

Metropolia Ammattikorkeakoulu
Tietotekniikan koulutusohjelma

Heidi Itkonen

**Moniantennitekniikka ja sen vaikutus
radiotietoliikenteeseen**

Insinööritö 24.11.2010

Ohjaaja: yliopettaja Pertti Jäppinen

Ohjaava opettaja: yliopettaja Pertti Jäppinen

Tekijä Otsikko	Heidi Itkonen Moniantennitekniikka ja sen vaikutus radiotietoliikenteeseen
Sivumäärä Aika	50 sivua 24.11.2010
Koulutusohjelma	tietotekniikka
Tutkinto	insinööri (AMK)
Ohjaaja Ohjaava opettaja	yliopettaja Pertti Jäppinen yliopettaja Pertti Jäppinen
<p>Insinööri­työn aiheena on moniantennitekniikka (MIMO) ja sen vaikutus radiotietoliikenteeseen. Työ oli pääsääntöisesti selvitystyö moniantennitekniikasta ja sen vaikutuksista radiotietoliikenteeseen.</p> <p>Työn tavoitteena on selvittää moniantennitekniikkaa, sen sovelluksia ja sen tuomia etuja ja haittoja radiotietoliikenteessä. Työssä käsiteltiin myös standardeja, jotka tukevat MIMO-tekniikkaa ja sen sovelluksia.</p> <p>Insinööri­työssä selvitetään, miksi moniantennitekniikkaa ja sen sovelluksia kannattaa hyödyntää ja käyttää tulevaisuudessa radiotietoliikenteessä.</p> <p>MIMO on erittäin tärkeä osa radiotietoliikenteessä ja eikä ilman MIMO-tekniikkaa radiotietoliikenne voisi välttämättä kehittyä ja toimia kuin se toimii MIMO:n kanssa. MIMO:n antamat käyttömahdollisuudet ja niiden tuomat edut ovat hyvin tärkeä osa radiotietoliikennettä.</p>	
Hakusanat	MIMO, WIMAX, 4G, LTE, moniantennitekniikka ja radiotekniikka

Author Title	Heidi Itkonen MIMO and its influence on radio telecommunications
Number of Pages Date	50 pages 24 October 2010
Degree Programme	Information Technology
Degree	Bachelor of Engineering
Instructor Supervisor	Pertti Jäppinen, Principal Lecturer Pertti Jäppinen, Principal Lecturer
<p>The purpose of the thesis was to study the MIMO technique with the main focus on its influence on radio telecommunications. The technical details of the MIMO technique as well as a number of its applications was investigated followed by an elaboration on how it will impact radio telecommunications in the future.</p> <p>The thesis clarifies the benefits of the MIMO technique explaining why it is the technique of choice in a variety of present projects, and why it is one of the best techniques to be recommended for the radio telecommunications in the future also.</p>	
Keywords	MIMO, WIMAX, 4G, LTE, radio technique

Sisällys

Tiivistelmä

Abstract

Lyhenteet, käsitteet ja symbolit

1 Johdanto	8
2 Älykkäät antennit	9
2.1 Älykkäiden antennien tyypit	9
2.2 Älykkäiden antennien laajentaminen	10
3 MIMO:n tekniikka	11
3.1 Historia	11
3.2 Yleistä	12
3.3 WIMAX	13
3.4 Tila-aikakoodi	15
3.5 Alueellinen multipleksointi	16
3.6 MIMO:n tehtävät	17
3.7 Matemaattinen kuvaus	18
3.8 MIMO:n testaus	19
3.9 MIMO:n kanavat	20
3.10 Kapasiteetin valmiuksia	22
3.11 Lähettimet ilman kanavatietoja	24
3.12 MIMO-kanavan kapasiteetti satunnaisen matriisin teorian kautta	25
3.13 MIMO-antennit	28
4 MIMO:a tukevat standardit	28
5 MIMO:n käytötavat ja sovellukset	34
5.1 Sovellukset	40
5.1.1 Lähetin-vastaanotinkorrelaatio	40
5.1.2 Avaimenreikäkanavat	41
5.1.3 Aaltoputkikanavat	42
5.2 Muut kanavat	42
5.2.1 Kaapelikanavat	42
5.2.2 Optiset kanavat kuidussa (MMF)	43
5.2.3 Vapaan-tilan optiset kanavat (FSO)	43
6 Ominaisuudet, edut ja heikkoudet	45
7 Kehitysnäkymät	47
8 Yhteenveto	48
Lähteet	49

Lyhenteet, käsitteet ja symbolit

3 GPP/3 GPP2	Third generation partnership project
3G	Third Generation, kolmas sukupolvi
4G	Fourth Generation, neljäs sukupolvi
BPSK	Binary Phase Shift Keying, binäärinen vaihe vaimennus, joka käyttää kahta kanta-aallon vaihetta ilmaisemaan binäärisen viestin arvon 0 tai 1 esimerkiksi 0 ja +180 astetta.
BLAST	Bell Labs Layered Space-Time, Bellin kehittämä MIMO-tekniikan esiaste.
BLUETOOTH	avoin standardi laitteiden langattomaan kommunikointiin lähietäisyydellä.
BS	Base Station, tukiasema
CCK-OFDM	Complimentary Code Keying- Orthogonal Frequency Divided Modulation
CDMA	Code Division Multiple Access eli koodijakokanavointi, joka on yksi radiotien kanavanvaraustekniikoista. Koodijakokanavointia käytetään laajakaistaisissa järjestelmissä.
CSI	Channel State Information, tieto kanavan tilasta
CSIT	Transmit Channel Side Information, Lähettimen puolen kanavainformaatio
CPE	Customer Premises Equipment, asiakas hyväksytyt laitteet
DFT	Discrete Fourier Transform, Diskreetti Fourier-muunnos
DET	Dominant Eigenmode Transmission, MIMO:n algoritmityyppi
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum. Suorahajautus on FHSS:n lisäksi toinen CDMA:ta toteutettaessa käytössä olevista tekniikoista.

DOA	Direction of Arrival, saapumissuunta
DOS	Distribution of Squared, ruudullinen jakauma
FDD	Frequency Division Duplex, Taajuusjakoinen Duplex-tekniikka
FEXT	Far End Crosstalk, FEXT-ilmiö vähentää kapasiteettia kaapelikanavassa
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum, taajuushyppelytekniikka, joka on DSSS:n lisäksi toinen CDMA:ta toteutettaessa käytettävistä tekniikoista.
FIR	Finite Impulse Response, Säteen muotoilua voidaan tehdä yksinkertaisella FIR-suodattimella. FIR-suodattimen painot voivat muuttua sopeutuneesti.
GSM	Global System for Mobile communications, yleinen matkapuhelinliikenteen standardi.
HR-DSSS	High Rate- Direct Sequence Spread Spectrum, Korkea-arvoinen suora sekvenssinen hajontaspektri.
HS-DSCH	High-Speed Downlink Shared Channel, WCDMA -verkossa voidaan HS-DSCH -datavirta jakaa kahteen rinnakkaiseen osaan ja lähettää ne eri antennien kautta.
IDFT	Inverse Discrete Fourier Transform, käänteinen diskreetti Fourier-muunnos
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers, kansainvälinen teknisen alan tutkimus- ja standardointijärjestö.
IID	Independent and Identically Distributed, itsenäinen ja identtisesti yleinen muuttuja.
IP	Internet Protocol-osoite. IP-osoite on numerosarja, joka yksilöi jokaisen Internet-verkkoon kytketyn tietokoneen.
ISM	Industrial, Scientific and Medical, maailmanlaajuinen radiotaajuuskaista

