



MATINE tutkimusseminaari 16.11.2017

# Uuden sukupolven HF-kommunikaatiotekniikka

**Lauri Anttila<sup>1</sup>, Mika Korhonen<sup>1</sup>,  
Juha Yli-Kaakinen<sup>1</sup>, Markku Renfors<sup>1</sup>,  
Hannu Tuomivaara<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Elektroniikan ja tietoliikennetekniikan laboratorio  
Tampereen teknillinen yliopisto

<sup>2</sup>Kyynel Oy

Hankkeelle myönnetty MATINE-rahoitus: 76 336 €

# HF-tietoliikenteen aaltomuodot ja signaalinkäsittely

- Lyhytaaltoalueen (high frequency, HF) radiotietoliikenne tarjoaa infrastruktuurista riippumattomia pienen datanopeuden tietoliikenneratkaisuja erityisesti kriisitilanteisiin.
- Haasteet
  - Taajuusalue: 1.8 ... 30 MHz, tyypilliset kaistanleveydet 3-24 kHz
  - Voimakkaasti aika- ja taajuusselektiivinen kanava
    - Ø Tehokkaat ja robustit kanavakorjainmenetelmät keskeisiä
  - Vaikeuksia löytää riittävän leveää jatkuvaa vapaata spektriä
    - Ø Epäjatkuva spektrinkäyttö
  - Vaihtoehtoina:
    - Ø Monikanavainen single-carrier lähete
    - Ø OFDM ja suodatinpankkipohjaiset monikantoaaltotekniikat
  - Lisähaaste:
    - Ø Näiden aaltomuotojen läheteiden voimakas verhokäyrän vaihtelu on ongelmallista lähettimen tehovahvistimen toteutuksen kannalta

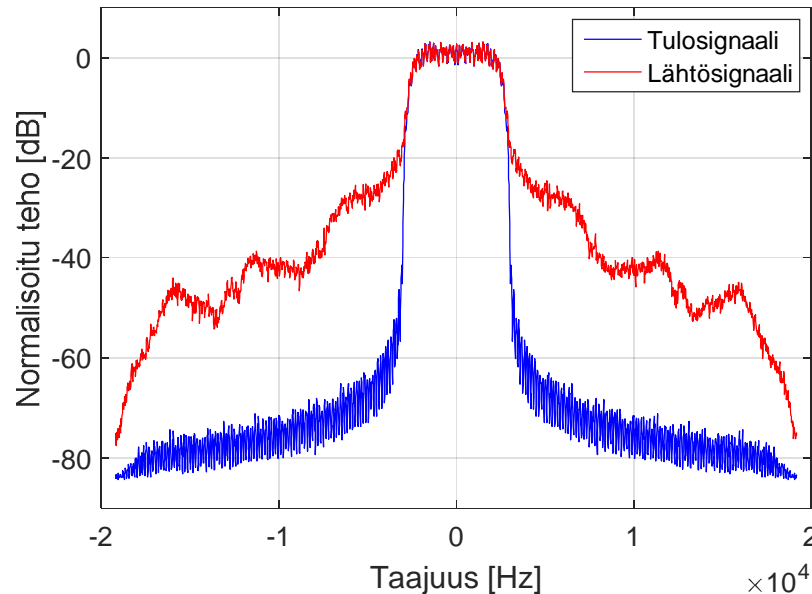
# Aiempi tutkimuksemme HF-tietoliikenteen alalla

- PVTO 2013 –hankeen HF-osio (2013-16, Kyynel Oy, CWC, TTY, VTT)
  - Tehokkaat kanavakorjaimet single-carrier (SC) aaltomuodolle
  - Epäjatkua spektrinkäyttö
    - Ø Digitaalinen kanavointisuodatus SC-aaltomuodoille
    - Ø Suodatinpankkiaaltomuodot
  - Suodatinpankkeihin perustuvat monikantoaaltotekniikat
- MATINE-hanke *Kanavamittaus moderneja laajakaistaisia HF-järjestelmiä varten* (2015, CWC, Kyynel Oy, TTY)
  - Mittausdatan analysointia ja kanavamallinnusta

# Uuden sukupolven HF-kommunikaatiotekniikat

- Osapuolet: TTY, Kyynel Oy
- Tavoitteet:
  1. HF-tehovahvistimen linearisointi digitaalisella esisäröytyksellä (digital predistortion, DPD) ja PAPR:n vähentämisellä
    - Ø Korkeampien lähetystehojen mahdollistaminen, rikkomatta spektrimaskia
    - Ø Epäjatkuvan spektrinkäytön mahdollistaminen
    - Ø Tavoitteena testata menetelmiä oikeaa tehovahvistinmoduulia (Kyyneleen CNHF radio) käyttäen
  2. HF-monikantaalitekniikoiden jatkokehitys
    - Ø Erityisesti kanavaestimointi ja –korjainmenetelmien kehitys haastavissa HF-kanavissa

# Tehovahvistimen epälineaarinen särö



- AM/AM (kompressio) ja AM/PM + muisti-ilmiöt
  - ∅ Oman kanavan häiriöt (EVM), viereisten kanavien häiriöt (ACLR), ”harhalähetteet” (spurious emissions) ...
- Modernien spektraalisesti tehokkaiden aaltomuotojen korkea huippu- ja keskitehon suhde (PAPR) on haaste
  - ∅ Sekä linearisointi että PAPR:n vähentäminen ovat tarpeen

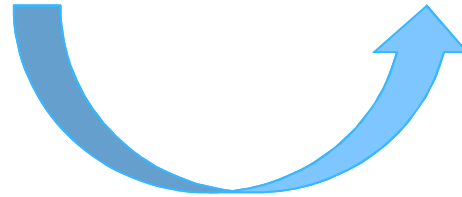
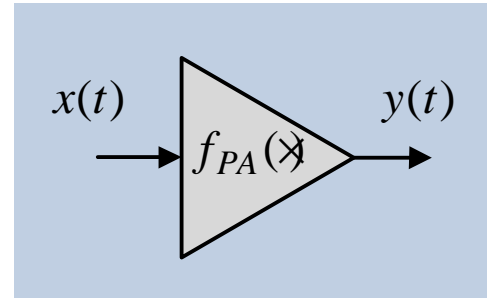
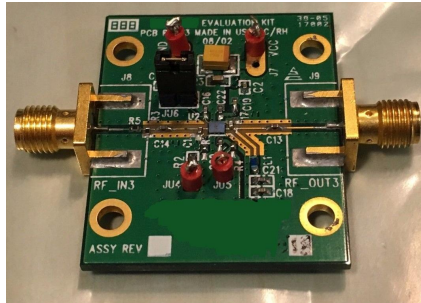


# Tehovahvistimen linearisointi

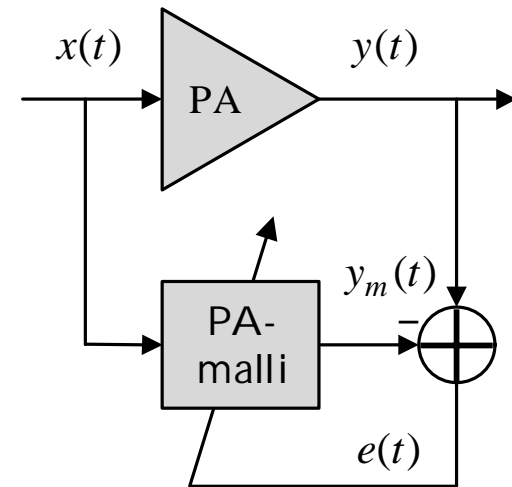
- Lähetystehon pienentäminen (back-off) on helpoin tapa linearisoida tehovahvistinta
  - Ø Huono hyötysuhde ja heikompi kantama
- Analogiset tekniikat (takaisinkytkentä, feedforward, esisäröytys)
  - Ø Kärsivät joko huonosta tarkkuudesta tai rajoittuneesta kaistanleveydestä
- Digitaalinen esisäröytys
  - Ø Joustavin ja tarkin



# Tehovahvistimen särön mallinnus



- Black-box / toimintamallit (behavioral models) ovat tehokas tapa epälineaarisen lähettimen tai linkin suorituskyvyn evaluointiin
- Ovat myös perusta digitaalisille esisäröytystekniikoille
- Yleensä parametrinen input-output malli fyysisen piirin toiminnasta

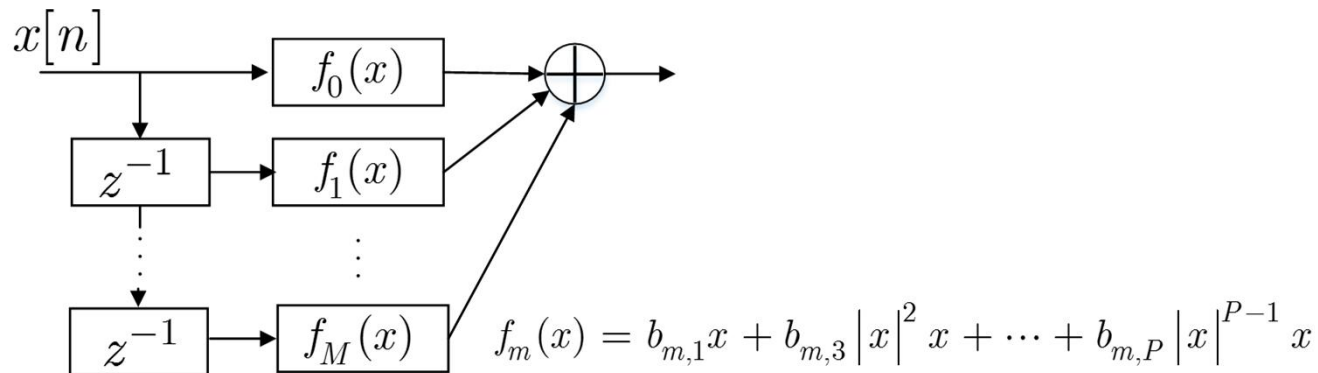


# Tehovahvistimen kantataajuinen mallinnus

- Parametriset PA ja DPD-mallit yleisimmin polynomipohjaisia
  - Analyttisesti käteviä; suoraviivainen taajuustason tulkinta; taipuvat helposti muisti-ilmiöiden mallintamiseen ja korjaamiseen
- Katkaistu polynomimalli, kompleksiset kertoimet:

