

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU
Tietotekniikka
Tietoliikennetekniikka

Tutkintotyö

Jari Virtanen

MIMO – MONIANTENNILÄHETTÄMINEN JA -VASTAANOTTO

Tutkintotyö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
insinöörin tutkintoa varten Tampereella 10.12.2008

Työn ohjaaja
Työn teettäjä
Tampere 2008

Lehtori Ari Rantala
Tampereen ammattikorkeakoulu

Tietotekniikka

Tietoliikennetekniikka

Tutkintotyön tekijä

Jari Virtanen

Tutkintotyön nimi

MIMO- moniantennilähtettäminen- ja vastaanotto

Päivämäärä

10.12.2008

Sivumäärä

28 sivua + 1 liitesivua

Hakusanat

MIMO, SIMO, MISO, SISO, WLAN, MIMAX

Koulutusohjelma

Tietotekniikka

Suuntautumisvaihtoehto

Tietoliikennetekniikka

Työn teettäjä

Tampereen ammattikorkeakoulu

Työn ohjaaja

Lehtori Ari Rantala

Langattomassa tiedonsiirrossa on tullut vastaan tarve suurelle siirtokapasiteetille useiden käyttäjien kesken, lähinnä liikkuvan kuvan ja raskaiden web-sivujen kannettavilla päätelaitteilla selaamisen takia. MIMO-tekniikasta on kehitetty ratkaisua niin langattomien lähiverkkojen, matkapuhelinverkkojen kuin langattomien internetyhteyksienkin nopeuden nostamiseksi. Näistä lähimpänä kaupallisia sovelluksia on langattomiin lähiverkkoihin tarkoitettut laitteet, vaikka niiden lopullinen standardi ei olekaan vielä valmis.

Muiden tekniikoiden parissa on vielä ratkottavana paljon kysymyksiä, lähinnä langattomien päätelaitteiden asettamien rajoitusten saralla.

Author	Jari Virtanen
Engineering thesis	MIMO – Multiple input / Multiple output
Date	12 th of December, 2008
Number of pages	28 pages + 1 appendix
Keywords	MIMO, SIMO, MISO, SISO, WLAN, MIMAX
Degree programme	Computer systems engineering
Specialisation	Telecommunications engineering
Commission Company	Tampere Polytechnic
Thesis supervisor	Senior lecturer Ari Rantala

Wireless communications have met a need for greater throughput due to increased need for video streaming and more complicated applications of web pages. MIMO-technology has been developed to meet these needs and it will affect all fields of wireless communication. The first commercial solutions will contain WLAN-applications even though the final standard is still under development. Cellular mobile phone networks and other solutions will follow as soon as the technologies are ready to meet the high power and processing standards for successful applications.

ALKUSANAT

Haluan kiittää kaikkia lähimmäisiäni ja koulun henkilökuntaa tuesta ja avusta.

Työ on tehty Tampereen ammattikorkeakoululle.

Työ on julkinen (ei salainen).

Tampereella 10.12.2008

Jari Virtanen

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ.....	i
ABSTRACT.....	ii
ALKUSANAT.....	iii
SISÄLLYSLUETTELO.....	iv
LYHENTEET JA MERKIT.....	v
1 Johdanto.....	1
2 Taustatietoa.....	3
3 MIMO-tekniikan kehitys.....	6
4 MIMO-tekniikan toimintaperiaatteet.....	9
4.1 Monitie-etenemisen hyödyntäminen.....	9
4.2 Useiden antennien hyödyntäminen.....	9
4.2.1 Tiedonsiirtokapasiteetin kasvu.....	10
4.2.2 Kantomatkan kasvu.....	10
4.2.3 Signaalikohinasuhteen kasvu.....	11
4.3 Lähettimen lohkot.....	12
4.3.1 Esikoodauksen suunnittelu.....	13
4.3.2 Kanavatiedon saaminen lähettimelle.....	14
4.3.3 Lähettimen tilakoodaus- ja tila-aikalohkojen rakenne.....	18
4.3.4 Tila-aika lohkokoodit.....	19
4.3.5 Lineaarisen esikoodaajan rakenne.....	20
4.3.6 Esikoodaus tulevissa langattomissa järjestelmissä.....	21
4.4 MIMO:n algoritmit.....	22
5 Päätelmät.....	26
LÄHTEET.....	27
LIITTEET	
1 MIMO:n kapeakaistaisen kanavan kapasiteetin laskukaava	

LYHENTEET JA MERKIT

BLAST	Bell Labs Layered Space-Time, Bellin kehittämä MIMO-tekniikan esiaste
CDMA	Code Division Multiple Access, koodijakoinen monikäyttötekniikka, joka perustuu hajaspektritekniikkaan. Mahdollistaa useiden käyttäjien samanaikaisen tiedonsiirron langattomissa järjestelmissä aiempaa suuremmalla kapasiteetilla
CSIT	Transmit Channel Side Information, lähettimen puolen kanavainformaatio
DET	Dominant Eigenmode Transmission, MIMOn algoritmityyppi
DFT	Discrete Fourier Transform, diskreetti Fourier-muunnos
FDD	Frequency Division Duplex, taajuusjakoinen duplex-tekniikka
GSM	Global System for Mobile communications, yleinen standardi matka puhelinliikenteelle
IDFT	Inverse Discrete Fourier Transform, käänteinen diskreetti Fourier-muunnos
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers, kansainvälinen teknisen alan tutkimus- ja standardointijärjestö
MIMAX	Eurooppalainen projekti, jossa on tarkoitus yhdistyä MIMO-tekniikka 802.11a-standardin WLAN-tekniikkaan
MIMO	Multiple Input, Multiple Output, moniantennilähetys- ja vastaanotto-tekniikka, jolla voidaan nopeuttaa langatonta tiedonsiirtoa
MISO	Multiple Input, Single Output, monen lähettimen ja yhden vastaanottimen tiedonsiirtojärjestelmä
MRC	Maximum Ratio Combining, maksimisuhteen yhdistely
OFDM	Orthogonal Frequency Divided Modulation, useissa langattomissa järjestelmissä käytetty modulointitekniikka
SISO	Single Input, Single Output, perinteinen yhden lähettimen ja -vastaanottimen tiedonsiirtojärjestelmä
SIMO	Single Input, Multiple Output, yhden lähettimen ja monen vastaanottimen tiedonsiirtojärjestelmä
STBC	Space Time Block Codes, tila-aika lohkokoodit, käytetään MIMOn lähettimellä signaalin symbolimappauksessa
TDD	Time Division Duplex, aikajakoinen duplex-tekniikka

WIMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access, IEEE 802.16 – standardiin perustuva langaton laajakaistatekniikka
WLAN	Wireless Local Area Network, langaton paikallisverkko tietokoneiden tai muiden tietoliikennelaitteiden väliseen tiedonsiirtoon

1 Johdanto

Nyky-yhteiskunnassa mahdollisuus tiedonsiirtoon ihmisten välillä korostuu jatkuvasti. Perinteisesti tiedonsiirto on toteutettu kiinteästi kaapeleihin pohjautuvilla ratkaisuilla, mutta tekniikan kehittyessä viestintä on siirtynyt langattomiin yhteyksiin.

Langattomaan tiedonsiirtoon liittyy tiettyjä perusongelmia, jotka tekevät muun muassa radiotietä käyttävästä tiedonsiirrosta haastavaa ja eri tavoilla rajoitteista. Eri yhteistyöelimet ja laitevalmistajat ovat kuitenkin ratkoneet näitä ongelmia niin, että ihmisten saatavilla ovat jo pitkään olleet esimerkiksi radiopuhelimet, matkapuhelimet, langattomat tietoverkot ja monet muut tehokkaan langattoman viestinnän mahdollistavat järjestelmät.

Langattomassa viestinnässä eräs suurimpia ongelmia on käyttökelpoisen taajuusalueen rajoittuneisuus. Erilaiset viestintäjärjestöt ja standardoinnista vastaavat elimet ovat allokoineet eri tekniikoille niille sopivat taajuusalueet, usein maakohtaisesti, mutta osassa järjestelmistä on jo kehitysvaiheessa neuvoteltu ja päätetty sopiva ja haluttu taajuusalue, jolla järjestelmä toimii.

Useissa pitkän matkan järjestelmissä, kuten yleisradiolähteet, taajuusalueella 88 MHz–108 MHz, on tärkeää saada käyttöön tarpeeksi matala taajuusalue, jolloin koko maan laajuinen kuuluvuus voidaan saavuttaa suhteellisen vähäisellä radioasemamäärällä. Tällöin ei ole mielekästä käyttää vapaan taajuusalueen suurimpia taajuuksia pitkän matkan tiedonsiirtoon perustuvissa järjestelmissä, koska korkeat taajuudet vaimenevat paljon nopeammin kuin matalat. Tämä taas lisäisi saman peittoalueen saamiseksi vaadittavien tukiasemien määrää rajusti.

