusija

- Promotrimo i spektralna svojstva pogreške prediktivne kvantizacije u zatvorenoj petlji:
  - u ovom slučaju kvantizacijska pogreška je spektralno neobojena, tj. ima karakter bijelog šuma, jednako kao i pogreška direktno kvantiziranog signala.
- Dakle za razliku od prediktivnog kodiranja u otvorenoj petlji, ovdje se **ne koristi** postupak uobličavanja spektra kvantizacijske pogreške, već se kvaliteta povećava isključivo **smanjenjem energije pogreške**.





# Primjene prediktivnog kodiranja govora u zatvorenoj petlji

- Opisani postupak prediktivnog kodiranja se koristi kod stvarnih koda govornog signala.
- Postupak je poznat i pod nazivom “Adaptivna diferencijalna pulsno kodna modulacija”, od engl. ***Adaptive Differential Pulse Code Modulation, ADPCM.***
- Koristi se u okviru ITU standarda (*International Telecommunication Union*) oznake **G.726** koji je nastao iz starijih inačica G.721 i G.723



# ADPCM – G.726

- Najviše se koristi se u digitalnoj žičnoj telefoniji u USA, kućnim digitalnim telefonskim centralama, a također i u DECT telefonima.
- Podržava brzine prijenosa govora od:
  - 16, 24, 32 i 40 kbit/s
- Najčešće korištena brzina je 32kbit/s kojom se ostvaruje dvostruka ušteda u odnosu na **G.711** standard koji provodi kvantizaciju bez predikcije.
- Standard ne predviđa korištenje entropijskog koda, već se indeks kvantizatora kodira kodom fiksne duljine.





# Što smo naučili

- pogreška rekonstrukcije i njen odnos prema kvantizacijskoj pogrešci predikcijske pogreške
- dobitak prediktivnog kodiranja u zatvorenoj petlji
- određivanje prediktora
- dobitak otvorene petlje
- spektralna svojstva pogreške rekonstrukcije
- Adaptivna diferencijalna pulsno kodna modulacija
- ADPCM – G726





# Primjer prediktivnog kodiranja slike u zatvorenoj petlji

prof.dr.sc. Davor Petrinović



# Prediktivno kodiranje slike

- Isti principi mogu se primijeniti na kodiranje slike:
  - umjesto vremenskih korelacija uzoraka, kod slike postoje prostorne korelacije susjednih elemenata slike, tj. pixela;
  - vrlo često slike imaju homogene dijelove, unutar kojih su susjedni pixeli vrlo slični (iste ili slične boje i istih ili sličnih intenziteta);
  - logično je pretpostaviti da se svaki pixel može uspješno predvidjeti kao linearna kombinacija svojih prostornih susjeda!



# Prediktivno kodiranje slike – problem kauzalnosti

- Predikcija se mora provoditi iz dijela slike koji postoji na obje strane (koderu i dekoderu) i to iz “prethodnih” uzoraka.
- Što su prethodni uzorci ?
  - kod slike ne postoji nikakav vremenski slijed
- Moguće je dvodimenzionalni signal slike zamisliti kao da je jednodimenzionalan ...
  - uvođenjem operacije slijednog čitanja elemenata slike.





