



S-38.211 Signaalinkäsittely tietoliikenteessä I Signal Processing in Communications (2 ov)

Syksy 1998
8. Luento: Kaiunpoisto

prof. Timo Laakso
Vastaanotto torstaisin klo 10-11
Huone G210, puh. 451 2473
Sähköposti: timo.laakso@hut.fi

KAIUNPOISTO (LM19)



- ◆ Tavallinen puhelinyhteys käyttää yhtä johtoparia kaksisuuntaiseen lähetykseen. Oma puhe kuuluu myös omasta mikrofonista, mutta se ei häiritse kunhan se ei sisällä riittävän viiveen päästä saapuvaa *kaukopään kaikua* (esim. satelliitin kautta siirrettävät ulkomaan puhelut). Toiminta on itse asiassa lähempänä *simplex*-lähetystä kuin *full-duplexia* - hyvin tapoihinhan kuuluu puhua vuorotellen.
- ◆ *Puheensiirossa* kaiunpoistoa voidaan käyttää häiritsevän kaikusignaalin vaimentamiseen
- ◆ *Datasiirossa* kaiunpoisto mahdollistaa samaan tapaan *samanaikaisen, kaksisuuntaisen* tiedonsiirron samalla taajuuskaistalla datayhteyksillä. Näin säästetään taajuuskaistaa.

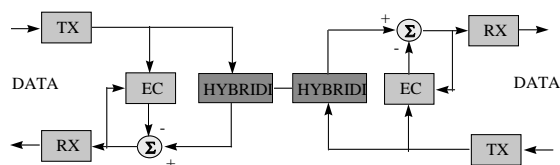
...Kaiunpoisto



Kaiunpoistaja toimii kaksisuuntaisen linkin molemmissa päissä ja sen toimintaidea on seuraava:

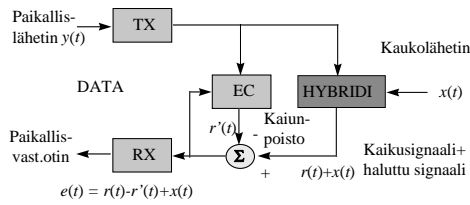
- 1) Tunnetaan (opitaan adaptiivisesti) *siirtofunktio* omasta lähettimestä omaan vastaanottimeen
- 2) Muodostetaan *kaiun kopio*
- 3) *Vähennetään* kopio vastaanotetusta signaalista jolloin jäljelle jää *toisen lähettimen* lähettämä signaali.

Kaksisuuntainen johtotransmissio



- ◆ **Kuvassa 19-1** on kaiunpoistomenetelmä kaksisuuntaiselle tiedonsiirrolle. *Hybridi* on moduuli, joka toteuttaa virtuaalisen nelijohdinkytken. *Kaiunpoistaja* (echo canceler, EC) on *adaptiivinen FIR-suodatin*, joka oppii hybridin vasteen ja muodostaa lähetetyn signaalin kopion.

Kaiunpoistajan matemaattinen malli



- ◆ **Kuvassa 19-2** on kaiunpoistajan signaalitason tarkastelu.
- ◆ Näemme, että paikallinen vastaanotin saa kaukolähettimen signaalin, jos malli on *konvergoitunut*

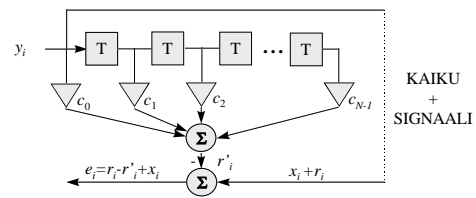
$$e(t) = r(t) - \hat{r}(t) + x(t) \Big|_{r(t)=\hat{r}(t)} = x(t)$$

3.11.1998

Teletekniikan laboratorio

Sivu 5

FIR-suodinrakenne kaiunpoistoon



- ◆ **Kuvassa 19-3** on kaiunpoistoon soveltuva FIR-suodatin, jonka kertoimien adaptointi voidaan tehdä *stokastisella gradientialgoritilla*.

