

Elektroakustika

osa1: Heli digitaliseerimine

Elektroakustika valdkond

Helisignaali salvestamine ja editeerimine:

- signaalitaseme indikaator; hea indikaator reageerib kiiresti signaalitaseme tõusule ja suhteliselt aeglasemalt signaalitaseme langusele
- kursori asukoha täpsus
- *nondestructive editing*
- võimalus liita *plugineja* (näiteks *Virtual Studio Technology, VST*)
- mugav navigeerimine pikkade failide puhul

Mitmekanalilise helisalvestuse montaaž (*Digital Audio Workstation, DAW*)

- nõuab võimsat riistvara
- võimalus salvestada ja maha mängida samaaegselt
- kanalite arv
- *playlist*-omadus (*multiple takes per track*)

Elektroakustika valdkond (2)

MIDI sequencer:

- helisünteesi riistavara ühendamise võimalused
- võimalus kuulda kohele editeerimise tulemust
- MIDI data esitamine nootidena
- MIDI data esitamine *event*:idena
- rütmi mitmekülgne kontroll
- video ühendamine muusikaga

Heli süntees

Muu tarkvara:

- helisignaali analüsaatorid
- noodistus
- DSP tarkvara

Hääle tee digitaalseks heliks

Enne kui heli on võimalik digitaalselt töödelda:

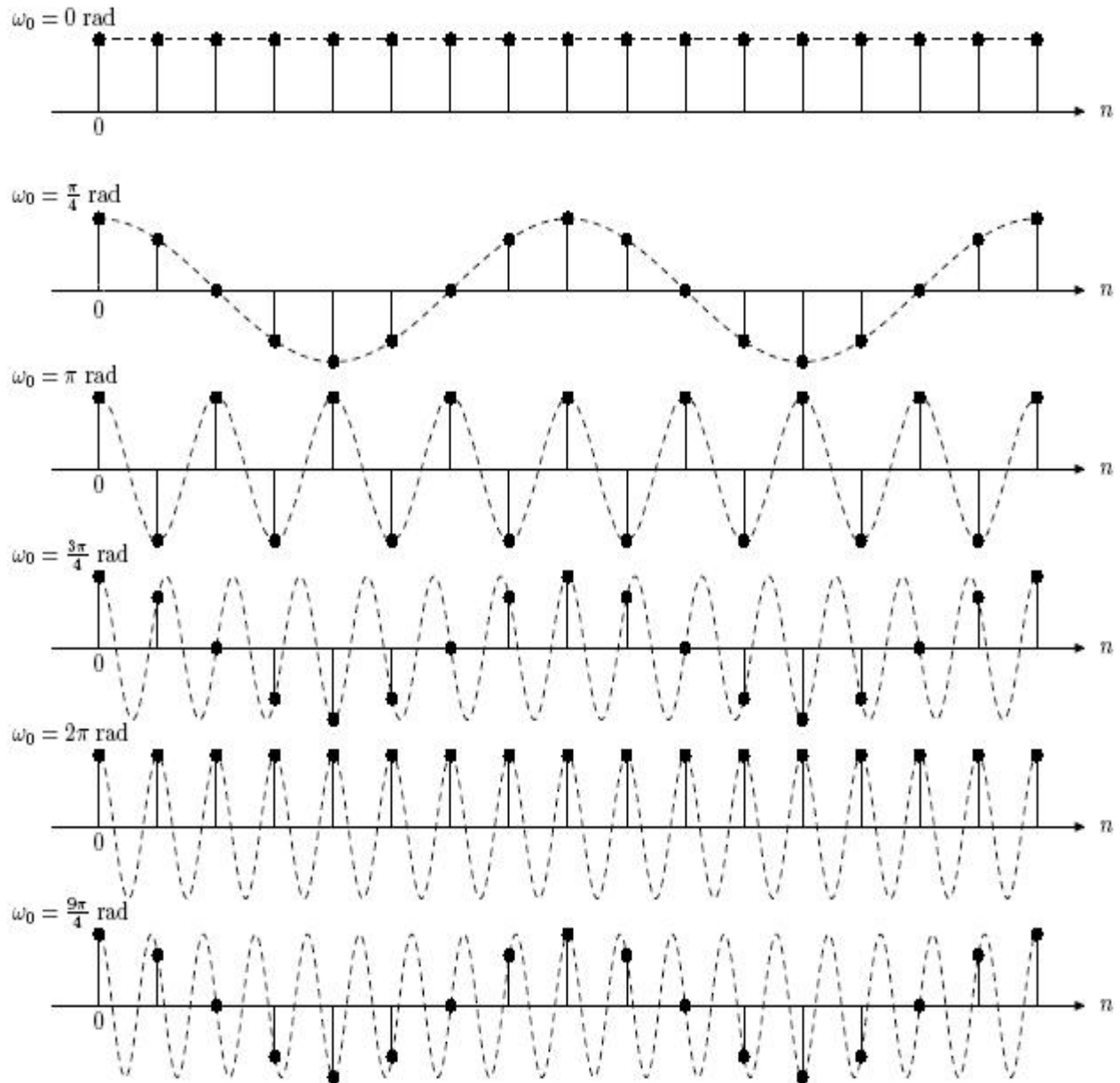
Heli (võnkumine) → mikrofon → analoog/digitaal (A/D) muundur → bittide jada

Analoog/digitaal muundur sisaldab endas kaks operatsiooni:

- Diskreetimine, mille tulemusel mikrofonist saadav jätkuva-ajaline (pidev, *continuous-time*) elektriline signaal muudetakse numbrite jadaks. Seda sammu iseloomustab diskreetimissagedus (diskreetimisperiood)
- Kvantiseerimine, mille tulemusel saadud numbrid esitatakse binäärkujul N bitiga. N bitiga on võimalik esitada 2^N eri väärtust

Nii diskreetimine kui kvantiseerimine põhjustavad moonutusi. Nende tundmaõppimine ja nende mõju vähendamine on oluline osa digitaalse audio distsipliini

Diskreetimine



Signaalid sageduse tasandil: Fourier' teisendus

Signaal on:

Teisendus on:

Mitteperioodiline

Pidev

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(\Omega) e^{j\Omega t} d\Omega$$

$$X(\Omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\Omega t} dt$$

Pidev, mitteperioodiline

Diskreetne

$$x[n] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} X(\omega) e^{j\omega n} d\omega$$

$$X(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n] e^{-j\omega n}$$

Pidev, perioodiline

Perioodiline

$$\tilde{x}(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k e^{jk\Omega_0 t}$$

$$c_k = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \tilde{x}(t) e^{-jk\Omega_0 t} dt$$

Diskreetne, mitteperioodiline

$$\tilde{x}[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \tilde{X}[k] e^{j\frac{2\pi}{N}kn}$$

