

Vastekorjaus (ekvalisointi)

Lähteet: Zölzer. "Digital audio signal processing". Wiley & Sons.
Zölzer (ed.) "DAFX – Digital Audio Effects". Wiley & Sons.

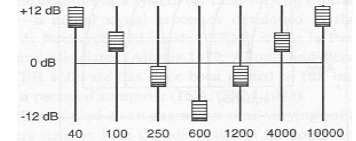


Sisältö:

- Johdanto
- IIR vai FIR äänten suodattamiseen?
- Suodatinrakenteita
- Diskreettien IIR:ien suunnittelu jatkuva-aikaisista
- Hyllykorjaimet
- Parametriset IIR-rakenteet

1 Johdanto

- Spektrin ekvalisointi on yksi äänisignaalin käsittelyn perusoperaatioita
- Vastekorjaimia eli ekvalisaattoreita on sekä ammattikäytössä että kuluttajilla
 - kuluttajalaitteissa (esim. autoradio tai vahvistin) käytetään tyypillisesti yksinkertaista basson ja diskantin säätöä
 - studioissa ja ammattimaisessa äänentoistossa käytetään hieman monimutkaisempia laitteita, esim. kolmannesoktaaveittain säädettävää korjainta
- Seuraavassa käsitellään vastekorjauksessa tavallisimmin tarvittavien suodattimien suunnittelua
 - tässä kalvosetissä IIR-korjaimia, seuraavassa FIR-suodatinpankkeja
 - lähdemateriaalissa käytetään IIR- ja FIR-suodattimista nimiä *rekursiiviset* ja *ei-rekursiiviset* suodattimet → termit OK



Johdanto

1.1 IIR vai FIR äänten suodattamiseen?

- IIR-suodattimet ovat laskennallisesti huomattavasti **tehokkaampia**
 - kapea siirtymäkaista saavutetaan pienellä määrällä suodinkertoimia
- FIR-suodattimet mahdollistavat **lineaarisen vaihevasteen**
 - äänen tapauksessa tämä ei ole mikään itseisarvo, sillä ihmiskuulo ei ole herkkä taajuuskomponenttien vaiheille
 - magnitudivaste on huomattavasti tärkeämpi (vrt. näköaisti: ei päde)
 - puoltaa IIR-suodattimien valintaa
 - matalien taajuuksilla vaiheilla on vaikutusta stereokuvaan
 - äänipuolellakin on signaaleita, joissa signaalin muodon säilyminen (eli vaihevaste) on tärkeä, esim. amplitudiverhokäyrä ajan funktiona

IIR vai FIR äänten suodattamiseen?

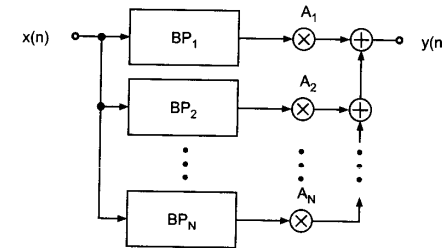
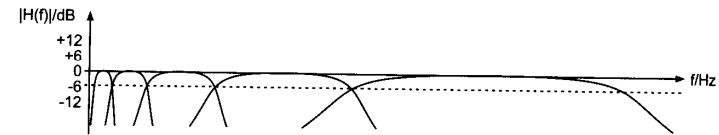
- FIR-suodattimet mahdollistavat **täydellisemmän vasteen hallinnan**
 - suodatinpankkeja suunniteltaessa FIR-suodattimilla saavutetaan ns. täydellinen rekonstruktio, eli analyysi/synteesi –pankki ei muuta signaalia, mikäli kaistoilla ei tehdä kvantisointia tai muuta prosessointia
 - helpottaa esim. audiokoodekin suunnittelua (useimmat käyttävät FIR-pankkia)
- Vasteen säätäminen reaaliaikaisesti (esim. rajataajuuden säätäminen) onnistuu helpommin IIR-suodattimella
 - parametriset suodatinrakenteet
- FIR:n etuja myös **varma stabiilisuus**, ja yleensä lyhyempi tarvittava sananpituus suodattimen kertoimia ja tilamuuttujia kvantisoidessa
 - Valinta riippuu käyttötarkoituksesta ja tehokkuusvaatimuksista

1.2 Suodatinrakenteita

- Kiinteän vasteen suodatin voidaan käytännössä suunnitella millä tahansa suunnittelumenetelmällä
- Usein halutaan säätää suodattimen parametreja
 - ainakin vahvistus tietyllä taajuusalueella
 - mahdollisesti myös taajuuskaistojen keskitaajuus ja kaistanleveys
- Kaksi vaihtoehtoa: joukko rinnakkaisia kaistanpäästösuotimia tai joukko hyllykorjaimia sarjaankytkettynä

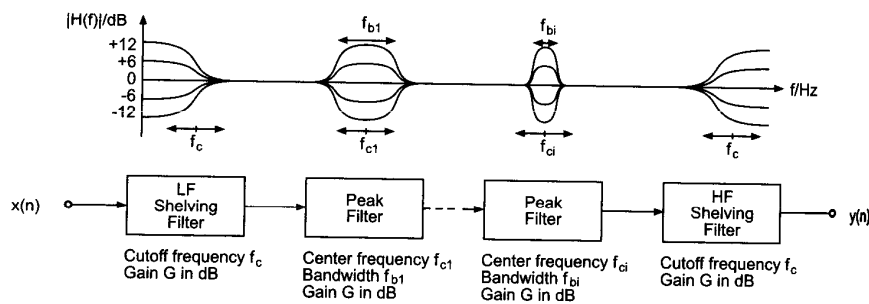
Suodatinrakenteita

- Kaistanpäästösuotimet rinnakkain = suodatinpankki, käsitellään omassa luentokokonaisuudessa