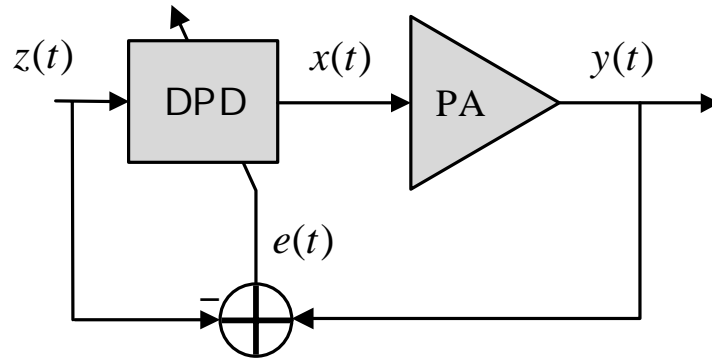
$$y(n) = b_1 x(n) + b_3 |x(n)|^2 x(n) + \dots + b_P |x(n)|^{P-1} x(n)$$

- Muistipolynomimalli





# Digitaalinen esisäröytin (DPD)

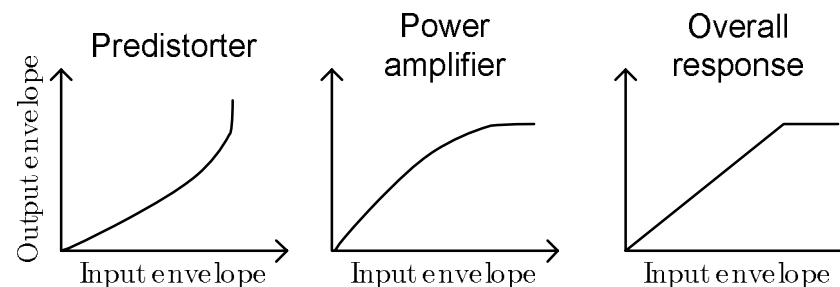


$$x(t) = f_{DPD}(z(t))$$

$$y(t) = f_{PA}(x(t))$$

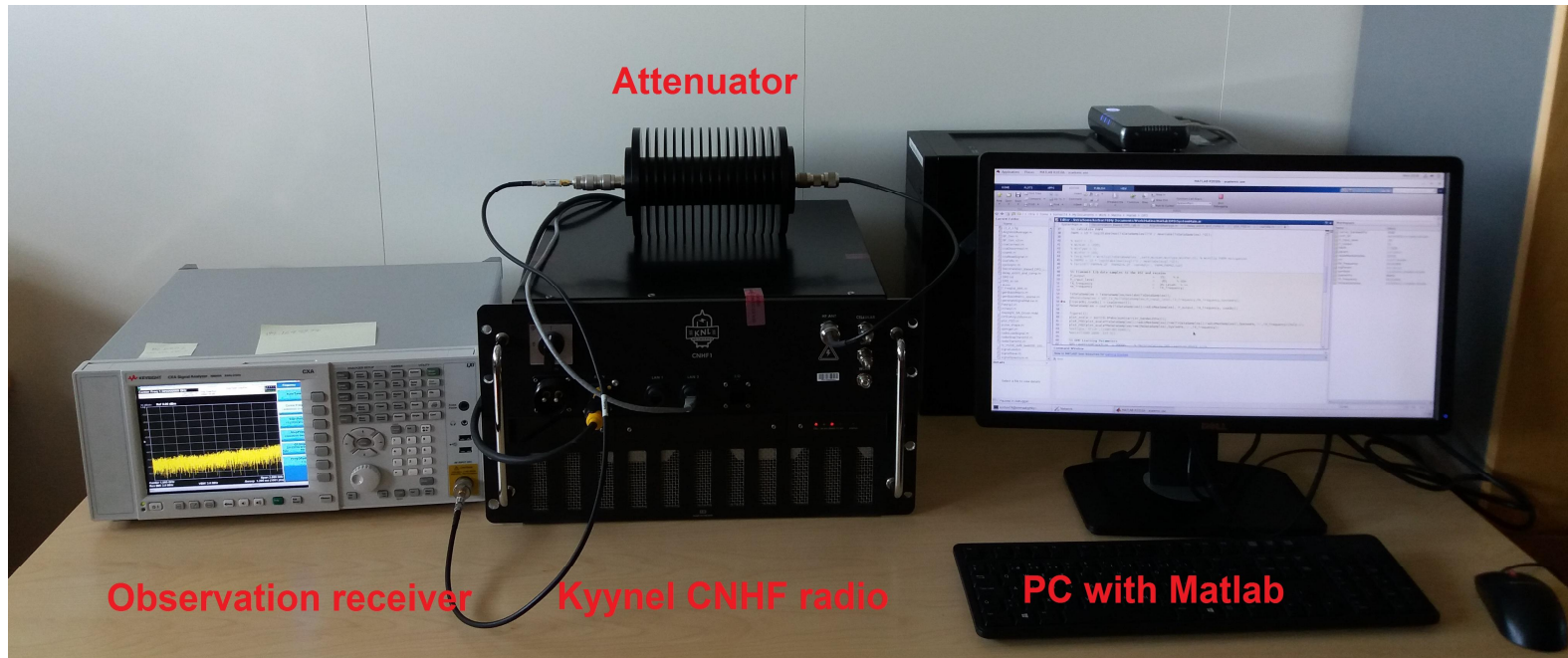
- PA:n eteen sijoitettava epälineaarinen systeemi, jonka vaste on PA:n vasteen inverssi (likimäärin):

$$y(t) = f_{PA}(f_{DPD}(z(t))) = Gz(t)$$



- DPD-malleina käytetään yleisimmin polynomipohjaisia malleja

# Mittausjärjestelmä



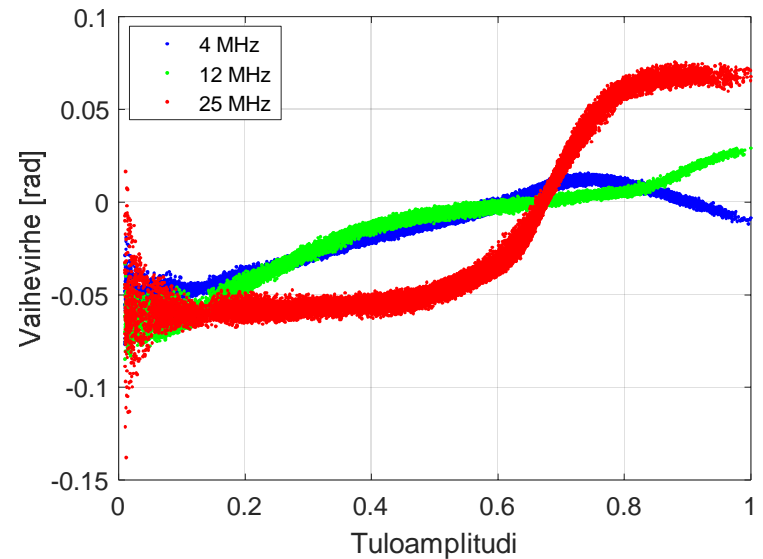
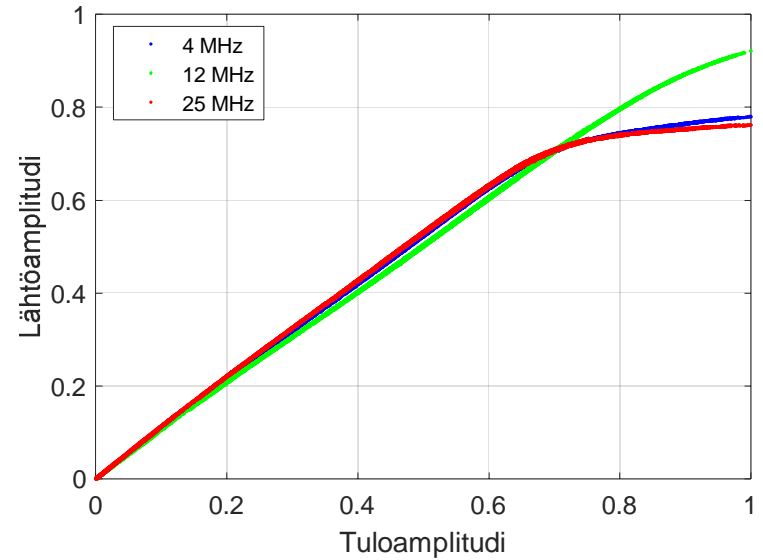
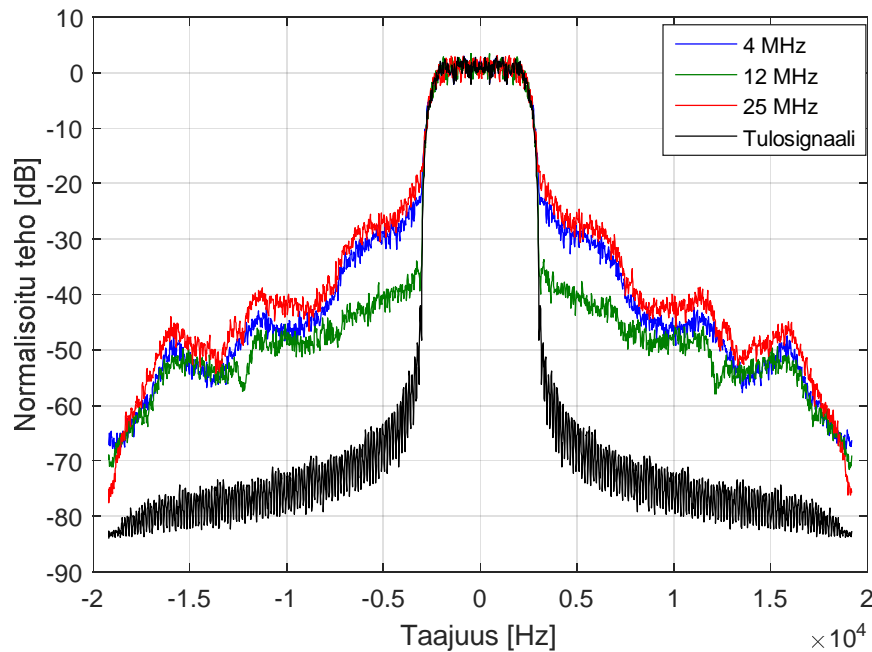
## Kyynel CNHF radio

- Nimellinen lähetysteho 50 W rms
- Käytetyt aaltomuodot: 6 kHz BPSK ja 8-PSK
- Käytetyt taajuusalueet: 4, 12 ja 25 MHz