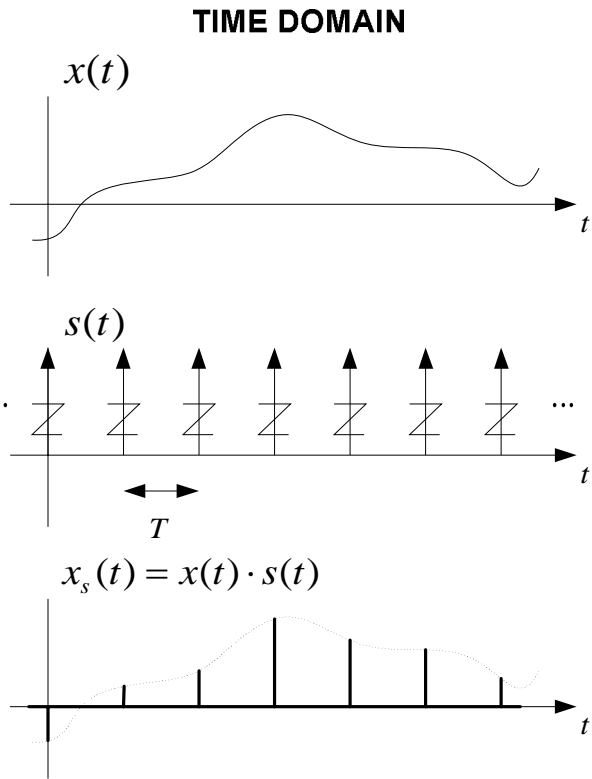
$$\tilde{X}[k] = \sum_{n=0}^{N-1} \tilde{x}[n] e^{-j\frac{2\pi}{N}kn}$$

Diskreetne, perioodiline

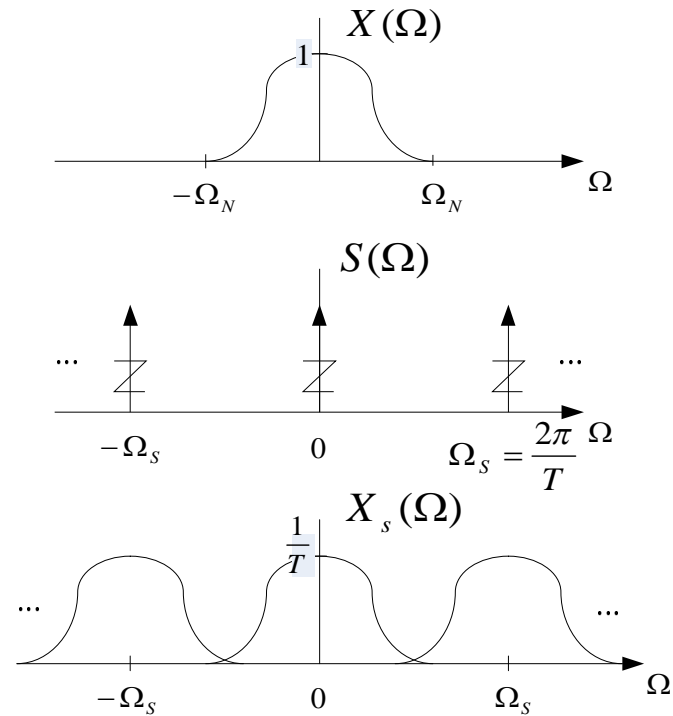
NB! Ainus võimalik Fourier' teisenduse vorm digitaalsetes süsteemides

Mis toimub sageduse tasandil kui signaal muudetakse diskreetseks ...

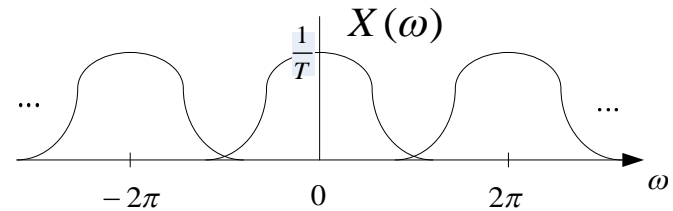
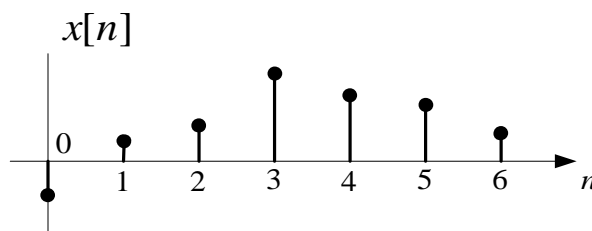
CONTINUOUS-TIME 'WORLD'



FREQUENCY DOMAIN



DISCRETE-TIME 'WORLD'