Yleisradiolähteyksessä koko taajuusaluetta ei käytetä paikallisesti, vaan eri maanosissa toimivat maanlaajuiset kanavat eri taajuuksilla ja näiden lisäksi ovat vielä paikallisasemat. Koska radiolähteykset ovat pääosin analogista ääntä, ei niiden siirtämiseen tarvita kovinkaan suurta taajuuskaistaa. Tämä tilanne muuttuu, kun siirrytään digitaalisiin nopean datasiirron mahdollistamiin järjestelmiin.

GSM-järjestelmä toimii edellisestä poikkeavana esimerkkinä siitä, kuinka rajoitetun taajuusalueen käyttöä on pyritty digitaalisessa järjestelmässä tehostamaan pakkaamalla lähetettävää äänisignaalia, käyttämällä hyväksi taajuusjakoisen järjestelmän lisäksi aikajakoisuutta ja muita kehittyneitä keinoja taajuuskaistan tehokkuuden parantamiseksi. GSM-järjestelmä poikkeaa radiojärjestelmästä siinä, että se on kaksisuuntainen, jokaiselle käyttäjälle henkilökohtainen järjestelmä, kun radiolähetteestä käyttäjät vain vastaanottavat kuulemansa lähetyksen samanaikaisesti.

MIMO-järjestelmissä (*engl. Multiple Input, Multiple Output*) eli moniantennijärjestelmissä tarkoituksena on ollut parantaa langattomien järjestelmien, kuten langattomien tietokoneverkkojen tiedonsiirtokapasiteettiä kehittämällä lähetyksen spektritehokkuutta. Tällä tarkoitetaan käytännössä sitä, että tiedonsiirrossa lähetetään enemmän bittejä samassa aikayksikössä samalla taajuuskaistalla kuin aiemminkin. Parannus näissä järjestelmissä saadaan usean antennin käyttämisestä perinteisen yhden sijaan, sekä siirrettävän datan koodaamisesta. MIMO-järjestelmät luetaan niin sanottujen 'älykkäiden antennien' joukkoon.

2 Taustatietoa

Radiotien käyttäminen viestinnässä ei ole uusi ilmiö, mutta viestinnän luonteen muuttuminen vaativammaksi ja välitettävän informaatiomäärän kasvu tuovat esille ongelmia langattoman viestinnän hyödyntämisessä.

Ilmakehä ja maastoon kuuluvat esteet ovat aina tuoneet omanlaisensa ongelmat ja ilmiöt langattomaan tiedonsiirtoon. Sen lisäksi, että jo siirtotie, eli ilmakehä vaimentaa lähetettyä signaalia, aiheuttavat ilmakehän kerrosten rajapinnat signaaleihin sirontaa ja heijastumia. Näiden lisäksi signaalin laatuun vaikuttavat vielä esteiden aiheuttama vaimennus, difraktiovaimennus sekä häipyminen ja doppler-siirtymä. Signaali myös viivästyy lähetyksen aikana ja siihen saattaa syntyä viivästymisen seurauksena merkittävää vaihevirhettä.

Vaimennus on langattoman tiedonsiirron perinteisin ongelma. Kuten aiemmin todettiin, aiheuttaa jo langattomassa tiedonsiirrossa siirtotienä käytetty ilmakehä ja sen ilmiöt, kuten sateet, vaimennusta signaaliin. Tämän lisäksi jokainen este, kuten talot, puut ja vuoret aiheuttavat oman vaimennuksensa signaalin tehoon, samoin tekee myös maan pinnan kaarevuus.

Vaimennusta voidaan ehkäistä valitsemalla mahdollisimman matalat lähetystaajuu-
det, sillä matalalla taajuudella lähetetty signaali vaimenee vähemmän kuin korkeita taajuuksia käytettäessä, ja näin signaalin kantamatkaa voidaan parantaa. Ongelmia tuo kulloinkin käyttöön määritetty taajuusalue, sillä usein matalimmat taajuusalueet on varattu pitkän matkan liikennöintiin.

Signaalin heijastuminen aiheutuu erilaisista esteistä, kuten rakennuksista ja ilmakehän eri rajapinnoista. Tällöin signaalin alkuperäinen tarkoitettu kulkusuunta muuttuu, ja se saattaa kuitenkin päätyä useiden eri heijastusten jälkeen vaimentuneena ja viivästyneenä vastaanottimeen. Heijastumista voidaan käyttää myös hyväksi tiedonsiirrossa, sillä heijastuneet signaalit päätyvät usein lähettimiltä katveessa oleviin kohteisiin. Tämä mahdollistaa tiedonsiirron onnistumisen monimutkaisissa olosuhteissa, kuten kaupungeissa. Heijastuneiden signaalien käyttäminen on myös yksi oleellisimmista tiedonsiirron laatua parantavista tekijöistä MIMO-tekniikassa.

Sironta on hieman heijastumisen kaltainen ilmiö, mutta siinä noin aallonpituuden luokkaa oleva epäjatkuvuuskohta siirtotiessä ikään kuin hajottaa radioaallon. Tällöin osa signaalin tehosta heijastuu tai siroaa eri suuntaan kuin on alun perin tarkoitettu, jolloin vastaanottimelle saapuu vaimentunut ja viivästynyt signaali /1/.

Difraktio on langattoman tiedonsiirron ilmiö, jossa signaali taipuu tai siroaa jonkun esteen taakse. Siinä esteen taakse päässeet signaalit usein vaimentavat toisiaan, mutta silti kyseistä ilmiötä käytetään hyväksi tiedonsiirron onnistumiseksi esim. kaupunkiolosuhteissa./2/

Langattoman tiedonsiirron periaate on luoda lähettävässä laitteessa haluttu signaali, joka viedään jännitteenä antenniin. Antennista signaali säteilee siirtotielle, eli ilmaan jolloin siihen vaikuttavat edellä mainitut häiriötekijät. Vastaanottimen antennissa ilmatieltä tullut signaali muodostaa puolestaan jännitteen, joka ilmaistaan vastaanottimessa.

Tällaista yksinkertaista periaatetta noudattaa esimerkiksi langattomissa tietoverkoissa (WLAN) käytettävä tiedonsiirto. Todellisuudessa, ennen lähetystä signaalia käsitellään monin tavoin, jotta se ei olisi niin altis siirtotien häiriöille ja jotta välitettävää informaatiota voitaisiin tiivistää, suuremman siirtonopeuden ja pienemmän lähetystehon saavuttamiseksi. Läheteeseen lasketaan ja liitetään myös virheentarkistussumma, jolla voidaan todeta lähetyksen onnistuneen virheettömästi. Esimerkiksi WLAN-tekniikassa signaali moduloidaan OFDM-menetelmällä ennen lähetystä ja siinä käytetään CDMA-tekniikkaa määrittämään tiedonsiirtoon käytettävä taajuuskanava /3/. Vastaavasti vastaanottimessa tarkistetaan, onnistuiko lähetys virheettömästi ja tämän jälkeen signaali demoduloidaan ja dekodataan, jolloin jäljelle jää alkuperäinen informaatio.

Samanlaiseen peruseriaatteeseen perustuvat myös muut langattomat tiedonsiirtojärjestelmät, kuten GSM. Toki jokaisen järjestelmän signaalinkäsittelytavat ja tekniset ominaisuudet on spesifioitu siihen parhaiten sopiviksi.

Tulevaisuudessa MIMO-teknologia tulee vaikuttamaan näihin kaikkiin järjestelmiin tehostamalla niiden toimintaa.

MIMO-tekniikka voidaan jakaa neljään alakategoriaan lähetävien ja vastaanottavien antennien lukumäärän perusteella.

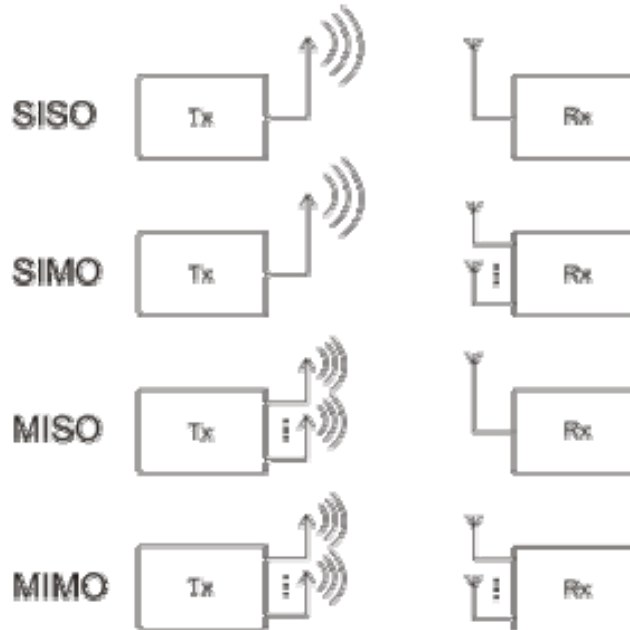
Ensimmäinen kategoria on perinteinen yhden lähetävän ja yhden vastaanottavan antennin järjestelmä SISO (Single Input/Single Output), esimerkiksi matkapuhelimen tukiasema ja itse päätelaite.

Toinen kategoria on SIMO (*engl. Single Input/Multiple Output*). Tässä järjestelmässä on yksi lähetävä antenni, mutta vastaanottavassa laitteessa niitä on kaksi tai useampia.