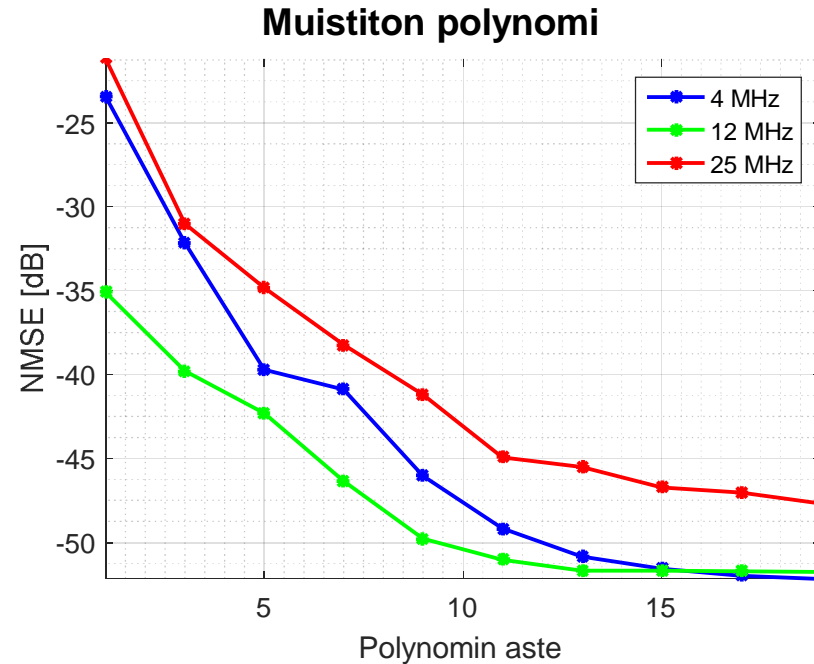
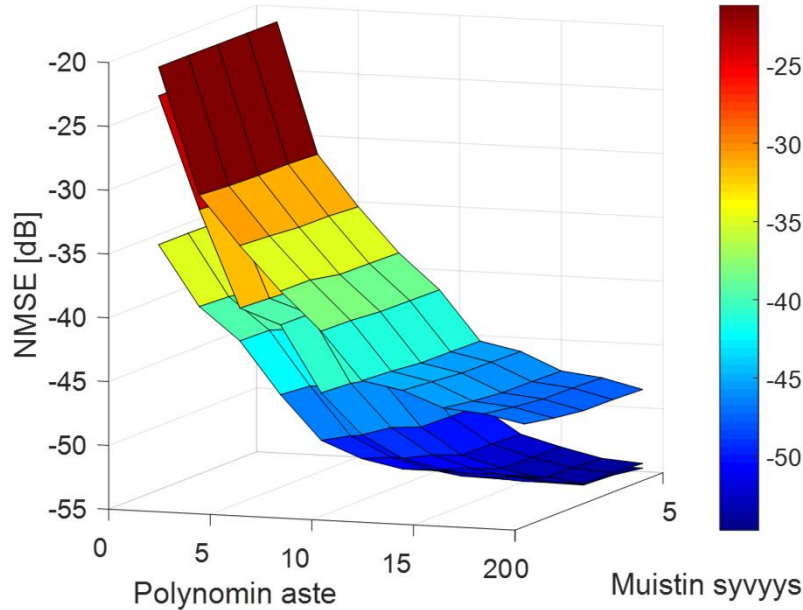


# Tuloksia – PA-mallinnus

Mitatut vasteet  
(100 W rms, 6 kHz BPSK)



# Tuloksia – PA-mallinnus

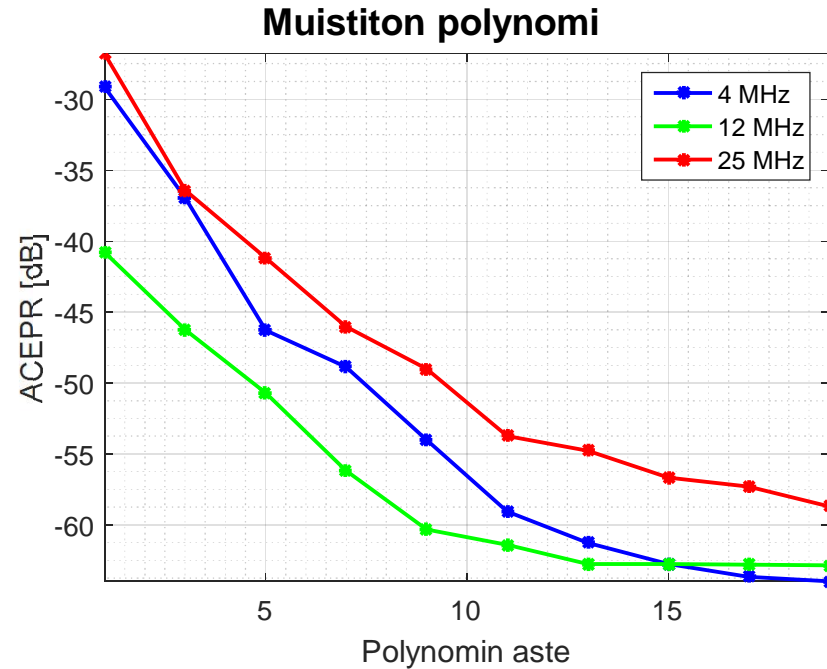
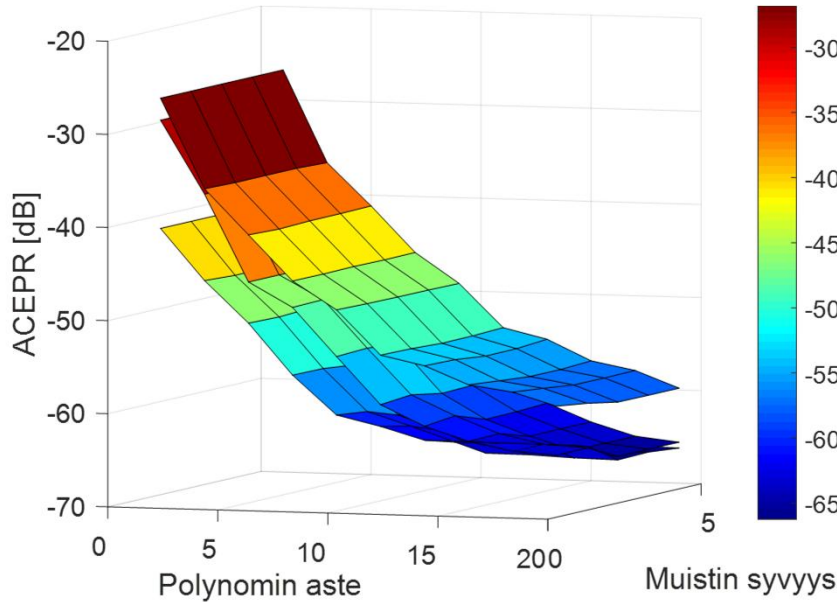


- Mallinnusvirhe polynomimallin asteluvun funktiona (koko signaali)

$$NMSE_{dB} = 10 \log_{10} \frac{E(|e[n]|^2)}{E(|y[n]|^2)}, \quad e[n] = y_m[n] - y[n]$$



# Tuloksia – PA-mallinnus



- Mallinnusvirhe polynomimallin asteluvun funktiona (viereinen kanava)

$$ACEPR_{dB} = 10 \log_{10} \frac{\int_{ch}^{adj} E(f) df}{\int_{ch}^{adj} Y(f) df}$$

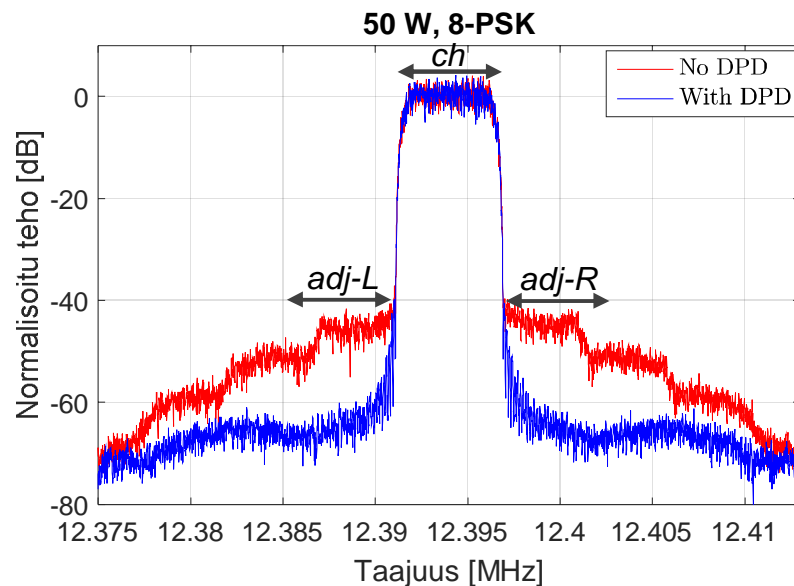
missä E(f) ja Y(f) ovat virhesignaalin ja PA-ulostulon tehospektrit



# Tuloksia – DPD

Mittausesimerkki:

- 50 W lähetysteho
- 6 kHz 8-PSK aaltomuoto



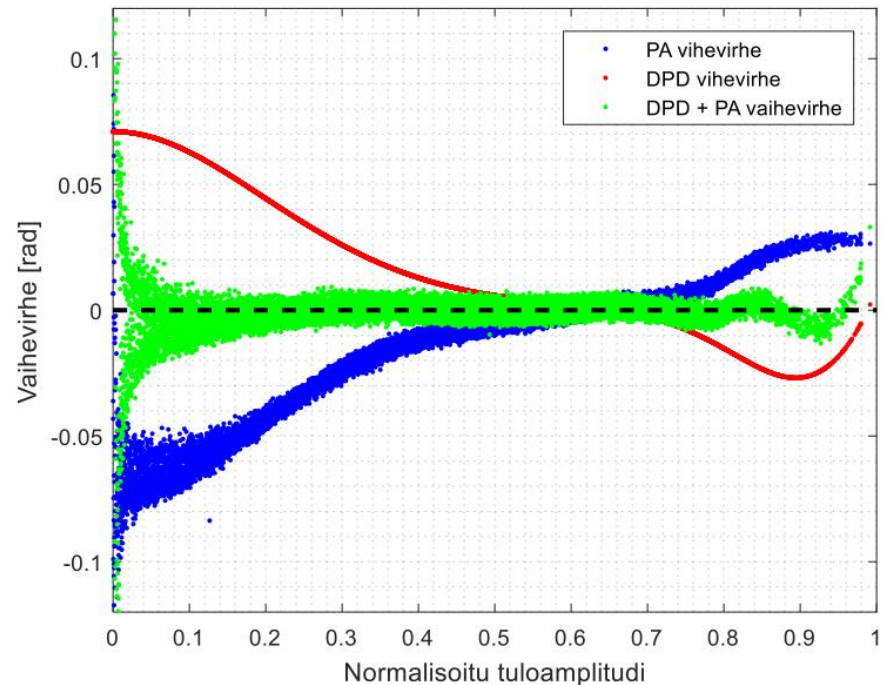
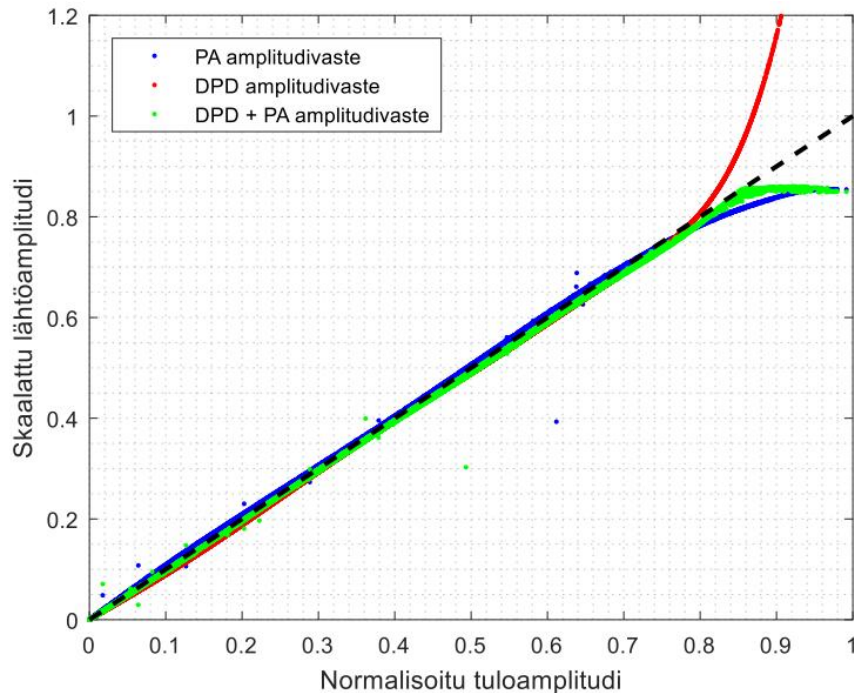
Käytetyt hyvyysluvut:

- 1) Viereisen kanavan tehosuhte (adjacent channel power ratio, ACPR)
- 2) Päästökaistalla esiintyvää säröä mittava EVM (error vector magnitude)
- 3) AM/AM ja AM/PM -ominaisuudet

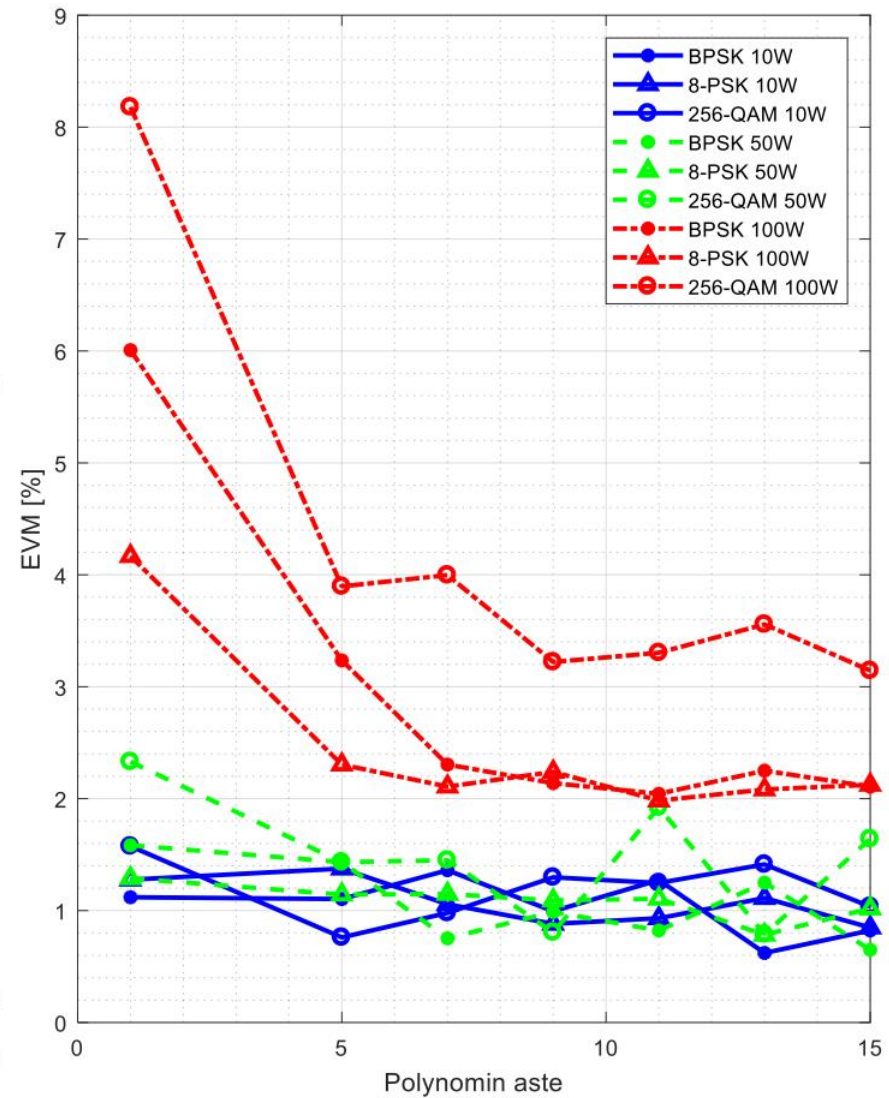
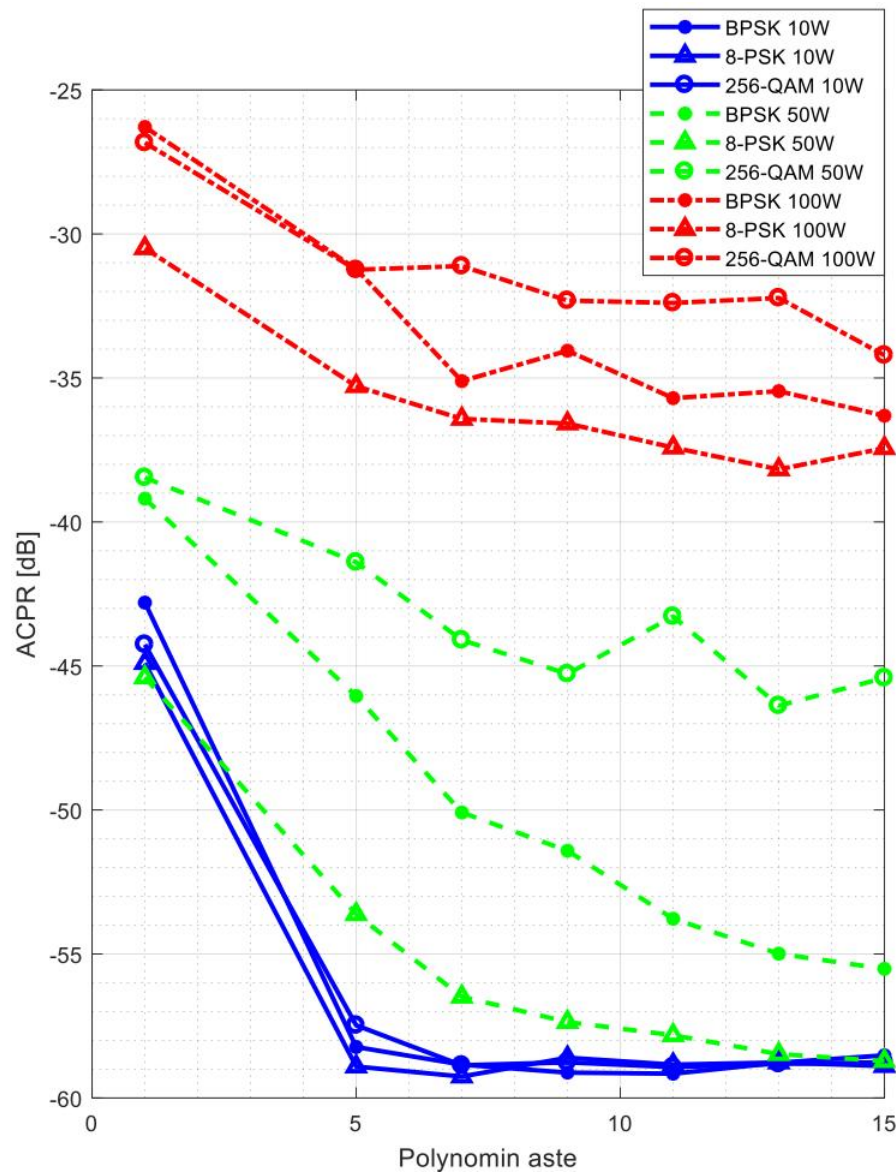