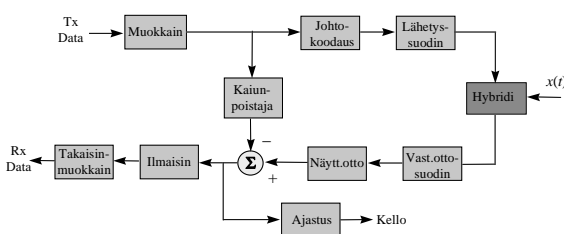
3.11.1998

Teletekniikan laboratorio

Sivu 6

3

Kaiunpoistovastaanottimen lohkokaavio



- ◆ **Kuvassa 19-4** on kaaviokuva kaksisuuntaisesta, digitaalisesta tilaajaliittymästä.

3.11.1998

Teletekniikan laboratorio

Sivu 7

...Kaiunpoistovastaanottimen lohkokaavio

- ◆ *Muokkain (scrambler)* muokkaa signaalia sellaiseksi, että ajoituksen muodostus onnistuu vastaanotimessa
- ◆ *Johtokoodauksella* vaikutetaan signaalin spektriin, (vaikkapa poistetaan DC-komponentti),
- ◆ *Lähetys-suodatin* vaimentaa korkeita taajuuksia (RFI, ylikuuluminen)
- ◆ *Kaiunpoistaja* sijoitetaan kohtaan, jossa kaikureitti on lineaarinen
- ◆ *Vastaanottosuodatin* estää laskostumisen
- ◆ Seuraavaksi signaali näytimeistään
- ◆ *Kaiunpoiston* jälkeen suoritetaan *ilmaisu*
- ◆ Ilmaistu bittijono viedään lopuksi *takaisinmuokkaimelle*

3.11.1998

Teletekniikan laboratorio

Sivu 8

4

Näytteenottotaajuuden valinta



- ◆ Näytteenottotaajuutta valittaessa on huomioitava kaksi asiaa: kaiunpoistajan *monimutkaistuminen* ja *ajoituksen* muodostuksen helppous.
- ◆ *Datan* kannalta katsoen symbolitaajuinen näytteenotto on riittävä, mutta *ajoituksen muodostus* tarvitsee yleensä symbolitaajuuteen nähden kaksinkertaisen taajuuden.
- ◆ Tästä syystä kaiunpoistajalla on usein *eri näytteenottotaajuudet* sisäänmenossa ja ulostulossa.

Kantataajuinen kanava (LM 19.2)



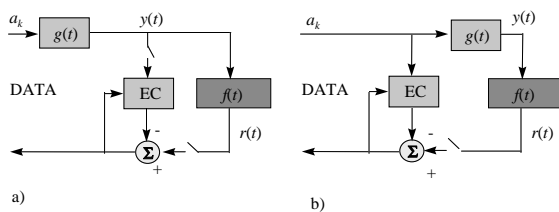
- ◆ *Kantataajuisen kanavan* kaiunpoisto eroaa huomattavasti *päästökaistakanavan* kaiunpoistosta. Tarkastelemme seuraavaksi lähetettyä PAM-signaalia

$$y(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} a_m g(t - mT) \quad (19.1)$$

- ◆ Kaikureitin siirtofunktio on $F(j\omega)$. Määritellään lisäksi $h(t) = g(t) * f(t)$, jolloin saamme *kaiuvasteen* muotoon

$$r(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} a_m h(t - mT) \quad (19.2)$$

Kantataajuinen kaiunpoistaja



- ◆ **Kuvassa 19-5** on esitetty kaksi vaihtoehtoa *kantataajuisen kanavan* kaiunpoistoon:

...Kantataajuinen kaiunpoistaja



- ◆ Koska lähetetyn signaalin ja kaiun kaistaleveys on suurempi kuin puolet symbolinopeudesta, niin **Kuvan 19-5a** tapauksessa tarvitaan näytetaajuus, joka on yli kaksi kertaa symbolitaajuus.
- ◆ **Kuvan 19-5b** tapauksessa sisäänmenon näytteenotto on symbolitaajuista, mutta ulostulon näytetaajuuden pitää olla korkeampi!