Kolmas kategoria on MISO (*engl. Multiple Input/Single output*),. Tässä järjestelmässä on kaksi tai useampia lähetäviä antennia, mutta vastaanottavassa laitteessa on vain yksi vastaanottoantenni.

Neljäs ja viimeinen kategoria on MIMO (*engl. Multiple Input/Multiple Output*). Tässä järjestelmässä on useita lähetäviä antennia ja myös vastaanottava laite hyödyntää kahta tai useampaa antennia.

Alla oleva kuva 1 selventää eri kategorioiden järjestelmien toimintaperiaatteita.



Kuva 1. Eri MIMO-järjestelmien toimintaperiaatteet /4/

3 MIMO-tekniikan kehitys

Jack Winters keksi MIMO-tekniikan alun perin jo vuonna 1984. Winters esitti Bell Laboratoriesissa urauurtavan teoriansa artikkelissaan ”*Optimum Combining in Digital Radio with Cochannel Interference*”, joka sai aikaan kehitystyön alkamisen MIMO-tekniikan parissa.

Vuonna 1996 Gregory G. Raleigh ja V.K. Jones esittivät radikaaleja ideoita monitie-etenemisen hyödyntämiseksi MIMO-kanavissa. Näistä saadaan hyötynä MIMO:n varsinainen päähyöty eli tiedonsiirtonopeuden kasvaminen taajuusalueen kasvamatta. Heidän artikkelinsa tunnetaan nimellä ”*Multivariate Modulation and Coding for Wireless Communication*”. Raleigh ja Jones todistivat matemaattisesti, että MIMO-tekniikka ei itse asiassa toimi ilman monitie-etenemistä.

Samana vuonna Gerard J. Foschini esitti BLAST-konseptin (engl. *Bell Labs Layered Space-Time*) työssään ”*Layered Space-Time Architecture for Wireless Communication in a Fading Environment When Using Multi-Element Antennas*”.

BLAST kiteyttää MIMO:n idean useiden antennien käyttämisestä sekä lähettimessä että vastaanottimessa. Ensimmäisellä BLAST-prototyypillä saavutettiin kahdeksal-

la lähetyssantennilla ja kahdellatoista vastaanottoantennilla 20 - 40 bittiä sekunnissa / Hz:n lähetyssnopeus.

MIMO:n matemaattinen malli syntyi vuonna 1999 I. Emre Telatarin toimesta. Hän todisti työssään ”*Capacity of multi-antenna Gaussian channels*”, että kanavakapasiteetti kasvaa antennien lukumäärän kasvaessa ja on suoraan verrannollinen lähettävien tai vastaanottavien antennien lukumäärään. Tämä MIMO:n perusteorian todistaminen matemaattisesti kiinnitti laajalti huomiota MIMO-tekniikan tutkimukseen.

Samaan aikaan itse MIMO-tekniikan kehitys edistyi ja Bell Laboratoriesissa kokeutettiin onnistuneesti MIMOon pohjautuvaa prototyyppiä vuonna 1998. Jo vuonna 1999 Gigabit Wireless ja Stanfordin yliopisto esittivät yhteistyönä ensimmäisen julkisen demonstraation.

Ensimmäinen kaupallinen sovellus MIMOsta julkaistiin vuonna 2002 Iospan Wirelessin (ent. Gigabit Wireless) toimesta. /5,6/

Alla on kuva langattomasta Belkinin N1-mallisesta reitittimestä, joka on kuluttajille suunnattu tuote, joka pohjautuu MIMO-tekniikkaan, mutta se on vasta ns. draft-laite, eli valmistajan oma näkemys MIMO:n hyödyntämisestä lopullisen standardin vielä puuttuessa. Reitittimen kolmen lähetyssantennin avulla päästään jopa 300 Mbps:n siirtonopeuksiin.



Kuva 2. Belkinin MIMOa hyödyntävä langaton reititin. /7/

4 MIMO-tekniikan toimintaperiaatteet

MIMO-tekniikan peruseriaatteita on kuvattu jo aikaisemmissa kappaleissa, mutta tässä kappaleessa on tarkoitus selvittää MIMOn toiminnan periaatteita vielä syvällisemmin.

4.1 Monitie-etenemisen hyödyntäminen

MIMO-tekniikka siis hyödyntää perinteissä langattomassa tiedonsiirrossa häiritsemiseksi laskettavaa monitie-etenemistä luodakseen useita lähetys- ja vastaanottoantenneja hyödyntäviin järjestelmiin vaihtoehtoiset kulkureitit useille samanaikaisille signaaleille. Jos lähettimellä ja vastaanottimella on näköyhteys toisiinsa, yksi lähetetyistä signaaleista etenee lyhintä reittiä vastaanottimeen saavuttaen sen ensimmäisenä. Tämä signaali tulkitaan ensimmäisenä. Muut samanaikaisesti lähetetyt signaalit löytävät tiensä vastaanottimeen heijastuen matkalla olevista esteistä. Jokainen heijastus muuttaa signaalin etenemiskulmaa ja näin heijastuneiden signaalien etenemisreitti vastaanottimeen on pitempi kuin näköyhteyden suoraan lyhimmän reitin kautta edenneellä signaalilla. Tämä aiheuttaa vastaanottimelle saapuneiden signaalien välille aikaeron, joka helpottaa niiden tunnistamista toisistaan. Monitie-edenneisiin signaaleihin syntyy myös vaihe-ero alkuperäiseen signaaliin nähden. Matkalla signaali myös vaimenee sekä viivästyy, joten lähetettäessä ajallisesti tietyn mittaiseksi määritetty signaali 'venyy' lähetysten aikana siirtotien ilmiöiden vaikutuksesta.

MIMO-tekniikka käyttää läheteissään MIMO-OFDM-modulointia, joka ei kuitenkaan edellytä näköyhteyttä lähettimen ja vastaanottimen välillä. Vastaanottimella käytetään tilakoodausta (*engl. spatial multiplexing*) samaan aikaan lähetettyjen, mutta siirtotien vuoksi eri aikaan saapuneiden pienten läheteiden kokoamiseen. /8/.

4.2 Useiden antennien hyödyntäminen

Monitie-etenemisen hyödyntäminen tuo MIMO-tekniikkaan perinteiseen yksiantennijärjestelmään verrattaessa kolme etua, joihin perehdytään seuraavaksi. Osana näistä hyödyistä on suoria fyysisiä seurauksia MIMOn fyysisistä ominaisuuksista.

sista, osa taas saavutetaan paljon vaativamman tutkimustyön tuloksena. Nämä liittyvät lähinnä MIMOn monimutkaisiin algoritmeihin.

4.2.1 Tiedonsiirtokapasiteetin kasvu

Suurin hyöty MIMOssa saadaan monen antennin tarjoamasta tiedonsiirtokapasiteetin kasvusta. Kun jokaiselta antennilta saadaan lähetettyä dataa samanaikaisesti, kasvaa tiedonsiirtokapasiteetti merkittävästi yhtä lähetys- ja vastaanottoantennia hyödyntäviin järjestelmiin verrattuna. Tämän asian voi todeta jo tarkastelemalla WLAN-tekniikan eri sukupolvien standardeja, mutta samalla on pidettävä mielessä, että MIMOa tukevalle 802.11n-tekniikalle on spesifioitu mahdollisuus käyttää 40 MHz:n kaistanleveyttä jokaisella kanavalla.

Aikaisemman sukupolven 802.11b/g/a-tekniikoilla kanavan kaistanleveys on puolestaan määritelty 20 MHz:iin.

Siinä missä ensimmäisen sukupolven 802.11b-WLAN-standardin laitteilla saavutettiin maksimissaan 11 Mbps:n siirtonopeus, 802.11g tai 802.11a-standardiin pohjautuvat yhtä antenniparia hyödyntävät laitteet pystyvät maksimissaan 54 Mbps siirtonopeuteen.

Uudelle MIMO:a hyödyntävälle 802.11n sukupolven tekniikalle on suunniteltu jopa 600 Mbps:n siirtonopeuksia, kun hyödynnetään maksimissaan neljää lähetys- ja vastaanotto antenniparia. Näiden nopeuksien saavuttaminen ensimmäisten sukupolvien kaupallisissa sovelluksissa on hyvin epätodennäköistä. Perinteistä 20 MHz:n kanavaa käytettäessä odotetaan päästävän 300 Mbps:n siirtonopeuksiin./9/ Useammankin antenniparin käyttäminen olisi periaatteessa mahdollista, mutta useiden antennien kautta siirrettävien läheteiden koodaaminen vaatii järjestelmältä suhteessa niin paljon tehoa ja aikaa, ettei nykyisellä tekniikalla ole vielä mielekää tehdä kaupallisia toteutuksia 802.11n -standardiin suunniteltua suuremmalla kapasiteetilla.