ITU	International Telecommunication Union, kansainvälinen tietoliikenneunioni.
LMDS	Local Multipoint Distribution Service, nopeiden radioverkkojen teknologia
LAN	Local Area Network, lähiverkko
LMS	Least Mean Square, säteen muotoilussa käytetty yleinen algoritmi.
LTE	Long Term Evolution, on edistynyt 3G-tekniikka, jonka tarkoitus on kasvattaa datan siirtonopeuksia, parantaa palveluita ja vähentää kuluja.
LOS	Line of Sight, Näkösäde
MAC	Media Access Control, IEEE 802-verkoissa (esimerkiksi Ethernet) verkon varaamisen ja itse liikennöinnin hoitava osajärjestelmä.
MAN	Metropolitan Area Network, Kaupunkiverkko
MIMAX	Eurooppalainen projekti, jossa on tarkoitus yhdistää MIMO-tekniikka ja 802.11a-standardin Wlan-tekniikka.
MIMO	Multiple Input, Multiple Output, moniantennilähetys- ja vastaanottotekniikka, jolla voidaan nopeuttaa langatonta tiedonsiirtoa.
MMSE	Minimum Mean Square Error, Minimi viritetty tavanomainen virhe
MMF	Multi Mode Fiber, monimuotokuitu
MSC	Modulation and Coding Scheme, moduloinnin ja koodauksen tapahtuma
MISO	Multiple Input, Single Output, monen lähettimen ja yhden vastaanottimen tiedonsiirtojärjestelmä
MRC	Maximum Ratio Combining, maksimisuhteinen yhdistely

MUSIC	Multiple Signal Classification, DOA-estimoinnissa älyantennien järjestelmä arvioi signaalin saapumista käyttäen erilaisia tekniikoita, esimerkiksi MUSIC:ia
NLOS	Non Line Of Sight, ei näkösäde
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing. OFDM on useissa langattomissa järjestelmissä käytetty tekniikka.
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access, on moni käyttäjä versio suositusta OFDM-tekniikan digitaalisesta modulaatio järjestelmästä.
OSI	Open Systems Interconnection Reference Model, kuvaa tiedonsiirtoprotokollien yhdistelmän seitsemässä kerroksessa. Kukin kerroksista käyttää yhtä alemman kerroksen palveluja ja tarjoaa palveluja yhtä kerrosta ylemmäs
PAR	Page Address Register, sivuosoiterekisteri
PARC	Per -Antenna Rate Control -arkkitehtuuri
PBCC	Packet Binary Convolutional Code, siirtotekniikka
PC	Personal Computer, henkilökohtainen tietokone
PDA	Personal Digital Assistant, kämmentietokone
PHY	Physical layer of OSI model, OSI-mallin fyysinen kerros
PSK	Phase Shift Keying, vaiheavainnus
QAM	Quadrature Amplitude Modulation, modulointitekniikka, joka yhdistää vaihemodulaation ja amplitudimodulaation. QAM:ssä moduloidaan samanaikaisesti ja toisistaan riippumatta signaalin amplitudia ja vaihekulmaa.
QOS	Quality of Service, palvelun laatu
QPS	Quadrature Phase Shift, nelivaiheinen vaihevaimennus
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying, nelivaiheinen vaihe avainnus käyttää neljää kanta-aallon vaihetta, esimerkiksi 0,

+90, +180 ja +270 astetta, ja voi ilmaista 4 numeroarvoa 0 - 3 eli kaksi bittiä (00, 01, 10, 11).

RF	Radio Frequency, radiotaajuus
RFIC	Radio Frequency Integrated Circuit, radiotaajuudelle integroitu piiri
RX	Receiver, vastaanotin
SC-FDMA	Single carrier Frequency Division Multiple Access, yksikertainen kantaalto taajuusjakokanavointi -menetelmä.
SFBC	Space Frequency Block Coding, avaruustajuus lohko koodaus
SISO	Single Input, Single Output, perinteinen yhden lähettimen ja vastaanottimen tiedonsiirtojärjestelmä
SIMO	Single Input, Multiple Output, yhden lähettimen ja monen vastaanottimen tiedonsiirtojärjestelmä
SMX	Spatial Multiplexing, alueellinen multipleksointi
SNR	Signal to noise ratio. SNR on määritelty signaalin tehon suhteena signaalia häiritsevän kohinan tehoon. Signaali-kohinasuhde ilmoitetaan yleensä desibeleinä. Mitä parempi signaali-kohinasuhde on, sitä vähemmän kohina häiritsee.
STBC	Space Time Block Codes, tila-aika avaruuskoodit.
STC	Space Time Code, tila-aikakoodi
SVD	Simultaneous Voice and Data, samanaikainen ääni ja data arvo eli Pääakselihajotelma arvo.
TDD	Time Division Duplex, aikajakoinen duplex-tekniikka.
UE	User Equipment, käyttäjälaitteet
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System. UMTS on GSM:n seuraajaksi suunniteltu kolmannen sukupolven (3G) matkapuhelinteknologia.

VOIP	Voice Over Internet Protocol, IP-puhe
W-CDMA	Wideband Code Division Multiple Access. W-CDMA on UMTS-verkoissa käytettävä radorajapinta. Se määrittelee esimerkiksi, kuinka mobiililaitteet kommunikoivat tukiasemien kanssa ja miten signaalit moduloidaan.
Wifi	WLAN-tuotteista käytetään usein kaupallista nimitystä Wi-Fi.
WIMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access, IEEE 802.16 -standardiin perustuva langaton laajakaistatekniikka.
WLAN	Wireless Local Area Network, langaton lähiverkko tietokoneiden tai muiden tietoliikennelaitteiden välisiin tiedonsiirtoihin.
WMAN	Wireless Metropolitan Area Network, langaton kaupunkiverkko

Kaavoissa käytetyt lyhenteet ja symbolit

\otimes	konvoluutio
R	valonilmaisain (PD) -herkkyys
h (t)	kanavan impulssivaste.
Q	määrän liikennemuoto
g_{ijk}	kanavan vahvistus
KTH	tilaan jth lähettimen nteen vastaanotin
WC	kantotaajuus
τ_{pk}	vaiheen viivästyminen.
N_r = NT	kaistanleveys, joka on saavutettavissa vasta kun N _r -BSISO on ihanteellisessa ympäristössä.
Z	L A-L diagonaalimatriisi
L	määrän lisääminen
V N_r \tilde{A}-L	liikennemuotomatriisi
hw	N _r -NT-matriisi
H	kanavien vastauksen matriisi ja ominaisarvo
RR ja Rt	kuvaavat N _r -N _r - ja NT -NT -antennien korrelaatio matriiseja, jotka ovat lähettimen ja vastaanottimen puolella vastaanavanlaiset.
T_x	lähetin
R_x	vastaanotin
$N \rightarrow \infty$	empiirinen ominaisarvo jakelu suppenee, kun $F_{\mu}(\mu): F_{\mu N}(\mu) \rightarrow F_{\mu}(\mu)$
M	alhaisella asemalla
alpha	Rice-tekijä
N	lähestymistapojen äärettömyys empiirisessä jakelussa

$$C = \sum_{n=1}^N \tilde{x}_n^2 = \sum_{n=1}^N E_n \quad \text{Kiinteä ja maksimoitu jakelu ja kapasiteetti.}$$

