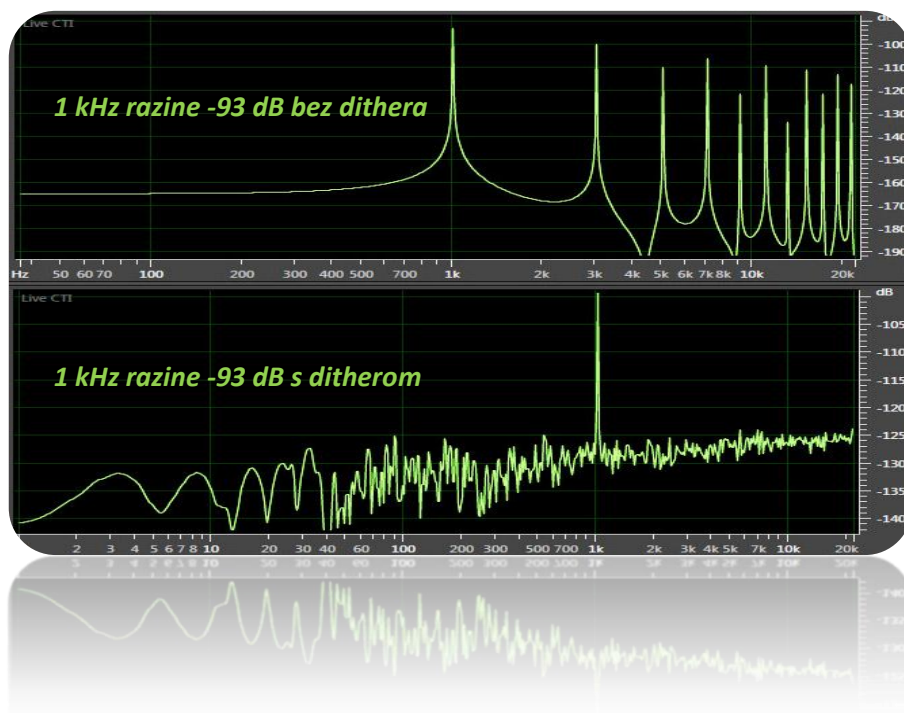


Jednostavno objašnjenje dithera s Matlab generiranim wav primjerima u Adobe Audition

Ozren Bilan

2.2.2014.



Kvantiziramo li signal bez dithera nastaju pogreške harmonički povezane s izvornim analognim signalom. To je posebno naglašeno za vrlo male amplitude analognog signala. Kako bi se pogreška minimizirala, signalu se dodaje dither, matematičkim postupkom koji eliminira harmonike izobličenja i zamjenjuje ih vrlo niskom nepromjenjivom razinom slučajnog šuma na koje ljudski sluh nije osjetljiv.

Jednostavno objašnjenje dithera s MATLAB generiranim wav primjerima u Adobe Audition

Način funkcioniranja ljudskog sluha vrlo je sličan načinu rada *Fourierove transformacije* jer uho čuje individualne frekvencije. Zbog toga je ljudski sluh izuzetno osjetljiv na izobličenja i frekvencijske sadržaje (poput harmonika) koji daju *timbar* zvuka, a mnogo manje je osjetljiv na slučajni šum.

Postupak digitalizacije analognog zvučnog signala, u prvom redu kvantizacija i rekvantizacija, rezultiraju pogreškama. Ako su te pogreške periodične i korelirane sa zvučnim signalom, pogreška će se periodično ponavljati što znači da se može odrediti matematički. Periodične pogreške, poput izobličenja neparnih harmonika, dovede do neželjenih pojava. Ako na neki način unesemo neodređenost u nastale pogreške sustavu će se drastično smanjiti mogućnost određivosti pogreške. Najbolji primjer je uvođenje dithera (slučajnog šuma) na području zvučnih signala.

Analognim sustavima signal je kontinuiran jer može poprimiti bilo koju vrijednost. Digitalnim sustavima amplituda signala je ograničena na skup numeričkih vrijednosti; kažemo signal je diskretan. Postupak pretvorbe kontinuirang signala u diskretni nazivamo kvantizacija.