Suodatinrakenteita

- Hyllysuotimia kaskadissa – joustavampi kaistojen raja- ja keskitaajuuksien ja kaistanleveyksien säätö



2 Diskreettien IIR-suodattimien suunnittelu jatkuva-aikaisista suodattimista

- IIR-suodinten suunnittelussa yleisin menetelmä on **bilineaarimuunnos**, joka muuttaa jatkuva-aikaisen (s-tason) siirtofunktion diskreettiaikaiseksi (z-tasoon)
- Jatkuva-aikaisen siirtofunktion $H(s)$ suunnittelu
 - tyypillisesti käytetään pohjana normalisoitua muotoa jostain analogisesta suotimesta (Butterworth, Chebyshev I,II, elliptinen)
 - käsitellään siirtofunktion normaalimuotoa halutun rajataajuuden, siirtokaistan ja vahvistuksen saamiseksi
 - valmiit suunnittelumenetelmät ovat olemassa ja selkeitä käyttää
 - s-tason siirtofunktio on usein yksinkertaisempi ja jo siirtofunktiosta ”näkee” (harjaantumalla) vasteen käyttäytymistä
- Em. menetelmillä saadaan jatkuva-aikainen siirtofunktio $H(s)$, joka sitten muutetaan bilineaarimuunnoksella diskreettiaikaiseen muotoon $H(z)$

IIR-suodinten suunnittelu bilineaarimuunnoksella

Kurssivaatimuksia koskeva huomautus

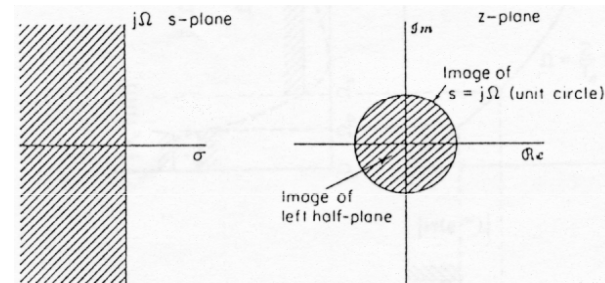
Vastekorjaus 9
DA / Klapuri & Virtanen

- Tässä noudatamme signaalinkäsittelyn johdatuskursseilla valittua tapaa tukeutua osittain Matlabin valmiisiin rutiineihin
 - etu: voidaan keskittyä suodattimien käytännöllisiin ominaisuuksiin, tarvitsematta hukkaa kaavanpyörytykseen ja arvojen taulukointiin
 - s-tason siirtofunktioita voi suunnitella Matlabissa, ja muunnoksen z-tasoon voi myös tehdä Matlabin avulla, kuten seuraavassa nähdään
- Tämän kalvosetin (Vastekorjaus) osalta ei tarvitse opetella ulkoa yksittäisiä kaavoja
 - riittää ymmärtää periaatetasolla miten suotimia suunnitellaan ja tietää mitä eri suodintyypeillä tarkoitetaan
 - kaavanpyörytys toivottavasti silti auttaa ymmärtämään syvällisemmin, miten esim. Matlabin suodinsuunnittelurutiinit on tehty (kokeile `type butter` Matlabissa)
 - kaavapuoli kartuttaa signaalinkäsittelyn osaamista yleisemmin, eikä ole pelkästään audiospesifiä

2.1 Bilineaarimuunnos

Vastekorjaus 10
DA / Klapuri & Virtanen

- Bilineaarimuunnoksella s-tasosta z-tasoon saadaan jatkuva-aikaisesta siirtofunktiosta $H(s)$ diskreetti $H(z)$
- Bilineaarimuunnos on yksinkertainen s-tason imaginääriakselin kuvaus z-tason yksikköympyrälle
 - s-tason $j\Omega$ -akseli (Ω on taajuus) \rightarrow z-tason ympyrä $e^{j\omega}$ (ω taajuus)
 - koko taajuusakseli $-\infty \leq \Omega \leq \infty$ kuvautuu välille $-\pi \leq \omega \leq \pi$



Bilineaarimuunnos

Vastekorjaus 11
DA / Klapuri & Virtanen

- Kuvaus tehdään korvaamalla s siirtofunktiossa $H(s)$

$$s = \frac{2}{T} \cdot \frac{z-1}{z+1}$$
 käytännössä ei aleta käsin laskemaan, vaan Matlabissa
 - $T=1/f_s$ on muunnoksen näytteenottoväli, Matlabissa käytämme vakioparametria $f_s=2$. Tällöin diskreetin suotimen rajataajuus voidaan antaa normaaliin tapaan suhteessa Nyquistin taajuuteen (Nyquistin taajuus on 1 mikäli $f_s=2$)
- Esimerkki: `[Bz, Az]=bilinear(Bs, As, fs)` missä B_z, A_z ovat diskreettiaikaisen suodattimen osoittaja ja nimittäjä (B_s, A_s jatkuva-aikaisen) ja $f_s=2$.
- Bilineaarimuunnoksella on monia mukavia ominaisuuksia
 - stabiili, kausaalinen, jatkuva-aikainen suodatin kuvautuu stabiiliksi diskreettiaikaiseksi suodattimeksi