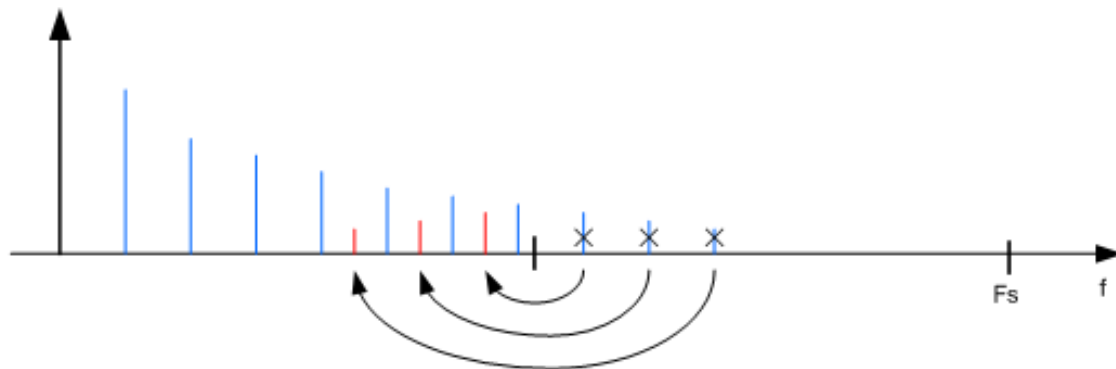


Diskreetimine: kokkuvõtteks

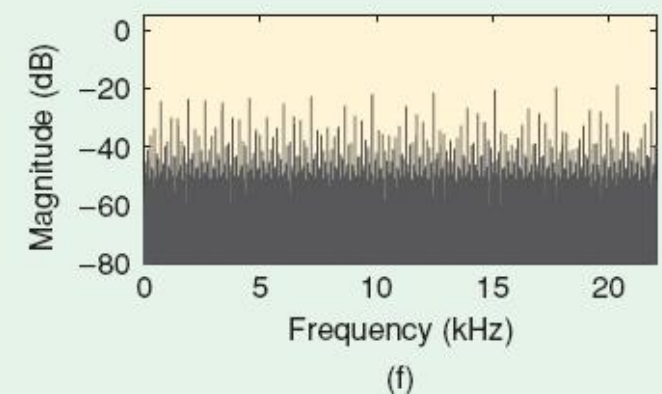
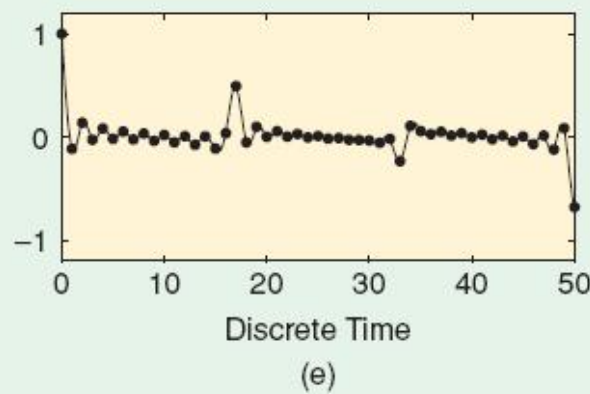
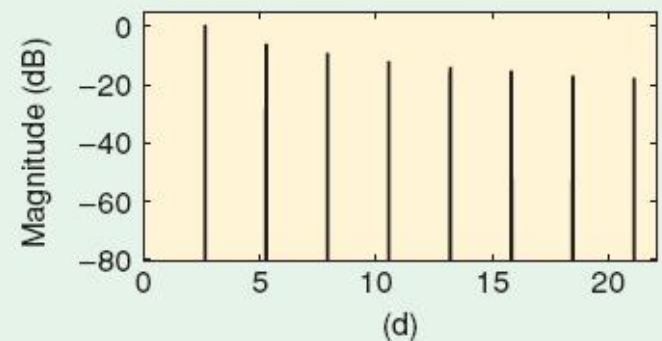
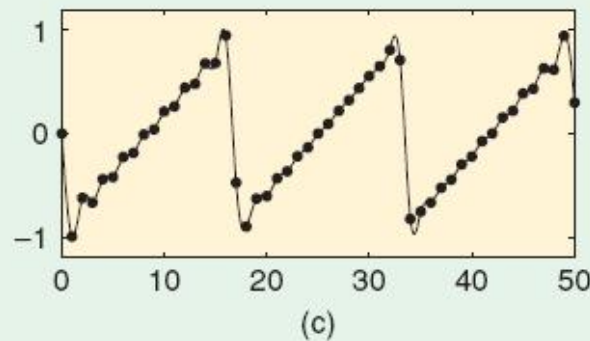
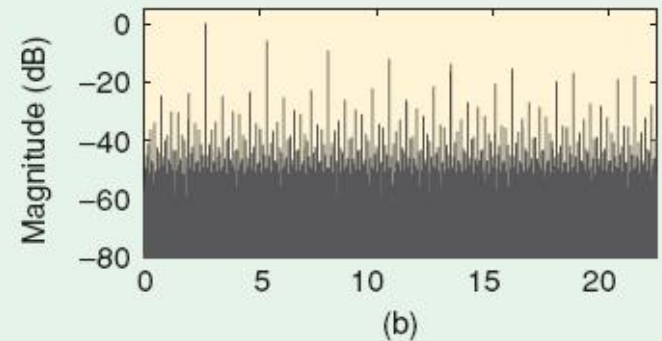
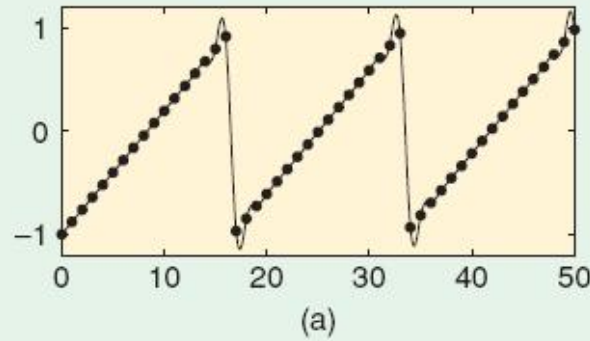
Signaali diskreetimisel on oluline et diskreetimissagedus oleks vähemalt kahekordne võrreldes signaalis esineva kõrgeima sagedusega (Nyqvisti teoreem).

Kuna signaalis on alati kõrgsageduslikku müra, signaal tavaliselt filtreeritakse madalpääsfiltriga enne diskreetimist (*anti-alias filtering*).

Juhul kui signaalis esineb komponente, mille sagedus on kõrgem kui pool diskreetimissagedusest, need komponendid 'peegelduvad' madalamale sagedusribale!



Näide:
'virtual analog
synthesis'

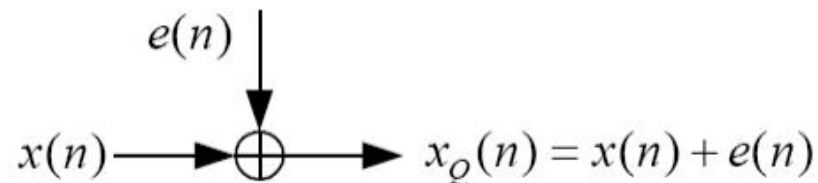


[FIG1] Waveform and magnitude spectrum of: (a), (b) the trivial, (c), (d) the ideal sawtooth signal; and (e), (f) their difference. The fundamental frequency of the sawtooth waves in this and other figures in this article is 2637.0 Hz (MIDI note #100) and the sampling rate is 44,100 Hz. The spectra presented in this article have been computed from a 1 s signal segment with a 65,536-point FFT using a Chebyshev window function with a 100-dB side-lobe attenuation.

Kvantiseerimine

Heli salvestamisel N biti abil on võimalik esitada 2^N signaali väärtust. Pideva signaali väärtused on seega vaja ümardada (või lõigata) lähima esitatava väärtuseni.

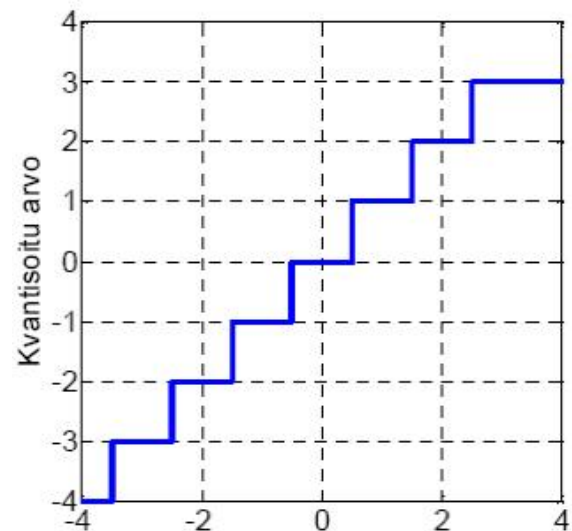
Oletades et signaal on piisavalt suure amplituudiga, võime kvantiseerimist vaadelda juhusliku müra lisandumisena signaalile:



Näide: 3-bitine kvantiseerimine ümardamise teel

On võimalik esitada 8 eri väärtust

NB! Kuidas antud joonis muutub kui ümardamise asemel kasutada lõikamist?



