

Suodatinpankit ja muunnokset*

Lähteet: Zölzer. "Digital audio signal processing". Wiley & Sons.
Spanias et al. "Audio signal processing and coding". Wiley & Sons
Smith, "Spectral audio signal processing", online book
Saramäki. "Multirate signal processing". Kurssi SGN-2106.

*1 Aihealue on erittäin laaja. Esitys tässä on tarkoituksellisesti suppea, keskittyen vain tärkeimpiin audiosignaalin käsittelyssä vastaan tuleviin ideoihin ja periaatteisiin.



Suodatinpankit

- Johdanto
- Kriittinen näytteistys, puolikaistasuodin
- QMF-suodatinpankki, prototyypisuodatin
- Laskostumisvirheen välttäminen, modifioitu pankki
- Täydellinen rekonstruktio, komplementtisuodattimet
- MCF-suodatinpankki

Muunnokset

- Johdanto
- Diskreetti Fourier-muunnos
- Diskreetti kosini-muunnos
- Modifioitu DCT
- Suodatinpankit vs. muunnokset

Johdanto

1 Johdanto

- Suodatinpankkeja käytetään mm. seuraavissa yhteyksissä:
 - kuulon malleihin perustuvassa koodauksessa
 - monikaistaisissa vastekorjaimissa
 - monikaistaisessa dynamiikan hallinnassa
 - monikaistaisessa tilaprosessoinnissa (kaiun simuloinnissa)
 - konekuulossa ja äänen sisällön analyysissä
- Ihmisen kuulojärjestelmä tekee taajuusanalyysiä
 - kriittiset kaistat kuulossa, sisäkorvan rakenne
 - tästä syystä monissa äänenkäsittelyn sovelluksissa törmätään suodatinpankkeihin

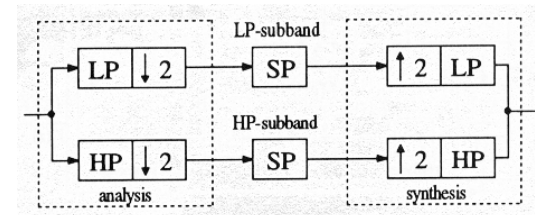
Johdanto

1.1 Suodatinpankit audiokoodauksessa

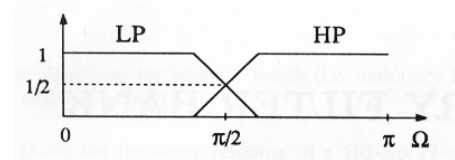
- Kuulon malleihin perustuvassa audiokoodauksessa signaali prosessoidaan alikaistoilla
 - näin voidaan hyödyntää taajuuspeittoilmiötä ihmiskuulossa
 - tarvitaan suodatinpankki, eli joukko suodattimia, jotka poimivat vierekkäisiä kapeita kaistoja, joilla koko taajuusalue katetaan
- Koodauksessa käytetyt pankit koostuvat
 - analyysipankista, joka hajottaa signaalin alikaistoihin
 - synteesipankista, joka rekonstruoi laajakaistaisen signaalin ulostuloon
- Yleensä audiokoodauksessa käytetään ns. kriittisesti näytteistettyjä, täydellisen rekonstruktion pankkeja
 - **kriittinen näytteistys**: jos pankki jakaa taajuusalueen 32:een kaistaan, kullakin kaistalla näytteistystaajuus pudotetaan 1/32:een
 - datamäärä ei kasva kaistoihin jaossa (aiheesta lisää seuraavilla sivuilla)
 - **täydellinen rekonstruktio**: mikäli alikaistoilla ei tehdä prosessointia, signaali voidaan synteesipankilla rekonstruoida virheettömänä

2 Kriittinen näytteistys 2:lla alikaistalla

- Kuva: lohkokaavio kahteen alikaistaan jakavasta, kriittisesti näytteistetyistä analyyysi-synteesi pankista