4.2.2 Kantomatkan kasvu

Seuraava merkittävä saavutettu etu on signaalin kasvanut kantomatka. MIMO-tekniikkaa hyödyntävissä laitteissa jokaisen antennin lähetysteho summautuu yhteen lisäten näin laitteen kantomatkaa huomattavasti. Perinteisten yhtä antenniparia hyödyntävien laitteiden (802.11b/g/a) kantomatkaksi mielletään yleensä n. 100

metriä, jolloin laitteiden tiedonsiirtonopeus putoaa pienimmälle sallitulle, eli 1 Mbps:n tasolle. Täydellä 54 Mbps:n siirtonopeudella etäisyys tukiaseman ja päätelaitteen välillä täytyy kuitenkin olla huomattavasti lyhyempi, eikä tukiaseman ja päätelaitteen välillä saa olla liiallista vaimennusta aiheuttavia esteitä, kuten seiniä, metallilevyjä tai muita paksuja, signaalia vaimentavia rakenteita.

802.11n-standardiin pohjaavilla laitteilla kantomatkojen arviointi on vaikeampaa, sillä tekniikka tarjoaa paljon erilaisia asetuksia, jotka vaikuttavat laitteiden suorituskykyyn. Yleisesti on kuitenkin arvioitu MIMO:a hyödyntävien laitteiden kak-

/10/

4.2.3 Signaalikohinasuhteen kasvu

MIMO-tekniikan viimeinen suurin hyöty liittyy välillisesti kahteen aiempaan. Se on parantunut signaali-kohina-suhde (S/N) vastaanotettavassa signaalissa verrattuna yhtä antenniparia hyödyntävään järjestelmään, lähetystehoa lisäämättä. Parantunut signaali-kohina-suhde tarkoittaa käytännössä signaalin tunnistamisen helpottumista vastaanottimessa ja vähentää häiriöitä itse tiedonsiirrossa. S/N tarkoittaa vastaanotetun signaalin tehon suhdetta ympäristön ja laitteiston aiheuttamaan taustakohinan tehoon. Jos signaali-kohina-suhde on heikko, on lähetetty signaali vaikeampi erottaa vastaanottimessa taustakohinan joukosta, jolloin sen oikeellisuus on myös vaikeampaa todeta. Suurella signaali-kohina-suhteella siis vastaanottimessa syntyy vähemmän bittivirheitä (BER), koska lähetetty data ei ole kärsinyt siirtotiellä, jolloin tiedonsiirron kapasiteetti paranee uudelleen lähetettävän datan pienen määrän vuoksi.

Teoriassa yhtä antenniparia käytettäessä 100 kHz:n kaistanleveydellä ja S/N:n ollessa 25 dB, siirtonopeus on noin 0,7 Mbps. Kahta antenniparia käytettäessä samalla 25 dB:n S/N-tasolla ja samalla kaistanleveydellä saavutetaan noin 1,4 Mbps:n siirtonopeus, mutta neljää antenniparia käytettäessä nopeus kasvaa samalla signaali-kohina-suhteella ja kaistanleveydellä jo 2,8 Mbps:ään.

Jos siis yhdellä antenniparilla haluttaisiin saavuttaa 25 dB:n signaali-kohina suhteella 2,8 Mbps siirtonopeus, pitäisi kaistanleveys kasvattaa 400 kHz:iin. Nämä esimerkit on laskettu ihanteellista lähetin- ja vastaanotin suunnittelua käyttäen, jo-

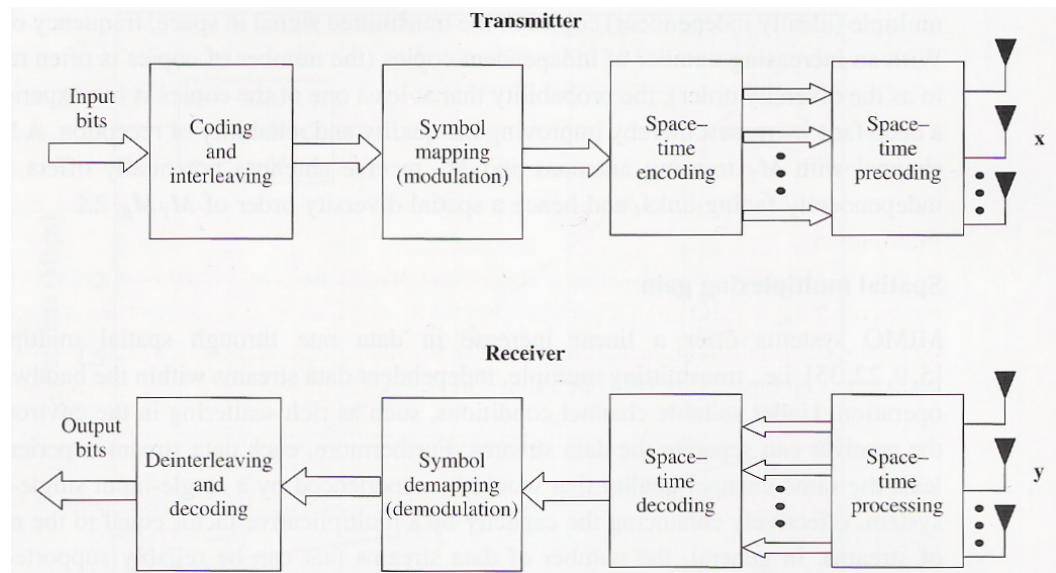
ten käytännössä erot eivät ole yhtä suuria, mutta samansuuntainen kehitys nopeuden kasvussa samalla signaali-kohina-suhteella on kuitenkin havaittavissa. /11/

4.3 Lähettimen lohkot

Kaikissa langattomissa tiedonsiirtolaitteissa itse lähettimen ja vastaanottimen rakenteet noudattavat pääpiirteittäin samantyyllisiä rakenteita. Järjestelmän täytyy ensin muodostaa haluttu informaatio lähetettäväksi, tämän jälkeen informaatio koodataan ja lomitetaan omassa laitelohkossaan ja tämän jälkeen suoritetaan symbolikartoitus eli modulointi, MIMOssa erikoisesti vaadittava tila-aika-koodaus tai tila-aika-esikoodaus. Tämän jälkeen informaatio lähetetään pieninä palasina jokaiselta antennilta tiedonsiirtokanavaan ja sitä kautta vastaanottimelle.

Vastaanottimessa tapahtuu täsmälleen samat tiedonkäsittelyvaiheet päinvastaisessa järjestyksessä eli ensimmäisenä aika-tila-prosessointi, aika-tila-dekoodaus, demodulointi ja dekoodaus ja lomituksen poisto. Jokaiselle toimenpiteelle on siis lähettimessä ja vastaanottimessa oma laitelohkonsa, ja näitä lohkoja tarkastellaan tässä kappaleessa tarkemmin lähettimen kannalta.

Alla kuvassa 3 on esitetty monimutkaisen tasavertaisen MIMO-järjestelmän lähetin- ja vastaanotinlohkot. X ja Y merkitsevät lähetettyjä ja vastaanotettuja signaali-vektoreita.



Kuva 3. Monimutkaisen MIMO-järjestelmän lähetin- ja vastaanotinlohkot /12/

4.3.1 Esikoodauksen suunnittelu

Lähettimessä kaksi symbolitasolla tärkeintä lohkoa ovat esikoodaus ja tila-aikakoodaus. Esikoodaus on lähettimessä viimeinen digitaalinen lohko, ja se hyödyntää lähettimellä olevaa kanavatietoa, tässä tapauksessa lähettimen puolen kanavainformaatiota (*CSIT*, engl. *Transmit Channel Side Information*) lähetettävän informaation koodauksessa. MIMO-tekniikassa tämä lähettimen puolen kanavatieto on erityisen tärkeä järjestelmän suorituskyvyn parantamisen kannalta ja sitä tarkastellaankin omassa kappaleessaan.

Tila-aika-koodaus puolestaan ei ole lähettimen puolen kanavainformaatiota olevan, vaan keskittyy parantamaan lähettimen luotettavuutta diversiteetin kautta. Näiden kahden tekniikan lisäksi lähettäminen vaatii normaalin kanavakoodauksen, jotta tiedon suojaaminen bittitasolla on mahdollista.

Lähettimen puolen kanavainformaatio auttaa saavuttamaan paremman lähetyksenopeuden, paremman kattavuusalueen ja vähentämään vastaanottimen rakenteen monimutkaisuutta MIMO-järjestelmissä.

Kanavainformaatiolla on monia eri tarkkuustasoja, joista täydellinen kanavainformaatio on luonnollisesti paras mahdollinen, mutta se on todella vaikea saavuttaa aika-selektiivisesti vaimenevassa siirtokanavassa. Todennäköisemmin vaadittavan kanavainformaation saa aikaiseksi kanava-arviolla, johon liitetään asiaankuuluva virhe-kovarianssi. Muut osittaiset kanavainformaation muodot voivat sisältää vain parametrin muodon kanavan tilasta, kuten esimerkiksi kanavan tila-arvon tai K -kertoimen. Tässä kappaleessa kuitenkin oletetaan, että vastaanottimella kanavan tila tunnetaan täydellisesti ja tarkastelun kohteena on lineaarinen esikoodaaja, koska se on kapasiteetiltään optimaalinen kun CSIT tunnetaan vain arviolta.