Kvantiziramo li signal bez dithera nastaju pogreške harmonički povezane s izvornim analognim signalom. To je posebno naglašeno za vrlo male amplitude analognog signala. Kako bi se pogreška minimizirala, signalu se dodaje dither, matematičkim postupkom koji eliminira harmonike izobličenja i zamjenjuje ih konstantnom nepromjenjivom razinom šuma. Konačni rezultat postupka i dalje daje izobličenje i šum, međutim izobličenje je potpuno slučajno, dakle matematički nepredvidivo i potpuno je dekorelirano od analognog signala. Osim pri analogno digitalnoj pretvorbi, dither se dodaje i u situacijama pri rekvantiziranju na manji broj bita.

Dither šum predstavljen je slučajnim brojevima koji se pri pretvorbi u analogni signal pretvaraju u šum. Amplituda im je oko 1 LSB najmanje značajnog bita, dakle oko 96 dB ispod pune skale signala. Primjenom dithera, *reverberacijsko slabljenje signala* može se zabilježiti do razine od oko -115 dB sa 16-bitnim riječima. Iako 16 bitne riječi teoretski omogućavaju 96 dB dinamičkog područja, sa ditherom je moguće realizirati oko 115 dB jer se signal može zabilježiti ispod razine šuma sustava.

SIGNAL BEZ DITHERA

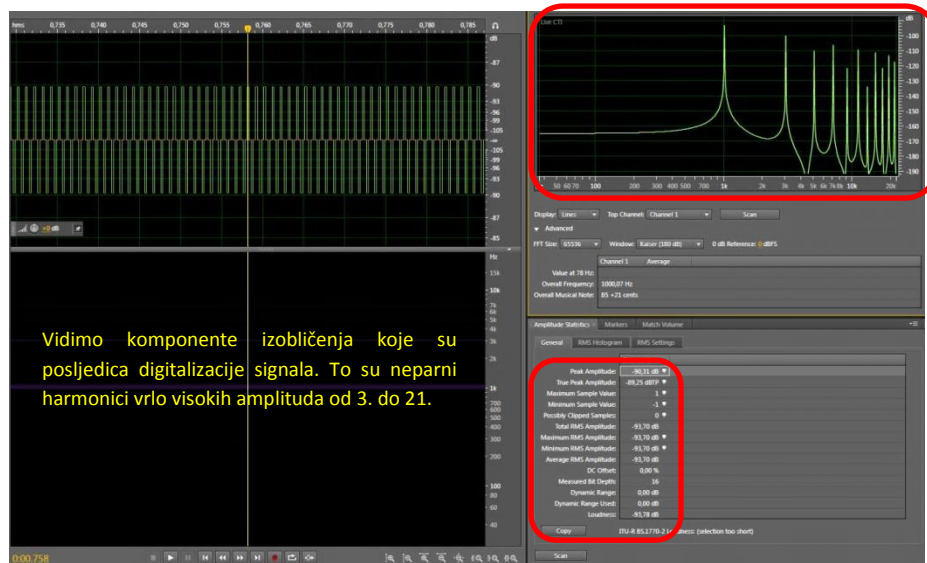
Sve opisano ćemo najjednostavnijim Matlab kodom prikazati u stvarnosti, a dobivene rezultate i datoteke moguće je prebaciti s ovog sitea u računalo. Postignute rezultate možemo čuti i vidjeti.