# Tuloksia – DPD

- Mitatut AM/AM ja AM/PM 12 MHz taajuudella
- 13:n asteen muistiton DPD



# Tuloksia – DPD @25 MHz

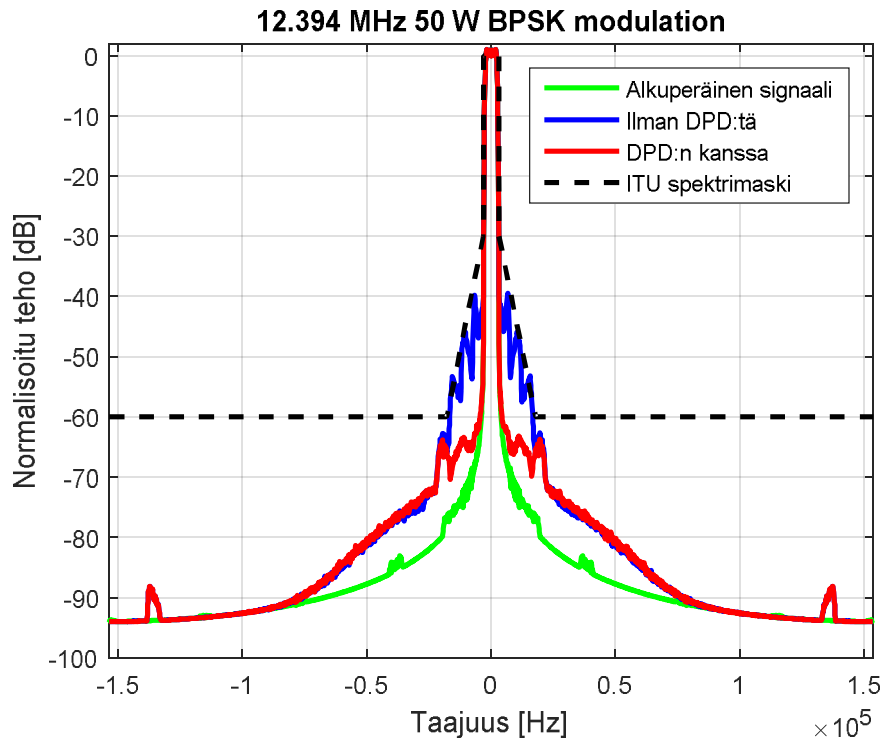




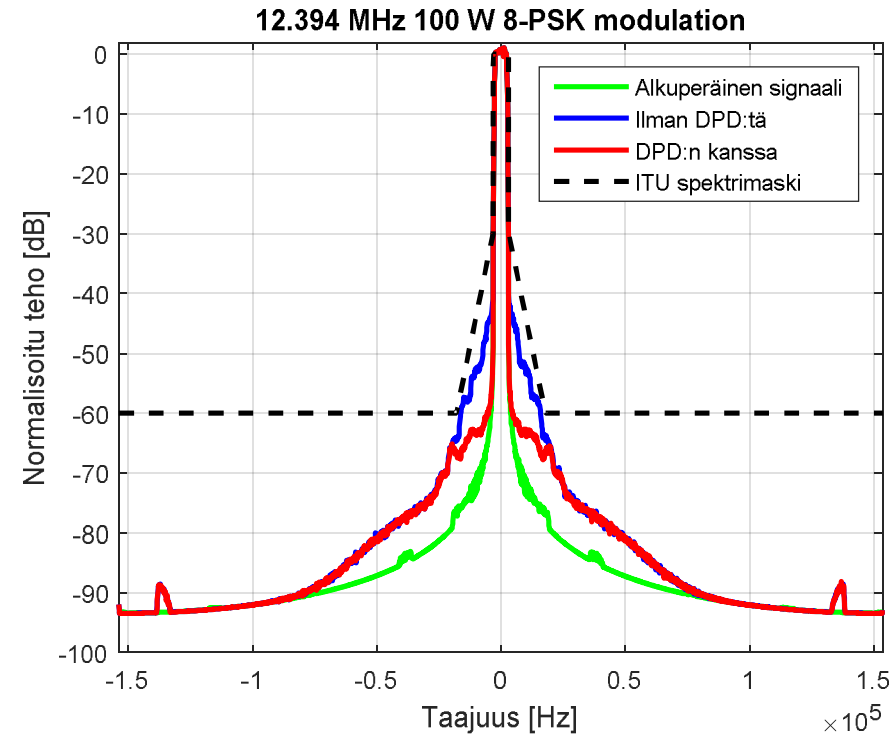
# Tuloksia – DPD

- Lähetyssignaalin tehospektri laajemmalla kaistalla
- 12 MHz kaista, 50 W ja 100 W lähetystehot
- ITU-R M.1798-1 ja ITU-R SM.329-12 (maritime) spektrimaskit

50 W



100 W



# Johtopäätöksiä DPD-tutkimuksesta

- Tehovahvistimen mallinnus osoitti, että epälineaarisuus on mitatuilla signaali-kaistanleveyksillä oleellisesti *muistiton*
  - ∅ DPD-kehityksen lähtökohdaksi otettiin muistiton polynomimalli
- DPD-menetelmä linearisoi lähettimen hyvin
  - ∅ Enemmän tehoa ulos häiritsemättä naapurikanavan käyttäjiä
  - ∅ DPD on käyttökelpoinen tekniikka myös HF-taajuusalueella
- Käytetty testausjärjestely rajoittaa lähettimen digitaalisen kaistanleveyden n. 45 kHz:iin
  - ∅ Linearisointi tämän ulkopuolella ei onnistu
- Jatkotyössä keskeisenä tavoitteena DPD:n testaus laajemmalla kaistanleveydellä
  - ∅ Myös epäjatkuvia SC-lähetteitä ja HF-monikantoaalto-signaaleita
  - ∅ Tehovahvistimen mallinnus laajemmalla kaistanleveydellä



# Monikantoaaltojärjestelmät

Perusperiaatteena on käyttää suurta määrää kapeakaistaisia alikantoaaltoja yhden laajakaistaisen lähetteen sijaan.

## Monikantoaaltojärjestelmät edut

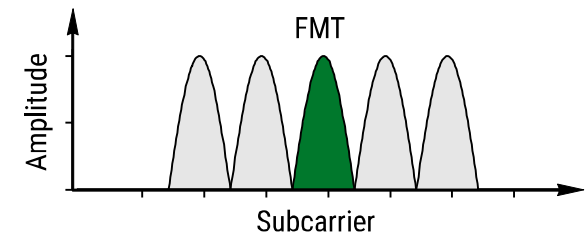
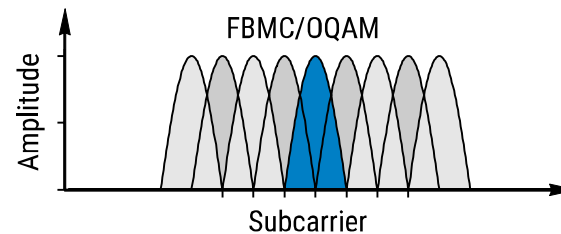
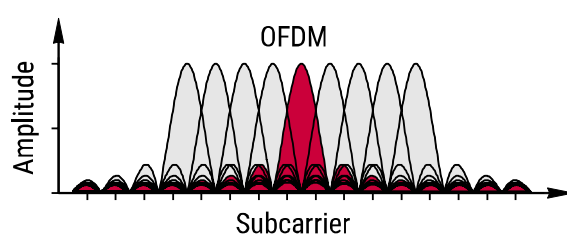
- Joustava spektrinkäyttö: Käytettyä kaistaa voidaan dynaamisesti säädellä aktivoimalla vain halutut alikantoaallot
- Alikanavan sisällä kaikki taajuuskomponentit kokevat liki samansuuruisen amplitudivasteen/häipymisen ►  
Yksinkertaisempi ekvalisaattori

## Haitat

- Ongelmia tehovahvistimen epälineaarisuuden takia (suuri huipputehon ja keskimääräisen tehon suhde)
- Estimointi ja ekvalisointi vaikeaa suurilla Doppler siirtymillä.

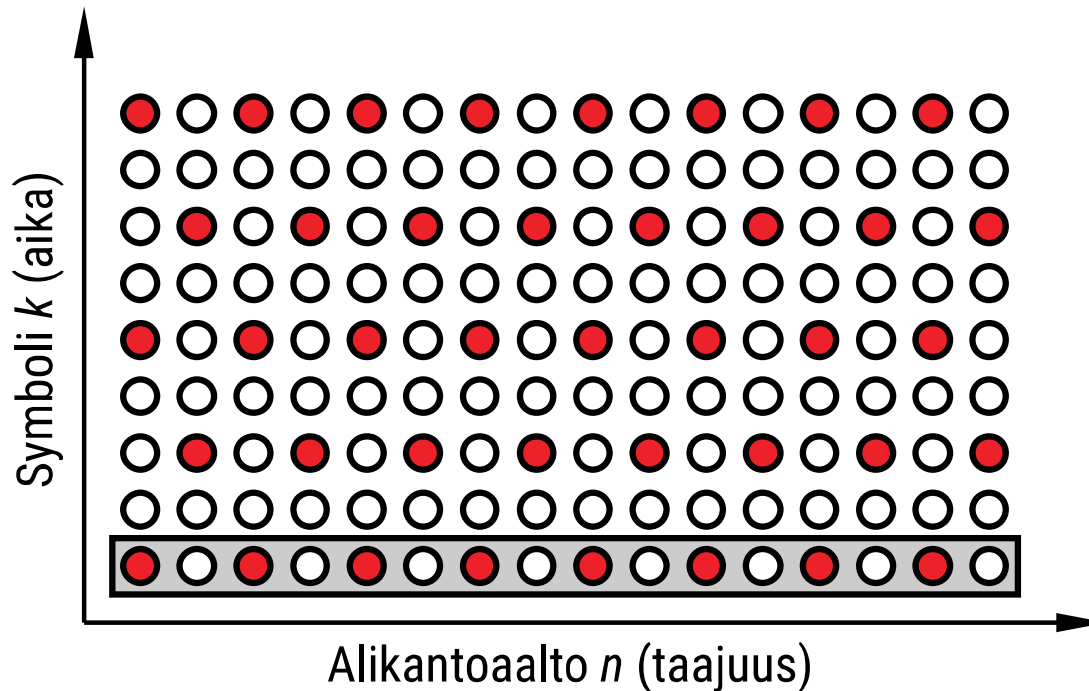
# Kanavaestimointi monikantoaaltojärjestelmissä

- Tavoitteena oli tarkastella kehittyneiden kanavaestimointimenetelmien suorituskykyä monikantoaaltojärjestelmissä.
- Tarkasteltavat monikantoaaltojärjestelmät ovat:
  - ▶ OFDM (orthogonal frequency-division multiplexing)
  - ▶ FBMC/OQAM (filterbank multi-carrier/offset-QAM)
  - ▶ FMT (filtered multitone)
- Monikantoaaltojärjestelmissä kanava tulee voida estimoida luotettavasti aika- ja taajuussuunnassa pilottisymbolien perusteella ▶ haastava ongelma vaikeissa HF-kanavissa.



# 2-D pilottirakenteet

Tavoitteena on estimoida kanavan vastetta tunnettujen pilottisymbolien perusteella monikantoaaltojärjestelmissä.