- Kuva: Kaistoihin jakavien suotimien magnitudivasteet

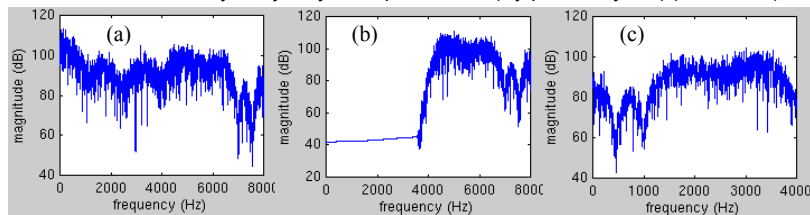


Kriittinen näytteistys 2:lla alikaistalla

2.1 Desimointi analyysipankissa

Suodinpankit ja muunnokset 5
DA / Klapuri & Virtanen

- Mitä analyysipankissa tapahtuu?
 - LP + $\downarrow 2$: Alipäästösuoatetaan ja desimoidaan suhteella 2
 - HP + $\downarrow 2$: Ylipäästösuoatetaan ja desimoidaan suhteella 2
- Kun ylempi puolikaista $[f_s/4, f_s/2]$ desimoidaan, se laskostuu (peilautuu) alemmille taajuuksille $[0, f_s/4]$
 - laskostuminen ei sotke taajuusinformaatiota, sillä alemmat taajuuskomponentit suodatettiin pois ylipäästösuoatuksella
 - kuva: (a) alkuperäisen signaalin spektri, (b) ylipäästösuoatettu (HP), (c) ylip. suodatettu ja desimoitu (HP + $\downarrow 2$), laskostunut spektri
 - huomaa näytteistystaajuuden putoaminen (Nyquistin taajuus (c):ssä 4 kHz)

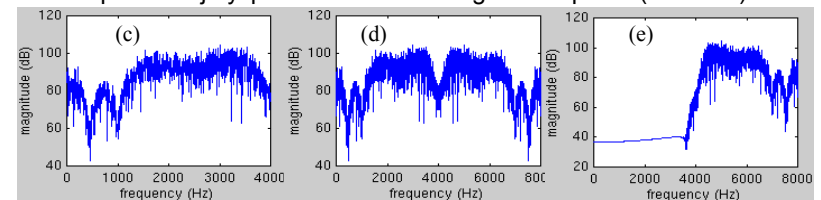


Kriittinen näytteistys 2:lla alikaistalla

2.2 Interpolointi synteisipankissa

Suodinpankit ja muunnokset 6
DA / Klapuri & Virtanen

- Mitä synteisipankissa tapahtuu?
 - $\uparrow 2$ + LP : Interpoloidaan suhteella 2 ja alipäästösuoatetaan
 - $\uparrow 2$ + HP : Interpoloidaan suhteella 2 ja ylipäästösuoatetaan
- $\uparrow 2$ -operaatio käytännössä:
 - lisätään signaaliin (lukuvektoriin) nollia näytteiden väleihin
 - kerrotaan signaali 2:lla, jotta sen teho ei muutu nollien lisäyksestä
- Tarkastellaan taas ylempää puolikaistaa
- Kuva: (c) analyysipankissa ylip. suodatetun ja desimoitun signaalin spektri, (d) c:stä interpoloimalla ($\uparrow 2$) saatu spektri, (e) c:stä interpoloidun ja ylipäästösuoatetun signaalin spektri ($\uparrow 2$ + HP)



Kriittinen näytteistys 2:lla alikaistalla

Interpolointi synteisipankissa

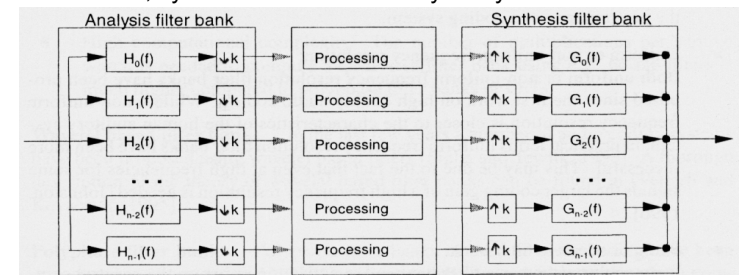
Suodinpankit ja muunnokset 7
DA / Klapuri & Virtanen

- Ylempikin puolikaista saatiin siis palautettua (miltei) ennalleen desimoinnin jälkeen
 - alkuperäinen signaali voidaan rekonstruoida kokonaan summaamalla puolikaistat synteisipankin ulostulossa

3 Useita alikaistoja tasavälein

Suodinpankit ja muunnokset 8
DA / Klapuri & Virtanen

- Kahdesta alikaistasta ei ole vielä paljon iloa
- Periaate on helppo skaalata n :lle tasaväliselle alikaistalle
- Kuva: n alikaistaa, joista jokainen desimoidaan suhteella k
 - kaistojen on oltava samanlevyisiä, jotta kaikki voidaan desimoida samalla suhteella $k \rightarrow$ *tasavälisen taajuuserottelun pankki*
 - mikäli $n=k$, kyseessä on kriittinen näytteistys