Pri frekvenciji sempliranja od 48 kHz, generirat ćemo signal frekvencije 1 kHz, približne razine -93dB. Grafički ćemo prikazati signal, reproducirat ćemo ga *bitperfect* preko Matlab-a s ASIO driverom i asinkronog DAC-a na sustav reprodukcije zvuka. Nakon toga zapisat ćemo ga u wav datoteku rezolucije 16 bita i frekvencije sempliranja 48kHz. Matlab kod koji izvodi opisani postupak je slijedeći:

```
% program koji generira signal f=1kHz, fs=48000Hz, rezolucije 16 bita, razine -93dB
% pa zapisuje signal u wav datoteku
% autor O. Bilan
fs=48000;
tn=0:1/fs:1; % trajanje
f1=1000; % frekvencije signala
% generiramo signal
y=.999* [.00002*sin(f1*2*pi*tn)]; % 20*log 0.0002=-93dB
% grafički prikazujemo i reproduciramo signal, a nakon reprodukcije pohranjujemo ga u kvaliteti 16 bita 48 kHz
plot(y); grid;
soundsc(y,fs); % reprodukcijom preko Matlab-a čujemo signal jer razina jednaka maksimalnoj vrijednosti
pause % čekamo završetak reprodukcije, pa zapisujemo wav datoteku na disk
wavwrite(y, 48000, 16, 'C:\Users\Ozren\Documents\MATLAB\test_16_48_minus93dB_1kHz bez dithera.wav');
```

Iako se analiza spektra pomoću FFT može napraviti u Matlabu, kako bi osjetili stvarni rezultat kojeg će imati krajnji korisnik datoteke, učitat ćemo datoteku **test_16_48_minus93dB_1kHz bez dithera.wav** u *Adobe Audition*.

Vidjet ćemo stvarni signal u frekvijskom i vremenskom području. Reprodukcijska datoteka preko *Adobe Audition* ili drugog playera; npr. *Foobara*, neće dati čujni zvuk jer je razina korisnog signala -93dB.

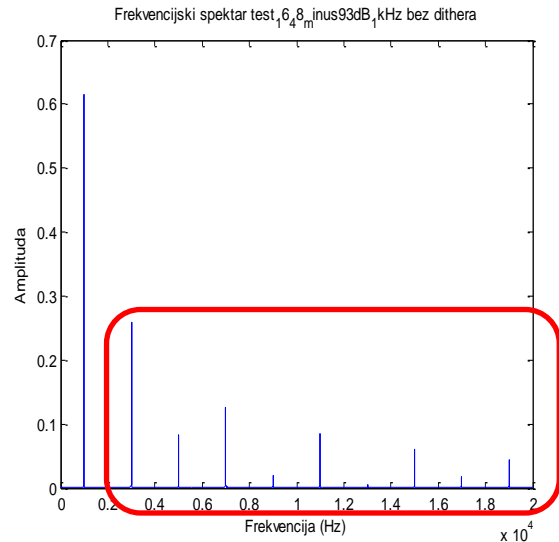
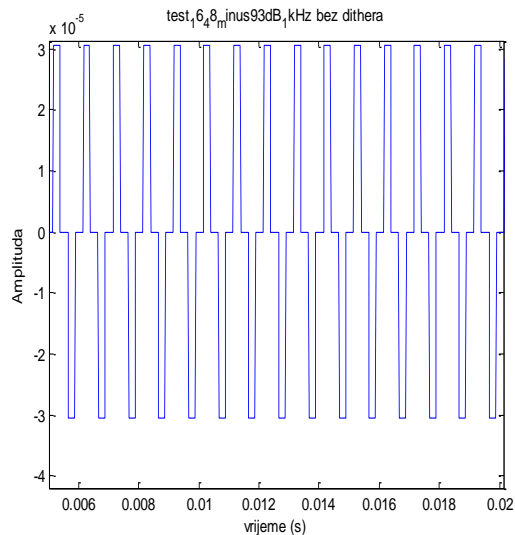


Postupak digitalizacije signala uosi posljedice. Iz spektra vidimo generiranje velikog broja neparnih harmonika vrlo visoke razine u odnosu na korisni signal. Budući da se za razinu od -93dB koristi samo jedan bit dobiveni valni oblik skoro je kvadratnog oblika.