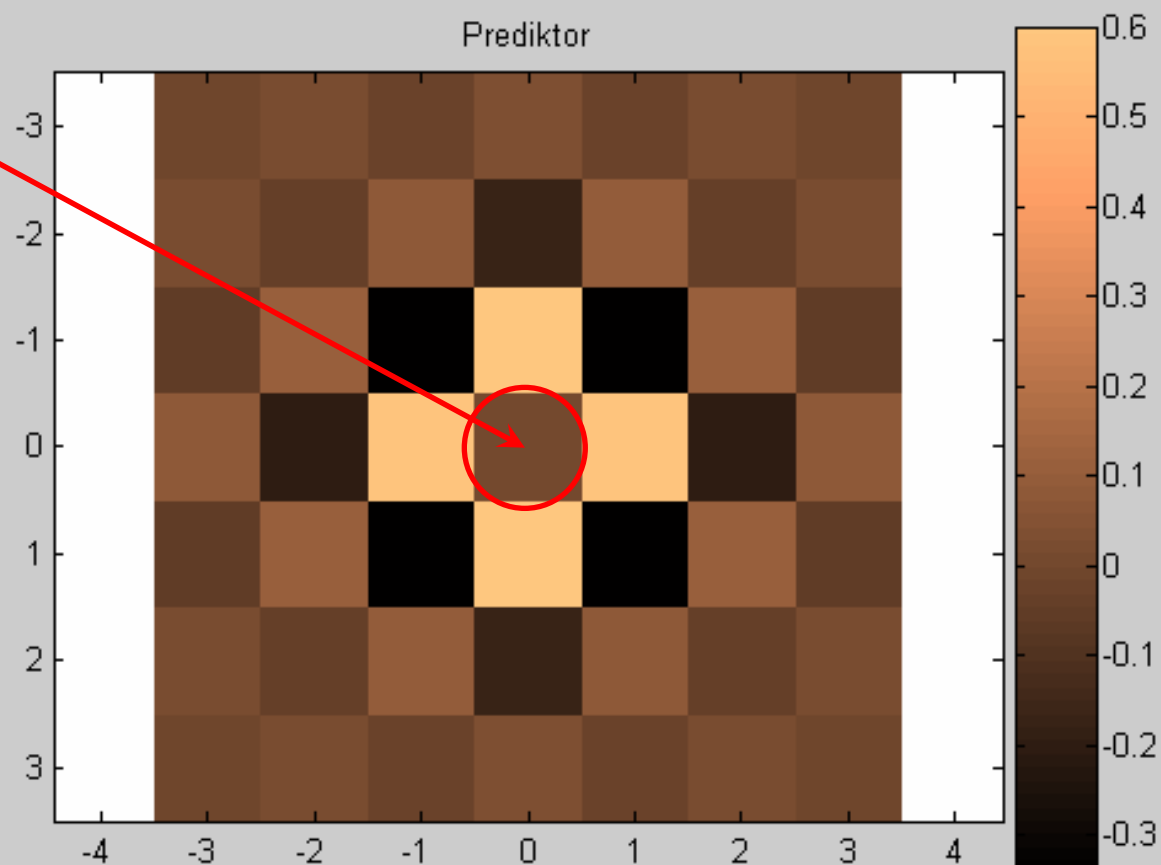
# Slijedno čitanje slike

- Slijed čitanja može biti bilo koji, a jedini uvjet je da “obiđe” sve pixele na slici, npr.:
  - čitanje po redcima,
  - čitanje po stupcima,
  - čitanje u obliku zmije koja se dijagonalno zig-zag širi iz jednog ugla slike prema drugom.
- Predikcija se može napraviti neovisno o načinu slijednog čitanja ...
  - dovoljno je kao izvor predikcije koristiti samo uzorke koji su ranije u slijedu čitanja ...
  - za takav prediktor kažemo da je **kauzalan**.



# Nekauzalni prostorni prediktor trećeg reda

Pixel koji  
se  
predviđa





# Kauzalni prediktor

- Za slučaj slijednog čitanja po redcima kauzalni prediktor kao izvor predikcije koristi:
  - odabrane pixele iz svih gornjih (prijašnjih redaka) u odnosu na poziciju pixela kojeg predviđamo i
  - odabrane pixele iz istog retka, koji se nalaze lijevo (prije) od pixela kojeg predviđamo.
- Odabrana regija prethodnih susjednih pixela koja se uistinu koristi za predikciju ovisi o tipu prostornih korelacija u slici.