Useita alikaistoja tasavälein

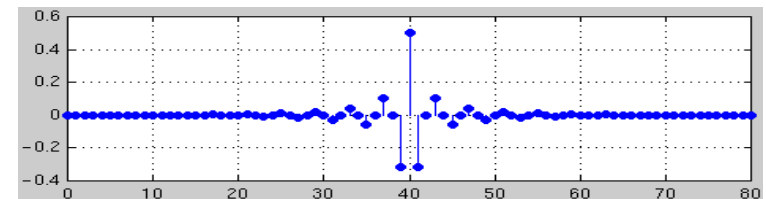
- Mitä analyysipankissa tapahtuu n :llä kaistalla?
 - taajuusalue $[0, f_s/2]$ jaettu n :ään kaistaan, kunkin leveys $(f_s/2) / n$
 - analyysipankin kaistanpäästösuodatin $H_m(f)$ poimii kaistan m
 - kaista m kattaa taajuudet

$$\left[\frac{mf_s}{2n}, \frac{(m+1)f_s}{2n} \right], m = 0, 1, \dots, n-1$$

- desimoitaessa ko. kaista laskostuu taajuuksille $[0, f_s/(2n)]$
 - jälleen tämä ei haittaa, koska ko. taajuudet on suodatettu pois
- Synteesipankissa
 - interpolointi suhteella k ($k=n$) moduloi kaistan $[0, f_s/(2n)]$ moninkertaisena kaikille eri alikaistoille
 - kukin alikaista poimitaan omalle taajuusalueelleen synteesipankin kaistanpäästösuodattimella $G_m(f)$ (poimii saman alueen kuin $H_m(f)$)

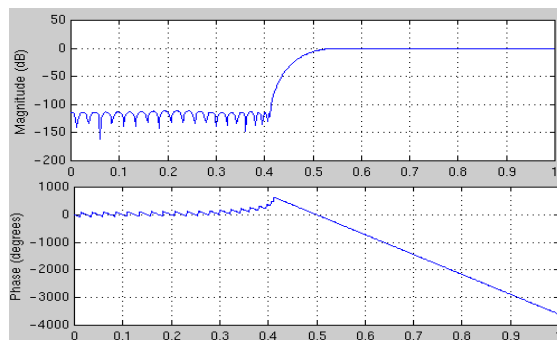
4 Puolikaistasuodatin

- Palataanpa vielä kahteen alikaistaan jakavaan pankkiin
- Puolikaistasuodattimella on se mukava ominaisuus, että se *voidaan toteuttaa laskennallisesti tehokkaasti*
- Kuva: esimerkki 80 tapin mittaisesta FIR-suodattimesta, joka poimii ylemmän puolikaistan $[f_s/4, f_s/2]$
 - parilliset kertoimet ovat nollija, lukuunottamatta keskimmistä
 - impulssivaste on symmetrinen
 - n -mittaisella FIR:llä konvolointiin tarvitaan vain $n/4 + 1$ kertolaskua kutakin sisääntulon näytettä kohden
 - voidaan tehdä suhteellisen jyrkkiä suodattimia myös FIR:ejä käyttäen



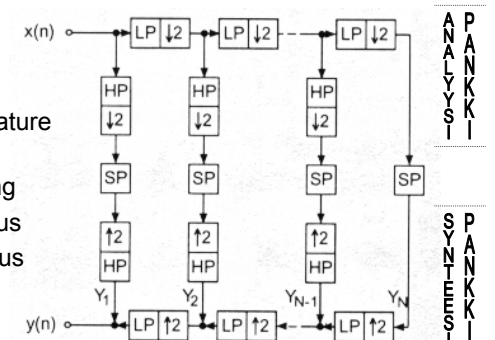
Puolikaistasuodatin

- Kuva: magnitudi- ja vaihevaste edellisellä sivulla esitetylle ylemmän puolikaistan päästävälle suotimelle
 - FIR:n etu: vaihevaste päästökaistalla on täysin lineaarinen
 - päästökaistan signaali on alkuperäisen viivästetty kopio



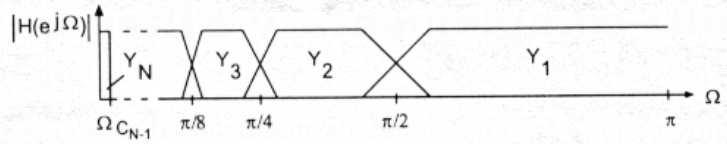
5 QMF-suodinpankki

- Kuva: oktaavikaistoihin jakava QMF-suodatinpankki, joka käyttää kriittistä näytteistystä (oktaavi=taajuusväli $[f, 2f]$)
 - peräkkäisiä alipäästö / ylipäästö -jakoja puolikaistoihin
 - jakojen jälkeen puolikaistat desimoidaan kertoimella 2
 - alempi kaista jaetaan yhä uudelleen
- Selityksiä:
 - QMF-pankki = Quadrature Mirror Filter bank
 - SP = signal processing
 - LP = alipäästösuodatus
 - HP = ylipäästösuodatus
 - ↓2 = desimointi
 - ↑2 = interpolointi