Prikazat ćemo isti postupak u Matlabu:

```
% Fourierova transformacija zvučne datoteke
% autor O. Bilan

% učitaj datoteku
file = 'test_16_48_minus93dB_1kHz bez dithera';
[y,Fs,bits] = wavread(file);
Nsamps = length(y);
t = (1/Fs)*(1:Nsamps) % pripremi vremenske podatke za grafički prikaz
% izvedi Fourierovu transformaciju
y_fft = abs(fft(y)); % zadrži magnitudu
y_fft = y_fft(1:Nsamps/2); % odbaci polovinu točaka
f = Fs*(0:Nsamps/2-1)/Nsamps; % pripremi frekvijske podatke za prikaz
% nacrtaj zvučnu datoteku u vremenskom području
figure
plot(t, y)
xlabel('vrijeme (s)')
ylabel('Amplituda')
title('test_16_48_minus93dB_1kHz bez dithera')
% nacrtaj zvučnu datoteku u frekvijskom području
figure
plot(f, y_fft)
xlim([0 20000])
xlabel('Frekvencija (Hz)')
ylabel('Amplituda')
title('Frekvijski spektar test_16_48_minus93dB_1kHz bez dithera')
```



SIGNALU DODAJEMO DITHER

Ponovit ćemo prethodni postupak ali ćemo signalu dodati najjednostavniji dither – neoblikovani slučajni šum. Matlab kod:

```
% program koji generira signal f=1kHz, fs=48000Hz, rezolucije 16 bita, razine -93dB
% i dodaje slučajni dither razine -96dB, pa zapisuje signal u wav datoteku
% autor O. Bilan

fs=48000;
tn=0:1/fs:1; % trajanje
f1=1000; % frekvencije signala
% generiramo signal
y=.999* [.00002*sin(f1*2*pi*tn)]; % 20*log 0.0002=-93dB
% generiramo vektor najjednostavnijeg neoblikovanog slučajnog dither šuma iste dužine kao i signal
n = randn(size(y));
% dodajemo ga signalu u iznosu 20 log 0.000015=-96.478 dB
y=.999* [.00002*sin(f1*2*pi*tn)] + 0.000015*n ;
% grafički prikazujemo i reproduciramo signal
plot(y); grid;
soundsc(y,fs); % reprodukcijom preko Matlaba čujemo signal
pause % čekamo završetak reprodukcije, pa zapisujemo wav datoteku na disk
% nakon reprodukcije pohranjujemo ga u kvaliteti 16 bita 48 kHz
wavwrite(y, 48000, 16, 'C:\Users\Ozren\Documents\MATLAB\test_16_48_minus93dB_1kHz i dither.wav');
```

Datoteke:

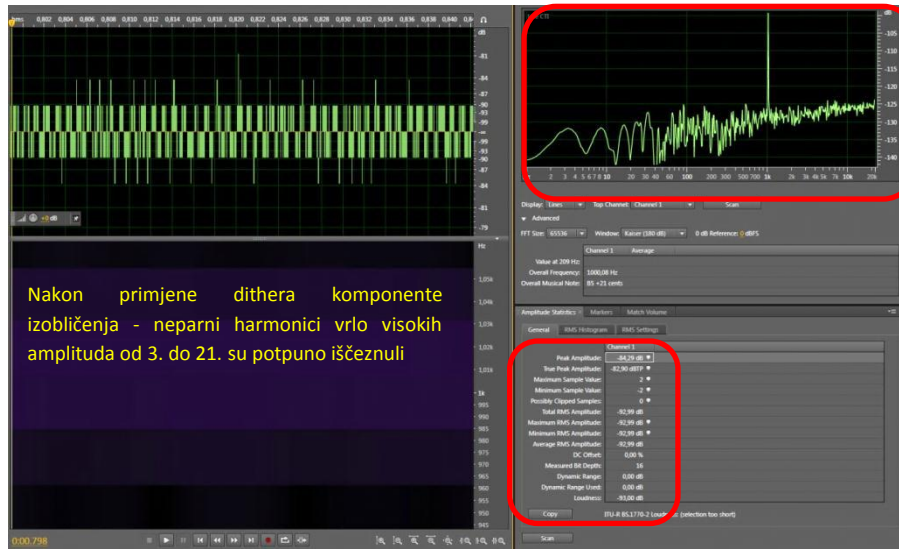


test_16_48_minus93dB_1kHz bez dithera.wav 94KB u zip obliku **bezdithera.zip**

test_16_48_minus93dB_1kHz i dither.wav 94KB u zip obliku **dither.zip**

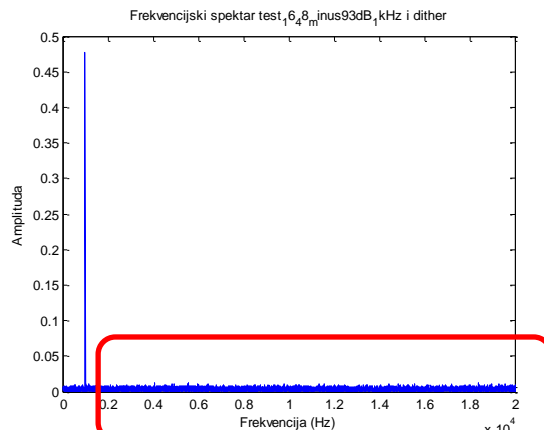
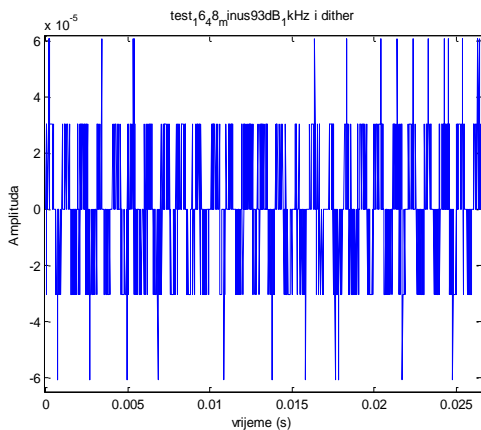
možete prebaciti u svoje računalo sa ovog siteda i sami se uvjeriti u rezultate ili ih možete sami generirati korištenjem prikazanih Matlab kodova.

Postupak digitalizacije signala unio je iste posljedice kao i u prethodnom slučaju ali pogledajmo posljedicu dithera nakon što učitamo datoteku **test_16_48_minus93dB_1kHz i dither.wav** u Adobe Audition.



Spektar signala je potpuno čist – nalikuje na analogni signal, a jedina posljedica je minimalno pogoršan odnos signal/šum. Isti postupak u Matlabu:

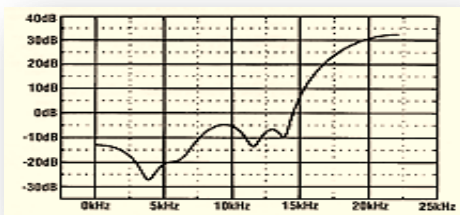
```
% Fourierova transformacija zvučne datoteke
% autor O. Bilan
% učitaj datoteku
file = 'test_16_48_minus93dB_1kHz i dither';
[y,Fs,bits] = wavread(file);
Nsamps = length(y);
t = (1/Fs)*(1:Nsamps) % pripremi vremenske podatke za grafički prikaz
% izvedi Fourierovu transformaciju
y_fft = abs(fft(y)); % zadrži magnitudu
y_fft = y_fft(1:Nsamps/2); % odbaci polovinu točaka
f = Fs*(0:Nsamps/2-1)/Nsamps; % pripremi frekvencijske podatke za prikaz
% nacrtaj zvučnu datoteku u vremenskom području
figure
plot(t, y)
xlabel('vrijeme (s)')
ylabel('Amplituda')
title('test_16_48_minus93dB_1kHz i dither')
% nacrtaj zvučnu datoteku u frekvencijskom području
figure
plot(f, y_fft)
xlim([0 20000])
xlabel('Frekvencija (Hz)')
ylabel('Amplituda')
title('Frekvencijski spektar test_16_48_minus93dB_1kHz i dither')
```



U našem pokusu generirali smo neoblikovani slučajni šum Matlab naredbom *rand*, a u profesionalnom radu koriste se slijedeći oblici *dither* šuma:

- **RPDF** *Rectangular Probability Density Function* (slično *rand*) gdje svaki broj ima jednaku vjerojatnost pojavljivanja.
- **TPDF** *Triangular Probability Density Function* vjerojatnost pojavljivanja broja jednaka je sumi dva neovisna uzorka RPDF i u profesionalnoj praksi se najčešće koristi.
- **Gaussova PDF** ekvivalentna je odnosima vjerojatnosti koji prate *Gaussovu funkciju*, a tipični su za oblike šuma analognih izvora zvučnih signala. Sami analogni izvori šuma mikrofona ili pretpojačala mogu generirati potreban dither.
- **Obojeni dither** predstavlja dither različitog oblika spektra od bijelog šuma.
- **Oblikovanje šuma** je postupak filtriranja kojim se oblikuje energija spektra greške kvantizacije kako bi se potisnule greške u području najveće osjetljivosti sluha ili se potpuno odvoja šum od signala.