Lomitettu kaiunpoistaja



- ◆ *Lomitetut* kaiunpoistajat ovat ratkaisu näytetaajuuksien yhteensopivuusongelmaan. Koska lähetykskello on saatavilla, on luonnollista näytteistää kaikusignaalia taajuudella, joka on symbolitaajuuden kokonaiskerrannainen ($= R$). Vastaanotetun kaikusignaalin näytteet ovat nyt

$$r_k(l) = r\left(k + \frac{l}{R}T\right), \quad 0 \leq l \leq R-1 \quad (19.3)$$

missä k edustaa symbolin näyteenottohetkeä. Tämä esitysmuoto johtaa luontevasti *lomitettuun kaiunpoistajaan* (**Kuva 19-6**):

$$h_k(l) = h\left(k + \frac{l}{R}T\right), \quad 0 \leq l \leq R-1 \quad (19.4)$$

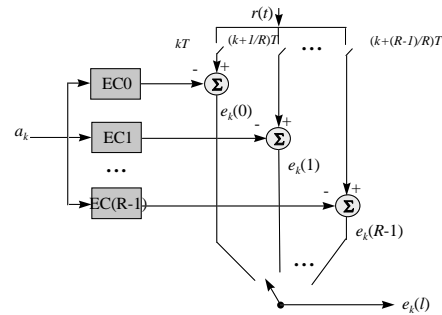
$$r_k(l) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} h_m(l) a_{k-m} \quad (19.5)$$

3.11.1998

Teletekniikan laboratorio

Sivu 13

Lomitettu kaiunpoistaja



◆ **Kuva 19-6.** Lomitettu kaiunpoistaja

3.11.1998

Teletekniikan laboratorio

Sivu 14

...Lomitettu kaiunpoistaja



- ◆ Kaikukanavan näytteet voidaan näin *tulkita* R :n riippumattoman kanavan näytteiksi. Jokaiseen kuviteltuun kanavaan syötetään identtinen symbolisekvenssi.
- ◆ Yhden haaran FIR-suodin muodostaa *kaikuestimaatin*

$$\hat{r}_k = \sum_{m=0}^{N-1} c_m a_{k-m} \quad (19.6)$$

- ◆ Adaptiivisen lomitetun kaiunpoistajan kaikki FIR-haarat konvergoituvat itsenäisesti. Tästä on mm. se hyöty, että *kokonaisuuden* konvergoituminen tapahtuu *rinnakkaisesti* (=nopeasti). Ulostulon näytetaajuuden valinta perustuu siis toteutuksen monimutkaisuuden minimoimiseen.

3.11.1998

Teletekniikan laboratorio

Sivu 15

...Lomitettu kaiunpoistaja



- ◆ **Kuvan 19-5b** mukaisella lomitetusti toteutetulla kaiunpoistajalla on siten *kiistattomia etuja* **Kuvan 19-5a** rakenteeseen verrattuna:
- ◆ 1) Lomitetun kaiunpoistajan sisäänmenona on symbolisekvenssi, jonka bittitarkkuus voi olla hyvin pieni ==> tarvittavat *kertojat* ovat yksinkertaisia
- ◆ 2) Lomitetut FIR-kaiunpoistajat ovat lyhyitä ja toisistaan riippumattomia ==> *nopea adaptointi*
- ◆ 3) Lomitettujen rakenteiden vaatima *kertolaskuintensiteetti* on pienempi.

3.11.1998

Teletekniikan laboratorio

Sivu 16

...Lomitettu kaiunpoistaja



- ◆ **Esimerkki 19-7**
- ◆ Jos vastaanotetun signaalin näytteenottotaajuus on R näytettä per symboli ja kaikureitin impulssivasteen tehollinen pituus on N symboliväliä, **Kuvan 19-5a** konvoluutiosummassa on NR kerrointa, jotka lasketaan R kertaa per symboli (kertolaskutiheys on NR^2 *symbolinopeus).
- ◆ Kuvan 19-5b kullakin R :llä lomitetulla kaiunpoistajalla on N kerrointa (kertolaskutiheys on NR). Siksi jälkimmäinen rakenne on yleisimmin käytössä.