Kvantiseerimismüra

Juhul kui kasutada ümardamist, kvantiseerimisest tekkiva vea suurus on kõige rohkem $\frac{1}{2}$ kahe kõrvuti oleva kvantiseerimistaseme vahest

Kvantiseerimismüra hinnatakse signaal/müra suhtega (S/N suhe), ühikuteks on dB.

Rusikareegel on: $20 \log \frac{\text{suurim esitatav väärtus}}{\text{suurim võimalik viga}} = 20 \log \frac{2^N - 1}{2^{-1}} = 20 \log 2^N$

16-bitise signaali puhul S/N suhe on 96,3 dB.

Iga lisatud bitt kasvatab S/N suhet ligikaudu 6 dB võrra

Kõrva dünaamiline ala on u. 120 dB (keskmistel sagedustel) -> oleks vaja 20 bitti

- Helistuudios 20...24 bitti
- CD: 16 bitti
- *Low end* rakendustes 8 bitti

Rangelt võttes kvantiseerimismüra on sõltuv signaalist.

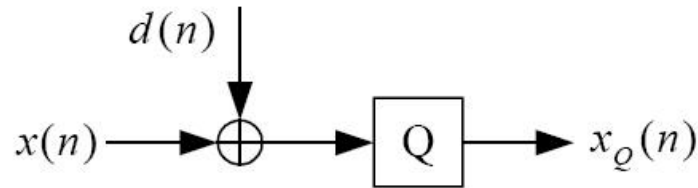
Kui kasutatakse madalat resolutsiooni (bittide arv väike), või kui signaali amplituud on madal, kvantiseerimisviga põhjustab signaali moonutumise



Dither

Dither tähendab tõlkes *värisemist*

Audiosignaalide puhul see tähendab *madala-amplituudilise müra lisamist signaalile* enne kvantiseerimist:



Eesmärgiks on muuta kvantiseerimismüra juhusliku(ma)ks

Dither-müra on laialdaselt kasutusel helisalvestusaparatuuris; seda kasutatakse nii

- analog-digitaal teisenduse puhul (A/D) et vähendada moonutusi ja võimaldada madalate signaalitasemete salvestus
- Digitaal-analog teisenduse puhul (D/A) et teha teisendusest lineaarsem ja võimaldada madalate signaalitasemete esitamine

Dither-müra implementeerimine

On olemas eri tehnikaid dither-müra lisamiseks:

- Eri amplituudijaotusega ja võimsusega dither
- Mahalahutatav dither (dither-müra lahutatakse signaalist mahamängimisel)
- Ns. autodither, mispuhul dither-müra 'tehakse' signaalist endast

Dither-müra genereeritakse juhuslike arvude generaatori abil, mis genereerib

- Tasase amplituudijaotusega müra
- Müra spekter on 'valge'

Dither-müra amplituud on enamasti $-0.5 \dots 0.5 * \text{LSB}$ (*Least Significant Bit*) ja sellisena see vähendab S/N suhet 3 dB võrra

Lisaks on kasutusel:

- *Kolmnurkse jaotusega dither* $d_{\text{tri}}(n) = d_1(n) + d_2(n)$
- *Kolmnurkse jaotusega kõrgpääs-dither* $d_{\text{hp}}(n) = d(n) - d(n-1)$