5.1 QMF-pankin alikaistat

- Kuva: hajotelman tuloksena saadaan alikaistat $Y_1 \dots Y_N$



- Kaistojen rajataajuudet ovat

$$\Omega_{Ck} = 2^{-k} \pi \Rightarrow f_{Ck} = 2^{-k} (f_s / 2)$$

missä $k = 1, 2, \dots, N - 1$

- Tämä kaistajako seuraa siitä että
 - irrotettu ja desimoitu ylempi puolikaista on valmis sellaisenaan
 - alempi puolikaista jaetaan yhä uudelleen kahteen puolikaistaan
 - ks. edellisen sivun lohkokkaavio

QMF-pankin alikaistat

- Kyseessä on nyt **epätasavälisen taajuuserottelun** pankki
 - kaistanleveydet puolittuvat alaspäin mennessä
 - kaistojen rajataajuudet muodostavat edellisellä sivulla esitetyn geometrisen sarjan, eivätkä jakaudu lineaarisesti
- Myös näytteistystaajuus on kullakin kaistalla omansa
 - matalille kaistoille tapahtuu monta peräkkäistä desimointia
 - synteesipankissa vastaavasti peräkkäisiä interpolointeja
- Huomaa että tässäkin pankissa **datamäärä pysyy vakiona** kaistoihin jakojen ja desimointien tuloksena
 - alkuperäinen datamäärä on Sf_s , missä S on signaalin kestoaika sekunneissa ja f_s näytteistystaajuus
 - datamäärä, kun jako kaistoihin on tapahtunut: $S(0.5f_s + 0.25f_s + 0.125f_s + \dots)$ missä näytteistystaajuudet on lueteltu ylimmästä kaistasta alkaen
 - kyse on kriittisestä näytteistyksestä

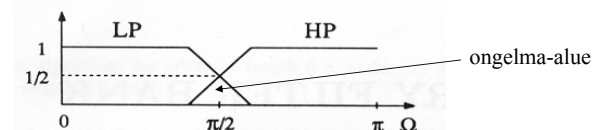
5.2 Prototyypisuodatin

- Samaa alipäästö- ja ylipäästösuodatinta** voidaan käyttää kaikissa peräkkäisissä alipäästö/ylipäästö jaoissa
 - puhutaan saman "prototyypisuodattimen" käytöstä
- Suodattimien vaste annetaan aina **suhteessa näytteistystaajuuteen**
 - esim. rajataajuus tietylle suodattimelle määrätään kohtaan $0.3f_s$
- Kun QMF-pankissa alemman puolikaistan näytteistystaajuutta lasketaan suhteella 2, saadaan uusi näytteistystaajuus

$$\hat{f}_s = f_s / 2$$
- Uudella näytteistystaajuudella alempi puolikaista $[0, f_s / 4]$ täyttää koko uuden taajuusalueen $[0, \hat{f}_s / 2]$
 - nyt samojen suodattimien rajataajuus onkin $\hat{f}_s / 4 = f_s / 8$
 - soveltamalla samaa prototyypisuodatinta **sellaisenaan** uudessa näytteistystaajuudessa, se jakaa alemman puolikaistan uudelleen
 - alkuperäisessä näytteistystaajuudessa ajatellen päästökaista kapenee puolella, ja myös siirtymäkaista jyrkkenee puolella
 - ns. *multirate signaalinkäsittelyä*: jyrkkiä suodattimia pienellä kerroinmäärällä

6 Laskostumisvirheen välttäminen

- On selvää, että kriittisesti näytteistetyssä pankissa tapahtuu hieman **ei-toivottua laskostumista alikaistoilla**
 - suodattimet eivät ole ideaalisen jyrkkiä (siirtymäkaista, ei porras)
 - kun esim. desimoidaan suhteella 2, laskostuu se osa siirtymäkaistasta, joka ylittää *uuden* Nyquistin rajataajuuden $\pi/2$ (toisin ilmaisten $f_s/4$)
- Alla on kertauksena esitetty kahteen alikaistaan jakavan kriittisesti näytteistävän pankin ali- ja ylipäästösuodattimien magnitudivasteet
 - kyseessä on QMF-pankin erikoistapaus, jossa kaistoja on vain 2

