Helsinki University of Technology
Laboratory of Telecommunications Technology

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* - hyviin tapoihinhan kuuluu puhua vuorotellen.
- *Puheensiirrossa* kaiunpoistoa voidaan käyttää häiritsevän kaikusignaalin vaimentamiseen
- *Datasiirrossa* kaiunpoisto mahdollistaa samaan tapaan *samanaikaisen*, *kaksisuuntaisen* tiedonsiirron samalla taajuuskaistalla datayhteyksillä. Näin säästetään taajuuskaistaa.

...Kaiunpoisto

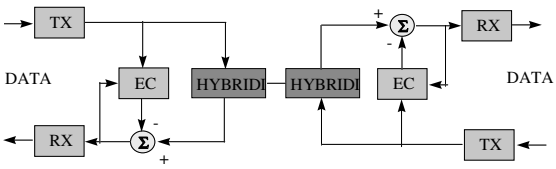
Kaiunpoistaja toimii kaksisuuntaisen linkin molemmissa päissä ja sen toimintaidea on seuraava:

1) Tunnetaan (opitaan adaptiivisesti) *siirtofunktio* omasta lähettimestä omaan vastaanottimeen

2) Muodostetaan *kaiun kopio*

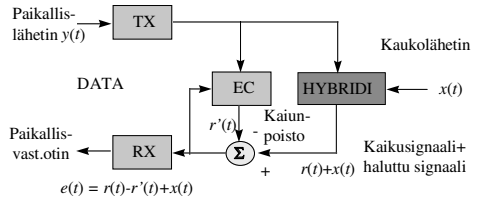
3) *Vähennetään* kopio vastaanotetusta signaalista jolloin jäljelle jää *toisen lähettimen* lähettämä signaali.

Kaksisuuntainen johtotransmissio



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

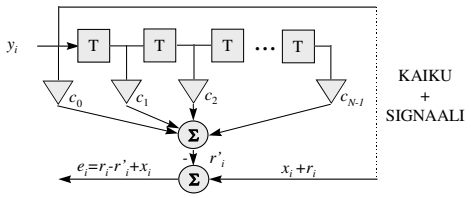
Kaiunpoistajan matemaattinen malli



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

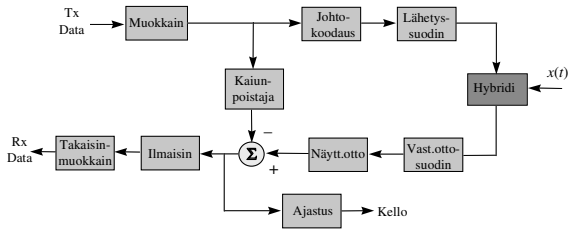
$$e(t) = r(t) - \hat{r}(t) + x(t)\big|_{r(t)=\hat{r}(t)} = x(t)$$

FIR-suodinrakenne kaiunpoistoon



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

Kaiunpoistovastaanottimen lohkokaavio



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

...Kaiunpoistovastaanottimen lohkokaavio

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

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)

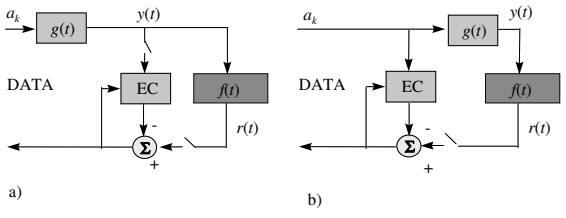
- *Kantataajuisen kanavan* kaiunpoisto eroaa huomattavasti *päästökaistakanavan* kaiunpoistosta. Tarkastelemme seuraavaksi lähetettyä PAM-signaalia

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

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

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

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 lähetyskello on saatavilla, on luonnollista näytteistää kaikusignaalia taajuudella, joka on symbolitaajuuden kokonaiskerrannainen (= R). Vastaanotetun kaikusignaalin näytteet ovat nyt

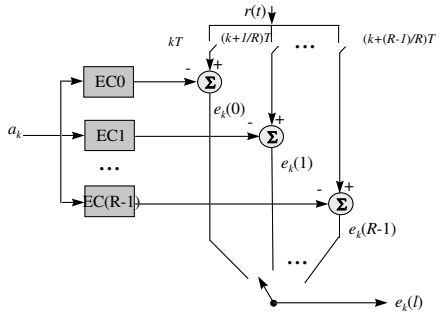
$$r_k(l) = r\left(\left(k + \frac{l}{R}\right)T\right), \quad 0 \le l \le R-1 \qquad (19.3)$$

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

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

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

Lomitettu kaiunpoistaja



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

...Lomitettu kaiunpoistaja

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

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

- 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.

...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.

...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.

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).

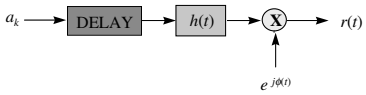
...Adaptointi

- 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.

Kaukopään kaiku (LM 19.5)

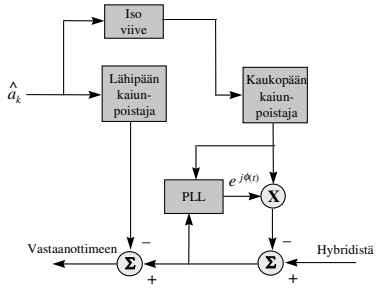
- Äänitaajuusmodeemeissa kaikua voi syntyä myös heijastuksena kauempaa kuin lähetyspäästä. Tällöin puhumme *lähikaiun* sijasta *kaukokaiusta.* Kaukokaiut syntyvät puhelinverkon erilaisissa kytkentäpisteissä ja ne ovat voimakkaammin vaimentuneita kuin lähikaiku. Siksi niiden poistoon riittää pienempi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

Kaukopään kaiun mallintaminen



- Lähikaikuun 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

Lähi- ja kaukokaiun poistaja



Kuvassa 19-12 on esitetty lähikaiun ja kaukokaiun poistava järjestelmä modeemisovellutukseen.

Kaiunpoisto tänään

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