1 Johdanto

Työ käsittelee moniantenni- eli MIMO-tekniikkaa niin matemaattisesti kuin tekstillisesti ja sen sovelluksia radiotietoliikenteessä. Työssä luodaan katsaus niin MIMO-tekniikkaan, sen sovelluksiin radiotietoliikenteessä kuin MIMO-tekniikan standardeihin, selvitetään MIMO-tekniikan tulevaisuutta ja sen kehitysnäkymiä. Teksti antaa kuvan MIMO-standardeista ja MIMO:n vaikutuksesta radiotietoliikenteessä.

2 Älykkäät antennit

Älykkäät antennit (smart antenna systems) ovat tekniikka, joka tehostaa langatonta viestintää. Älykkään antennin ideana on, että antenni pystyy muuttamaan lähetys- tai vastaanottokuviota tai molempia automaattisesti ympäristön ja signaalin mukaan. Älykkäät antennit ovat antenniryhmiä, jotka sisältävät älykkäitä signaalinkäsittelyn algoritmeja.

Älykkäitä antennitekniikoita käytetään erityisesti akustiseen signaalinkäsittelyyn, tunnistamiseen, seuraamiseen ja skannaamiseen tutka-, radioastronomia- ja radioteleskooppien ja useimmiten solunsisäisten järjestelmien avulla (kuten W-CDMA (Wideband Code Division Multiple Access) ja UMTS (Universal Mobile Telecommunications System)). Älykkäillä antenneilla on kaksi päätehtävää: DOA (Direction of arrival) -estimointi ja säteen muotoilu. DOA-estimoinnissa älyantennien järjestelmä arvioi signaalin saapumista käyttäen erilaisia tekniikoita, esimerkiksi MUSIC:ia (a Multiple Signal Classification). Säteen muotoilua käytetään luomaan säteilykuvio. Antennin ryhmiä lisäämällä vaiheittain signaalin suuntaan saavutetaan tavoitteet.

Älykkäs antenni -tekniikka on myös ominainen piirre MIMO (Multiple input, multiple output) -järjestelmissä, kuten IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) 802.11n -standardissa. [13.]

Älykkäiden antennien kaksi päätyyppiä ovat kytketyt keila-antennit (Switched Beam) ja joustavat antenniryhmät (Adaptive Array). Kytketyissä keila-antenneissa on siirretty palkkijärjestelmiin, koska palkkijärjestelmissä on saatavilla useita kiinteitä keilamalleja. Joustavissa antenniryhmissä (Adaptive Array) paneelit eivät anna antennien ohjata antennikeiloja mihinkään suuntaan, ilman niitä kiinnostavia ja häiritseviä viestejä. Antennikeilojen suunta voidaan arvioida käyttämällä niin sanottuja DOA-arviointimenetelmiä. [13.]

Säteen muotoilu on menetelmä, jota käytetään luomaan kuvion ja antennin joukko. Säteen muotoilu voidaan tehdä yksinkertaisella FIR-suodattimella (finite impulse response). FIR-suodattimen painot voivat muuttua sopeutuneesti, ja niitä voidaan käyttää antamaan optimaalinen säteen muotoilu, mikä vähentää MMSE:tä (Minimum Mean Square Error), joka on halutun ja todellisen suuntakuvion välillä muodostettu. Tyypillisiä algoritmeja ovat gradienttialgoritmi (Gradient laskeutuminen) ja LMS (Least Mean Square) -algoritmi. [13.]

Älykkäät antennit ovat ominaispiirre MIMO-järjestelmissä, kuten IEEE 802.11n-standardissa. Perinteisesti älykäs antenni on yksikkö langattoman viestinnän järjestelmässä, ja se käyttää alueellisessa signaalinkäsittelyssä useita antennejä. Useita antennejä voidaan käyttää joko lähettimessä tai vastaanottimessa. Viime aikoina tekniikkaa on laajennettu käyttämään useita antennejä, jotka sisältävät lähettimen ja vastaanottimen. Tällainen järjestelmä on nimeltään moniantennijärjestelmä. Tavanomaisessa tutkimuksessa älykkäissä antenneissa on keskitytty siihen, miten tarjota säteen muotoilun etua paikkatietojen käytössä ja signaalinkäsittelyä langattomassa kanavassa. Paikkatietojen käsittely sisältää paikkatietojen koodausta, kuten alueellisen multipleksoinnin ja säteen muotoilun. [13.]

3 MIMO:n tekniikka

3.1 Historia

Vuonna 1984 Jack Winters kirjoitti artikkelin "Optimal Alliance Digital Mobile Radio Cochannel Interference", joka oli urauurtava kehityksen alku MiMO:lle. Sitten monet tutkijat ja insinöörit ovat auttaneet merkittävällä panoksella MIMO-järjestelmien ymmärtämistä. Vuonna 1996 keksittiin uudenlaisia lähetystapoja, joilla lisätä signaalihyötysuhdetta MIMO-kanavassa.

Gregory G. Raleigh ja VK Jones kirjoittivat kirjan nimeltä "Multivariate Modulation and Coding for Wireless Communication", jossa he väittivät, että monitiekanaavilla on vielä runsaasti vaikutusta kapasiteettiin, jos monitiesignaalin etenemistä on käytetty asianmukaisena viestintäjärjestelmänä. Samana vuonna Foschini esitteli BLAST (Bell Labs Layered Space-Time) -käsitteen kirjassaan "Layered Space-Time Architecture for Wireless Communication in Fading: Environment when using Multi Elements Antennas".