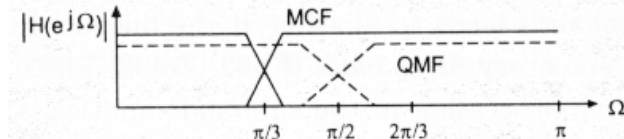


Laskostumisvirheen välttäminen

- Audiokoodauksessa käytettävät suodatinpankit suunnitellaan yleensä siten, että **synteesipankki eliminoi** alikaistoilla tapahtuvan laskostumisen ulostuloon
 - saavutetaan ns. täydellinen tai melkein täydellinen rekonstruktio huolimatta alikaistoilla tapahtuvasta ei-toivotusta laskostumisesta
 - suodatinpankin rekonstruointivirheet ovat mitättömiä verrattuna enkoodauksessa ja dekodauksessa tuleviin virheisiin
- Useissa muissa sovelluksissa sen sijaan ei riitä, että synteesipankki kompensoi analyysipankissa tapahtuvan laskostumisen
 - monikaistaisissa vastekorjaimissa, dynamiikan hallinnassa, tilaprosessoinnissa, äänen analyysissä
 - pitää suunnitella analyysipankki, jossa ei tapahtu laskostumista alikaistoilla

Laskostumisvirheen välttäminen

- Jotta voitaisiin välttää laskostumista alikaistoilla, voidaan suodatinpankkia muuttaa hieman
 - ei-toivottua laskostumista tapahtuu ali- ja ylipäästökaista rajalla, sillä näytteistystaajuutta lasketaan suhteella 2, vaikka kaistoihin jakava suodatin ei ole täydellinen
- Kuva: muutetun prototyypisuodattimen (MCF-suodatinpankki, multi-complementary filter bank) taajuusvaste verrattuna edelliseen (QMF)

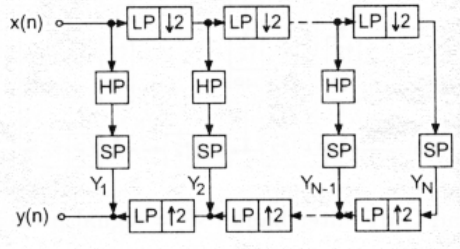


- Modifioidussa suodatinpankissa puolikaistojen raja on siirretty $\pi/2$:sta alemmalle taajuudelle
 - desimoitaessa alipäästökaistaa suhteella 2 laskostumista ei tapahdu
 - **ylempää puolikaistaa ei voida desimoida lainkaan**

Laskostumisvirheen välttäminen

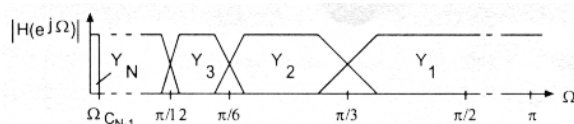
6.1 Modifioitu suodatinpankki

- Kuva: modifioitu suodatinpankki, jossa toistetaan uutta puolikaistoihin jakoa
 - erona QMF-pankkiin on, että ylempää kaistaa ei desimoida



- Kaistarajat:

$$\Omega_{ck} = \frac{\pi}{3} 2^{-k+1}$$



Laskostumisvirheen välttäminen

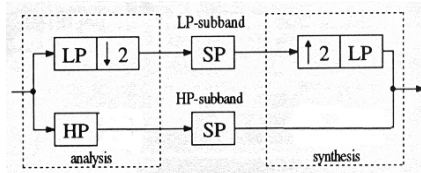
Modifioitu suodatinpankki

- Datamäärä ei pysy vakiona esitettyssä suodatinpankissa, vaan kasvaa kaistoihin jaon seurauksena
 - alkuperäinen datamäärä on Sf_s , missä S on signaalin kestoaika sekunneissa ja f_s näytteistystaajuus
 - datamäärä, kun jako kaistoihin on tapahtunut: $S(f_s + 0.5f_s + 0.25f_s + 0.125f_s + \dots) \approx 2Sf_s$ missä näytteistystaajuudet on lueteltu ylimmästä kaistasta alkaen
 - datamäärä alikaistoihin jaossa kaksinkertaistuu, **riippumatta kaistojen lukumäärästä**
- Useissa sovelluksissa datamäärän kohtuullinen kasvu ei kuitenkaan ole ongelma
 - vastekorjaus, monikaistainen dynamiikan hallinta, äänen analyysi jne.