Bilineaarimuunnos

Vastekorjaus 12
DA / Klapuri & Virtanen

- Yhteys taajuusmuuttujien Ω ja ω välillä saadaan sijoittamalla bilineaarimuunnoksen kaavaan $s=j\Omega$ ja $z=e^{j\omega}$

$$j\Omega = \frac{2}{T} \cdot \frac{1 - e^{j\omega T}}{1 + e^{j\omega T}} = \frac{2}{T} \cdot \frac{2e^{j\omega T/2} [j \sin(\omega T / 2)]}{2e^{j\omega T/2} [\cos(\omega T / 2)]} = \frac{2j}{T} \tan\left(\frac{\omega T}{2}\right)$$
- Tästä saadaan

$$\Omega = \frac{2}{T} \tan\left(\frac{\omega T}{2}\right)$$
 ja toisin päin

$$\omega = \frac{2}{T} \arctan\left(\frac{\Omega T}{2}\right)$$
- Digitaalista suodatinta suunnitellessa pitää ω :n suhteen annetut vaatimukset muuttaa Ω -akselille em. yhteyttä käyttäen

2.2 Suotimen suunnitteluproseduuri analogisen suodattimen kautta

Vastekorjaus 13
DA / Klapuri & Virtanen

- Valitaan pohjaksi jokin klassinen analoginen suodin (Butter, Cheby 1,2, elliptinen). Esim. Butterworthille: $H(s) = \frac{1}{s+1}$

```
[Bs,As]=butter(1,1,'s'); % aste 1, rajataajuus 1
→ Bs=[0 1]; A=[1 1]; % normaalimuoto H(s):lle
```
- Lasketaan analogisen suodattimen $H(s)$ rajataajuus, joka vastaa halutun diskreetin suodattimen $H(z)$ rajataajuutta

```
Wn=0.3; %haluttu diskreetti rajataajuus (1=Nyquist)
T=0.5; % näytteenottoväli (1/fs, fs=2 pid.vakiona)
omega=2/T*tan((2*pi*Wn)/(2/T)); % analog.rajataaj
```
- käsitellään jatkuvaa siirtofunktiota $H(s)$ halutun rajataajuuden (tai siirtokaistan, vahvistuksen, tms.) saamiseksi

```
[Bs,As]=lp2lp(Bs,As,omega); % rajataajuus→omega
→ Bs=[0 2.0381]; A=[1 2.0381]; % haluttu H(s)
```
- käytetään bilineaarimuunnosta diskreetin siirtofunktion saamiseksi

```
[Bz,Az]=bilinear(Bs,As,1/T);
→ B=[0.3375 0.3375]; A=[1.0000 -0.3249]
```

Suotimen suunnitteluproseduuri

Vastekorjaus 14
DA / Klapuri & Virtanen

- Tarkistuksen vuoksi kasketaan Matlabin rutiinilla `butter` suoraan diskreettiaikainen alipäästösuodatin, jonka rajataajuus f_c on $0.3*(f_s/2)$, missä f_s on näytteistystaajuus

```
Wn=0.3; [B,A]=butter(1,Wn);
→ B = [0.3375 0.3375]; A = [1.0000 -0.3249];
```

 - Saatiin siis sama tulos kuin analogisen suodattimen kautta suunnitellen
- Miksi siis tehdä vaikeimman kautta: ensin analoginen suodin ja sitten bilineaarimuunnos?
 - s-tasossa suodattimia voidaan hallitusti suunnitella ja muutella*, ennen siirtymistä lopulliseen diskreettiaikaiseen esitykseen
 - esim. Matlabin "butter"-rutiini tekee juuri näin: suunnittelee ensin jatkuva-aikaisen suotimen ja muuttaa sen sitten diskreetiksi (type butter)
- Analogisen suotimen säätämiseen on Matlab-rutiinit (esim. `lp2lp` edellä muutti rajataajuutta) ja jatkossa tukeudutaankin Matlabiin
 - vastaavat asiat voi tehdä kynällä ja paperilla: manipuloidaan osoittajan ja nimittäjän kertoimia soveltaen simpeleitä matemaattisia sääntöjä

2.3 Ali- ja ylipäästösuodattimet (IIR)

Vastekorjaus 15
DA / Klapuri & Virtanen

- Jatkossa suodattimien vasteita pyritellään niiden suunnittelun ymmärtämiseksi hieman *s*-tasossa
- Butterworth-tyyppiset ali- ja ylipäästösuodattimet
 - käytössä esim. analogimiksereissä kaistan rajoittamiseen
 - monotoninen päästökaistan vaste, monotonisesti laskeva estokaistan vaste
 - siirtofunktiot toisen asteen ali- (LP) ja ylipäästösuodattimille (HP):

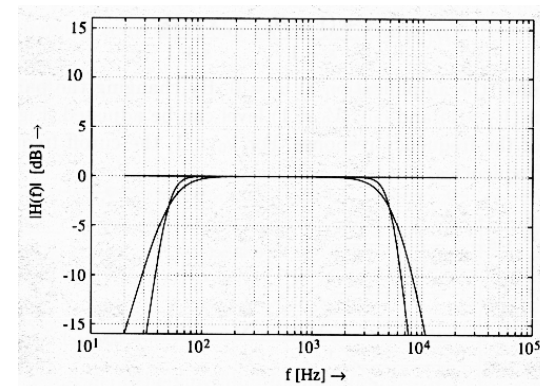
$$H_{LP}(s) = \frac{1}{s^2 + s/Q_\infty + 1} \quad H_{HP}(s) = \frac{s^2}{s^2 + s/Q_\infty + 1}$$
missä $Q_\infty = 1/\sqrt{2}$ Butterworthin tapauksessa
- Matlabissa jatkuva-aikainen siirtofunktio $H(s)$:n saadaan 's' parametrilla [oletusarvoisesti palautetaan $H(z)$]

```
[Bs,As]=butter(2,1,'s'); % rajataajuus = 1
→ Bs = [0 0 1] % = HLP:n osoittajan kertoimet
→ As = [1 1.4142 1] % = HLP:n nimittäjän kertoimet
```