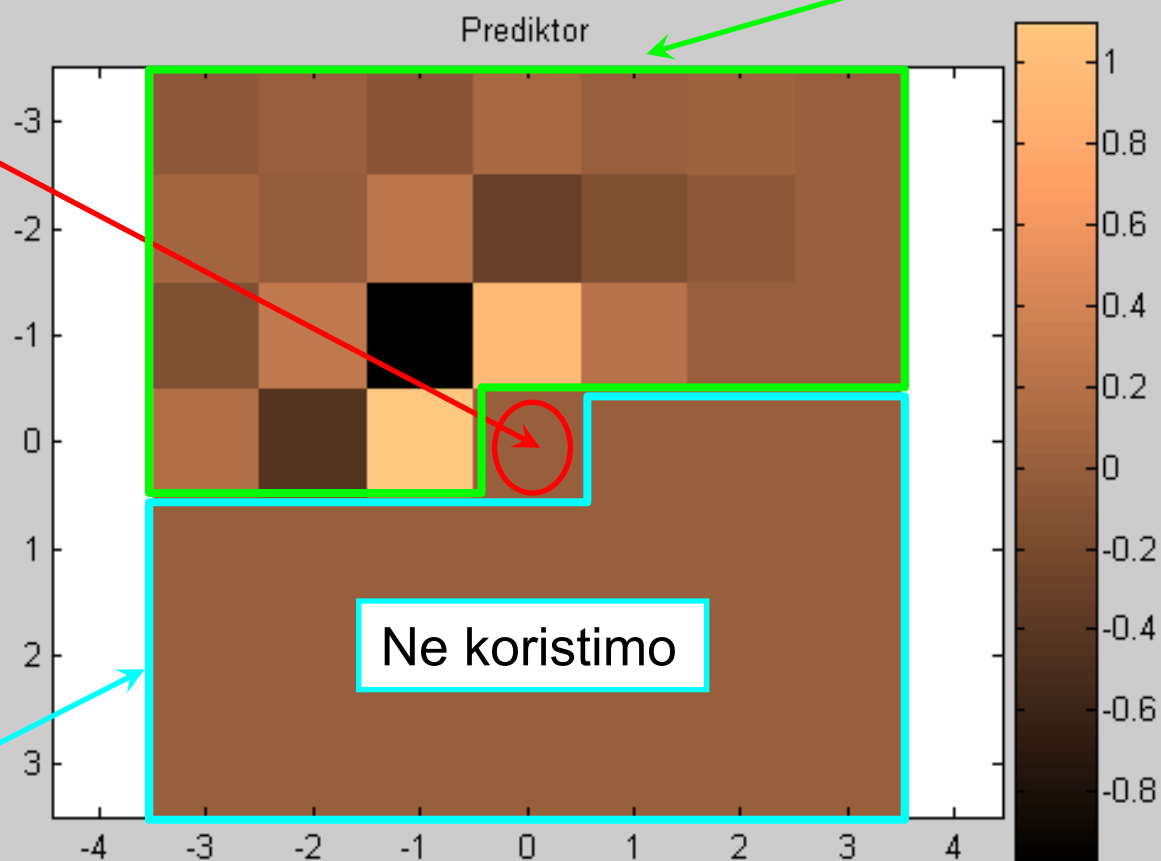


# Kauzalni prostorni prediktor trećeg reda – primjer

Dio slike koji postoji

Pixel koji se predviđa

Dio slike koji još ne postoji





# Kauzalni prediktor

- Predikcijski dobitak kauzalnog prediktora je manji nego nekauzalnog prediktora,
  - za slučaj slijednog čitanja po redcima iskorištava **samo korelacije iz jednog dijela okoline** pixela (lijevo-gore), ali
  - može se koristiti u zatvorenoj ADPCM prediktivnoj petlji!
- Koeficijenti prediktora određuju se ranije opisanim postupcima određivanja optimalnog linearnog prediktora.



# Prediktivno kodiranje slike - primjer

- Program za simulaciju prediktivnog kodiranja slike:
  - **MT04\_ADPCM\_slika.m**
  - vrlo je sličan programu za kodiranje govora,
  - kodiranje provodi na slici u nijansama sive boje
  - moguće odabrati ulaznu sliku, red prediktora i željenu izlaznu entropiju
  - optimalni linearni prediktor se određuje funkcijom: **MT04\_impred.m** na osnovu učitane slike i njenih korelacijskih svojstava





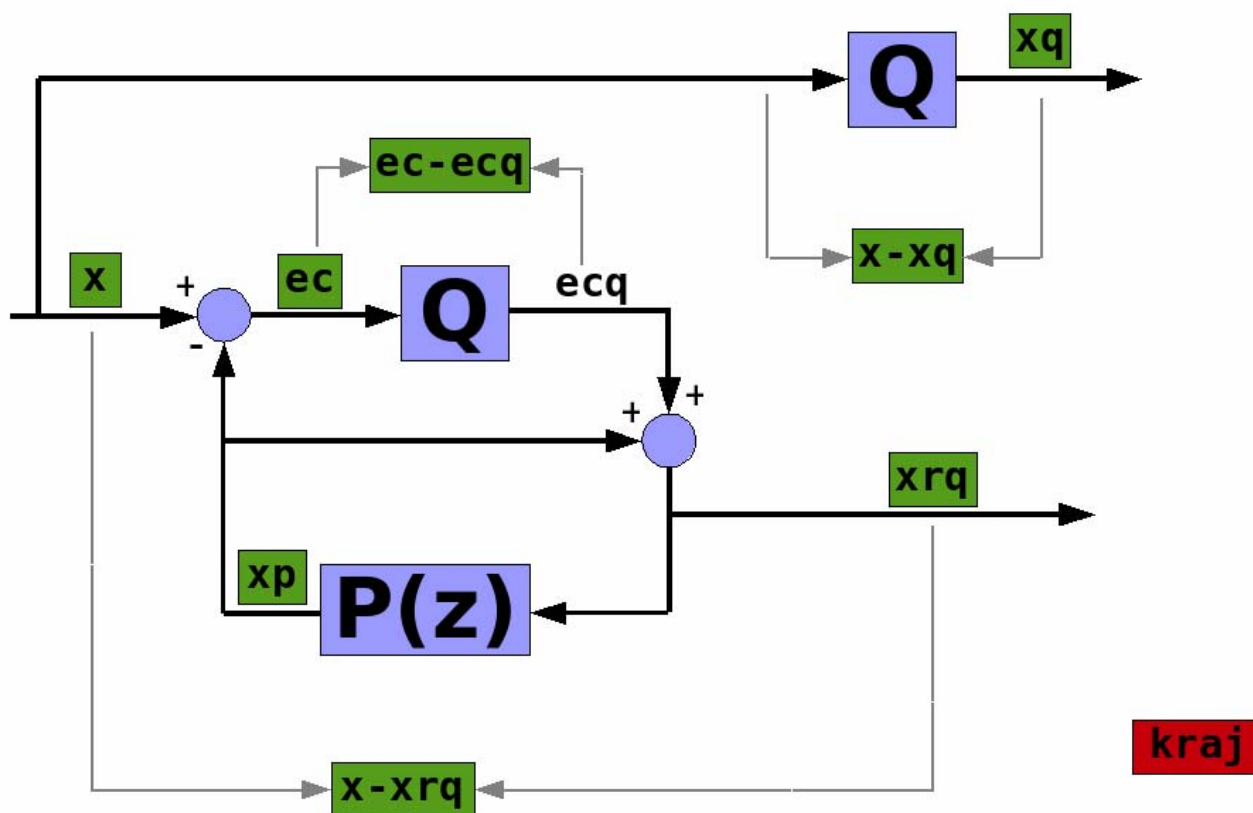
# Prediktivno kodiranje slike - primjer

- Prediktivno kodirana slika korištenjem ADPCM strukture uspoređuje se sa postupkom direktne kvantizacije uz istu izlaznu entropiju.
- Kvantizatori su ECSQ tipa za oba koder, a koraci kvantizacije se prilagođavaju ostvarenju željene izlazne entropije.
- Izlazna kvaliteta se određuje izračunavanjem *SQNR* odnosa u karakterističnim točkama koder.
- Program prikazuje slike u svim točkama strukture, kao i pripadne kvantizacijske pogreške, također prikazane u obliku slika korištenjem nijansa sivog.