BLAST on yksi laajimmin tutkittu tekniikka nykyaikana. I. Emre Telatar totesi kirjassaan "Capacity of Multi-antenna Gaussian channels", että kanavan kapasiteetti kasvaa useiden antennien mukana. Vuonna 1998 Bell Lab suoritti ensimmäisen onnistuneen teknologian esittelyn laboratorio-olosuhteissa. Vuonna 1999 Gigabit Wireless Inc:n ja Stanfordin yliopiston järjestivät yhdessä onnistuneen ensimmäisen prototyypin esittelyn ulkona. Lospan Wireless Inc. tuotti ensimmäisen kaupallisen tuotteensa vuonna 2002. Ensimmäiset 4x4 MIMO -testialustahankkeet aloittivat toimintansa University of Albertassa vuonna 2003. [12]

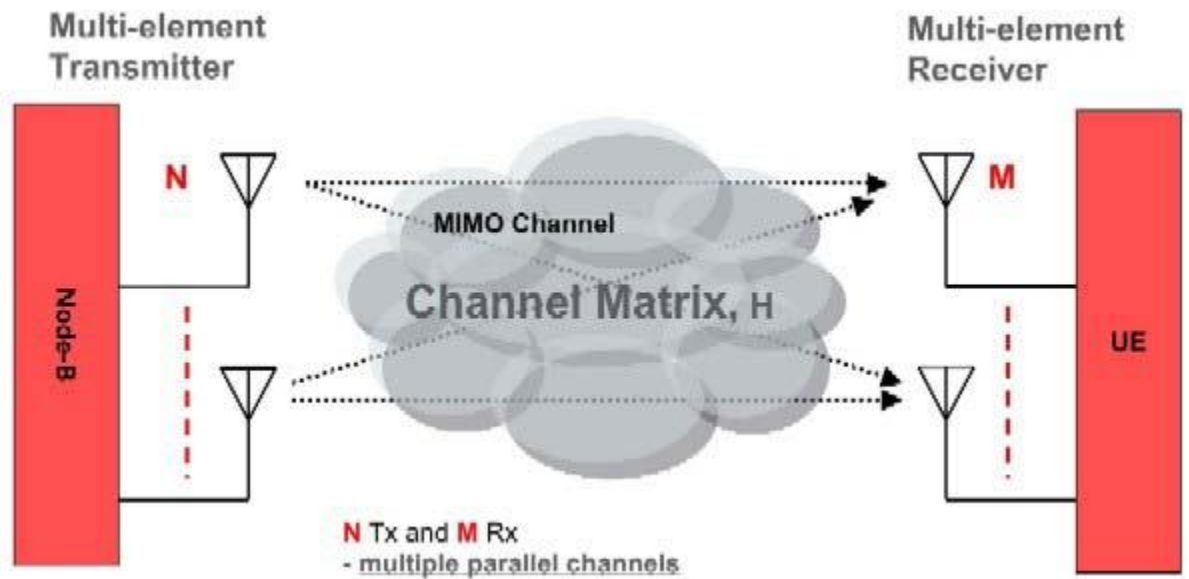
3.2 Yleistä

MIMO on langattoman tiedonsiirron antennitekniikka, joka tarjoaa merkittäviä lisäyksiä tiedonsiirtonopeuteen ja erilaisia linkkejä ilman ylimääräisiä kaistanleveyksiä ja lähetystehoja. MIMO:lla on käytössä useiden antennien tukiasemia. MIMO:n antenneja käytetään sekä tiedon lähettämiseen että tiedon vastaanottamiseen. Yhteyden molemmissa päissä on yhdistetty virheiden minimointi ja optimaalinen datanopeus.

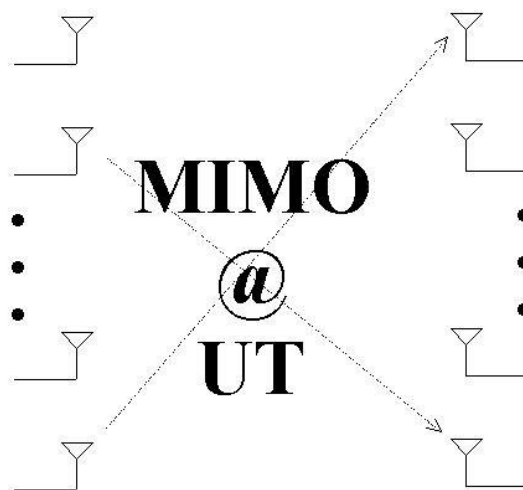
Tyypillisiä laitteita, jotka käyttävät usean antennin tekniikka, ovat muun muassa kannettavat tietokoneet, CPE (Customer premises equipment) -laitteet sekä matkapuhelimet. MIMO-tekniikkaa käyttävät laitteet sisältävät aina kaksi tai useampia antenneja.

Kuten kuvissa 1 ja 2 havaitaan, MIMO-tekniikka tukeutuu nimensä mukaisesti moneen rinnakkaiseen antenniin ja radio-osaan tiedon lähetyksessä ja vastaanotossa. Niin sanottua monitie-etenemistä hyödyntämällä verkon toiminta-alueelle muodostuu eräänlaisia ”mimo-kanavia”, jotka vastaanotin yhdistää bittivirraksi.

Monitie-eteneminen tarkoittaa sitä, että radiosignaalit kimpoilevat erilaisista esteistä ja kulkeutuvat vastaanottajalle monta eri reittiä. MIMO:ssa tätä on yleensä pidetty haitallisena ilmiönä. Mutta se on kuitenkin pystytty muuttamaan hyödyksi erittäin tehokkaiden signaaliprosessoreiden avulla. Antennit voivat olla varsin pieniä, ja niitä on helppo rakentaa pienenkin laitteen piirilevyyn.[9; 10; 11]



Kuva 1. MIMO:n toiminta periaate [8.]



Kuva 2. MIMO:n toiminta periaate [11.]

3.3 WIMAX

WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) on langaton verkkoratkaisu, jonka ominaisuudet ovat määriteltä IEEE 802.16 -suosituksissa. Standardia tukemassa on kansainvälinen Wimax Forum, joka WiFi:n tavoin huolehtii siitä, että Wimax-laitteet ovat yhteensopivia keskenään ja täyttävät tietyt minimivaatimukset. Teknisesti Wimax on tarkoitettu kiinteitä yhteyksiä varten, mutta suositus IEEE 802.16e mahdollistaa myös liikkuvat yhteydet Wimax-verkossa.

Alkuperäinen suositus perustuu toimintaan 10–66 gigahertzin taajuuksilla, mutta lisäys IEEE 802.11A mahdollistaa liikennöinnin myös 2–11 gigahertzin taajuuksilla.

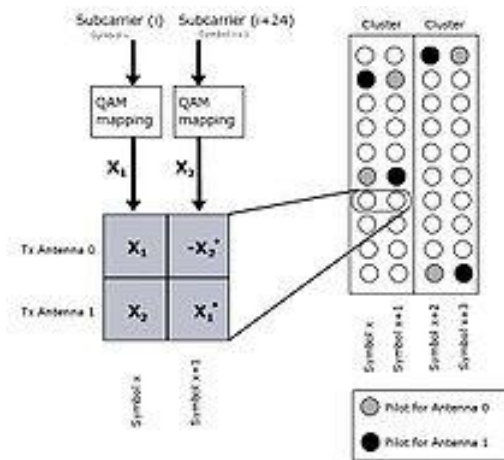
Liikkuvia laitteita tukeva suositus IEEE 802.16e määrittelee yhteydet 2–6 gigahertzin taajuuksille. Suomessa käytetään Wimax-liikenteessä 3,5 gigahertzin taajuuksia.

Paremmen kattavuuden saavuttamiseksi Wimax tukee *dynaamisia modulaatioita*, mikä sallii käytettävän BPSK- (binary phase shift keying), QPSK- (Quadrature phase shift keying), 16-QAM- (Quadrature amplitude modulation) ja 64-QAM-modulaatiomenetelmiä. Näiden lisäksi yhteyden symbolinopeus voidaan nopeuden kustannuksella pudottaa paremman kattavuuden saamiseksi.