2.4 Butterworth-suodattimen ominaisuuksia

Vastekorjaus 16
DA / Klapuri & Virtanen

- Kuva: taajuusvasteita toisen ja neljännen asteen Butterworth-suodattimille
 - ylipäästösuodatus ($f_c = 50$ Hz) ja alipäästösuodatus ($f_c = 5000$ Hz)



Butterworth-suodattimen ominaisuuksia

- Vastekorjauksen tietyissä sovelluksissa ei haluta jyrkkiä siirtymäkaistoja, vaan esimerkiksi pehmeäraijainen korostus tai leikkaus matalille taajuuksille
→ Butterworth ja sen sukuiset suodattimet sopivat tähän, koska:
- Vaste on maksimaalisen laaka päästö- ja estokaistalla
 - mahdollisimman moni derivaatta on nolla taajuudella nolla
 - vaste on monotonisesti laskeva
- Päästökaistan vaihevaste on lähes lineaarinen
 - signaalin muoto säilyy hyvin
- Estokaistan vaimennus menee kauempana hyvin syvälle
 - myös estokaistan vaihevaste on ”melko” lineaarinen
- Suodinkertoimia tarvitaan hieman enemmän kuin esim. elliptisen suodattimen tapauksessa, mutta ero on pieni

Butterworth-suodattimen ominaisuuksia

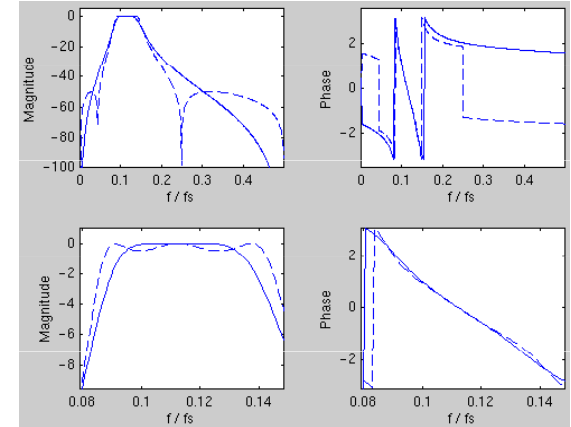
- **Vertailua:** kuudennen asteen kaistanpäästösuo-datin.
— viiva: Butterworth, - - - katkoviiva: elliptinen suodin

YLLÄ

- magnitudivaste
- vaihevaste

ALLA

- magnitudivaste zoomattuna päästökaistalle
- vaihevaste zoomattuna päästökaistalle



3 Hyllysuotimet (IIR)

- Hyllysuotimia (hyllikorjaimia) käytetään korostamaan tai leikkaamaan tiettyjä taajuuksia
 - engl. *shelving filter, shelving equalizer*
 - tietty taajuuskaista ”hyllytetään” (nostetaan/lasketaan) eri tasolle kuin muut taajuudet
- **Idea:** Muutetaan jotakin osaa taajuusspektristä ja jätetään muu osa spektristä koskemattomaksi
 - vrt. tyypillisesti päästetään joitain taajuuksia ja estetään muut
- Sovellus vastekorjaukseen ja vasteen hallintaan on ilmeinen
 - manipuloidaan järjestelmän vastetta vain tietyllä taajuusalueella
- Seuraavassa käsitellään ensimmäisen ja toisen asteen hyllysuotimia
 - näiden peruslohkojen kaskadeilla saadaan aikaan erilaisia vasteen manipulointeja

Hyllysuotimet (IIR)

3.1 Matalien taajuuksien korostus

- Yksinkertainen ensimmäisen asteen **korostussuo-datin** matalille taajuuksille (”basso”)

$$H(s) = 1 + H_0 \frac{1}{s+1}$$

```
[Bs, As]=butter(1,1,'s');
→ Bs=[0 1]; As=[1 1];
```

→ koostuu ensimmäisen asteen alipäästösuotimesta (missä dc-komponenttia vahvistetaan vakiolla H_0), sekä all-pass komponentista, jonka siirtofunktio on $H(s) = 1$

- Voidaan kirjoittaa muotoon

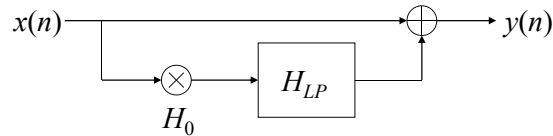
$$H(s) = \frac{s + (1 + H_0)}{s + 1} = \frac{s + V_0}{s + 1}$$

missä V_0 määrää vahvistuksen taajuudella $\omega=0$

- **Säätämällä V_0 :n arvoa saadaan haluttu korostus** tai leikkaus → ks. kuva seuraavalla sivulla

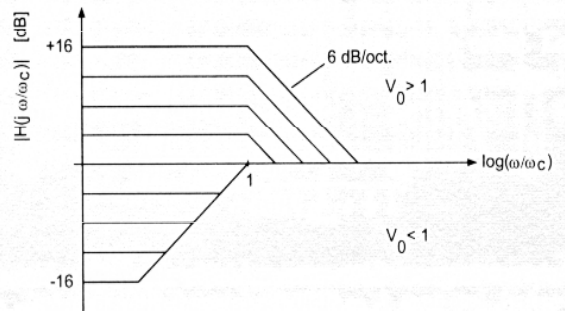
Matalien taajuuksien korostus

- Sama lohkokaaviona



- Kuva: edellä esitetyn hyllysuotimen taajuusvasteen asymptoottikäyrät V_0 :n eri arvoilla