# ADPCM struktura za kodiranje slike – jednaka kao i za slučaj govora!

## Adaptivna diferencijalna pulsno kodna modulacija





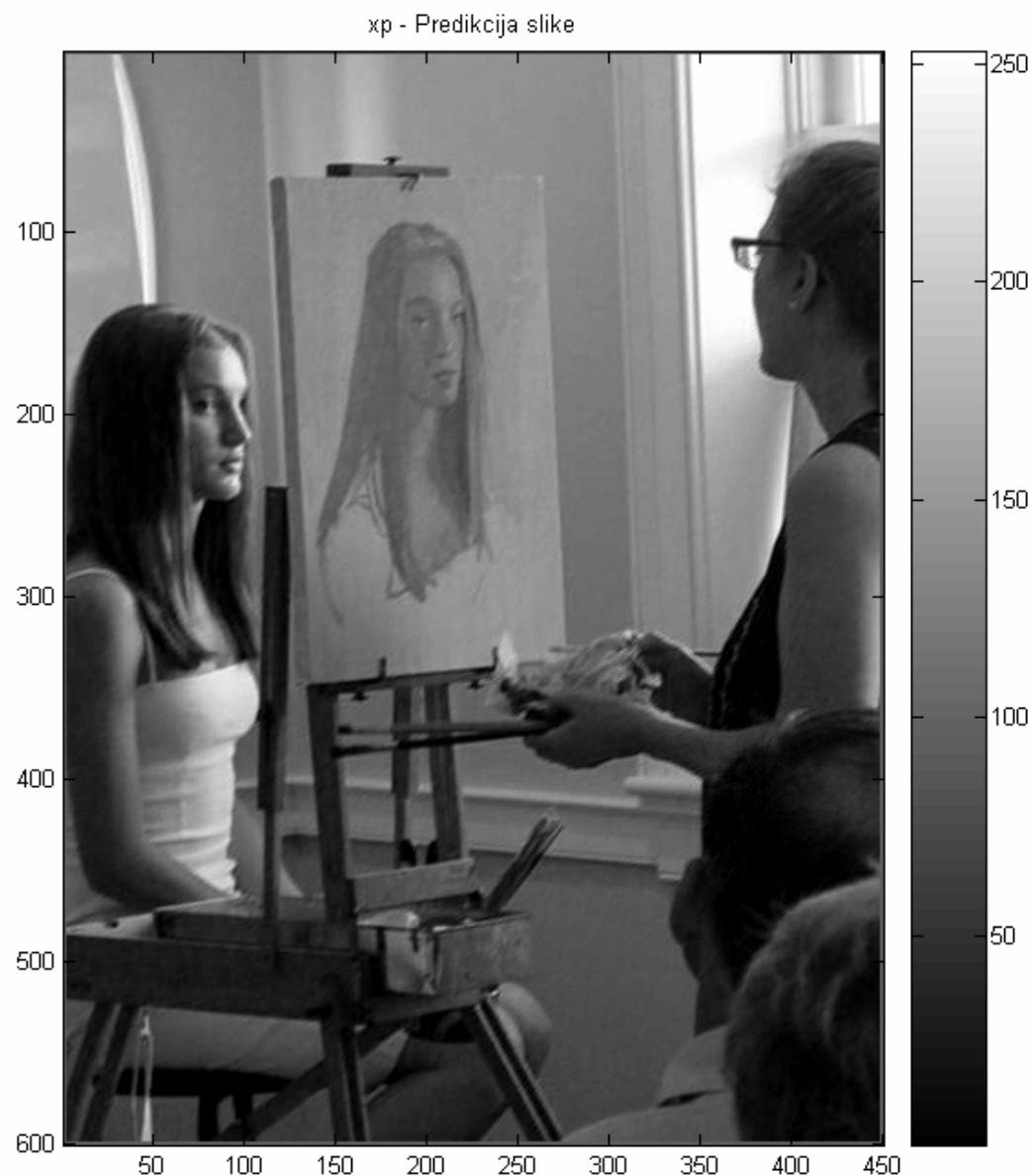
- Ulazna slika  
– “demo1”