- Pilottien perusteella laskettu kanavaestimaatti
- Estimoitava arvo

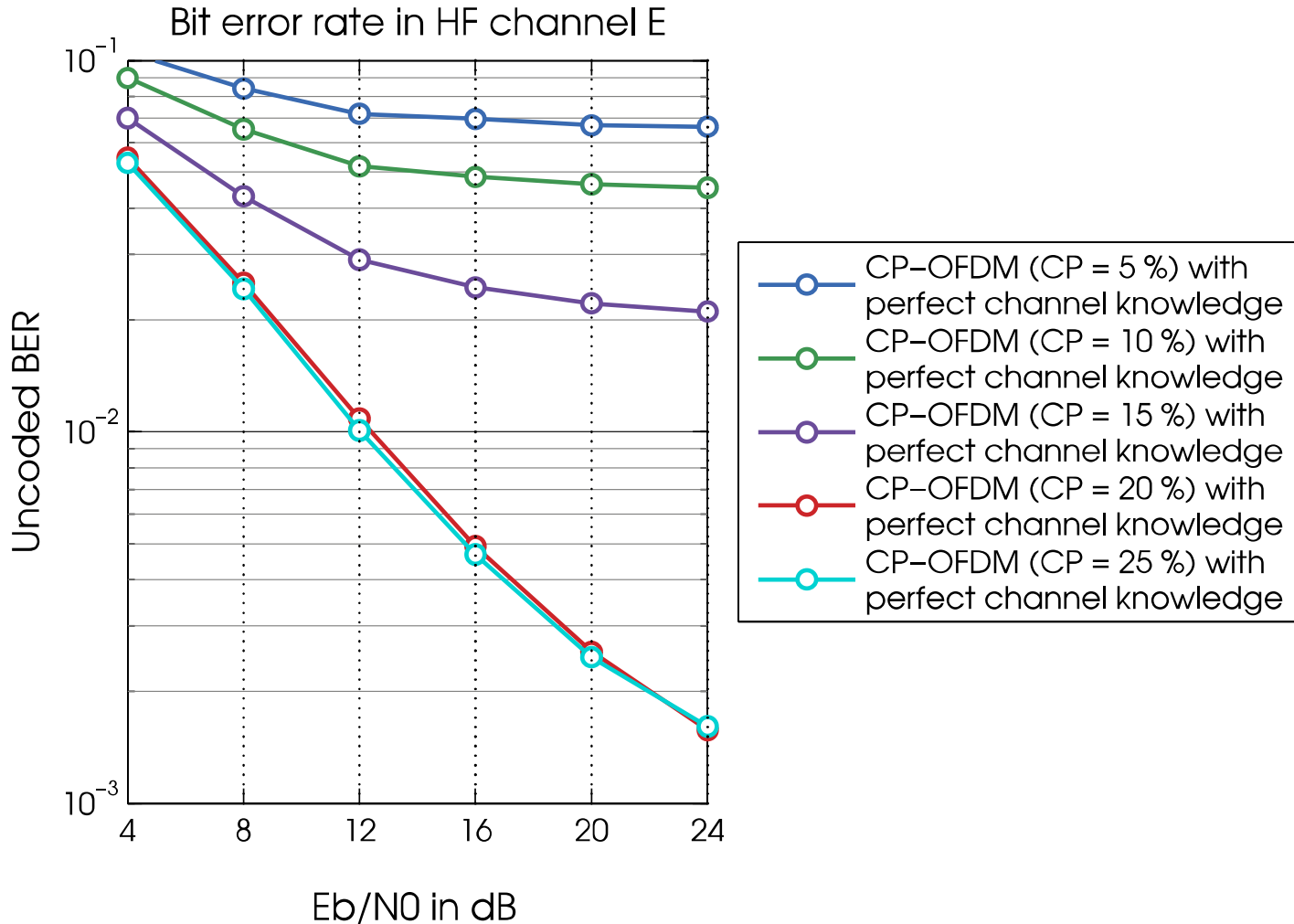
# MMSE kanavaestimaatti

- Pienimmän keskineliövirheen (minimum mean square error, MMSE) kanavaestimaatti voidaan muodostaa pilottien perusteella jos kanavan toisen kertaluvun statistiikka (viive- ja Doppler-haje) on tiedossa/estimoitavissa.
- Kanavan estimointi pilottien ulkopuolella (extrapolointi) edelleen ongelmallista
- Laskennallinen kompleksisuus on suhteellisen pieni koska tarvittavat matriisit voidaan taulukoida etukäteen (jolloin reaaliaikainen käänteismatriisin laskeminen vältetään).

# Aaltomuotojen parametrisointi: OFDM

- OFDM:n syklisen jatkeen (cyclic prefix, CP) tulee olla pitempi kuin kanavan viivehajeen, jotta kanava on ekvalisoitavissa. Toisaalta syklinen jatke pienentää spektraalista tehokkuutta.
- DRM (digital radio mondiale) spesifikaatio määrittelee viisi toiminta-moodia, joista HF-kanaville soveltuvissa moodeissa syklisen jatkeen pituus on vähintään 25 % ► Tämä arvo on valittu myöhempiin simulaatioihin.

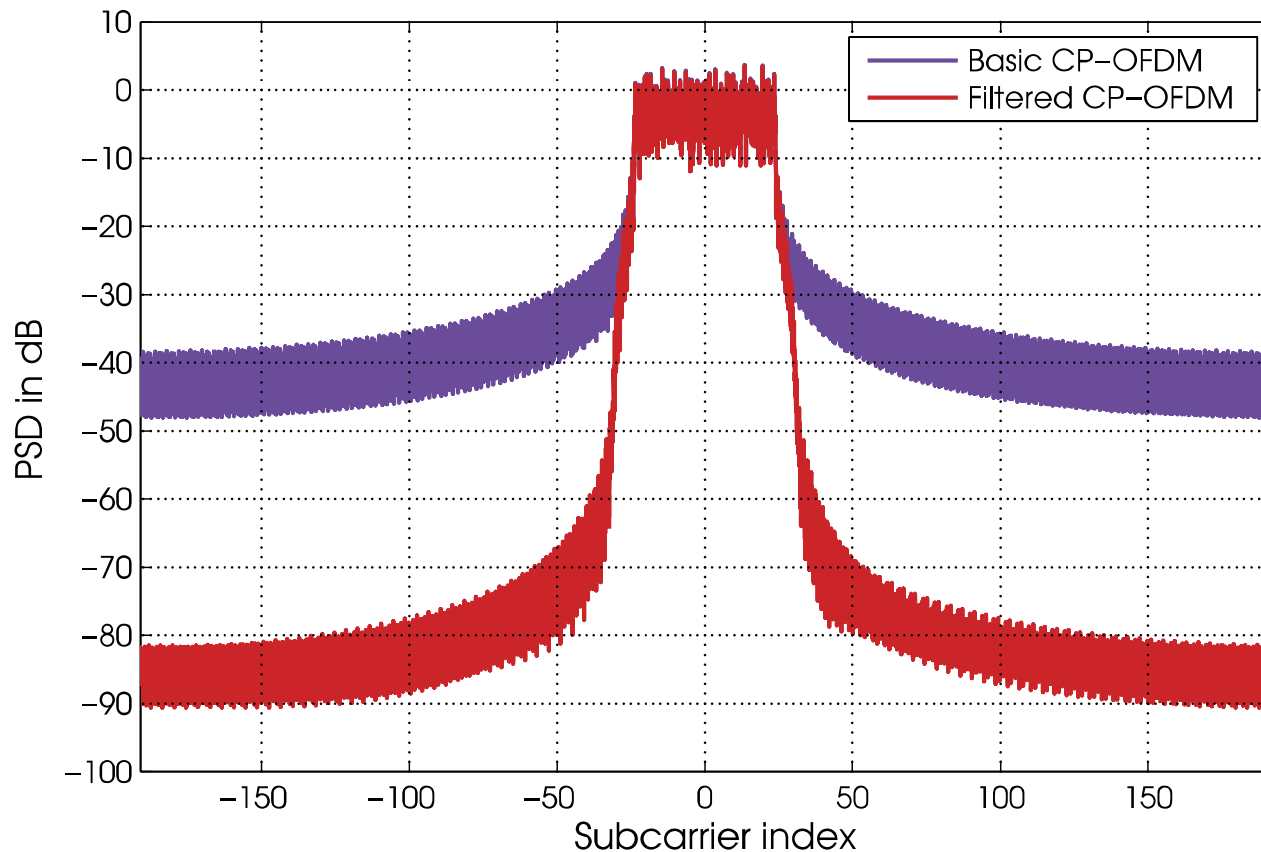
# Syklisen jatkeen vaikutus OFDM:n suorituskykyyn





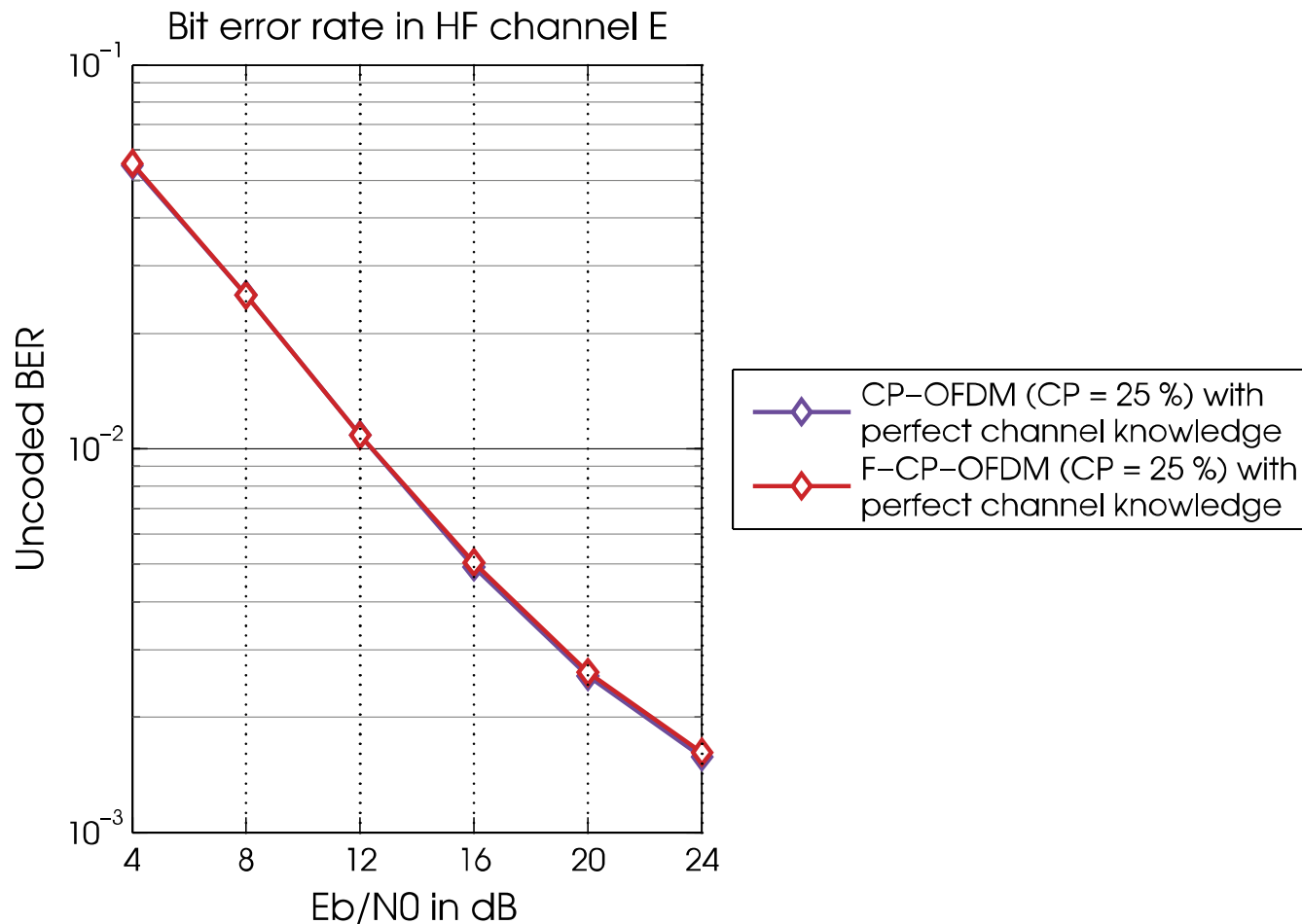
# Suodatettu CP-OFDM (Filtered CP-OFDM)