3.11.1998

Teletekniikan laboratorio

Sivu 17

Adaptointi (LM 19.4)



- ◆ Adaptiivisella kaiunpoistajalla on *kaksi* keskeistä suorituskykyä kuvaavaa ominaisuutta:
 - *adaptointinopeus* ja
 - adaptoituneen järjestelmän *kaiunpoistotarkkuus*
- ◆ Nämä ominaisuudet korreloivat yleensä negatiivisesti, eli kun kaiunpoistotarkkuus huononee, adaptointinopeus kasvaa. Käytännön järjestelmiin pitää löytää hyvä kompromissi.
- ◆ Koska johtimien ominaisuudet muuttuvat yhteyden aikana yleensä hyvin hitaasti, adaptointinopeus on tärkeä lähinnä järjestelmän *käynnistystilanteessa* (äänitaajuusmodeemi).

3.11.1998

Teletekniikan laboratorio

Sivu 18

9

...Adaptointi



- ◆ Modeemeissa käytetäänkin usein yhteyden alussa nopeasti konvergoituvaa (ja epätarkempaa) adaptointi-algoritmia. Tarkkaa kaiunpoistoa tarvitaan vasta opetusjakson jälkeen.
- ◆ Yleisin adaptointialgoritmi kaiunpoistosovelluksissakin on *stokastinen gradienttialgoritmin (SG)*. Optimaalinen MMSE-ratkaisu voidaan johtaa samaan tapaan kuin korjaimille, josta saadaan suoraan SG-algoritmi.
- ◆ Pidättäydymme jälleen yksityiskohtien tarkastelusta.

3.11.1998

Teletekniikan laboratorio

Sivu 19

Kaukopään kaiku (LM 19.5)



- ◆ Äänitaajuusmodeemeissa kaikua voi syntyä myös heijastuksena kauempaa kuin lähetyspäästä. Tällöin puhumme *lähikaiun* sijasta *kaukokaiusta*. Kaukokaiut syntyvät puhelinverkon erilaisissa kytkentäpisteissä ja ne ovat voimakkaammin vaimentuneita kuin lähikaiku. Siksi niiden poistoon riittää pienempi tarkkuus.
- ◆ Toisaalta kaukokaiut voivat sisältää *taajuusvärinää* ja jopa *taajuusoffsetia*, minkä takia niiden vaimentaminen on ongelmallisempaa.

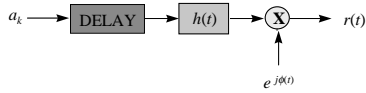
3.11.1998

Teletekniikan laboratorio

Sivu 20

10

Kaukopään kaiun mallintaminen



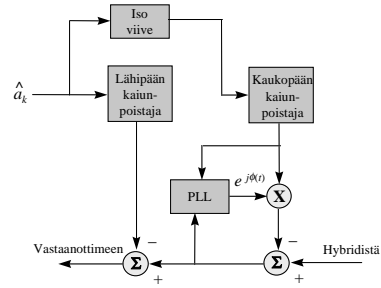
- ◆ Lähikäikuun verrattuna **Kuvan 19-11** malli kaukopään kaiulle sisältää kaksi *lisäominaisuutta*:
 - *lisäviive*, joka edustaa etenemisviivettä lähettimen ja siirtokanavassa olevan kaikupisteen välillä
 - aikavariantti *modulaattori*, joka edustaa kantoaallon vaihevärinää ja taajuusvirhettä

3.11.1998

Teletekniikan laboratorio

Sivu 21

Lähi- ja kaukokaiun poistaja



Kuvassa 19-12 on esitetty lähikäiun ja kaukokäiun poistava järjestelmä modeemisovellutukseen.

3.11.1998

Teletekniikan laboratorio

Sivu 22

Kaiunpoisto tänään



- ◆ Kaiunpoistajien tutkimus- ja kehitystyö kohdistuu nykyisin *adaptointinopeuden kasvattamiseen* ja *epälineaaristen kaikkukanavien kumoamiseen*.
- ◆ Epälineaarisia kaiunpoistajia voidaan toteuttaa esim. *neuraaliverkoilla*.

3.11.1998

Teletekniikan laboratorio

Sivu 23