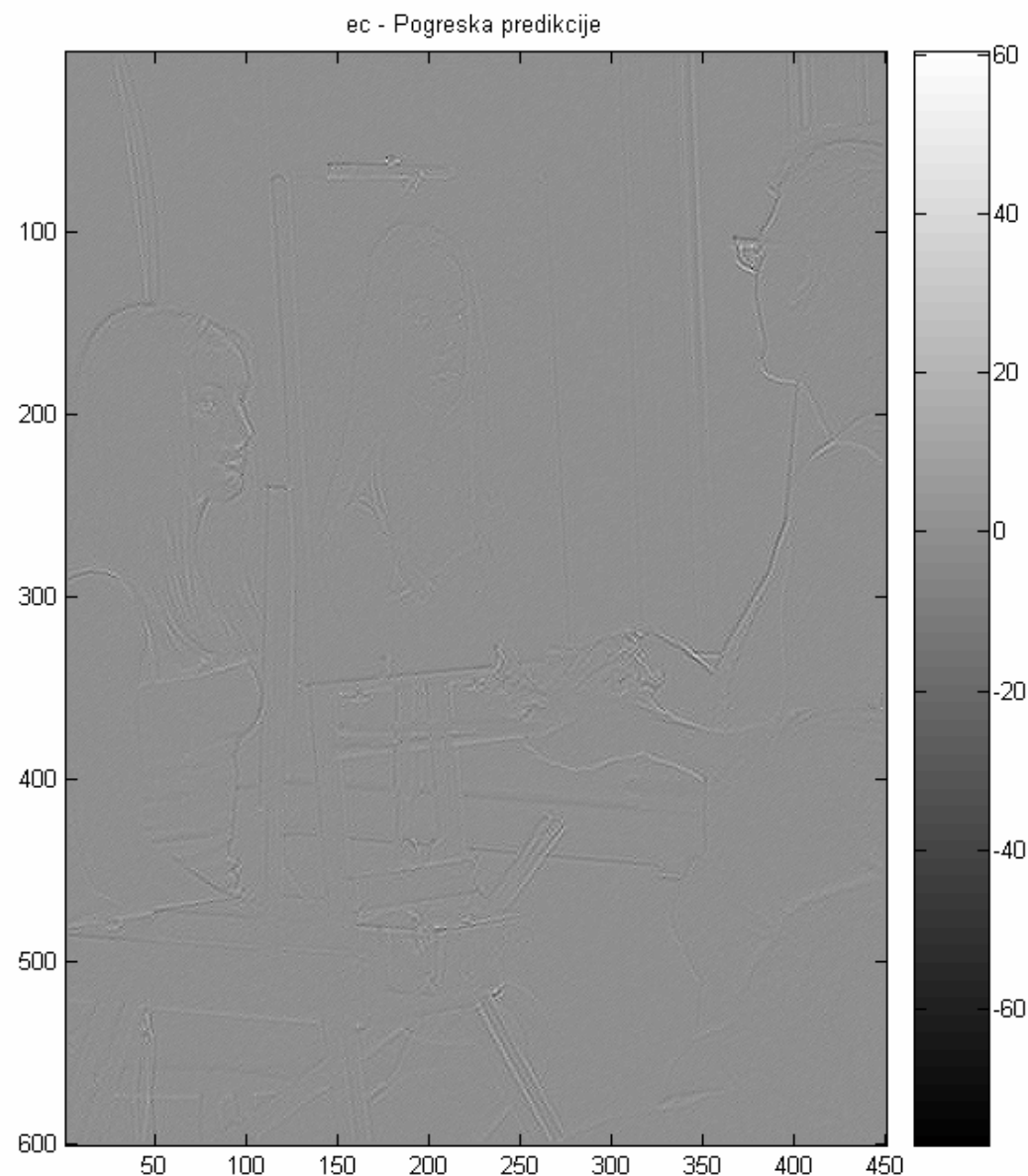


- Predikcija na obje strane (zatv. petlja)  
 $p=2$





- Pogreška predikcije u zatv. petlji  $p=2$
- Uoči rubove koji nisu mogli biti predviđeni prediktorom!