7 Täydellinen rekonstruktio

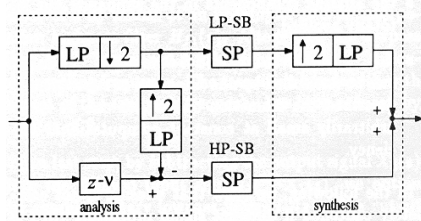
- Ns. **komplementtisuodattimien** avulla saadaan suodinpankille täydellinen rekonstruktio ulostuloon

- Kuva 1: modifioidun pankin kahteen kaistaan jakava peruslohko



- Kuva 2: peruslohko toteutettuna komplementtisuotimilla

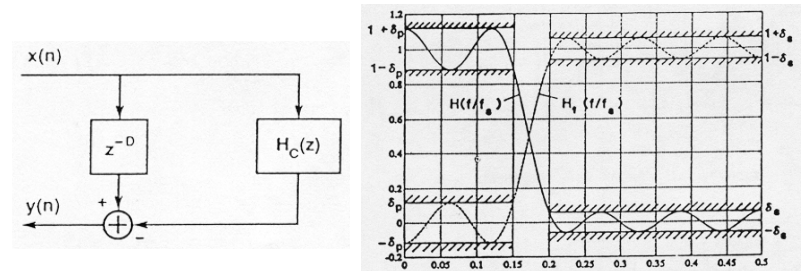
- ylempi kaista saadaan rekonstruoida alempi ja vähentämällä se sopivasti viivästetystä sisääntulosta
- näin voidaan taata, että alikaistat summaamalla saadaan rekonstruotua alkuperäinen signaali



Täydellinen rekonstruktio

7.1 Komplementtisuodattimet

- Kuva: komplementtisuodattimien toteutus ja niiden vasteiden riippuvuus toisistaan [Saramäki, SGN-2106]
 - tietyin FIR-suodattimen $H_C(z)$ komplementtisuodatin saadaan
 - suodattamalla sisääntulosignaali $H_C(z)$:lla
 - vähentämällä suodatettu signaali alkuperäisestä sisääntulosta, jota on viivästetty suodattimen $H_C(z)$ aiheuttaman viiveen verran



Täydellinen rekonstruktio

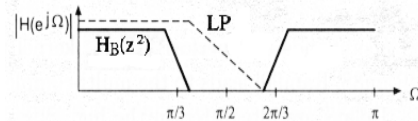
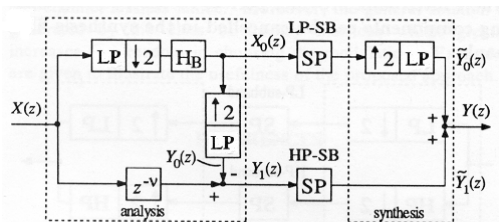
7.2 Kaksivaiheinen alipäästösuodatus

- Alempi osakaista kannattaa erottaa kaksivaiheisesti, kuten oheisessa kuvassa on esitetty

- Näytteistystaajuus pudotetaan puoleen käyttäen tehokkaasti toteutettavissa olevaa puolikaistasuodatinta

- Varsinaisella prototyyppisuodattimella rajataan haluttu kaista

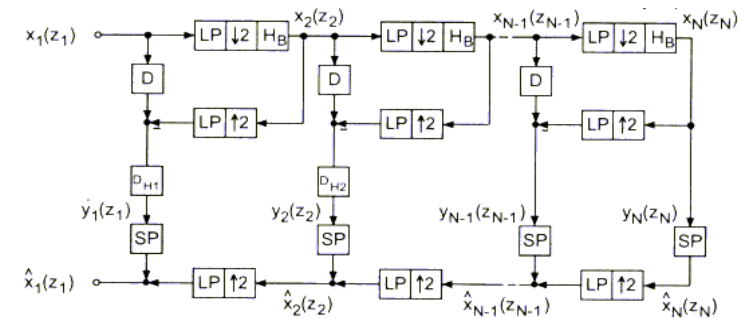
- Alkuperäisessä näytteistystaajuudessa ajatellen prototyyppisuodattimen $H_B(z^2)$ rajataajuus on $\pi/3$, mutta näytteistystaajuuden puolittamisen takia suodatin $H_B(z)$ voidaan suunnitella käyttäen rajataajuutta $2\pi/3$
 - etu: myös siirtymäkaistan leveys puolittuu desimoinnin myötä



Täydellinen rekonstruktio

7.3 MCF-suodinpankki

- Kuva: Käyttäen edellisellä sivulla esitettyä peruslohkoa saadaan MCF-suodinpankki (multi-complementary filter bank)
 - kuvassa "D" ja "D_H#" ovat viivelohkoja, muut merkinnät kuten edellä
 - vrt. QMF-pankkiin: tässä peruslohko on toteutettu komplementtisuotimilla, eikä yläkaistoja desimoida