Viimase puhul on vaja vaid üht juhuslike arvude generaatorit



Näide: dither-müra

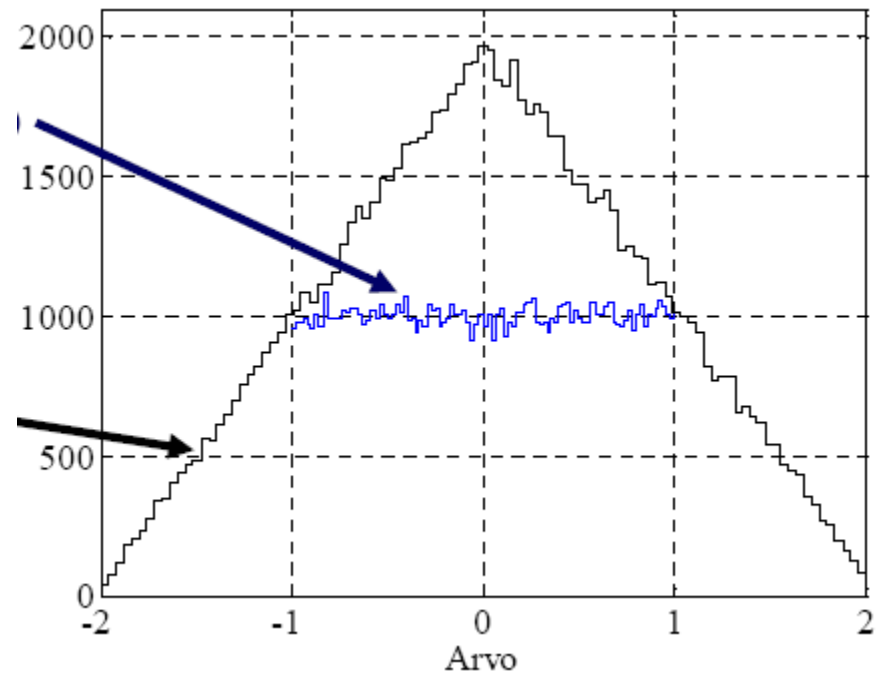
Tasase amplituudijaotusega dither

100,000 diskreeti


100 eri väärtust

Kõrgpääs-dither

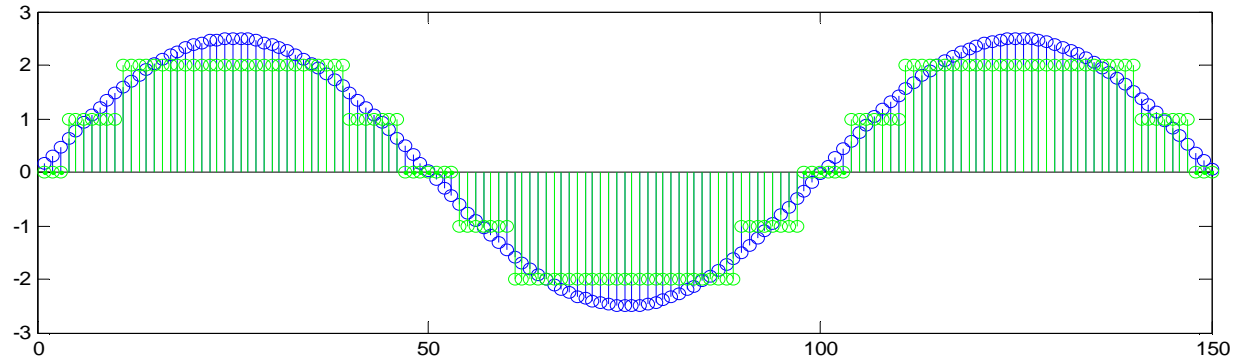
200 eri väärtust



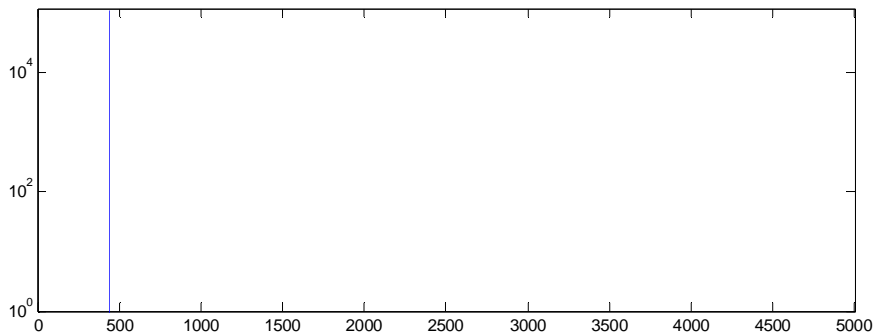
Näide: kvantiseerimismüra muutmine juhuslikuks

Kvantiseerimata: 
(praktiliselt 16-bit)
440 Hz puhas sinusoid

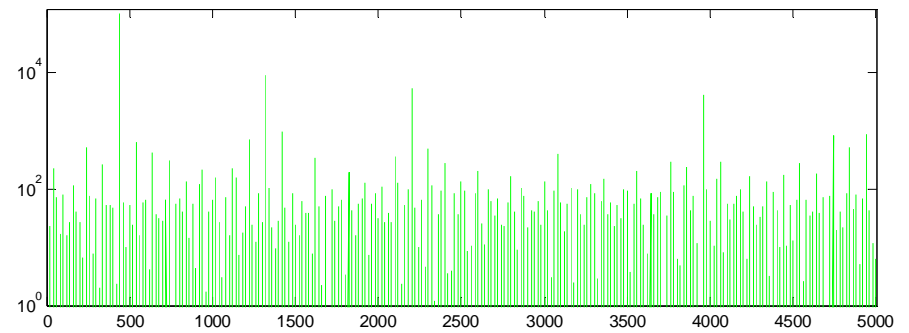
Kvantiseeritud: 



Kvantiseerimata signaali spekter



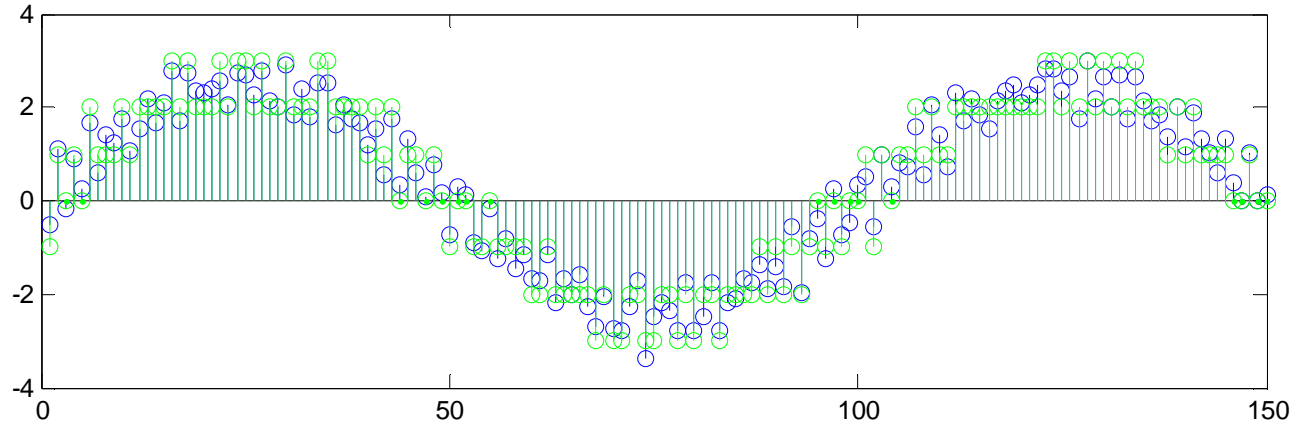
Kvantiseeritud signaali spekter



Näide: kvantiseerimismüra muutmine juhuslikuks

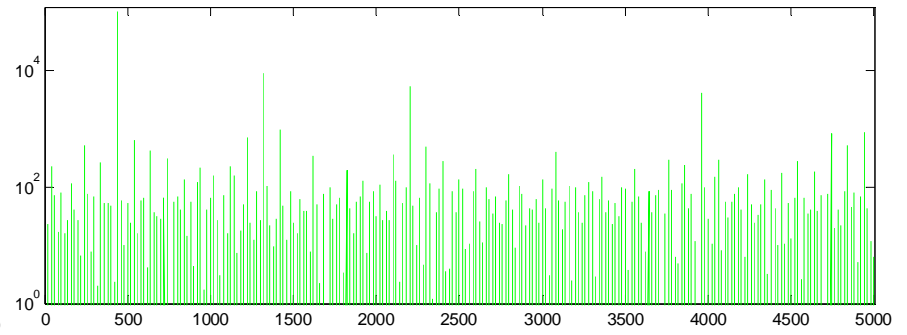
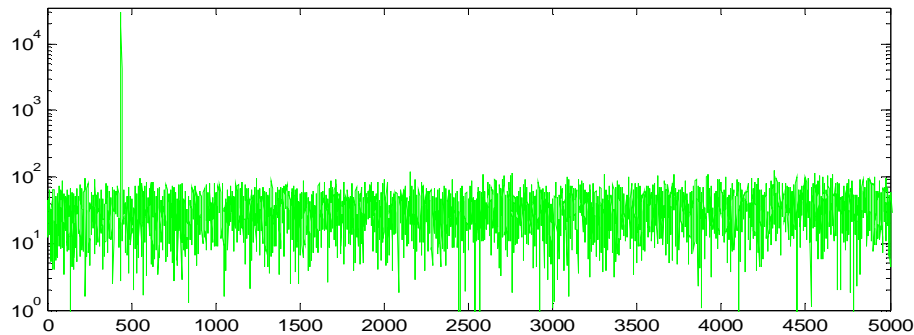
Kvantiseerimata:
440 Hz sinusoid +
dither

Kvantiseeritud:



Kvantiseeritud ditheriga spekter

Kvantiseeritud ilma ditherita spekter

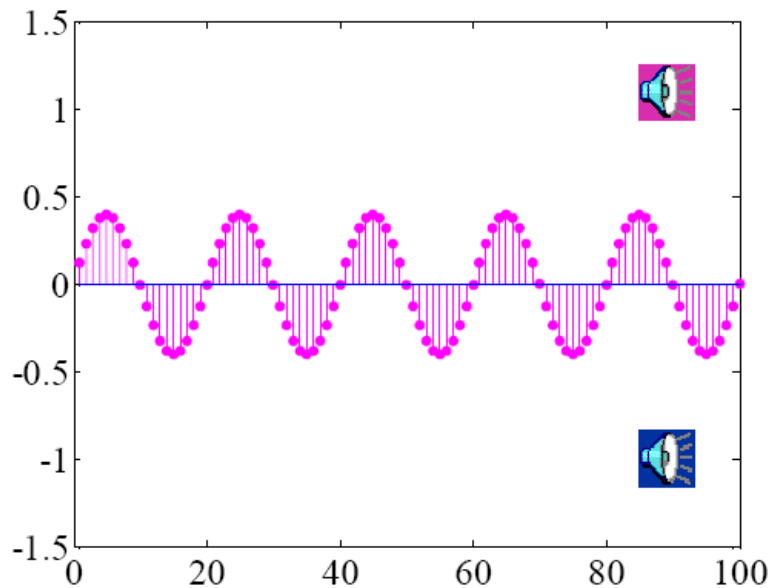


Dither-müra eelised eriti madala-amplituudiliste signaalide puhul

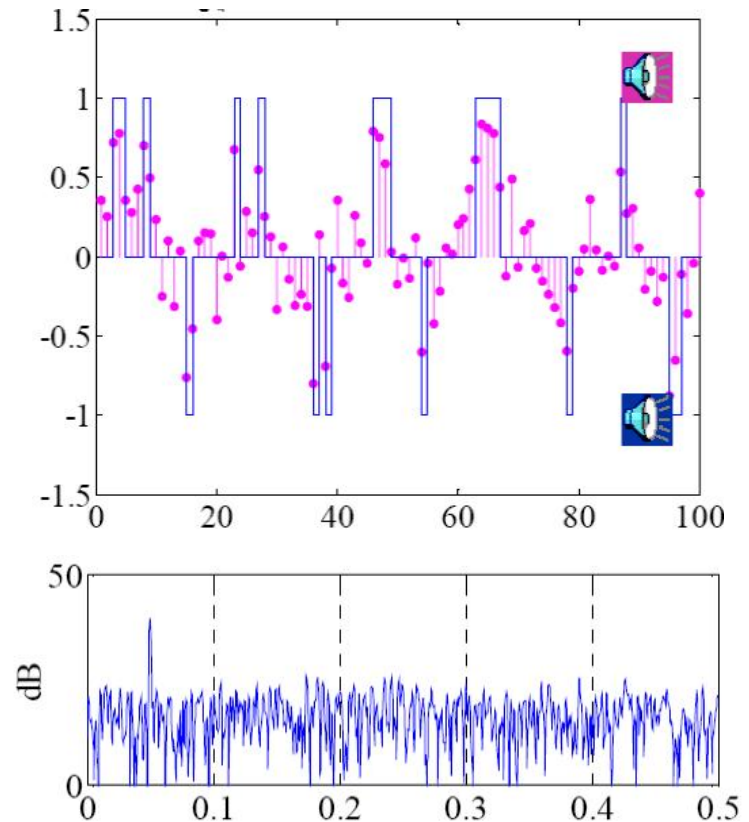
Kui signaali amplituud on alla poole kvantiseerimistasemest ($< 0.5\text{LSB}$), signaal hävib kvantiseerimisel. Dither-müra lisamine võimaldab sellise signaali tuua kuuldavale.

Näide: signaali amplituud on 0.4LSB :

Ilma ditherita



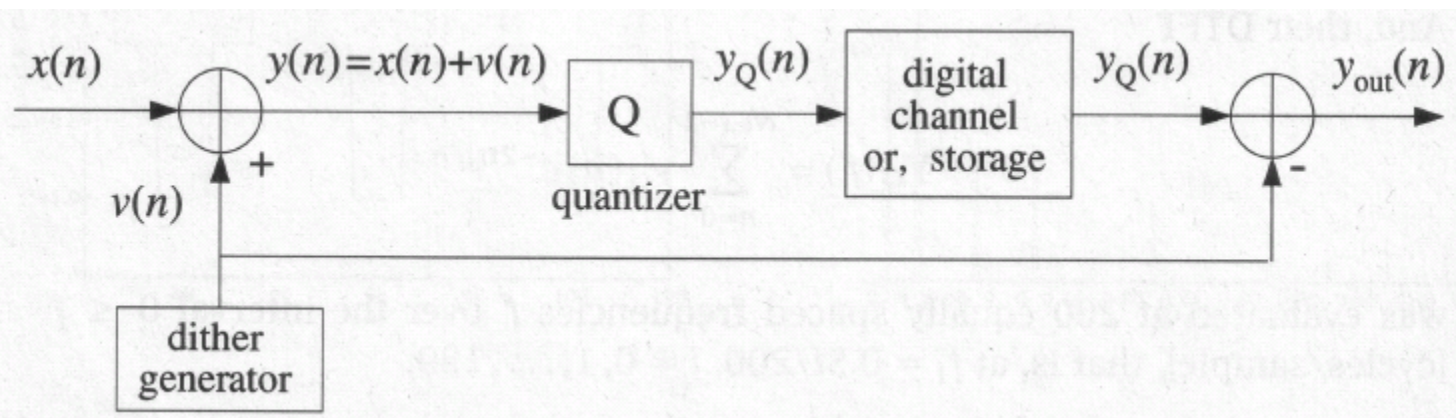
Ditheriga



Vähendatav dither-müra (*subtractive dither*)

Dither-signaal on võimalik mahamängimise (*playback*) juures maha lahutada, mispuhul dither-signaali lisamine ei madalda S/N suhet.

Vähendava ditheri kasutamine eeldab et salvestuse ja mahamängimise puhul on kasutada sama mürasignaali:



Autodither

Autoditheri puhul dithersignaali kas

- toodetakse digitaalse signaali LSB muutustest (eeldades et need on juhuslikud). Sel puhul ei ole vaja erilist juhuslike arvude generaatorit. Samas LSB muutused ei pruugi olla alati juhuslikud, eriti madalate signaalitasemete puhul. Algoritmid mis toodavad dither-signaali LSBst on vahest vägagi keerulised et dither oleks juhuslik

või

- salvestus sisaldab ise sedavõrd müra et dither-signaali lisamine ei ole vajalik

Ditheri lisamist peetakse professionaalse audio puhul vältimatuks. Dither-müra omadused on sealjuures olulised et kvantiseerimismüra oleks signaalist sõltumatu

'Ülediskreetimine' (*oversampling*)

Üldjuhul kvantiseerimismüra on valge, s.t. tema spekter on konstantne väärtusega $\frac{\sigma^2}{f_s}$