WiMAX-yhteys muodostetaan radioteitse käyttäjän kiinteistöön sijoitetun asiakaspäätelaitteen ja operaattorin tukiaseman välille. Tukiasema muistuttaa matkapuhelinverkoista tuttuja radiomastoja ja voi olla yhteydessä operaattoriin joko suoraan nopean kaapeliyhteyden avulla tai mikroaaltolinkillä toisen maston kautta. Asiakaspäätelaite voidaan liittää tietokoneen korttipaikkaan tai kytkeä erillisenä laitteena. Päätelaitteeseen voidaan kytkeä jo olemassa oleva lähiverkko; WiMAX ei siis korvaa WLAN (Wireless Local Area Network) -verkkoja, vaan täydentää niitä langattomana laajakaistana. Yhteyden laadun takaamiseksi rakennuksen katolle voidaan tarvittaessa asentaa erillinen antenni, joka kytketään kaapelilla päätelaitteeseen. [15; 16.]

WiMAX-toteutukset käyttävät MIMO-tekniikka. MIMO-tekniikkaa käytetään, koska MIMO-tekniikka parantaa vastaanottoa ja mahdollistaa paremman lähetyksen. 802.16:ssa on määritelty MIMO:lle kokoonpano, joka toimii kunkin tukiaseman ja langattoman aseman välillä. 802.16 erittely tukee mahdollisuutta tukea liikkuvia asemia eri MIMO-valmiuksissa.[15; 16; 11.]

3.4 Tila-aikakoodi

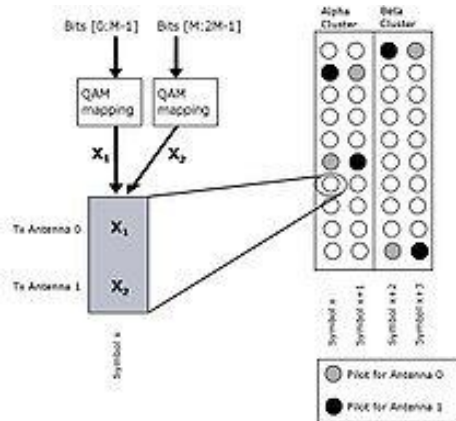


Kuva 4. Tila-aikakoodin kaavio [11.]

Tila-aikakoodi eli STC (Space Time code) lähettää monimuotoisuutta ja tukee MISO (multiple input, single output) -tekniikkaa 802.16:n määrittelyn mukaan. Tämän menetelmän kaksi tai useampi antenni työskentelee lähettimenä ja vain yksi antenni vastaanottimena. MIMO -tekniikka käyttää useita antennia, jotka voivat edelleen parantaa STC-vastaanottoa ja toimittaa signaaleja. Kuvassa 4 on osoitettu kaavion avulla STC-tekniikan toiminta.

STC:ssä siirtodiversiteetti arvo (Transmit Diversity rate) on 1. STC:ssä erilaiset tiedot siirretään kahdessa eri antennin konstellationa (vaihekaaviona) samaan symboliin. Loogisten operaatioiden ”JA” ja ”TAI” avulla siirretään kaksi käänteisesti samaa tähtikuviota yhteisessä antennissa seuraavalla symbolilla. Tiedonsiirtonopeus on STC:ssä sama kuin perustason osalta. Tämä määrittely tuottaa samanlaisen suorituskyvyn kuin kaksi vastaanottoantennia ja yksi lähetinantenni yhdessä. [11.]

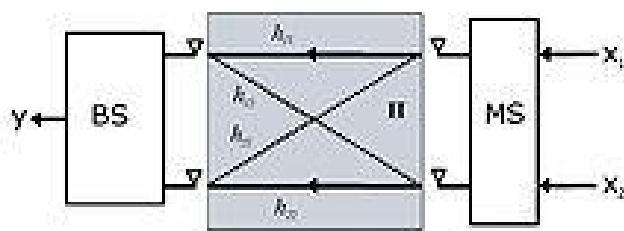
3.5 Alueellinen multipleksointi



Kuva 5 Alueellinen multipleksointi [11.]

802.16-standardi tukee MIMO-tekniikan alueellista multipleksointia SMX:ia (Spatial Multiplexing). Alueellinen multipleksointimenetelmä siirtää yhden tiedon ensimmäisestä antennista ja toisen tiedon toisesta antennista samanaikaisesti. Kun vastaanottajalla on monia antennia ja niiden signaalit ovat riittävän laadukkaita, vastaanotin pystyy erottamaan signaalit toisistaan. Tässä menetelmässä lisätään monimutkaisuutta, kustannuksia ja lähettimien ja vastaanottimien määrää. [11.] Kuvassa 5 on esitetty kaavion avulla alueellisen multipleksoinnin toimintaa.

WIMAX-verkon käyttöä suositellaan käytettäväksi laadukkaana signaalin alueella, jotta paikkatietojen haku ei veisi liian kauan aikaa. Käyttäjät, joiden signaalin laatu on liian alhainen, voivat alueellisesti multipleksoitujen signaalien avulla käyttää WIMAX-verkkoa. Tämä mahdollistaa, että operaattori voi tarjota suurempia siirtonopeuksia joillekin käyttäjille tai palvelu useita käyttäjiä. [11.]



Kuva 6 Alueellinen multipleksointijärjestelmä. [11]

Kuvassa 6 on esitetty alueellinen multipleksointijärjestelmä.

3.6 MIMO:n tehtävät

MIMO:n tehtävät ovat jaettu kolmeen pääryhmään: esikoodaukseen, alueelliseen multipleksointiin ja monimuotoisuuskoodaukseen.

Esikoodaus on yleistys säteen muotoilusta, joka tukee monitasolähetyksen moniantenni-järjestelmää langattomassa viestinnässä. Esikoodaus on monikerroksisen säteen muotoilua suppeasti tai paikkatietojen käsittelyä lähettimessä. Tavanomaisessa yksikerroksisen säteen muotoilussa sama signaali toimittaa kullekin antennille asianmukaisen painotuksen, siten että signaalin teho maksimoidaan vastaanottimen lähtöön. Kun vastaanottimessa on useita antennia, lähettimen säteen muotoilua ei voida samanaikaisesti maksimoida, koska signaalin tason saavat kaikki antennit, jolloin käytetään esikoodausta (precoding). Esikoodaus edellyttää tietoa kanavan tilasta CSI (Channel State Information), joka on lähettimessä. Edut säteen muotoilussa ovat signaalin hyötyä rakentavan yhdistelyn lisääminen ja monitiehäipymisen vaikutuksien vähentäminen.

Kaksipistejärjestelmien esikoodaus tarkoittaa sitä, että useat datavirrat pääsevät toimittamaan antennille riippumattoman ja asianmukaisesti painotetun koodin. Tällöin yhteyden välille voidaan maksimoida vastaanottimen lähtö. Kaksipistejärjestelmissä voidaan toteuttaa esikoodaus ilman kanavan tilatietoja lähettimeen. [8; 21.]