Toiminnallisesti esikoodaaja on lähettimen lohko, jossa lähetettävä signaali valmistetaan kanavainformaation perusteella lähetyskanavaan sopivaksi, jotta se ei huku lähetyksen aikana. Se on rakenteeltaan periaatteessa säteenmuodostaja (*engl. beam-former*) joko yhdellä tai useammalla säteellä, joista jokaiselle määritetään suunta- ja tehokuorma.

Langaton leveäkaistainen tiedonsiirtokanava on selektiivinen ajan, taajuuden ja tilan suhteen eli se on toisin sanoen häipyvä. Tätä häipymää aiheuttavat jo ensikappaleissa mainitut Doppler-siirtymä, viive, signaalin vaihemuutokset ja sironta. Esikoodauksen toimintaa ja CSITin muodostamista tarkastellaan yleisimmin ajan mukaan muuttuvan, mutta taajuudeltaan muuttumattoman kanavan suhteen, koska OFDM:llä on mahdollista muodostaa taajuusselektiivisessä ympäristössä taajuuden suhteen muuttumaton ratkaisu jokaiselle alikantoaallolle.

4.3.2 Kanavatiedon saaminen lähettimelle

Kanavainformaatio on jokaisen langattoman järjestelmän toiminnan kannalta tärkeä peruselementti, jonka toteutus täytyy ottaa huomioon jo suunnitteluasteella. Jos tiedonsiirtokanavan tietoja ja muutoksia ei oteta tiedonsiirrossa huomioon, ei lähettäminen vaadittavalla tasolla välttämättä onnistu.

MIMO-järjestelmässä kanavainformaatiota tarvitaan lähettimellä esikoodausvaiheessa, joten seuraavassa tutkitaan tämän tiedon toimittamista ja hyödyntämistä esikoodauslohkon kannalta.

Kanavainformaation saaminen lähettimelle on aina monimutkaisempaa kuin vastaanottimelle, sillä signaali etenee kanavaan vasta lähdettyään lähettimeltä. Vastaanotin saa kanavainformaation vastaanotetun signaalin ominaisuuksien muutoksien perusteella ja täten sen täytyy toimittaa kanavainformaatio takaisin lähettimelle.

Kun otetaan huomioon, että tietoliikenne on harvoin jatkuvasti yksisuuntaista, vaan lähettimen ja vastaanottimien roolit kummankin liikennöintiin osallistuvan osapuolen kesken vaihtuvat, niin kanavainformaation toimittaminen kummallekin osapuolelle täytyy järjestää kulloinkin käytössä olevan järjestelmän perusteella. Teoriassa, koska tietoliikennejärjestelmät ovat usein full-duplexeja, eli niissä voidaan siirtää tietoa samanaikaisesti kumpaakin suuntaan, voi lähetin olettaa kanavan tilan olevan lähettämässään informaatioissa saman kuin toisen osapuolen lähettämässä informaatioissa, kunhan lähetystaajuudet, lähetysaika pysyvät samana, eikä antennien sijainnit muutu.

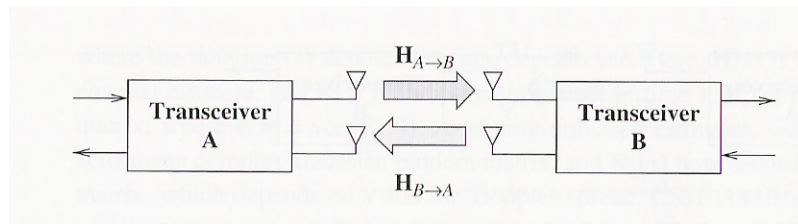
Käytännössä full-duplex-liikenteessä ei kuitenkaan voida käyttää aivan samoja taajuuksia, aikoja ja sijainteja, jolloin edellä kuvattu kanavainformaation hankkimisen vastavuoroisuusperiaate hieman kärsii, mutta sen periaate säilyttää tarvittavan tarkkuuden niin kauan kuin lähettimen lähetysten ja vastaanottimen lähetysten välinen aikaviive ei kasva suuremmaksi kuin kanavan koherenssiaika. Vastaavasti taajuuden muutos ei saa olla suurempi kuin kanavan koherenssikaistanleveys ja antennien paikan muutos ei saa olla suurempi kuin kanavan koherenssietäisyys.

”Koherenssikaistanleveys kertoo puolestaan suurimman taajuuseron, jolla kahden eri taajuisen signaalin häipyminen on vielä samanlaista. Jos eri signaalit häipyvät samalla tavalla, ovat ne samalla koherenssikaistalla.

Koherenssiaika kertoo suurimman aika-eron, jolla häipymisestä johtuvan signaalitason muutos ei vielä ole merkitsevä. Koherenssiaika kuvaa häipymisen samankaltaisuutta kahdella eri ajan hetkellä /13/”

Tämä vastavuoroisuusperiaate (*engl. reciprocity principle*) tunnetaan avoimen silmukan menetelmänä (*engl. open-loop method*), ja se toimii ainoastaan aikajakoisissa duplex-järjetelmissä (TDD), joissa lähettäminen tapahtuu muuttumattomalla taajuudella eriaikaisesti, kuitenkin edellä mainitun koherenssiaikavaatimuksen mukaisesti.

Alla on kuvassa 4 esitetty kanavainformaation toimittaminen lähettimelle vastavuoroisuusperiaatetta hyväksikäyttäen.



Kuva 4. Kanavainformaation toimittaminen lähettimelle vastavuoroisesti /14/

Taajuusjakoisessa duplex-järjestelmässä (FDD) lähettäminen tapahtuu samanaikaisesti eri taajuuksilla, jolloin taajuusero lähetyskanavien välillä on paljon suurempi kuin sallittu koherenssikaistanleveys, joten vastavuoroisuusperiaatetta ei voida käyttää tällaisissa järjestelmissä.

Vastavuoroisuusperiaate toimii teoriassa vain radiokanavassa joka on käytössä antennien välillä, kun taas käytännössä kanavainformaatiota käytetään kantataajuusprossessorilla. Tämä tarkoittaa sitä, että eri lähetys- ja vastaanotto RF-laitteistoketjuista tulee osa siirtokanavaa, jolloin niiden erilaisista lähetystaajuusmäärittelyistä johtuen vastavuoroisuus vaatii lähetys-vastaanottoketjun kalibrointia.

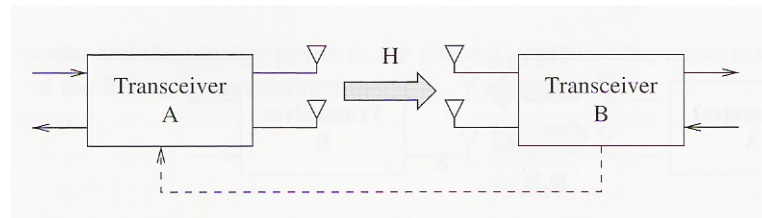
Vastavuoroisuusperiaatteen ongelmat voidaan kuitenkin kiertää käyttämällä ns. palautetietoa (*engl. feedback*) vastaanottimelta lähettimelle. Tällöin vastaanotin mittaa kanavan tilainformaation läheteestä ja lähettää tiedon välittömästi takaisin lähettimelle. Palautetta ei rajoita vastavuoroisuuden rajoitteet, mutta siinäkin aikavälin mittauksesta ja palautetiedon käytölle lähettimellä täytyy olla pienempi kuin kanavan koherenssiaika, tai tietoliikenteeseen syntyy virheitä.

Palautetta voidaan käyttää myös sellaisen kanavatiedon lähettämiseen, jotka muuttuvat paljon itse kanavan tilaa hitaammin, jolloin aikaviivettä käyvän palautteen lähettämiseksi voidaan pienentää huomattavasti.

Tällaista palautetiedon kautta tehtävää kanavainformaation välittämistä kutsutaan suljetun silmukan menetelmäksi (*engl. closed-loop method*) ja sitä käytetään juuri FDD-järjestelmissä.

Vaikka palautetietoa ei alistetakaan lähetin-vastaanotin kalibroinnille, palautetiedon käyttäminen aiheuttaa kuitenkin rasitteen järjestelmän suorituskyvyille, sillä se syö tiedonsiirtokapasiteettia. Tämän takia palautetiedon käsittelytavat, kuten lähetien määrän säännöstely ja tiedon kvantifiointi ovat sekä tärkeitä että tarpeellisia.

Alla on kuvassa 5 esitetty kanavainformaation toimittaminen lähettimelle palauteperiaatteella, varsinaisesta informaatiolähteestä eroavalla omalla läheteellä.



Kuva 5. Kanavainformaation toimittaminen lähettimelle palauteperiaatteella /15/

Taajuudeltaan tasaisessa MIMO-kanavassa kanavan tilainformaatiota lähettimellä voidaan hyödyntää niin tilapäisessä ulottuvuudessa kuin tilallisessakin ulottuvuudessa, kun taas perinteissä SISO-kanavassa vain tilapäisellä ulottuvuudella on merkitystä. On yleisesti tiedossa, että tilapäinen lähettimen kanavainformaatiotietomonella eri aikajaksolla tarjoaa mitättömän kanavakapasiteettivahvistuksen keskisuurella tai suurella signaali-kohinasuhteella. Kokeiden perusteella on todettu, että tämä vahvistus katoaa signaali-kohinasuhteen ollessa 15 dB. MIMOn tilallinen CSIT puolestaan mahdollistaa merkittävän parannuksen kanavakapasiteettivahvistukseen millä tahansa signaali-kohinasuhteen arvolla.