Täydellinen rekonstruktio MCF-suodinpankki

Suodinpankit ja muunnokset 25
DA / Klapuri & Virtanen

- Alikeistojen näytteistystaajuudet ja kokonaisdatamäärä kaistoihin jaon jälkeen ovat samat kuin kohdassa 6.1 esitetyssä modifioidussa suodinpankissa
 - ei-toivottua laskostumista ei kummassakaan tapahdu alikaistoilla
- MCF-pankki tuottaa täydellisen rekonstruktion ulostuloon, mikäli alikaistoilla ei tehdä prosessointia ("SP"-lohkot)
- Kaistoihin jakoa voi muuttaa säätämällä prototyyppisuodattimen $H_B(z)$ rajataajuutta
 - silti kaistarajat ovat edelleen muotoa

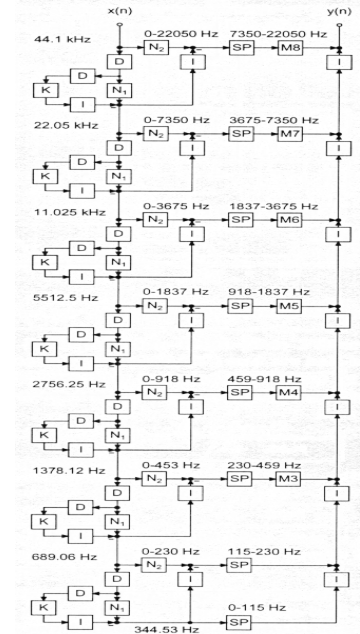
$$\Omega_{Ck} = a\pi 2^{-k}$$

missä a on vakio

- muuttamalla myös desimointisuhdetta (edellä $\downarrow 2$) saadaan lisää vapausasteita

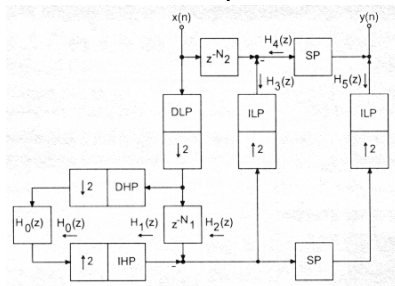
7.4 Esimerkki

- Kuvassa on esitetty 8-kaistainen MCF-pankki
- Merkinnot eri kuin aiemmin
 - D: ali/ylipäästö+desimointi
 - I: interpolointi+ali/ylipäästö
 - K: prototyyppisuodatin (kernel/prototype filter)
 - N_1 : viive 1
 - N_2 : viive 2
 - M_i : ryhmäviiveen kompensointi kaistalle i
- Kuvaan on merkitty myös näytteistystaajuudet ja kaistat kussakin vaiheessa

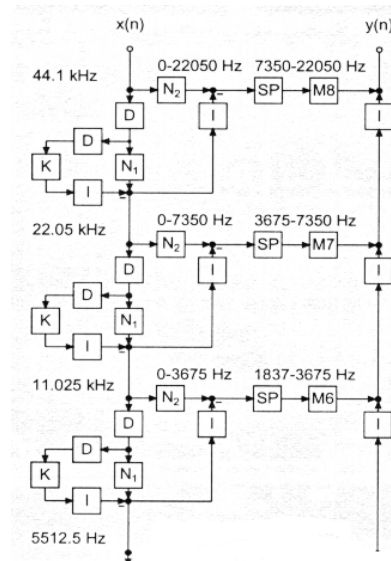


Esimerkki

- Kuva 1:
 - 8-kaistaisen MCF-pankin kaavio zoomattuna
 - selostetaan luennolla
- Kuva 2: peruslohko hieman auki purettuna



Suodinpankit ja muunnokset 27
DA / Klapuri & Virtanen



Suodinpankit ja muunnokset 28
DA / Klapuri & Virtanen

Esimerkki

- Taulukko: kaistojen rajataajuudet ja siirtymäkaistojen leveydet 7:lle eri siirtymäkaistalle 8:n eri kaistan välissä

f_S [kHz]	f_{C1} [Hz]	f_{C2} [Hz]	f_{C3} [Hz]	f_{C4} [Hz]	f_{C5} [Hz]	f_{C6} [Hz]	f_{C7} [Hz]
44.1	7350	3675	1837.5	918.75	459.375	≈ 230	≈ 115
TB [Hz]	1280	640	320	160	80	40	20