Alueellinen multipleksointi on alueellinen kanavointitekniikka, jossa kokonaissignaali on jaettu alakanaviin. Jos nämä signaalit saapuvat vastaanottimen antenniin riittävän erilaisilla signaali-kohinasuhteilla, vastaanotin voi erottaa näitä signaaleja ja luoda rinnakkaisia kanavia ilmaiseksi. Alueellinen multipleksointi on erittäin tehokas menetelmä lisätä kanavan kapasiteettiin suurempi signaali-kohinasuhde, koska sen jälkeen on mahdollista saada parempi kanavan kapasiteetti.[8.]

Alueellinen multipleksointi edellyttää MIMO-antennin asetuksia. Enimmäismäärässä paikkatietoja signaali rajoittaa pienempää määrää antennia, jotka ovat lähettimessä ja vastaanottimessa. Alueellista multipleksointia voidaan käyttää yhdessä tai ilman välittävän kanavan tietoa. Alueellinen multipleksointi voidaan myös yhdistää

esikoodaukseen, kun kanava on tiedossa lähettimessä tai yhdistettynä monimuotoisuuden koodauksessa.[10.]

Monimuotokoodaustekniikoita käytetään, kun kanavalla ei ole tietoa lähettimestä.

Monimuotokoodaus hyödyntää riippumattomia antennoja. Monimuotoisessa koodauksessa häipyminen parantaa useiden antennilinkkien signaalien monimuotoisuutta. Riippumattomilla antennilla ei ole kanavatietoja, säteen muotoilua tai joukkoa, jotka hyötyisivät monimuotoisesta koodauksesta. Signaali pääsee kustakin toimittaa antennien avulla tietyt periaatteet kokonaan tai lähes kohtisuorassa koodauksella. Monimuotoisuus hyödyntää riippumatonta häipymistä, jossa on useita antennilinkkejä, jotka parantavat signaalin monimuotoisuutta.[8.]

Tila-aikalohkokoodi tuottaa monimuotoisuustekniikkaa MIMO-järjestelmissä.

Tila-aika lohkokoodi järjestelmissä M_t edustavat määrä, joka toimitetaan antennien määräraajojen välillä yhteen lohkoon, jossa kaikki koodatut symbolit ja signaalin konstellaatio, jotka koostuvat $2m$ pisteistä. Jokainen koodauskartta on lohkon k_m . Tietojen bitit valitaan k moduloidusta signaalista. Nämä bitit on koodattu ajoissa, mikä estää esikoodaamista. Koodatut bitit tuottavat (M_t) samanaikaisesti signaalin sekvenssien pituuden s . Tästä saamme matriisin S ($M_t \times P$). Tarttuvat $M_t \times P$ ajanjaksoina.

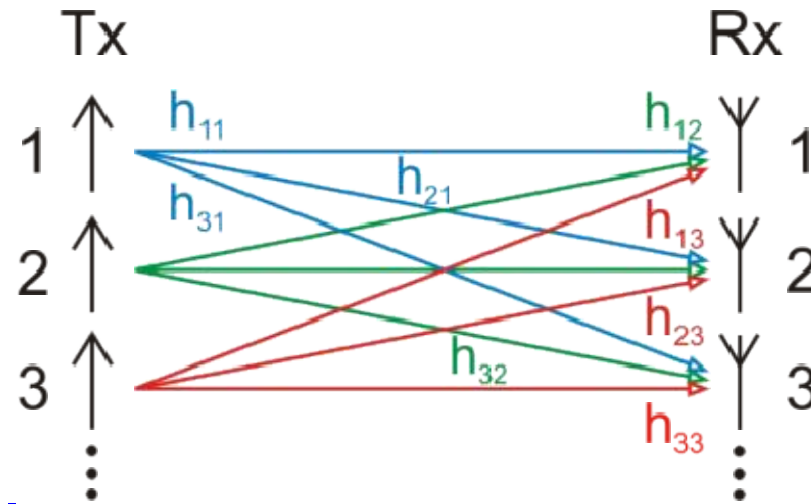
Keulan korko on $R = K / P$ ja tehokkuus on k_m / p bittia / s / Hz. Missä P = tietty määrä bittia/s [bit/s], K = sekvenssin pituus [km] R = Keulan korko [km/p bit/s/Hz]. k =moduloitu signaali, S = lähetetty matriisi, M_t = määrä, joka toimittaa koodatut symbolit ja signaalin konstellaation [km]. [8]

3.7 MIMO:n matemaattinen kuvaus

Matemaattisessa kuvauksessa selvitetään MIMO-tekniikan toimintaa matemaattisin keinoin. Kaava 1 on yksinkertaistettu kaava MIMO-järjestelmän toiminnasta, joka on esitetty kuvan 7 avulla.

MIMO-järjestelmän mallikaava on: $y = Hx + n$ (1)

jossa y vastaanottaa ja välittää vektoreita, x vastaanottaa ja välittää vektoreita sekä H ja n ovat kanavan matriisi. Kaavan 1 termit ovat hyvin tärkeitä signaalien kannalta, koska niiden avulla MIMO-järjestelmää voidaan ohjata. [10.]



Kuva 7. MIMO-kanavan malli.[33]

Saavutettavissa oleva kapasiteetti suljetun piirin MIMO-järjestelmässä on esitetty kaavassa 2.

$$C_{CL} = E[\max_Q \log_2 \det(I + HQH^H)] = E[\log_2 \det(I + USU^H)] \quad [F] \quad (2)$$

jossa $UDV^H = \text{svd}(H)$ ja $S = \text{waterfilling}(D^2)$. Toiminnot SVD (H) ja waterfilling (D^2) edustavat vallan jakamista. Saavutettavissa oleva kapasiteetti avoimen piirin MIMO-järjestelmä on esitetty kaavassa 3.

$$C_{CL} = \max_Q E[\log_2 \det(I + HQH^H)] = E[\log_2 \det(I + HH^H)] \quad [F] \quad (3)$$

jossa useimmiten $\min(N_t, N_r)$ ovat suurempia kuin SISO (Single input, single output) -järjestelmässä. [10.]

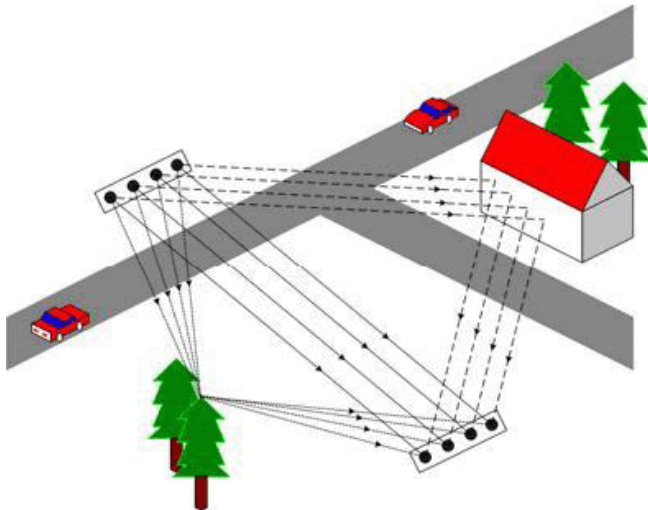
3.8 MIMO:n testaus

MIMO-signaalin testaus keskittyy enimmäkseen lähetin-vastaanotinjärjestelmään. Tasapainottomassa satunnaisessa vaiheessa operaattorin signaaliin voidaan tuottaa hetkellistä tasoa, joka aiheuttaa vahvistimen kyllästymistä ja hetkellisiä vääristymiä ja

lopulta symbolivirheitä. Signaalin korkea PAR (Peak Amplitude ratio) -suhde voi aiheuttaa vahvistimen tiivistymistä arvaamattomasti lähetyksen aikana. OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) -signaalit ovat hyvin dynaamisia ja pakkaamisen ongelmat voivat olla hyvin vaikeita havaita. [10.]