Perus CP-OFDM lähetteen spektraalinen lokalisaatio on hyvin huono  
► Lokalisaatiota voidaan parantaa suodattamalla OFDM-aaltomuoto taajuusselektiivisellä suodattimella



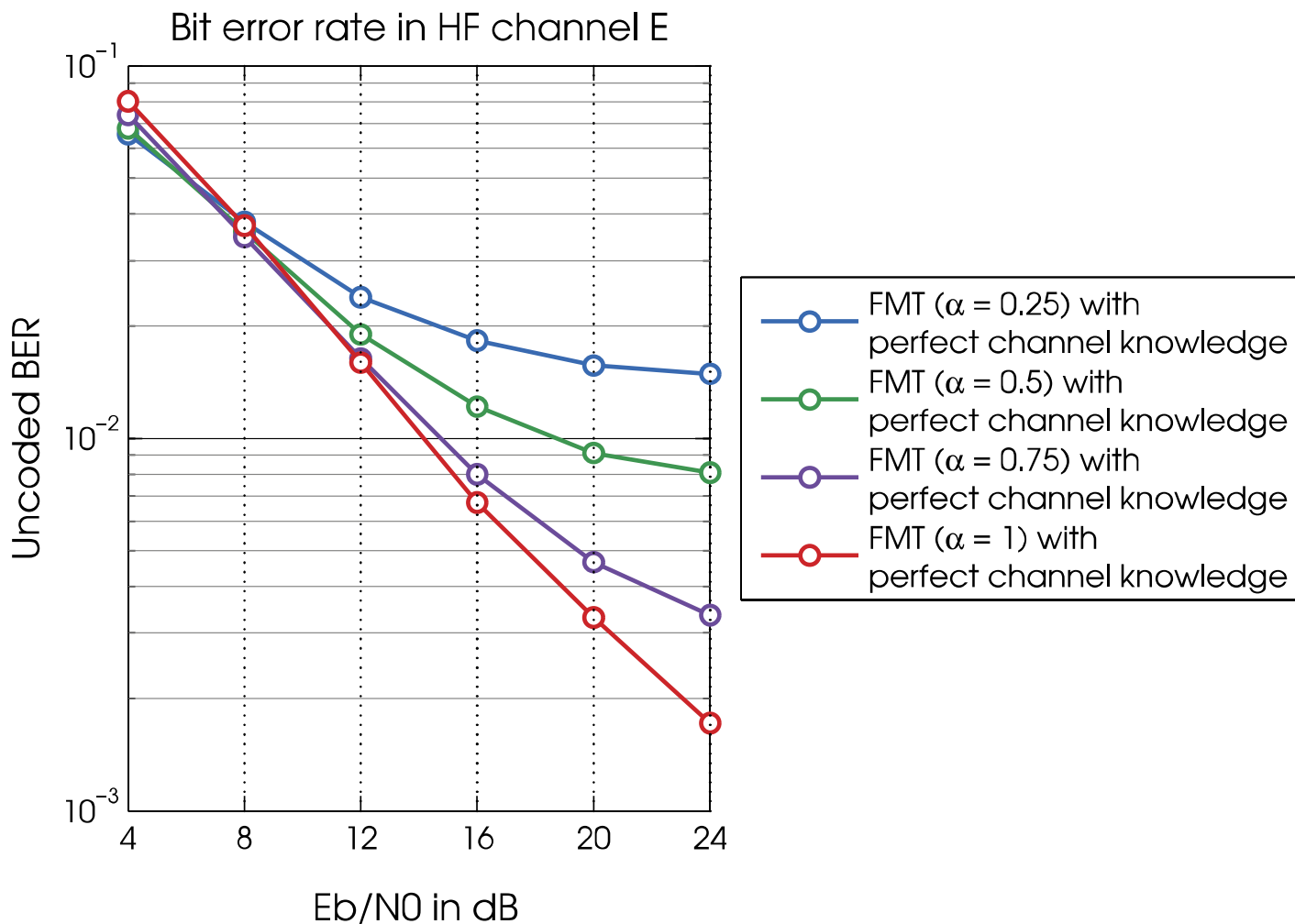
# Suodatettu OFDM (Filtered-OFDM)

Suodatus ei aiheuta suorituskyvyn heikkenemistä edes haastavissa HF-kanavissa jos syklinen jatke on riittävän pitkä



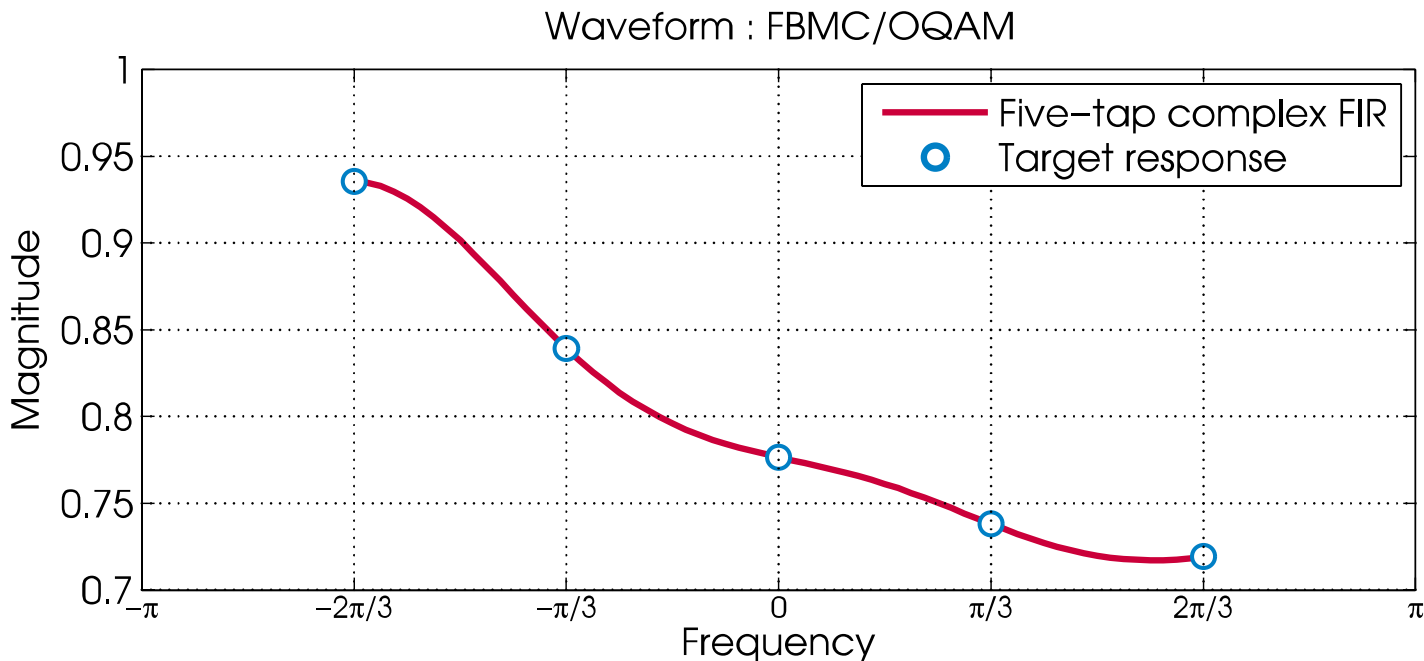
- FMT:n alikantaaaltojen välinen suojakaista määräytyy modulaatiossa käytetystä lisäkaistastakertoimesta (roll-off factor), samoin järjestelmän spektraalinen tehokkuus ►  
Lisäkaistastakertoimeksi on valittu  $\alpha = 0.25$ , jotta FMT:n ja OFDM:n spektraalinen tehokkuus on sama.