- **heikkous:** kun $V_0 < 1$, rajataajuus ω_c siirtyy matalammaksi



Matalien taajuuksien korostus

- Miksi rajataajuus siirtyy?
- Mikäli negatiivinen korostus, eli **leikkaus** menisi oikein, korostus- ja leikkausjärjestelmä kumoaisivat toisensa sarjaan kytkettynä

- näin ei kuitenkaan käy

$$\left[1 + \frac{H_0}{s+1}\right] \cdot \left[1 - \frac{H_0}{s+1}\right] \neq \text{vakio}$$

- (sen sijaan nämä kyllä kumoaisivat toisensa *rinnan* kytkettynä

$$\left[1 + \frac{H_0}{s+1}\right] + \left[1 - \frac{H_0}{s+1}\right] = 2 = \text{vakio}$$

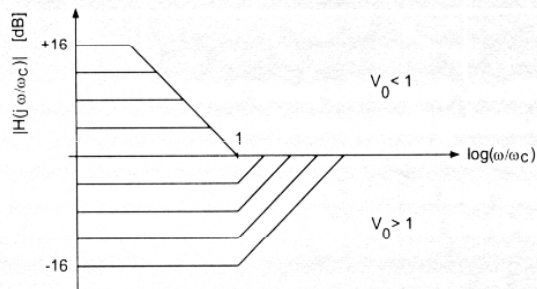
- tämä ei kuitenkaan ole se mitä halutaan leikkaukselta)

3.2 Matalien taajuuksien leikkaus

- Jotta saataisiin taajuusakselin suhteen symmetrinen vaste muuttamatta rajataajuutta, täytyy korostussuotimen siirtofunktio kääntää leikkauksen tapauksessa ($V_0 < 1$):

$$H(s) = \frac{s+1}{s+V_0}$$

- Kuva: yllä olevan siirtofunktion taajuusvasteen asymptoottikäyrät



- Nyt korostus ja leikkaus kumoavat toisensa sarjaan kytkettynä (selviö)

$$\left[\frac{s+1}{s+V_0}\right] \cdot \left[\frac{s+V_0}{s+1}\right] = 1$$

3.3 Korotuksen/leikkauksen määrän säätö

- Tapaus 1: halutaan $x_{dB} > 0$ dB korostus

- Muutetaan x_{dB} lineaariselle asteikolle

$$x_{lin} = 10^{(x_{dB}/20)}$$

- $x_{lin} = V_0$ antaa lineaarisen vahvistuksen taajuudella $\omega=0$

- tarvittava vahvistus alipäästösuotimelle on $H_0 = V_0 - 1$

- Tapaus 2: halutaan $x_{dB} < 0$ dB leikkaus

- Suunnitellaan vastaavan korotuksen $-x_{dB}$ antava suodatin ja käännetään siirtofunktio (vaihdetään osoittaja ja nimittäjä)

3.4 Korkeiden taajuuksien korostus/leikkaus

- Vastaava hyllikorjain korkeille taajuuksille ("diskantti") saadaan alipäästö–ylipäästö muunnoksella
- Matlabissa alipäästö–ylipäästö muunnos tehdään $[Bsh, Ash] = lp2hp(Bs1, As1, Wo)$ missä $Bs1, As1$ ovat alipäästösuoittimen siirtofunktion osoittaja ja nimittäjä, Bsh, Ash vastaavasti ylipäästön. Mikäli rajataajuutta ei haluta muuttaa $Wo=1$.

- Korostuksen tapauksessa saadaan:

$$H(s) = \frac{sV_0 + 1}{s + 1}, V_0 > 1$$

```
[Bsh,Ash]=lp2hp([1 V0],[1 1],1);
→ Bsh=[V0 1]; Ash=[1 1]
```

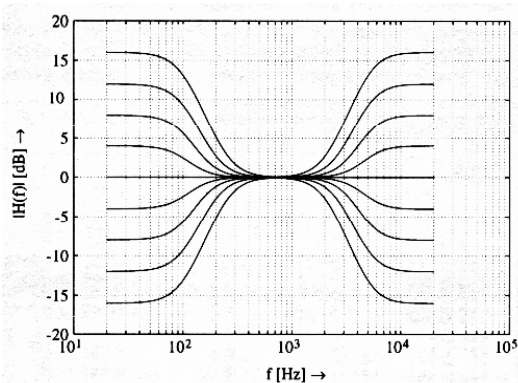
missä parametri V_0 määrää siirtofunktion $H(s)$ arvon taajuudella $\Omega = \infty$ (kuvautuu disk. suotimen Nyquistiksi)

- Leikkauksen tapauksessa taas käännetään yllä oleva:

$$H(s) = \frac{s+1}{sV_0+1}, V_0 > 1$$

Toisen asteen korostussuodatin

- Kuva: toisen asteen hyllysuotimien magnitudivasteet
 - matalien taajuuksien korostus/leikkaus: $f_c = 100$ Hz
 - korkeiden taajuuksien korostus/leikkaus: $f_c = 5000$ Hz



3.5 Toisen asteen hyllysuotimet

- Siirtofunktio *toisen asteen* matalien taajuuksien korostussuodattimelle:

```
[Bs,As]=butter(2,1,'s'); % rajataajuus=1
→ Bs = [0 0 1]; As = [1 1.4142 1];
```

$$H(s) = 1 + H_0 \frac{1}{s^2 + \sqrt{2} \cdot s + 1} = \frac{s^2 + \sqrt{2}V_0 \cdot s + V_0}{s^2 + \sqrt{2} \cdot s + 1}$$