8 Muunnokset

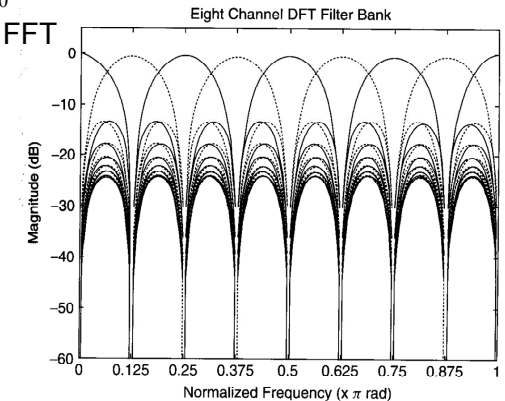
- Kehyspohjaisessa signaalinkäsittelyssä signaali ikkunoidaan jonka jälkeen voidaan käyttää (taajuus)muunnosta
- Muunnoksessa lasketaan ristitulo ikkunoidun signaalin ja muunnoksen kunkin kantafunktion välillä
- Audiosignaalin käsittelyssä käytetyissä muunnoksissa muunnoksen kantafunktiot ovat tyypillisesti eri taajuisia sinejä tai kosineja, tai kompleksisia eksponentteja
- Ulostulo on signaalin spektri ko. kehyksessä
- Tehokkaita algoritmeja ristitulon laskemiseen kaikille taajuuksille yhtä aikaa

8.1 Diskreetti Fourier-muunnos (DFT)

- Kantafunktiot kompleksisia eksponentteja

$$X(k) = \frac{1}{\sqrt{2M}} \sum_{n=0}^{2M-1} x(n) e^{-jnk\pi/M}, \quad 0 \leq k \leq 2M-1$$

- Tehokas algoritmi: FFT
- Taajuusvasteet:



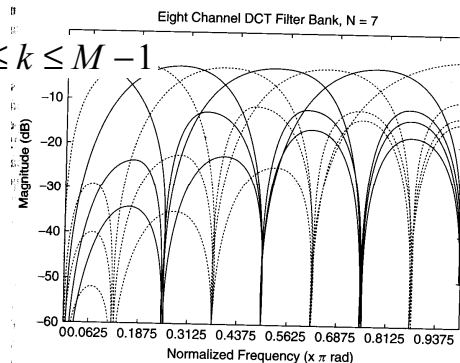
8.2 Diskreetti kosini-muunnos (DCT)

- Kantafunktiot kosineja:

$$X(k) = c(k) \sqrt{\frac{2}{M}} \sum_{n=0}^{M-1} x(n) \cos \left[\frac{\pi}{M} \left(n + \frac{1}{2} \right) k \right], \quad 0 \leq k \leq M-1$$

- Missä $c(0) = 1/\sqrt{2}$ ja $c(k) = 1/\sqrt{2}$, $1 \leq k \leq M-1$

- Tehokas algoritmi: Fast cosine transform
- Taajuusvasteet:



8.3 Modifioitu diskreetti kosini-muunnos (DCT)

- Kantafunktiot kosineja:

$$X(k) = \sqrt{\frac{2}{M}} \sum_{n=0}^{2M-1} x(n) \cos \left[\frac{\pi}{M} \left(n + \frac{1}{2} + \frac{M}{2} \right) \left(k + \frac{1}{2} \right) \right], \quad 0 \leq k \leq M-1$$

- Tehokas algoritmi
- Erot DCT-muunnokseen
 - Sisäänmenossa kaksi kertaa enemmän näytteitä kuin ulostulossa -> muunnos aiheuttaa aikatazon laskostumista
 - Vierakkäiset kehukset kumoavat laskostumisen synteesipankissa kun käytetään sopivaa ikkunafunktiota
 - Mahdollistaa yhtä aikaa täydellisen rekonstruktion, kriittisen näytteistykseen ja päällekkäin olevat kehukset -> erittäin hyödyllinen audiokoodauksessa

Suodatinpankit vs. muunnokset

- Suodatinpankin alikaistan k ulostulo on konvoluutio suodattimen $H_k(n)$ ja signaalin välillä, laskettuna $M:n$ näytteen välein (desimointi)
- Muunnoksien kantaa k vastaava ulostulo on ristitulo ikkunoidun signaalin ja kantavektorin $G_k(n)$ välillä
- Matemaattisesti täysin samoja, kun $H_k(-n)$ on ikkunafunktion ja kantafunktion pisteittäinen tulo
 - Suodatinpankkeja ja muunnoksia voidaan käsitellä samoilla matemaattisilla työkaluilla
- Eroja toteutuksessa: muunnokset nopeita laskea kun kaistoja paljon
- Suodatinpankkitoteutus mahdollistaa helpommin epälineaarisen taajuuserottelun ja suodattimien spesifiointin kaistoittain