Suurella signaali-kohinasuhteella järjestelmät, joissa on korkeintaan yhtä paljon lähetysantenneja kuin vastaanottoantenneja, on pienenevä kapasiteettivahvistus johdun CSIT:n ns. vesitäyttö ratkaisusta (*engl. water-filling solution*), joka on tekniikka CSIT-arvojen optimointiin. Toisaalta taas järjestelmissä, joissa on enemmän lähetys- kuin vastaanottoantenneja CSIT kasvattaa kapasiteettiä korkeillakin signaali-kohinasuhteilla, koska kanava-arvo on pienempi kuin lähetysantennien lukumäärä.

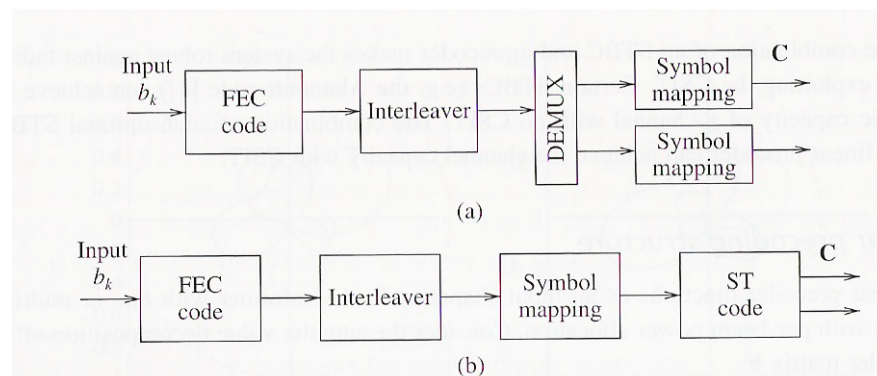
4.3.3 Lähettimen tilakoodaus- ja tila-aikalohkojen rakenne

Tässä kappaleessa tutkitaan edellisen kappaleen lähettimen kanavainformaatiotiedon pohjalta MIMO-järjestelmän lähettimen tärkeiden osien, eli tilakoodauslohkon (*engl. spatial multiplexing block*) ja tila-aika-koodauslohkon (*engl. space-time coding block*) rakennetta.

Jompikumpi tai molemmat näistä lohkoista sijaitsevat lähettimen koodauslohkossa, joka sijaitsee lähettimen lohkoketjussa ennen esikoodauslohkoa.

Koodauslohko sisältää kanavakoodaajan ja symbolimappaajan, jotka toimittavat vektorisymboleja esikoodaajalle. Koodauslohkon rakenne vaikuttaa siis esikoodauslohkon rakenteeseen, ja seuraavassa esitelläänkin kaksi laajaa toteutusta koodauslohkolle.

Alla olevassa kuvassa 6 on havainnollistettu sekä tilakoodausrakenne (a) että aika-tilakoodausrakenne (b) koodauslohkon osana.



Kuva 6. Koodauslohkon rakenne, ylempänä (a) tilakoodausrakenne ja alempana (b) aika-tilakoodausrakenne /16/

Ensimmäinen toteutus on tilakoodausrakenne, jossa luodaan kanavakoodaajan ja bittilomittajan tuottamasta tiedosta demultipleksaamalla erillisiä pienempiä tietovirtoja. Nämä tietovirrat mapataan vektorisymboleiksi, jotka lopulta syötetään esikoodaajaan. Tässä toteutuksessa jokaisella pienemmällä tietovirralla on oma signaali-kohinasuhteensa, joten jokaisen virran nopeusaste voidaan säätää erikseen.

Toinen toteutus on tila-aikakoodaus, jossa yksittäinen kanavakoodauksen ja lomituksen läpikäynyt tietovirta mapataan symboleiksi. Tämän jälkeen tila-

aikakoodaaja muuttaa nämä symbolit vektorisymboleiksi, jonka jälkeen ne siirretään esikoodaajalle.

Jos tila-aikakoodi on kapasiteetiltaan häviötön kanavalle, jonka lähettimen kanavainformaatiota ei tiedetä, on tämä toteutus kapasiteetiltaan optimaalinen kanavalle, jonka lähettimen kanavainformaatio tiedetään.

Tila-aikakoodauksen toteutuksessa käsitellään vain yhtä tietovirtaa, jonka takia tarvitaan vain yksi nopeusasteen säätö koko informaatiomäärälle. Tämän nopeusasteen määrää ns. ulomman koodin taso (*engl. outer-code rate*) ja konstellaatiosuunnittelu. Ulompi koodi on osa järjestelmän virheenkorjauskoodien toteutusta.

4.3.4 Tila-aika lohkokoodit

Tila-aika lohkokoodit (*engl. Space time block codes, STBC*) suunnitellaan yleensä saavuttamaan tilakanavan diversiteetti kun lähettimen kanavatilatietoa ei oleteta olevan saatavilla. Diversiteetti määrittää kulmakertoimen virheiden todennäköisyydelle suhteessa signaali-kohinasuhteeseen ja se on suhteessa käytössä olevien tilalinkkien lukumäärään, jotka eivät ole täysin korreloivia. Täyden diversiteetin koodi saavuttaa maksimaalisen diversiteetin asteen kanavassa saatavilla oleville lähetin- ja vastaanotin antennipareille. Kaikki tila-aikakoodit eivät kuitenkaan tarjoa täyttä diversiteettiä. Korkea diversiteetti on hyödyllinen häipyvällä siirtotiellä, koska se vähentää niin sanottua häipymämarginaalia, jota tarvitaan luotettavan yhteyslinkin saavuttamisessa.

Tila-aikakoodi voidaan kuvailla myös sen tila-asteen kautta, joka on keskiarvolukema erilaisista symboleista lähetettynä tietyllä symboliaikajaksolla. Ykkösasteen tila-aikakoodit siirtävät keskimäärin yhden symbolin symboli aikajaksolla riippumatta lähetysantennien lukumäärästä. Ortogonaaliset tila-aikakoodit omaavat lukeman joka on korkeintaan 1. Koodia, joka omaa lukeman joka on suurempi kuin 1, kutsutaan suurnopeus koodiksi (*engl. high-rate code*). Suurimman lukuarvon määrittää kuitenkin tiedonsiirtoon osallistuvien antennien lukumäärä.

Tila-multipleksaus voidaan mieltää erikoislaatuiseksi tila-aikakoodiksi, jolla on täysi tilallinen lukema, mutta ei lähetyksen diversiteettiä. Korkeamman tila-asteen koodit eivät tarkoita pienentyntä diversiteettiä, sillä monilla uusilla koodeilla on suuret tila-asteet ja täysi diversiteetti.

Tila-aikakoodauksessa on kuitenkin olemassa periaatteellinen tasapaino diversiteetin ja multipleksauksen välillä. Multipleksausasteen määrittää skaala, jolla lähetysnopeus kasvaa asymptoottisesti signaali-kohinasuhteen kanssa. Pysyvän nopeuden järjestelmässä multipleksausaste on nolla.

Tila-aikakoodauksen suunnittelua, jolla saavutetaan optimaalinen diversiteetti-multipleksaus tasapaino, tutkitaan jatkuvasti.

Tässä työssä käsitelty vahvistuksen saavuttaminen lähettimen kanavainformaatiotiedon perustella on kuitenkin itsenäinen ja käänteinen asia diversiteetti-multipleksaus tasapainolle.

Esikoodaajan ja tila-aikakoodien yhdistelmän tarkoitus MIMO-järjestelmässä on tehdä siitä immuuni häipymiselle, samalla kun lähettimen kanavainformaatiotieto on käytössä. Tietyt tila-aikakoodit (kuten esim. Alamouti koodi) voivat saavuttaa kanavan ergodisen kapasiteetin ilman lähettimen kanavainformaatiota. Tällaisten optimaalisten tila-aikakoodien ja lineaarisen esikoodaajan yhdistelmä voi saavuttaa täyden kanavakapasiteetin lähettimen kanavainformaation kera.

4.3.5 Lineaarisen esikoodaajan rakenne

Lineaarinen esikoodaaja toimii sisään tulevan informaation muokkaajana ja säteenmuodostajana yhden tai useamman säteen kanssa, sisältäen allokaation jokaisen säteen teholle.

Esikoodaajalla on kaksi tehtävää, se jakaa sisään tulevan signaalin ortogonaalisiin tilamuotoihin, joilla kaikilla on oma suuntamäärityksensä ns. eigen-säteiden (*engl. eigen-beam*) pohjalta ja näiden säteiden tehotasojen määrittäminen. Eigen-säteet ja kanavan eigen-suunnat ovat ne tekijät, jotka mahdollistavat MIMO-järjestelmässä usean samanaikaisen lähetteen lähettämisen ilman, että lähetettävät signaalit sotkevat toisiaan. Jos lähetteen esikoodatut ortogonaaliset tilamuodot vastaavat kanavan eigen-suuntia, näissä tiloissa lähetettyjen signaalien välillä ei ilmene häiriötä, jolloin voidaan synnyttää rinnakkaisia lähetyskanavia ja mahdollistaa erillisten signaalivirtojen lähettäminen.