3.9 MIMO:n kanavat

MIMO:n kanavat syntyvät langattoman viestinnän ympäristössä, jossa käytetään useita antennia vastaanottamaan ja lähettämään. MIMO-kanavat toimivat parhaiten sirontaa tuottavassa etenemisympäristössä, jossa lähettimet ja vastaanottimet ovat useiden etenemisreittien sisällä. Kuvassa 8 on havainnollistettu MIMO-kanavien reittejä maastossa.



Kuva 8. MIMO-kanavat maastossa [11.]

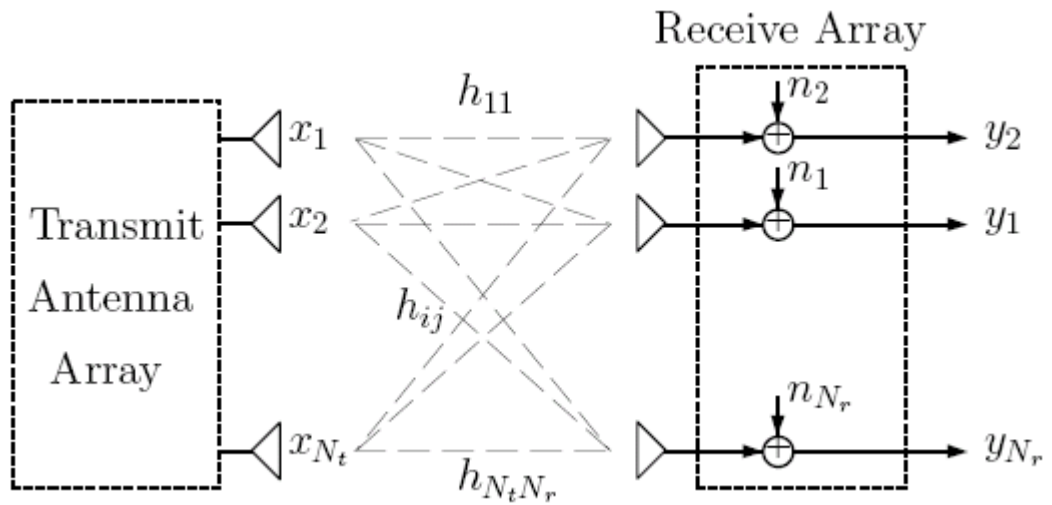
MIMO-kanavan viestinnän järjestelmän tavoitteena on hyödyntää monen polun signaalin etenemistä. Tiettyjen oletusten johdosta se korreloi osittain kanavien luomaan hajontaan ympäristössä. Sitä voidaan tarkasti kuvata seuraavan matriisiyhtälön avulla, joka on sama kuin kaava 1:

$$y = Hx + n \quad (4)$$

Tyypilliset oletukset yhtälöstä ovat:

- Polut h_{ij} ovat riippumattomia.

- Kohina on monimutkainen muuttuja. Kohina on ristiriidassa Gaussin kohinan kanssa eli N_0 kanssa (eli $N_0/2$ kunkin ulottuvuus).



Kuva 9. Lohkokaavio[12]

Kuvassa 9 on esitetty lohko-kaavio.

Seuraavia yksinkertaisia malleja käytetään usein tutkimuksessa ja mallin perus-MIMO-kanavat ovat:

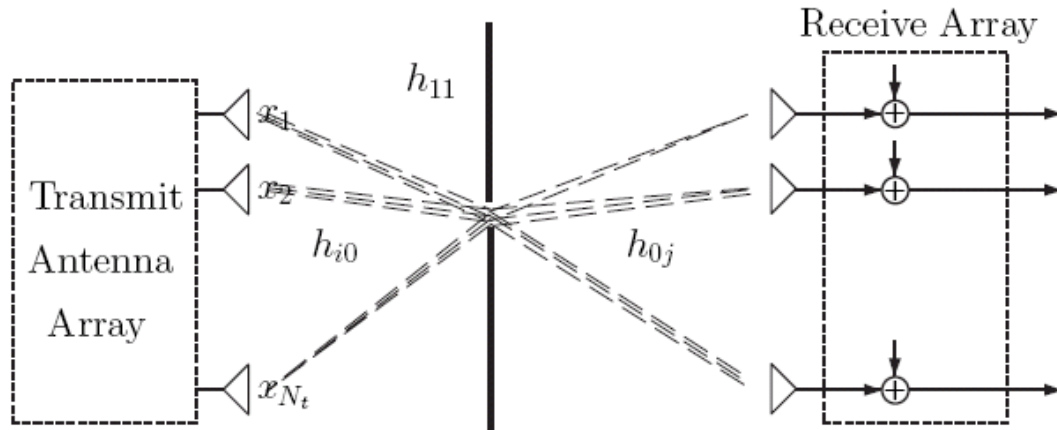
- **Rayleigh-kanava:** Merkinnässä h_{ij} H mallinetaan Gaussin satunnaisten muuttujien yksikön varianssin mukaan ja se jakaa itsenäisesti myös muuttujia. (IID (independent and identically distributed)). Matriisissa M on lisätty muuttuja H .
- **Korrelaatiokanava:** merkinnässä h_{ij} H on mallinnettu niin (IID) kuin Gaussin satunnaismuuttujia, joiden yksikkö on varianssi, keskiarvo M ja korrelaatio E ovat seuraavan yhtälön mukaisia: $[h_{ijkl}] = r_{ijkl}$. (5)

Kaavassa 6 on havainnollistettu korrelaatio mallia. Kaavan kirjaimet on saatu kaavaa 5 käyttäen.

$$H \rightarrow R^{(1/2)} * H * T^{(1/2)} \quad (6)$$

- **Huonontuneet kanavat:** Huonontuneet kanavat sisältävät avaimenreikäkanavat ja tiedonvälityskanavat. Avaimenreikäkanava on erityinen

MIMO-kanava, jonka mallissa esiintyvät aukot, joita ovat muun muassa käytävät ja tunnelit. Kanava voi antaa lisää monimuotoisuutta. [12.] Kuva 10 on kaaviokuva avaimenreikäkanavasta.