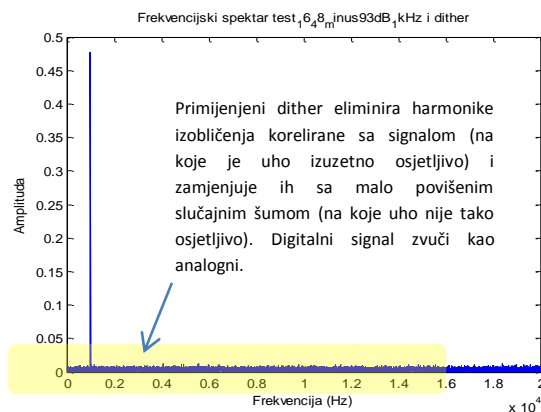
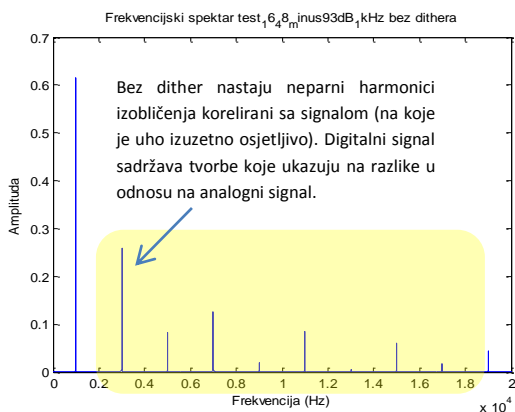
Rezultat se može dodatno poboljšati primjenom posebno oblikovanog šuma koji prati karakteristiku ljudskog sluha. Dijagram oblika jednog od najučinkovitije oblikovanog šuma prikazan je na slici:



Karakteristika filtra je izuzetno složena i zahtijeva dugotrajni proračun, a slabljenja krivulje nalaze se upravo na frekvencijama na kojima je ljudsko uho najosjetljivije. Posljedica oblika filtra je vrlo tiha tzv. *potpuno crna* pozadina signala pa i u CD rezoluciji. Na dijagramu je 0 dB otprilike -96 dBFS pune skale. Proračun se izvodi primjenom posebnih vrlo brzih DSP čipova, zahtjevnim algoritmima vrlo visoke točnosti, najčešće primjenom 72 bitne aritmetike.

ZAKLJUČAK

Uvidom u spektar signala bez dithera i sa ditherom vidimo kako su pogreške kvantiziranog signala bez dithera harmonički povezane s izvornim analognim signalom. To je posebno naglašeno za vrlo male amplitude analognog signala. Kako bi se pogreška minimizirala, signalu se dodaje dither, matematičkim postupkom koji eliminira harmonike izobličenja i zamjenjuje ih vrlo niskom konstantnom nepromjenjivom razinom šuma. Konačni rezultat postupka daje nečujna izobličenja i šum, međutim izobličenja su potpuno slučajna, matematički nepredvidiva i potpuno dekorrelirana od analognog signala pa **digitalni signal zvuči kao analogni**.



Napomena:

Prikazani programi nisu primjenjivi za profesionalnu primjenu nego služe isključivo za objašnjenje temeljnih pojmova i prikaz programiranja u Matlabu. Detaljniju analizu sa prikazom PCM i DSD signala, proračunom spektra i raznim tipovima dithera vidi u pdf prezentacijama:

- **Kontinuirani i diskretni signali i DSP - Analogno digitalna i digitalno analogna pretvorba i višetaktni i nadzorkujuć sustavi**
- **Zvučni signali visoke HD i ultra visoke UHRA razlučivosti**