- Leikkaus saadaan jälleen kääntämällä tämä siirtofunktio
- Siirtofunktio toisen asteen korkeiden taajuuksien korostussuodattimelle saadaan taas yllä olevan alipäästö–ylipäästö muunnoksella:

$$H(s) = \frac{V_0 s^2 + \sqrt{2}V_0 \cdot s + 1}{s^2 + \sqrt{2} \cdot s + 1}$$

```
[Bsh,Ash] = lp2hp(...
[1 sqrt(2*V0) V0],...
[1 sqrt(2) 1],1);
```

3.6 Rajataajuuden määrääminen

- Edellä jatkuva-aikaiset suodattimet suunniteltiin käyttäen normalisoitua rajataajuutta $\Omega=1$
 - esiintyi lausekkeissa `butter(aste,luku,rajataajuus,'s')`
- Suodattimen rajataajuutta voidaan yleisessä tapauksessa muuttaa ns. alipäästö–alipäästö muunnoksella

```
– Matlabissa muunnos: [Bs,As]=lp2lp(Bs,As,omega);
missä omega (Ω) on haluttu jatkuva-aikaisen suotimen rajataajuus
– esimerkki: tavallinen ylipäästösuoitin, jonka rajataajuus fc on 0.1*(fs/2)
T=0.5; % kiinteä muunnosvakio (näyteväli)
Wn=.1; % haluttu diskreetin suotimen rajataajuus
% jatkuva-aik. 2-asteen ylipäästösuoitin,rajataajuus=1
[Bs,As]=butter(2,1,'high','s');
% rajataajuuden siirto halutuksi (alip-alip muunnos):
[Bs,As]=lp2lp( Bs, As, 2/T*tan((2*pi*Wn)/(2/T)));
% diskreetti suodatin saadaan bilineaarimuunnoksella
[B,A]=bilinear(Bs,As,1/T);
% plotataan suodattimen vaste
freqz(B,A);
```

taaj.: z-taso → s-taso

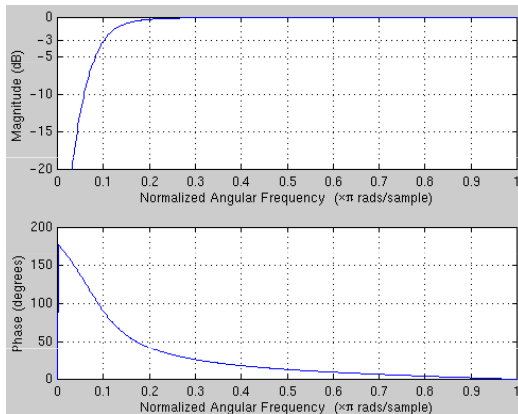
$$\Omega = \frac{2}{T} \tan\left(\frac{\omega T}{2}\right)$$

→ Magnitudivasteen -3 dB:n raja on $f=0.1 \cdot f_s$ kohdalla

Hyllysuotimet (IIR) Rajataajuuden määrittäminen

Vastekorjaus 29
DA / Klapuri & Virtanen

- Plotattu vaste: edellisen sivun tavallinen ylipäästösuodin, jonka rajataajuus on $0.1 \cdot (f_s/2)$.



Hyllysuotimet (IIR) 3.7 Piikkisuodatin

Vastekorjaus 30
DA / Klapuri & Virtanen

- Piikkisuodattimella voidaan korostaa tai leikata haluttua taajuutta
- Toisen asteen kaistanpäästösuodattimen siirtofunktiosta

$$H_{BP}(s) = H_0 \frac{(1/Q_\infty)s}{s^2 + (1/Q_\infty)s + 1}$$

```
[Bs,As]=butter(1,[.8 1.25], 's');  
→ Bs=[0 .45 0]; As=[1 .45 1];
```

voidaan johtaa piikkisuodattimen siirtofunktio

$$H(s) = 1 + H_{BP}(s) = \frac{s^2 + [(1 + H_0)/Q_\infty]s + 1}{s^2 + (1/Q_\infty)s + 1}$$

$$= \frac{s^2 + (V_0/Q_\infty)s + 1}{s^2 + (1/Q_\infty)s + 1}$$

- Taajuusvasteen maksimiarvon keskitajuudella määrää parametri V_0 , ja suhteellisen kaistanleveyden Q -arvo

Hyllysuotimet (IIR) Piikkisuodatin: esimerkki

Vastekorjaus 31
DA / Klapuri & Virtanen

- Suunnitellaan Matlabissa diskreettiaikainen piikkisuodatin
 - keskitajuus: $w_n = f_c / (f_s/2)$
 - vahvistus keskitajuudella desibeleinä: V_0 dB
 - terävyys, eli Q -arvo: Q