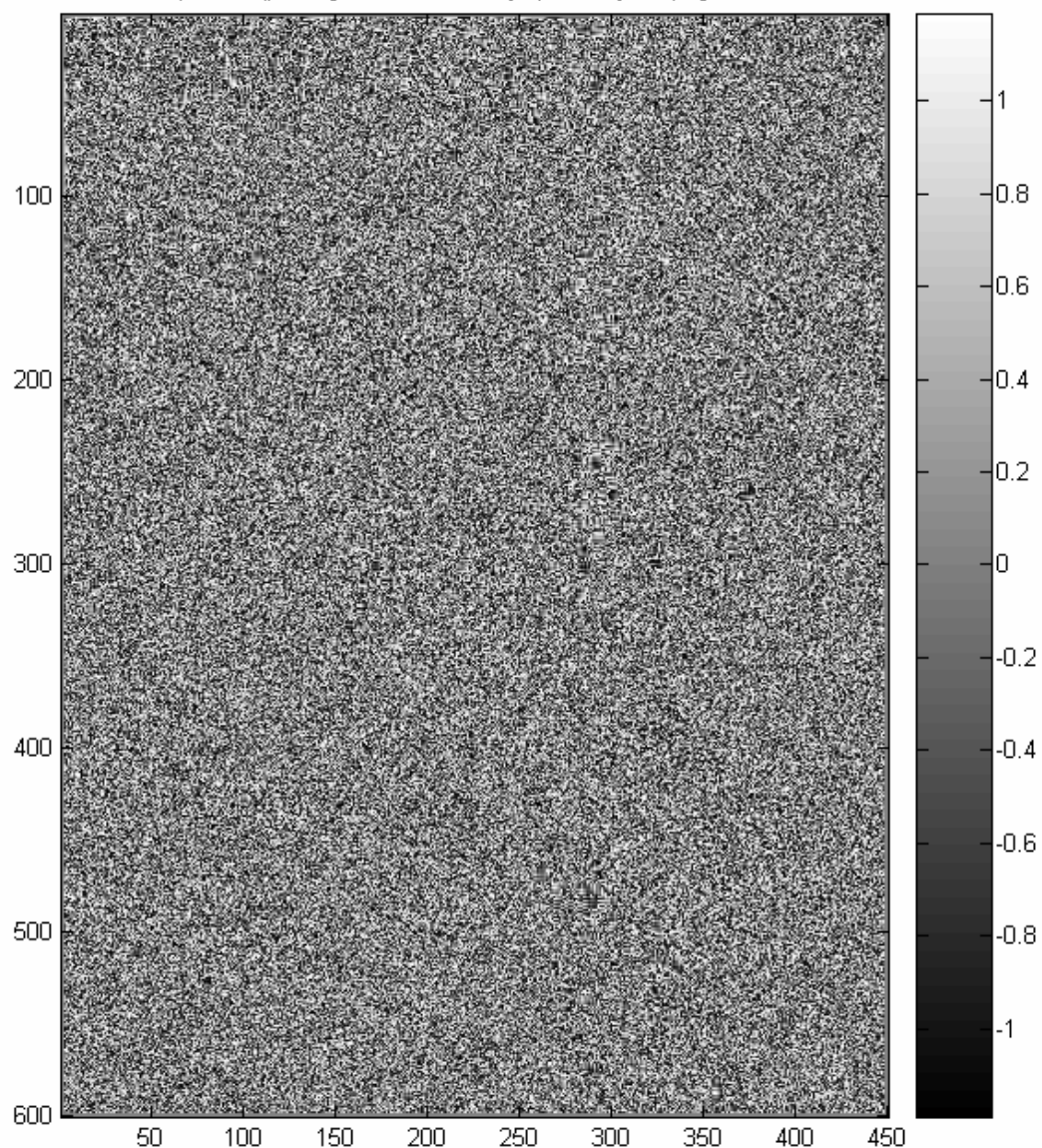






- Pogreška kvantizacije predikcijske pogreške,  $p=2$ ,  $H(l)=2$  bit

(ec - ecq) - Pogreška kvantizacije predikcijske pogreške