Tämä lähetystekniikka vaatii kuitenkin täydellisen lähettimen kanavainformaation, josta eigen-suunnat saadaan, mutta vajavaisella kanavainformaatiotiedolla esikoodaaja toimii parhaansa mukaan yrittäen parittaa eigen-säteensä kanavan eigen-suuntiin, yrittäen vähentää näissä säteissä lähetetyn informaation aikaansaamia häiriöitä rinnakkaisiin lähetteisiin. Tätä ilmiötä kutsutaan englanninkielisellä nimityksellä *decoupling effect*.

Tämän lisäksi esikoodaaja määrittää kyseisille säteille myös tehotasot. Jos jokaisella eigen-säteellä on sama teho, lähetyssantenniryhmästä lähtevä säteilykuvio on isotrooppinen. Siinä tapauksessa, että säteillä on kuitenkin erisuuruiset tehotasot lähettimen säteilykuvio vaihtelee. Määrittämällä tehotasoja esikoodaaja muokkaa lähettimen säteilykuvion ja tehotasot kanavaan sopiviksi lähettimen tilakanavatiedon perusteella. Tällöin niihin suuntiin joissa kanava on vahva, lähetetään vähemmän tehoa kuin niihin suuntiin joissa kanava on heikko. Useammat antennit mahdollistavat säteilykuvion hienosäätämisen ja synnyttävät täten MIMO-järjestelmään suuren esikoodausvahvistuksen.

4.3.6 Esikoodaus tulevissa langattomissa järjestelmissä

Esikoodauksen toteutus on onnistuneesti sisällytetty IEEE:n 802.16e standardiin laajakaistaisille langattomille kaupunkialueiden verkoille (WIMAX). Suljetun silmukan järjestelmissä esikoodaaja perustuu joko alkuperäiseen kanavan mittaukseen tai kanavan statistiikkaan. Käyttäjät mittaavat kanavan käyttäen joko etenemissuunnan esipuhetta (*engl. forward-link preamble*) tai pilottitietoa. Tämän jälkeen takaisin lähettimelle lähetetään parhaiten vastaava yhtenäinen tieto kanavan tilasta, johon liitetään myös tiedon voimassaoloaika (*engl. time-to-live*). Esikoodaaja käyttää kanavatietoa kunnes sen voimassaoloaika täyttyy. Tämän lisäksi esikoodaajan toiminta nojaa myös harvemmassa tahdissa päivitettävään kanavastatistiikkaan. Avoimen silmukan tapauksessa osa käyttäjistä lähettää tunnustelusignaalin takaisin tukiasemalle, joka arvioi kanavan tilan tunnustelusignaalista ja määrittää lähettimen kanavainformaation lähetys-vastaanotto RF-osan kalibroinnin jälkeen.

Kuten aiemmin on todettu, MIMO-tekniikka sisältyy myös IEEE:n 802.11n standardiin langattomien tietoverkkojen osalta. Sekä tila-aikakoodaus että tila-

multipleksaus ovat tuettuina standardissa. Tällä hetkellä esikoodaukseksi ehdotetut ratkaisut hyödyntävät avoimen silmukan tekniikkaa.

Vastavuoroisuuden käyttäminen tarkoittaa sitä, että paras vastaanotettu säde on myös paras säde lähettämislle. Tukiasema käyttää etukäteen muodostettuja säteitä tiedonsiirrossa ja tallentaa parhaan signaalin laadun omaavat säteet jokaiselle käyttäjälle ja käyttää näitä säteitä lähettämiseen. /17/

4.4 MIMO:n algoritmit

MIMO:n toiminnan kannalta olennainen, mutta käyttäjälle vähemmän näkyvä puoli ovat tiedon lähettämässä ja vastaanottamisessa tarvittavat algoritmit. Perinteisessä langattomassa tiedonsiirrossa usean signaalin samanaikainen lähettäminen sekoittaa signaalit vastaanottokelvottomaksi kohinaksi, joten tiedon koodaaminen lähetysvaiheessa niin, että samanaikaiset signaalit ovat tunnistettavissa vastaanottimella, on välttämätöntä.

Seuraavassa tutkitaan tiedon koodaamiseen käytettäviä algoritmeja tulevan eurooppalaisen MIMAX-järjestelmän kannalta.

Moniantennitekniikan käyttämisellä saavutetaan monia etuja, kuten suoraan antennien lisääntyneestä määrästä saatava antennivahvistus (*engl. array gain*). Antennivahvistus ilmenee suoraan lisääntyneenä lähetystekona. Usean samanaikaisen datavirran lähettämässä saavutetaan puolestaan kanavointivahvistus (*engl. multiplexing gain*), joka ilmenee suoraan kasvaneena tiedonsiirtokapasiteettina. Kanavien parantuneen laadun takia saavutetaan parempi luotettavuus, eli diversiteettivahvistus (*engl. diversity gain*).

Nämä saavutetut hyödyt ovat kuitenkin osittain toisensa pois sulkevia parannuksia, ja kun MIMO:n ohjelmiston toiminnallisuutta on suunniteltu, on algoritmien suunnittelussa täytynyt ottaa huomioon nopeasti ympäristöön ja kanavan muutoksiin ajan ja tilan suhteen sopeutuvat algoritmit, jotka hyödyntävät tietyn periaatteellisen kompromissin mukaan edellä mainittuja etuja. Yleisesti periaatteellinen kompromissi haetaan kanavointivahvistuksen ja diversiteettivahvistuksen väliltä.

MIMO-algoritmit, jotka saavat aikaan kanavointivahvistusta, eivät luo ollenkaan diversiteettivahvistusta. Toisaalta taas täyden diversiteettivahvistuksen aikaansaavat MIMO-algoritmit hyödyntävät yhtä lähetettävää signaalia, eli niillä ei saavuteta lainkaan kanavointivahvistusta. Joka tapauksessa kuitenkin sopeutuvan modulaation ja kanavakoodauksen jälkeen diversiteetti- ja kanavavahvistus on havaittavissa BERinä, joka on kanavan ja lähetteen ominaisuuksia tutkittaessa käytetty mittayksikkö.

MIMO-algoritmeja kehitetään sopimaan erilaisiin käyttötarkoituksiin tilanteen mukaan, eli perinteiselle pisteestä pisteeseen tapahtuvalle tiedonsiirrolle, usean käyttäjän järjestelmälle ja kannettavalle järjestelmälle on kaikille omat algoritminsä.

Kaikkien yhtä kanavaa käyttävien MIMO-algoritmien seassa niin sanottu *dominant eigenmode transmission* (DET) takaa parhaan suorituskyvyn. Se aikaansaa vastaanotossa parhaan S/N-suhteen monimutkaisen koodauksen avulla. DET mahdollistaa täyden antennivahvistuksen ja täyden tilallisen diversiteetin ilman, että tiedonsiirtonopeus kärsii tästä. Varsinkin keskisuuren ja pienen S/N suhteen olosuhteissa DET:n suorituskyky on lähellä MIMOn monisignaalisia algoritmeja.

Varsinkin MISO- ja SIMO -tekniikoiden tapauksissa DET skaalautuu sekä lähetyksessä että vastaanotossa maksimisuhteen yhdistelyyn (*engl. maximal ratio combining*, MRC) siten, että sen kapasiteetti pysyy optimaalisena. Vähemmän optimaalisissa tapauksissa saattaa tulla kyseeseen muiden algoritmien käyttö, jolloin järjestelmän toiminta pysyy yksinkertaisempänä ja vaatimukset kanavatilanteelle pienenevät, mutta suorituskyky pysyy silti lähellä DETiä.

Täten järjestelmän täytyy olla muunneltavissa, jotta se voi vaihdella käytettävää lähetysstrategiaa yllämainittujen välillä kanavan tilatiedon ja vaaditun suorituskyvyn ohjaamana.

DETin käytössä S/N-suhteen lähettimessä ja vastaanottimessa maksimoivat parametrit saadaan MIMOn kanavamatriisista. Tämän takia DET vaatii, että sekä lähettimessä että vastaanottimessa pidetään kirjaa kanavainformaatiosta, mikä entisestään lisää DETin monimutkaisuutta. Vähemmän optimaaliset algoritmitkin kuitenkin vaativat usein kanavainformaation joko vastaanottimessa tai lähettimessä.

MIMAX-järjestelmissä kanavatilán tieto täytyy saada vastaanottimelle käyttäen kanavan ennustusalgoritmeja. MIMAXissa tehokkaiden kanavan ennustusalgoritmien tutkiminen on yksi tärkeistä tehtävistä, koska niiden tarkkuusvaatimuksissa täytyy ottaa huomioon RF-osan etupään rajoitukset ja häiriöt. DETin toiminta osittaisen kanavatiedon tai rajoitetun kanavatiedon tapauksessa täytyy ottaa huomioon, jotta järjestelmä toimisi halutulla tavalla.