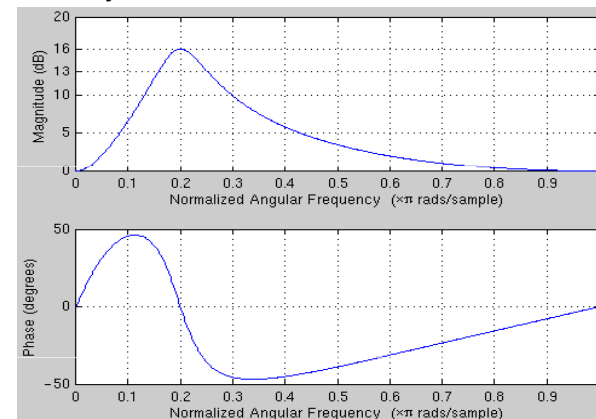
Matlab-koodi:

```
% speksataan halutut arvot suodattimen parametreille  
Wn = 0.2; V0dB=16; Q=2;  
T=0.5; % kiinteä muunnosvakio (näyteväli)  
V0lin=10^(V0dB/20); % Muunnetaan dB-vahvistus lineaarisesti  
% käytetään piikkisuodattimen siirtofunktiota (ks. ed. sivu)  
Bs=[1 V0lin/Q 1];  
As=[1 1/Q 1];  
% siirretään keskitajuus halutuksi alip-alip muunnoksella  
[Bs,As]=lp2lp(Bs,As,2/T*tan((2*pi*Wn)/(2/T)));  
% diskreettiaikainen suodatin:  
[B,A]=bilinear(Bs,As,1/T);  
% plotataan vaste  
figure(1); freqs(Bs,As); figure(2); freqz(B,A);
```

Hyllysuotimet (IIR) Piikkisuodatin: esimerkki

Vastekorjaus 32
DA / Klapuri & Virtanen

- Plotattu vaste: keskitajuus 0.2, Q -arvo 2, eli kaistanleveys $0.2/2 = 0.1$



Hyllysuotimet (IIR) Piikkisuodatin

Vastekorjaus 33
DA / Klapuri & Virtanen

- Edellä piikkisuodattimen keskitaajuus siirrettiin halutuksi Matlabissa alipäästö-alipäästö muunnoksella [...]=lp2lp(...)
- On tietysti olemassa siirtofunktio, jossa kaikki kolme parametria (myös keskitaajuus) esiintyvät valmiina

$$H(s) = \frac{s^2 + (\omega_c V_0 / Q_\infty) s + \omega_c^2}{s^2 + (\omega_c / Q_\infty) s + \omega_c^2}$$

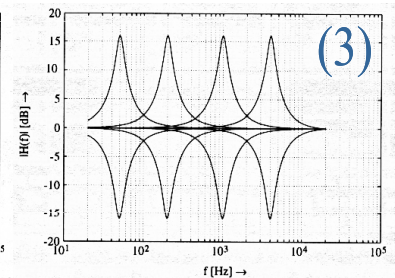
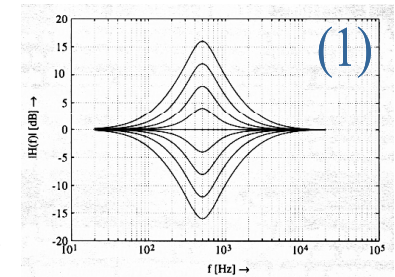
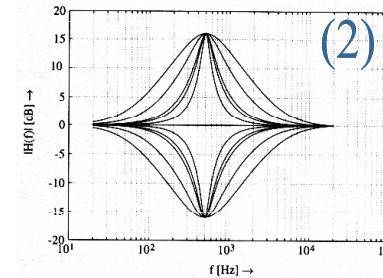
tässä ω_c on keskitaajuus, V_0 on vahvistus keskitaajuudella, ja Q on suotimen Q -arvo (terävyys)

- Yleensä on kuitenkin järkevämpää tallettaa taulukkoon vain perusmuoto, lähteä siitä liikkeelle, ja asettaa sitten keskitaajuus jne. muunnoksilla

Hyllysuotimet (IIR) Piikkisuodatin

Vastekorjaus 34
DA / Klapuri & Virtanen

- Piikkisuodattimen vaste
 1. V_0 :n arvoilla -16 dB ... 16 dB
 - $f_c = 500$ Hz; $Q_\infty = 1.25$;
 2. Q_∞ :n arv. 0.707, 1.25, 2.5, 3.5
 - $f_c = 500$ Hz; $V_0 = \pm 16$ dB
 3. f_c :n arv. 50, 200, 1000, 4000 Hz
 - $Q_\infty = 1.25$; $V_0 = \pm 16$ dB



Hyllysuotimet (IIR)

Vastekorjaus 35
DA / Klapuri & Virtanen

4 Hyllysuotimen suunnittelu digitaalisesta ali/yli/kaistanpäästösuodimesta

- Edellä suunniteltiin ensin analoginen ali/yli/kaistanpäästösuodatin, muunnettiin se hyllysuotimeksi, joka taas muunnettiin digitaalisesti suotimeksi
- Hyllysuodatin voidaan suunnitella myös muokkaamalla digitaalista ali/yli/kaistanpäästösuodatinta $H(z)$
- Sama periaatteet: kerrotaan digitaalinen siirtofunktio $H(z)$ halutulla sopivalla vahvistuksella H_0 ja lisätään 1
- Hyllysuotimen siirtofunktio:

$$H_{eq}(z) = 1 + H_0 H(z)$$

Vaihevasteen vaikutus

Vastekorjaus 36
DA / Klapuri & Virtanen

- Edellä on oletettu että alkuperäisen suodattimen (ali/yli/kaistanpäästö) vaihevaste päästökaistalla on 0.
- Erityisesti korkea-asteisille suotimille oletus ei enää päde, ja tuloksena saattaa olla vääristynyt hyllysuotimen vaste
- Sen sijaan että lisätään 1, voidaan käyttää myös jotain muuta all-pass suodatinta tai ylipäästö/alipäästö/kaistanestosuodatinta (ei käsitellä tällä kurssilla)

5 Parametriset suodinrakenteet (IIR)

- Parametriset suodinrakenteet mahdollistavat suodattimen parametrien säätämisen. Parametreja ovat:
 - vahvistus
 - keski-/rajataajuus
 - kaistanleveys
- Parametrien muuttelu tapahtuu kontrolloimalla niihin vaikuttavia suodinkertoimia