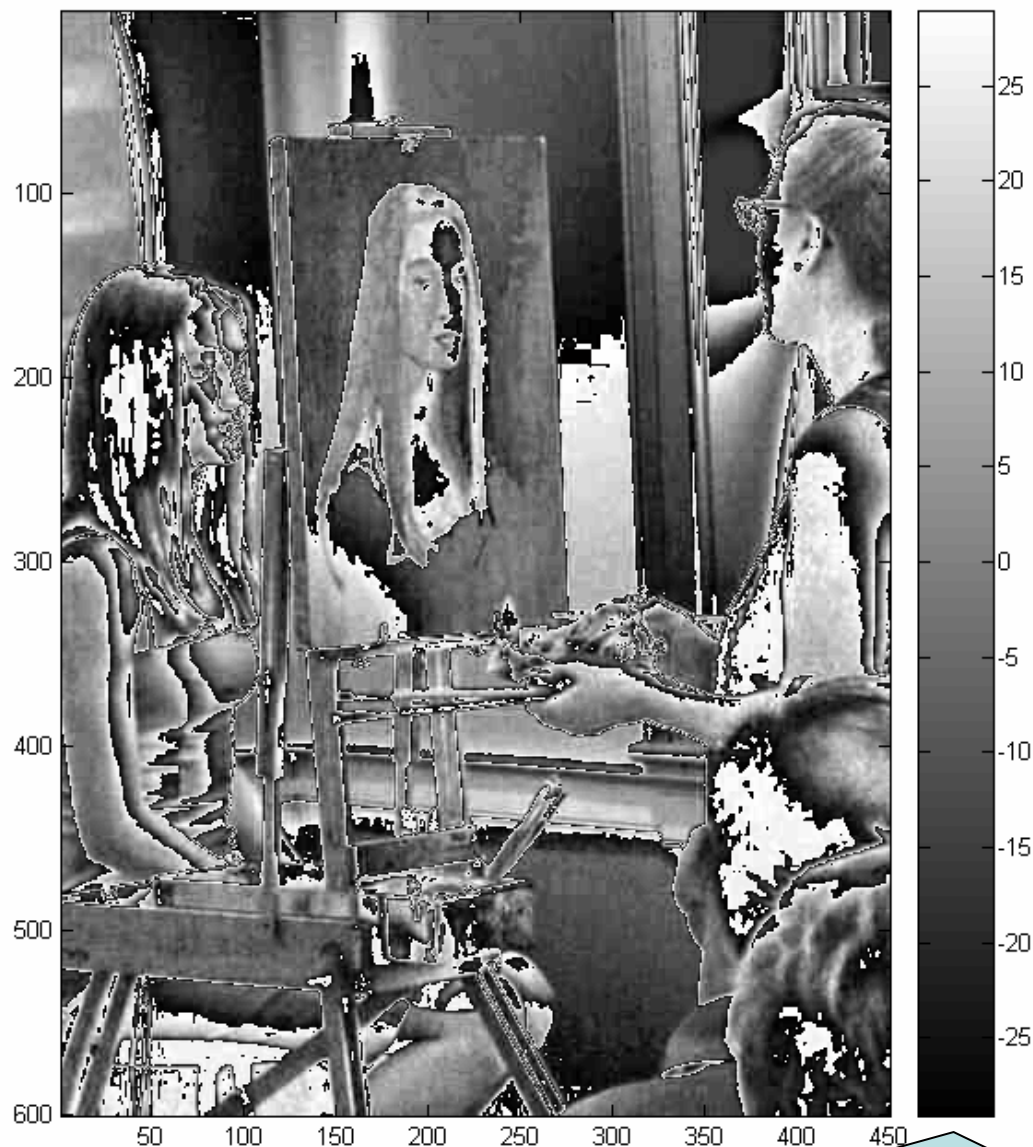






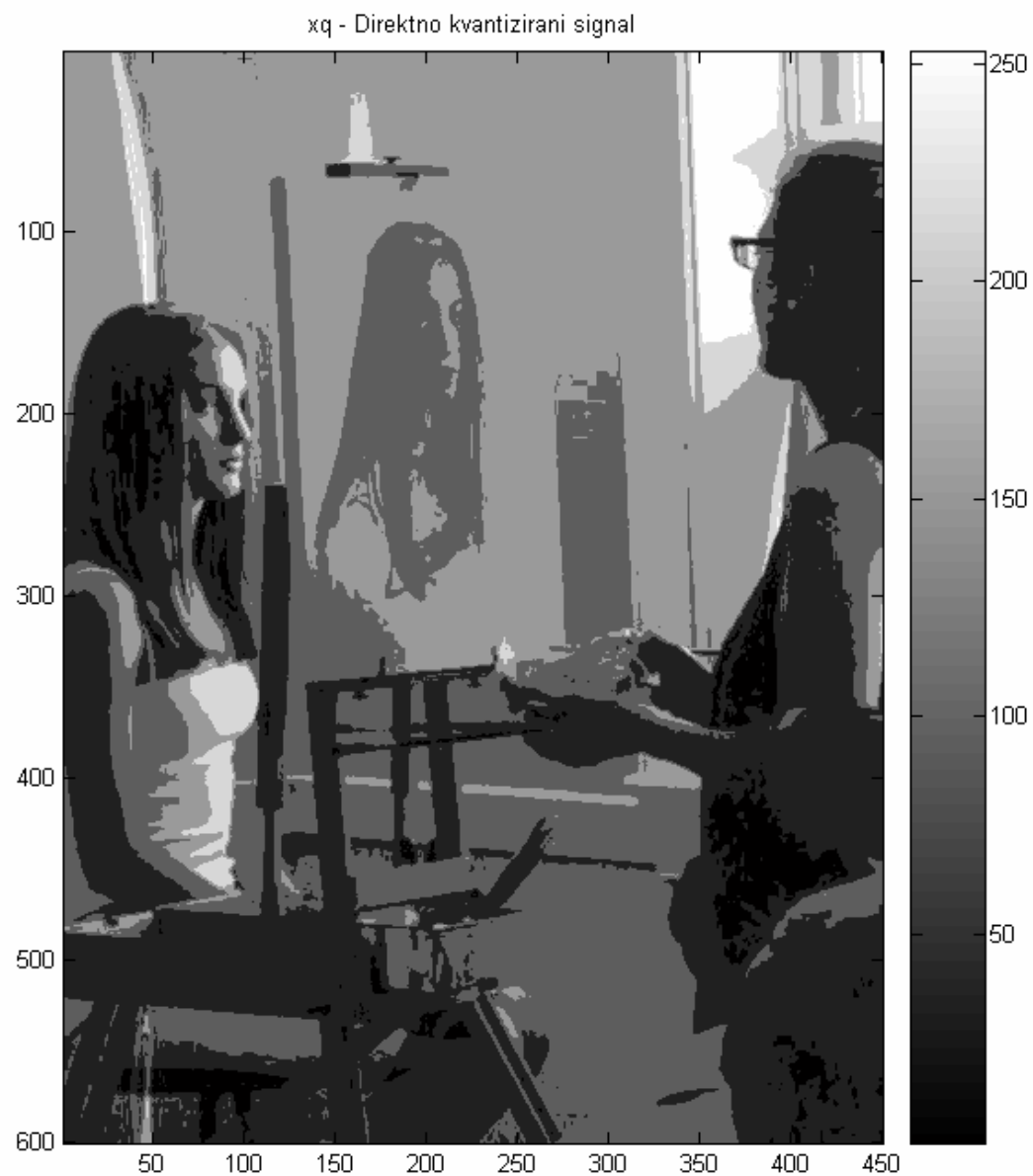
- Pogreška direktne kvantizacije slike, uz  $H(I)=2$  bit
- Pogreška je unutar +/- 30 LSB-a od 8-bitne vrijednosti