Oletame et diskreetimine toimub L korda kõrgema diskreetimissagedusega

$$\hat{f}_s = Lf_s$$

Osutub, et sama S/N suhte saavutamiseks on nüüd vaja vähem bitte, s.t. kvantiseerida võib väiksema resolutsiooniga:

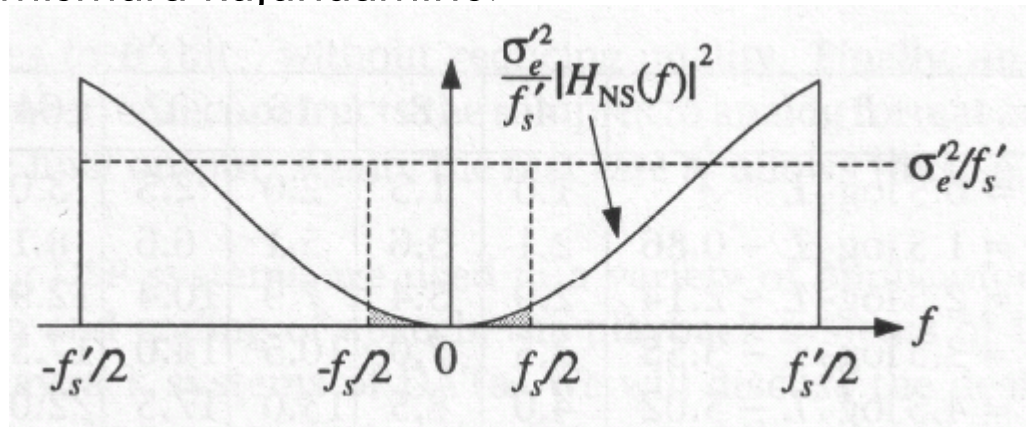
$$\Delta B = 0.5 \log_2 L$$

⇒ on võimalik teha kompromissi kvantiseerimise resolutsiooni ja diskreetimissageduse vahel!

Näide: et üle minna 16-bitiselt resolutsioonilt 8-bitisele, on vaja diskreetimissagedust tõsta 2^{16} korda. Ohhohh!

Kvantiseerimismüra 'kujundamine' (*noise shaping*)

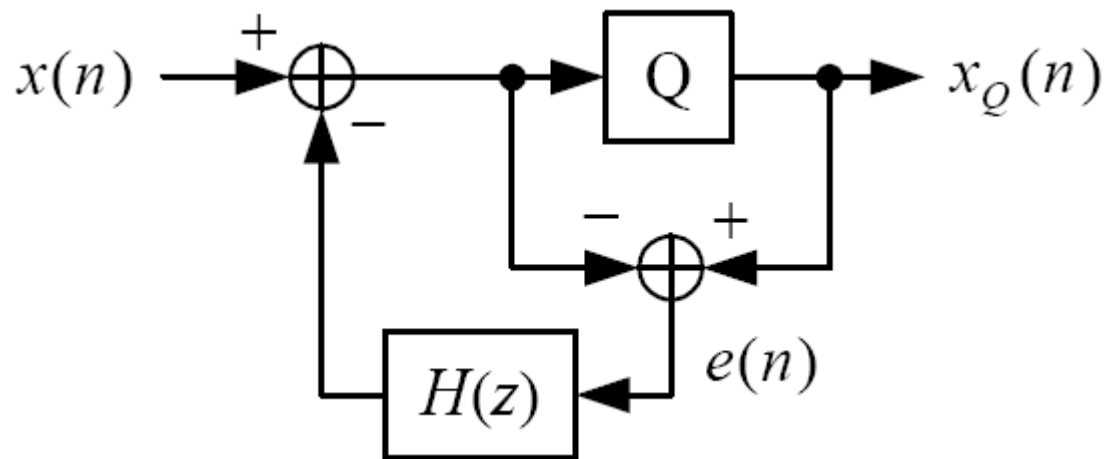
Ülediskreetimine muutub otstarbekaks kui kasutusele võtta kvantiseerimismüra kujundamine.



Kvantiseerimismüra kujundamisega on võimalik müra 'suruda' kõrgematele sagedustele, mis ülediskreetimise puhul jäävad kuulmiskiirgusest välja.

Müra kujundamine praktikas

Kvantiseerimismüra on võimalik kujundada juhtides kvantiseerimisvea tagasi filtreeritult:



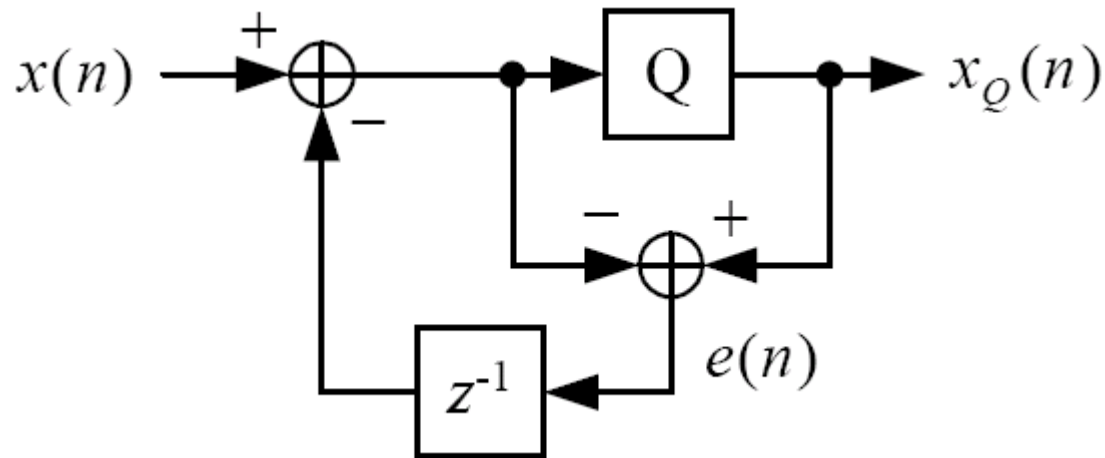
Sellest skeemist võime kirjutada: $X_Q = X + (1 - H)E$

\Rightarrow väljundisse kvantiseerimisviga tuleb ülekandefunktsiooniga $(1 - H(z))$

Selle funktsiooni valikuga on võimalik suruda müra kõrgematele sagedustele

Esimest järku müra kujundaja

Lihtsaim müra kujundaja on hilistus ühe diskreedi võrra:



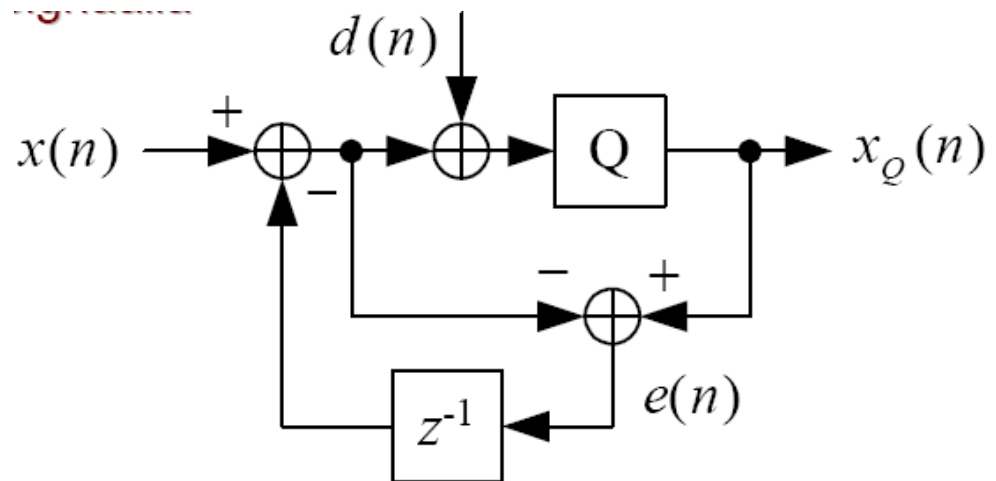
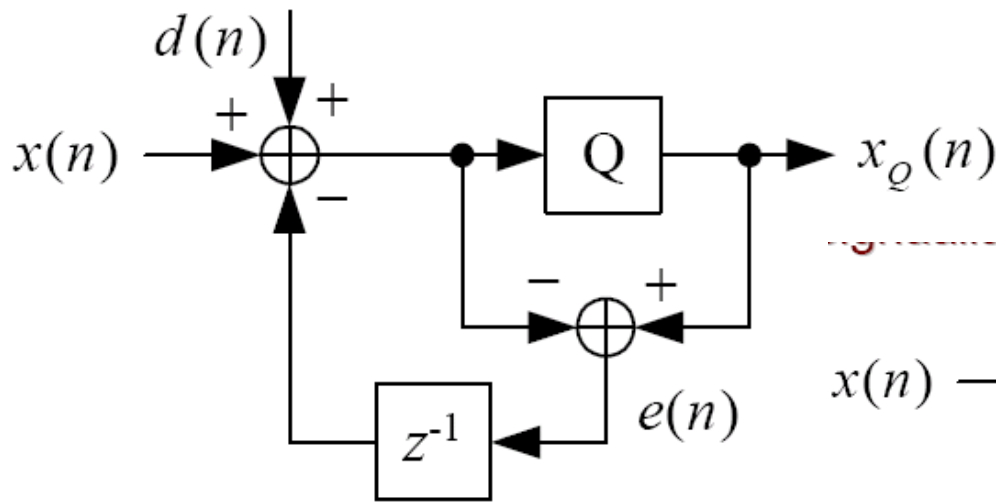
Mürale ülekandefunktsioon on antud juhul $(1 - z^{-1})$

Praktiliselt kasutatakse üpriski keerulise ülekandefunktsiooniga mürakujundajaid, nii et kavntiseerimismüra järgib kuulmisläve kuulmispiirkonda jäävatel sagedustel

Ditheri ühendamine müra kujundamisega

Dither on võimalik lisada kahes erinevas punktis:

- otse sisendsignaalile
- kvantiseerimise juures (sel juhul müra kujundaja kujundab ka ditherit)



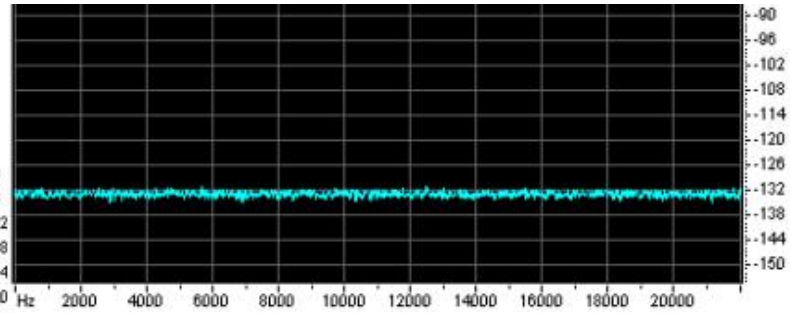
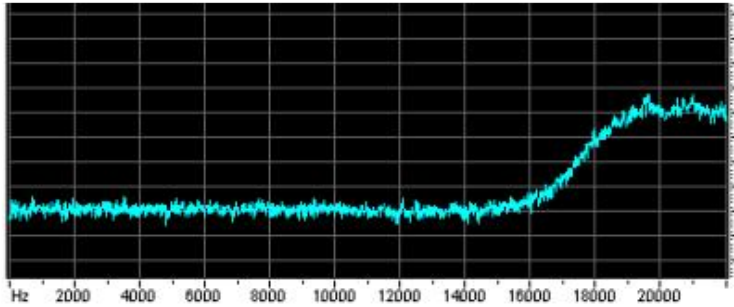
Some examples and samples:

<http://audio.rightmark.org/lukin/dither/dither.htm>

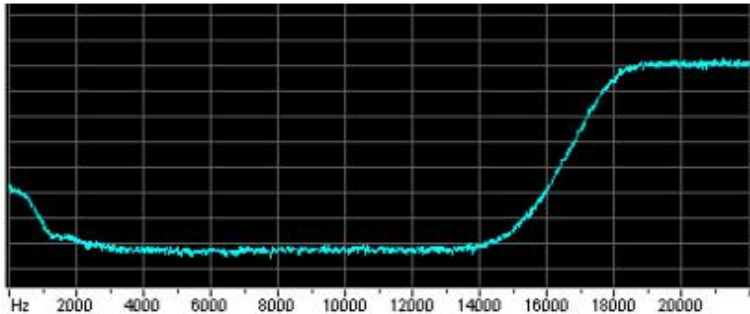
Näiteid

Ilma müra kujundamiseta

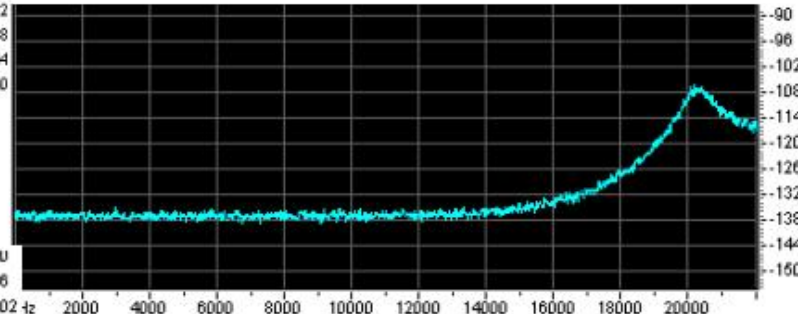
UV22



Extrabit
Ultra



Pow R1



Wavelab