# Lisäkaistakertoimen vaikutus suorituskykyyn

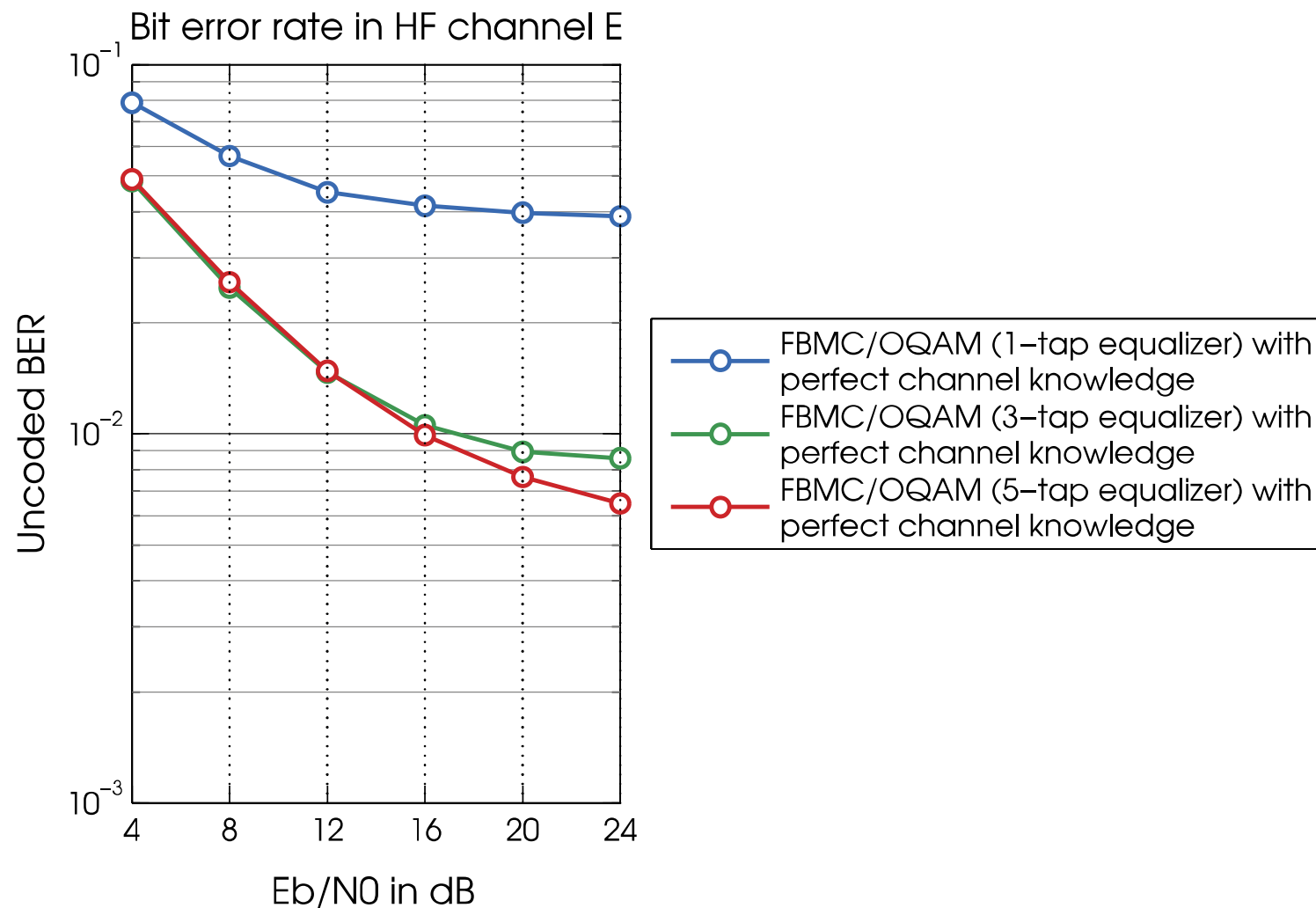


# Aaltomuotojen parametrisointi: Alikanavaväli

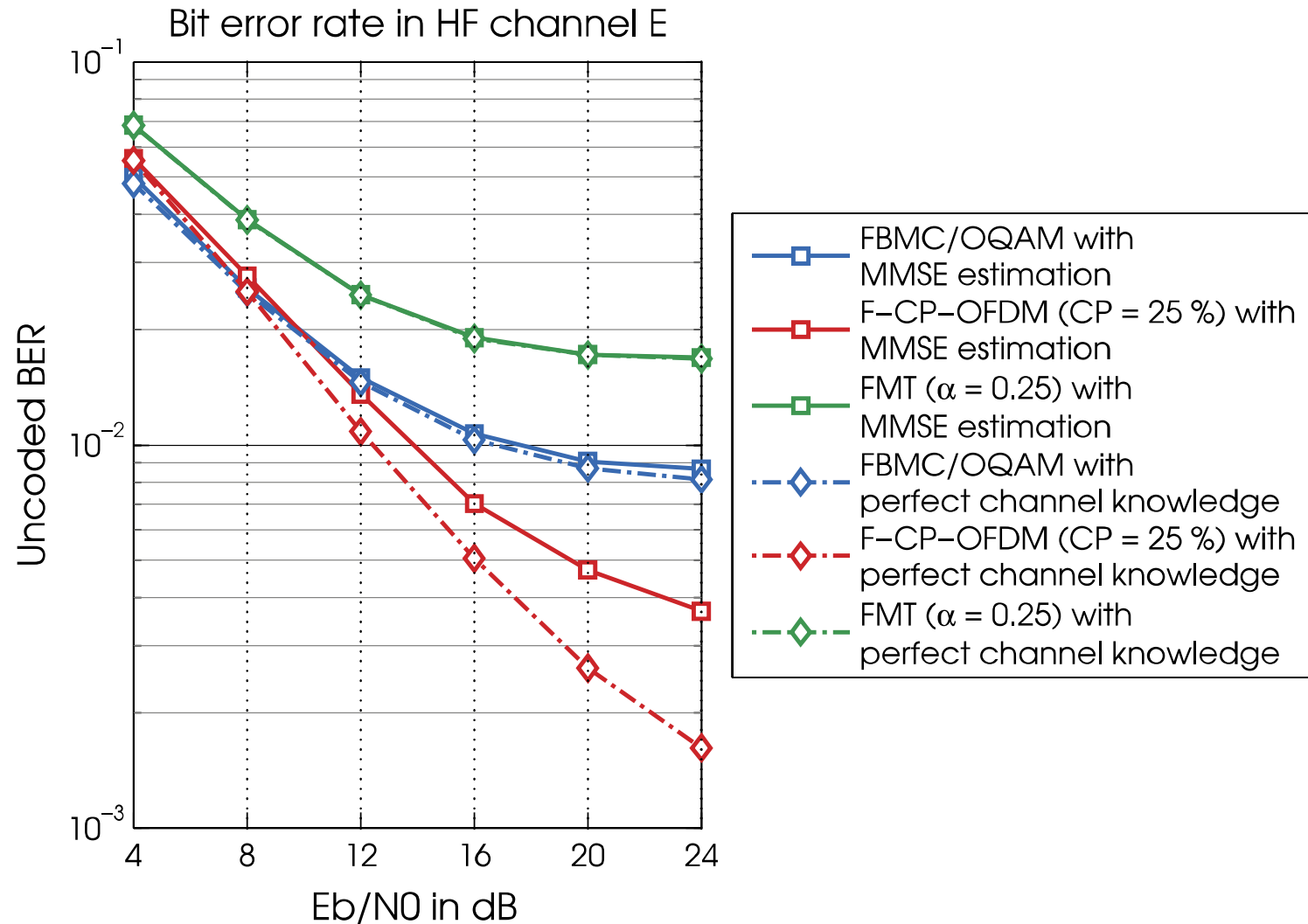
- Sopivaksi alikanavaväliksi simulointien perusteella on valittu 50 Hz.
- DRM spesifikaatiossa HF-kanaville soveltuvissa moodeissa alikanavaväli on  $\Delta_f \approx 50 \text{ Hz} - 100 \text{ Hz}$ .
- Käytetyllä alikanavavälillä kanava on edelleen taajuusselektiivinen
  - ▶ Alikanavakohtaisen ekvalisaattorin astelukua tulee kasvattaa.



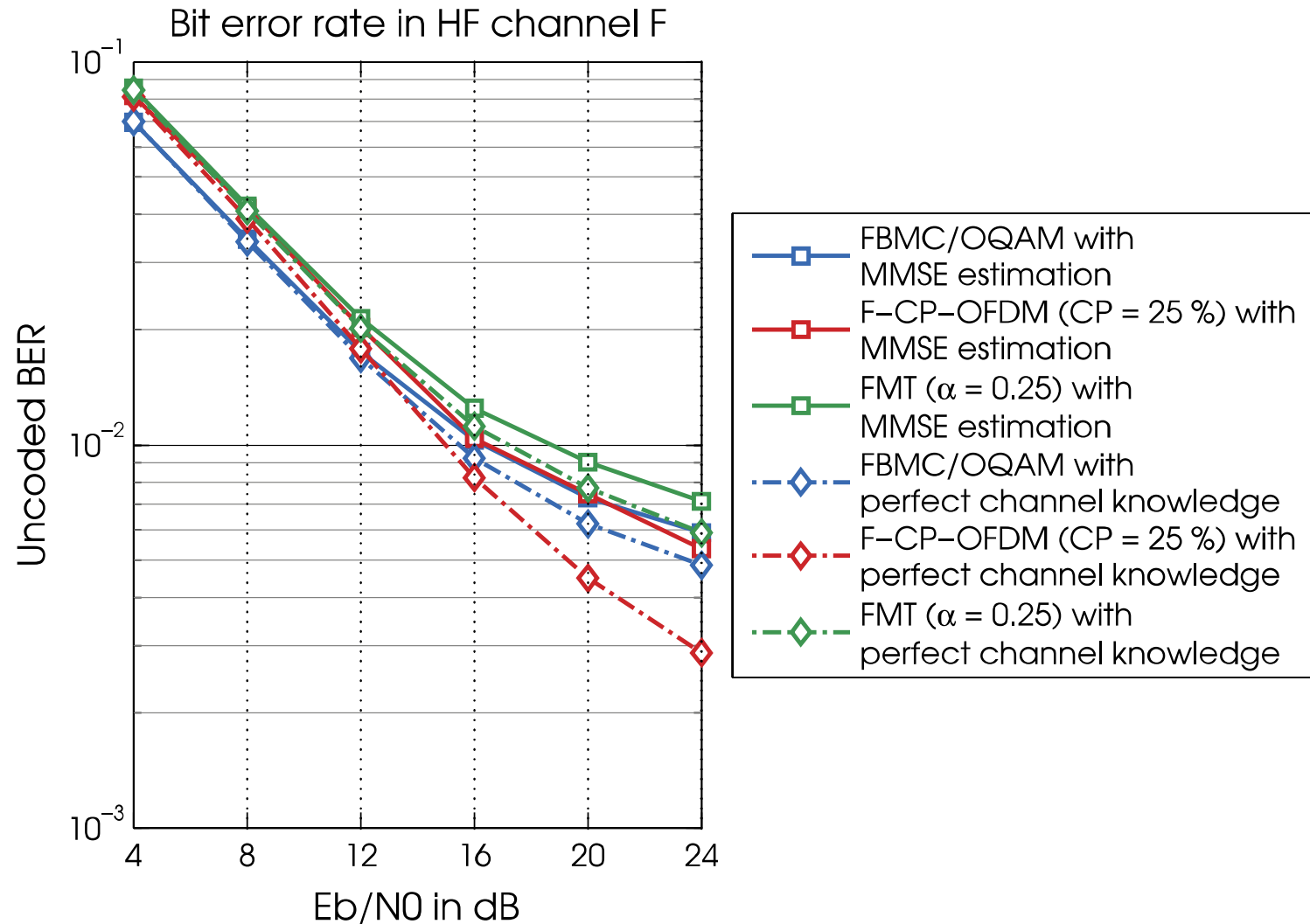
# Ekvalisaattorin asteluvun vaikutus FBMC/OQAM:n suorituskykyyn



# Simulointituloksia – BER eri menetelmillä – HF E



# Simulointituloksia – BER eri menetelmillä – HF F





- Testatuissa tapauksissa OFDM toimi luotettavimmin tosin ero FBMC/OQAM:n on kaikenkaikkiaan varsin pieni.
- FMT heikoin kaikilla mittareilla.
- Vertailussa tulee ottaa huomioon, että FMT:n ja OFDM:n pienempi spektraalinen tehokkuus rajoittavat tiedonsiirtokapasiteettia.
- Lisäksi FBMC/OQAM:n parempaa spektraalista tehokkuutta voidaan koodauksen avulla hyödyntää suorituskyvyn parantamiseksi.
- Käytännössä kaikilla menetelmillä päästään alle  $10^{-4}$  bittivirhesuhteeseen sopivalla koodauksella.

# Tuloksien julkaiseminen

## Tehovahvistintutkimus

- Mika Korhonen, *HF-taajuusalueen tehovahvistimen linearisointi*, diplomityö, TTY, 12/2017
- Tavoitteena kirjoittaa julkaisu ICMCIS 2018 konferenssiin

## HF-taajuusalueen monikantoaaltotekniikat

- Yksi julkaisu on lähetetty WCNC 2018
- Toinen julkaisu on tekeillä lähettäväksi ICMCIS 2018 konferenssiin
- Tavoitteena on myös kirjoittaa tieteellinen lehtiartikkeli aiheesta

ICMCIS: International Conference on Military Communications and Information Systems,  
DL 15.1.2018

WCNC: IEEE Wireless Communications and Networking Conference