Parametriset suodinrakenteet (IIR)

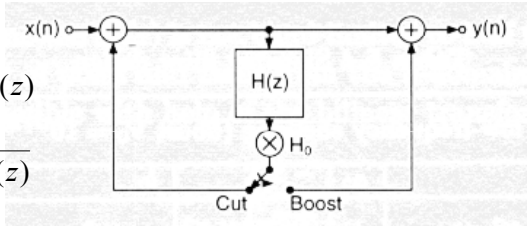
4.1 Feed forward / backward -rakenne

- *Toisistaan riippumaton* vahvistuksen, raja-/keskitaajuuden, ja kaistanleveyden kontrolli saavutetaan *korostukselle* feed forward (FW) -rakenteella ja *leikkaukselle* feed backward (FB) -rakenteella
 - ks. kuva

- Siirtofunktiot ovat

$$G_{FW}(z) = 1 + H_0 H(z)$$

$$G_{FB}(z) = \frac{1}{1 + H_0 H(z)}$$



missä $V_0 = 1 + H_0$ ja

$H(z)$ voi olla ali-, yli-, tai kaistanpäästösuodatin.

- Feed backward -tapauksessa sisäisen siirtofunktion täytyy olla muotoa $H(z) = z^{-1}H_1(z)$, jotta diskreetti toteutus olisi stabiili
 - viiveetön takaisinpäin kytkentä ei ole sallittu

Parametriset suodinrakenteet (IIR)

Feed forward / backward -rakenne

- Tyypilliset audiosuodattimet on mahdollista implementoida *ilman feed backward* -rakennetta
 - saavutetaan parametrien riippumaton hallinta korostuksen tapauksessa
 - leikkauksen tapauksessa kaistanleveys ja vahvistus jäävät toisistaan riippuviksi
 - esim. Regalia-suodatin: parametrinen suodinrakenne, joka perustuu siirtofunktion all-pass hajotelmaan
 - Regalia, Mitra. (1987). "Tunable digital frequency response equalization filters". *IEEE Trans. on Acoust., Speech, and Signal Processing*, Vol. ASSP-35 No. 1, Jan. 1987.

Vastekorjauksen taajuusalueita

Instrumentti	Ominaisuus	Viulu	Perusointi 200-1300 Hz Täyteläisyys 400 Hz Tiukkuus 1,5-2,5 kHz Jousen rahina 8 kHz
Bassorumpu	Perusointi 60-120 Hz Pahvisuus 250 Hz Märkyys 650 Hz Lyönti 3-5 kHz	Sähkökitara	Perusäänialue 80-800 Hz Täyteläisyys 200-500 Hz Kireys 1-2 kHz Kirkkaus 3-5 kHz
Virveli	Perusointi 100-200 Hz Pahvisuus 300-400 Hz Napakkuus 1 kHz Kireys 2-4 kHz Kirkkaus 6-10 kHz	Saksofonit	Vihlova nasaali 1 kHz Kireys 5 kHz
Tomit	Perusointi 80-200 Hz Humina 300-500 Hz Lyönti 3-5 kHz	Laulu	(Leikkaa alle 80 Hz:n HPF-kytkimellä taajuudet pois, lavan jyminät vaimenevat) Miesäänen perusalue 100-400 Hz Naisäänen perusalue 200-600 Hz Täyteläisyys 100-300 Hz Nasaali 800-1200 Hz Kirkkaus, selvyys > 3 kHz s-äänen 6,5-10 kHz Ilmavuus > 10 kHz
Hiitit ja symbaalit	Kireys 1 kHz Säkenöinti > 5 kHz		
Sahkibasso	Perusäänialue 40-160 Hz Humina 200-300 Hz "attack" 800-1200 Hz Metallisuus 1 kHz Kirkkaus 3-5 kHz		

6 Kvantisoinnin vaikutuksia

- Rajoitettu sananpituus johtaa erityyppisiin kvantisointivirheisiin
 - *sananpituus*: kuinka monta bittiä käytetään esittämään yhtä näytettä tai yhtä suodinkertoimen arvoa
- *Suodinkertoimien* kvantisointi
 - aiheuttaa lineaarista vääristymää, joka näkyy poikkeamana ideaalisesta taajuusvasteesta, hallittavissa oleva ja melko pieni ongelma
- *Signaaliarvojen* kvantisointi IIR-suodattimen sisällä (suodattimen tila)
 - IIR-suodattimessa tehdään takaisinkytkentää...
 - kvantisointi määrää maksimaalisen dynaamisen alueen
 - kohinakäyttäytyminen (suodattimen sisällä tapahtuvat pyöristykset)
 - limit-sykli: jaksollisia prosesseja suodattimessa, jotka johtuvat suotimen tilamuuttujien kvantisoinnista
 - häiriöt ovat erittäin häiritseviä kapeakaistaisuutensa (sinimäisyytensä) takia
 - tyypit: ylivuotosykli (→ skaalaus kuntoon), pienen mittakaavan sykli sisääntulon vaimetessa (→ ditheröinti), signaalin kanssa korreloiva sykli

Kvantisoinnin vaikutuksia

- Käytännön vinkki: esim. C-kielessä suodattimen kertoimet ja suodattimen tila kannattaa olla tyyppiä double, riippumatta siitä että itse signaali olisi esim. tyyppiä float, tai jopa byte
- Keskittymällä jo suodattimen suunnittelussa sananpituuden minimointiin, saadaan kvantisoinnista aiheutuvia häiriöitä vähennettyä pienemmälläkin sananpituudella (ei käsitellä tällä kurssilla)