(x-xq) - Pogreška direktne kvantizacije





- Direktno kvantizirana slika uz  $H(I)=2$  bit





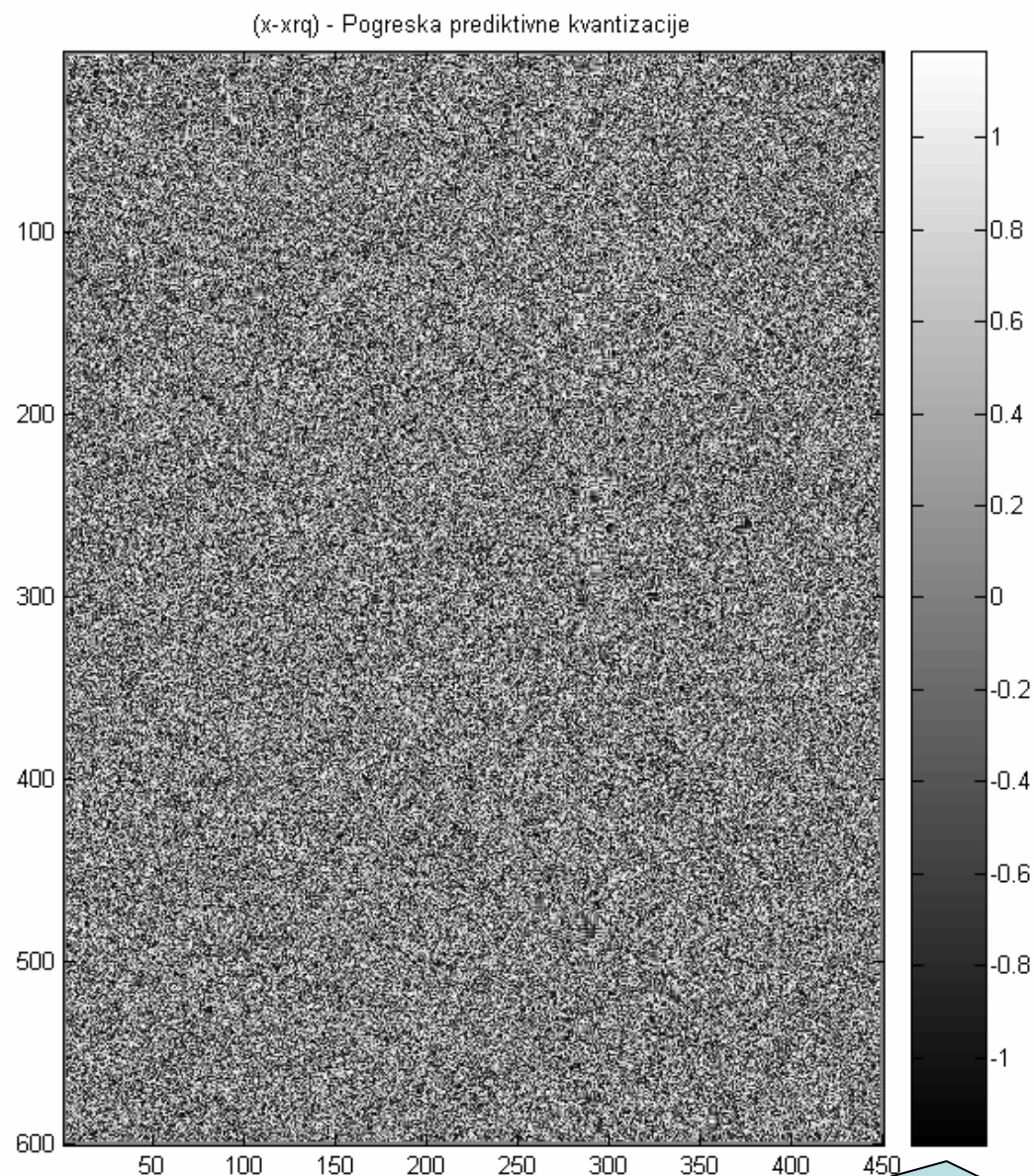
- Prediktivno kodirana slika  
 $p=2$ ,  $H(l)=2$  bit







- Pogreška prediktivne kvantizacije u zatv. petlji,  $p=2$ ,  $H(l)=2$  bit
- Pogreška je unutar  $\pm 1$  LSB 8-bitne vrijednosti





# Prediktivno kodiranje slike u zatvorenoj petlji ... diskusija

- Rezultati za primjer “demo1.jpg” sa prediktivnim kodiranjem u zatvorenoj petlji sa  $p=2$  i  $H(I)=2$ :

Stvarne izlazne entropije:  $H(I_X)=2.014$   $H(I_E)=2.028$   
Stvarni izlazni SNR:  $SNR(X)=11.040$  dB  $SNR(E)=11.837$  dB  
Stvarni izlazni SNR nakon rekonstrukcije:  $SNR(X_r)=38.601$  dB  
Predikcijski dobitak:  $PG_{otv} = 27.750$  dB i  $PG_{zativ} = 26.764$  dB  
Povećanje kvalitete:  $SNR(X_r)-SNR(X)=27.562$  dB

- Uoči poklapanje očekivanog predikcijskog dobitka zatvorene petlje ( $PG_{zativ}$ ) i stvarnog povećanja kvalitete  $SNR(X_r)-SNR(X)$ .
- Dobitak je čak 27.5dB, što odgovara uštedi od čak 4.5 bita po pixelu!





# Što smo naučili

- prostorne korelacije u slici
- pojam kauzalnosti kod slike
- operacija slijednog čitanja
- kauzalni i nekauzalni prediktor
- primjer prediktivnog kodiranja slike unutar ADPCM petlje