Laajakaistaisissa järjestelmissä lähetyskanava voi olla taajuusselektiivinen, joten tällaisissa tapauksissa monikantaalitekniikat kuten OFDM tarjoavat yksinkertaisemman toteutuksen riippumatta koherenssikaistanleveydestä.

Kantataajuisissa MIMO-OFDM-järjestelmissä käytetään käänteistä diskreettiä fourier-muunnosta tai diskreettiä fourier-muunnosta (IDFT/DFT) käyttävää lohkoa jokaiselle lähetys- tai vastaanottoantennille. Tällaisessa tapauksessa diversiteettihaarjojen (*engl. diversity branches*) painotuksia säädetään muuttamalla taajuusaluetta. Tämän takia erityisiä painotusvektoreita voidaan käyttää jokaiselle alikantaalolle. MIMAXissa taas käytetään yhtä IDFT/DFT lohkoa kaikille antennille, kuten tehdään myös painotusvektoreissa.

Tämän takia OFDMn käyttö MIMAXissa mahdollistaa laskennallisesti yksinkertaisemman järjestelmän, joka on myös halvempi suunnitella ja jolla on pienempi tehontarve. OFDMn käyttö aiheuttaa kuitenkin pienen notkahduksen suorituskyvyssä, mutta vastaavasti sillä saadaan paljon merkittäviä etuja.

Aika-jaksolla käytettäviä painotustekniikoita on tutkittu vain SIMO-järjestelmissä, joissa on todettu suorituskyvyn heikkenevän vain kun lähetyskaistanleveys on vain vähän suurempi kuin koherenssikaistanleveys. MIMAXin toiminnan oletetaan olevan vastaavanlaista DETiä käytettäessä.

Joka tapauksessa, yksi MIMAXin kehityksen suurimpia haasteita on tutkia optimaalista painotusvektorien toimintaa ja soveltuvuutta taajuusselektiivissä järjestelmissä.

Monen käyttäjän MIMO-järjestelmissä (käytettäessä TDMAta), yllä kuvattuja diversiteettialgoritmeja voidaan käyttää jos lähetin- ja vastaanotin on varustettu MIMAX-ryhmällä. Tällainen tapaus on toteutukseltaan ja toiminnaltaan paljon yksin-

kertaisempi kuin optimaalinen kantoaaltoa käyttävä monta käyttäjää tukeva MI-MO-järjestelmä, kuten likaisen paperin koodausta (*engl. dirty paper coding*) hyödyntävät järjestelmät, vaikka sen suorituskyky onkin hieman heikompi silloin kun siirtotien S/N-suhde on heikko tai keskitasoinen.

Joka tapauksessa DET-TDMA:ta käyttävät järjestelmät vaativat toimiakseen täyden kanavainformaatiotiedon sekä lähettimellä että vastaanottimella, eli vähemmän optimaalisten tekniikoiden käyttö tulee luultavasti olemaan yleisempää helpomman toteutuksensa ansiosta. Esimerkiksi opportunistista kuljetussignaalin muodostusta hyödyntävät lähettimet ja vastaanottimet vaikuttaisivat varsin optimaalisilta MI-MAX-järjestelmiin, sillä siirrettäessä tietoa tukiasemalta käyttäjille tarvitaan lähettimellä tieto vain S/N-suhteesta.

Ylläkuvatut tekniikat yhdessä säätelyalgoritmien kanssa mahdollistavat monen käyttäjän järjestelmissä hyvän tiedonsiirtonopeuden käyttäjien välillä. Edellä mainittuja säätelyalgoritmeja käytetään laitteen MAC-prosessorissa, joka puolestaan suunnitellaan näissä tapauksissa erityisesti MIMO-järjestelmän toimintaa silmällä pitäen.

Häiriörajoitteisissa järjestelmissä kuten kannettavat sovellukset, MIMAXiin ehdotetut MIMO-algoritmit ovat tehokkaita, koska painotusvektorit voidaan valita vain yhtä käyttäjää silmällä pitäen ja kanavavasteen perustella, ilman että muiden käyttäjien kanavavasteita tarvitsee huomioida. Tämä takaa luontaisen häiriöiden vähenemisen, koska halutun käyttäjän ja muiden käyttäjien kanavat ovat erilaiset, eikä painotusvektorien valintaan tarvita kuin halutun yksittäisen käyttäjän kanavatilatiedot. /18/

5 Päätelmät

MIMO-tekniikka tulee siis olemaan osa kaikkea tulevaa langatonta tiedonsiirtoa, jossa useille käyttäjille tarvitsee välittää tietoa suurella siirtonopeudella. Ensimmäiset kaupalliset sovellukset ovat jo saatavilla langattomien lähiverkkojen saralla, sillä useat laitevalmistajat ovat jo tuoneet ns. draft-versioita 802.11n-standardiin pohjautuvista laitteista markkinoille. Näihin järjestelmiin MIMO-tekniikan tuominen on verrattain helppoa, koska laitteilla on suurempi tiedon prosessointikyky ja ne ottavat käyttövirtansa sähköverkosta, jolloin tehonkulutuksen merkitys pienenee.

Kannettavat sovellukset kuten matkapuhelimet ovat tällä saralla vaikeampia kohteita MIMOn lanseeramiseen, sillä lisääntynyt prosessoritehon tarve ja päätelaitteiden omat akut virtalähteinä asettavat vielä kovia rajoituksia kaupallisten sovellusten lanseeraamiselle. MIMOa on kuitenkin suunniteltu hyödynnettävän 4G-standardin matkapuhelinverkoissa. Lisäksi nykyään käytössä olevat 3G-standardin matkapuhelinverkot täytyy päivittää 4G:n tasolle, jotta MIMO-tekniikkaa voidaan hyödyntää.

Kaiken kaikkiaan MIMO on ehdottoman hyödyllinen sovellus, jolla teknisestä monimutkaisuudestaan huolimatta voidaan parantaa tiedonsiirtonopeuksia ilman taajuuskanavien kaistanleveyden kasvattamista.

LÄHTEET

- 1 Rantala Ari, Langaton Tiedonsiirto – Radiokanava s. 23
- 2 Rantala Ari, Langaton Tiedonsiirto – Radiokanava, s. 18
- 3 IEEE Standards Association [pdf-dokumentti]. [viitattu 10.12.2008]. Saatavissa:
<http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.11-2007.pdf> s.591
- 4 Computerbase. [www-sivu]. [viitattu 10.12.2008]. Saatavissa:
http://pics.computerbase.de/lexikon/182844/280px-Prinzip_MIMO.png
- 5 Albertan yliopisto. [www-sivu]. [viitattu 10.12.2008]. Saatavissa:
<http://www.ece.ualberta.ca/~hcdc/mimohistory.htm>
- 6 Farpoint Group. [pdf-dokumentti]. [viitattu 10.12.2008]. Saatavissa:
http://www.sohoware.com/support/pdf/WhitePaper-Farpoint_Group_Evaluates_MIMO.pdf
- 7 Belkin. [www-sivu]. [viitattu 10.12.2008]. Saatavissa:
http://catalog.belkin.com/IWCatProductPage.process?Product_Id=273526#
- 8 Wave Report [www-sivu]. [viitattu 10.12.2008]. Saatavissa:
<http://www.wave-report.com/tutorials/OFDM.htm>
- 9 Broadcom. [www-sivu]. [viitattu 10.12.2008]. Saatavissa:
http://www.broadcom.com/docs/WLAN/802_11n-WP100-R.pdf s.6
- 10 Wi-Fi Planet [www-sivu]. [viitattu 10.12.2008]. Saatavissa:
<http://www.wi-fiplanet.com/tutorials/article.php/3680781>
- 11 MIMO Wireless Communications (Biglieri, Claderbank, Constantinides, Goldsmith, Paulraj and Poor), s. 3-4
- 12 MIMO Wireless Communications (Biglieri, Claderbank, Constantinides, Goldsmith, Paulraj and Poor), s. 4
- 13 Rantala Ari, Langaton Tiedonsiirto – Radiokanava s. 47
- 14 MIMO Wireless Communications (Biglieri, Claderbank, Constantinides, Goldsmith, Paulraj and Poor), s. 91
- 15 MIMO Wireless Communications (Biglieri, Claderbank, Constantinides, Goldsmith, Paulraj and Poor), s. 92
- 16 MIMO Wireless Communications (Biglieri, Claderbank, Constantinides, Goldsmith, Paulraj and Poor), s. 101

- 17 MIMO Wireless Communications (Biglieri, Claderbank, Constantinides, Goldsmith, Paulraj and Poor), s. 88-133
- 18 MIMAX-Project. [www-sivu]. [viitattu 10.12.2008]. Saatavissa:
<http://www.ict-mimax.eu/index.php?id=374>
- 19 Campus Grimstad Institute of ICT. [www-sivu]. [viitattu 10.12.2008]. Saatavissa:
<http://ikt.hia.no/mobilecommunications/Projects/MIMO.htm>

MIMOn kapeakaistaisen kanavan kapasiteetin laskukaava /19/

$$C = \begin{cases} \log_2[\det(I_N + \rho/M H \cdot H^H)], & M \geq N \\ \log_2[\det(I_M + \rho/M H^H \cdot H)], & M < N \end{cases}$$