Kuva 10 Avaimenreikäkanavat[12]

3.10 Kapasiteetin valmiuksia

Avaimenreikä-kanavassa saadaan matriisista H . Matriisin H -lauseke on esitetty kaavassa 4, kaavassa 5 ja kaavassa 6 on esitetty myös matriisin H -lauseke, jossa esitetyt U ja V ovat yhtenäisiä arvoja. Pääakselihajotelma SVD:n (Simultaneous voice and data) arvo on seuraavassa muodossa:

$$H = UDV^+ \quad (7)$$

jos U ja V ovat yhtenäinen, eli

$$UU^+ = VV^+ = I \quad [V] \quad (8)$$

(jos $N_r < N_t$) ja $N = \min(N_r, N_t)$. Matriisi D sisältää yksikössä H arvoja, jotka ovat positiivisia neliöjuuria ja ominaisarvot HH^+ ja H^+H .

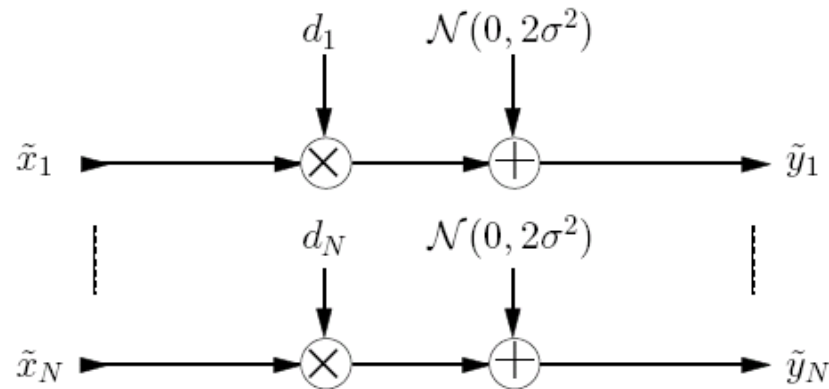
Nyt kanavan yhtälö voidaan kirjoittaa vastaavissa muodossa kaavojen 8 ja 9 tavoin:

$$y = Hx + n = UDV^+ + n \quad [V] \quad (9)$$

$$\tilde{y} = U^+y = \tilde{D}x + \tilde{n} \quad [V] \quad (10)$$

jos $NT > Nr$, vastaa ensimmäinen Nr signaalia x ja $NT - Nr$. Loput kanavat on nollattu. Tämä johtaa seuraaviin samanaikaisesti Gaussin kanavan malliin, joka on esitetty lausekkeena kaavassa 10 ja kuvakaaviona kuvassa 11.

$$\tilde{y} = U^+ y = \tilde{D}x + \tilde{n} \quad [\text{V}] \quad (11)$$



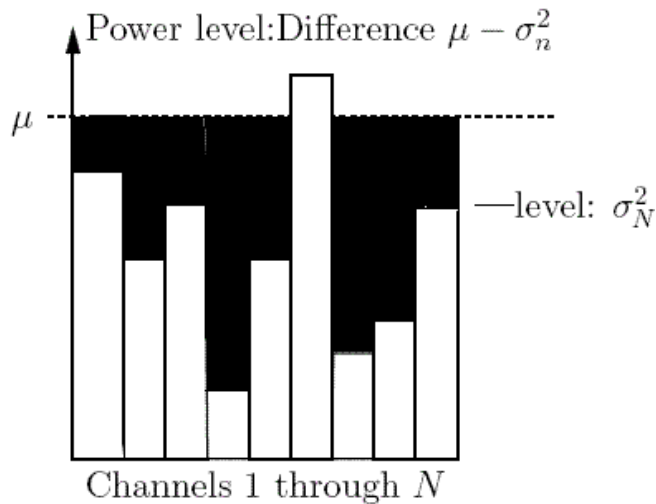
Kuva 11: Rinnakkaiset Gaussin kanavat [12]

Kapasiteetti N sisältää samanaikaisesti monimutkaisia kanavia, jotka voidaan laskea kaavan 12 mukaisesti:

$$C = \sum_{n=1}^N \log\left(1 + \frac{E_n}{\sigma_n^2}\right) = \sum_{n=1}^N \log\left(1 + \frac{\mu}{\sigma_n^2}\right) \quad [\text{F}] \quad (12)$$

missä $C = \sum_{n=1}^N \tilde{x}_n^2 = \sum_{n=1}^N E_n$ on kiinteä ja maksimoidusta jakelusta $E = [E_1, \hat{a}, \dots, e_n]$ saa kaavan 13 mukaiset reunaehdot:

$$\begin{aligned} \sigma_n^2 + E_n &= \mu; & \sigma_n^2 < \mu \\ E_n &= 0; & \sigma_n^2 \geq \mu \end{aligned} \quad [\text{V}] \quad (13)$$



Kuva 12. Waterfilling -lauseke

Kuvassa 12 on esitetty Waterfilling -lauseke taulukkokuvana. Taulukkokuva sisältää kaavan 13 reunaehdot.

3.11 Lähettimet ilman kanavatietoja

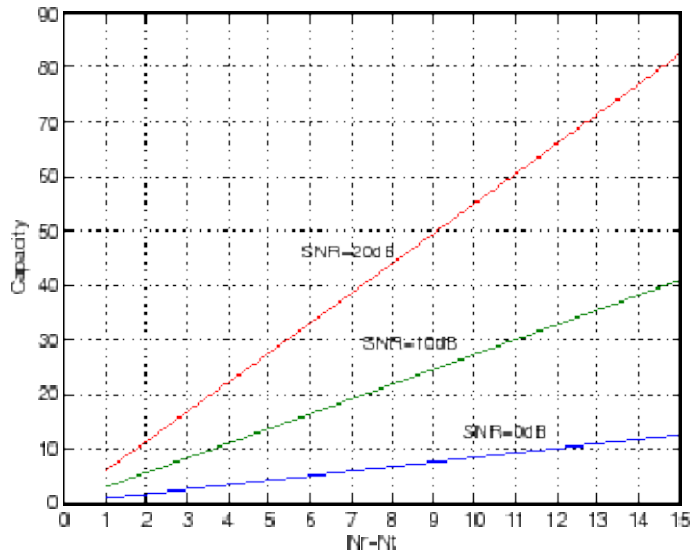
Kanavan tietoa ei ole aina saatavilla lähettimille, joten ainoa vaihtoehto on jakaa energiaa tasaisesti kaikilla osa-kanaville. Symmetrisen kapasiteetin -määritelmä on esitetty kaavassa 14:

$$C = \sum_{n=1}^N \log\left(1 + \frac{d_n^2 E}{N_t \sigma^2}\right) = \log \prod_{n=1}^N \left(1 + \frac{d_n^2 E}{N_t \sigma^2}\right) \quad [\text{F}] \quad (14)$$

Edellä oleva kaava voidaan kirjoittaa matriisin ominaisarvona H , josta saadaan kaavan 14 mukainen lauseke.

$$C = \log \det \left(I_{N_r} + \frac{E}{N_t \sigma^2} H H^+ \right) = \log \det \left(I_{N_r} + \frac{E}{N_t \sigma^2} H^+ H \right) \quad [\text{F}] \quad (15)$$

Erityisenä toimintona on se, että MIMO-kanavan kapasiteetti C kasvaa lähes lineaarisesti, minkä on määrä saavuttaa antenni tai toimittaa antennit tilaan $N_r = N_t$, joka on osoitettu kuvassa 13. [12]



Kuva 13. Kapasiteetti $N_r = N_t$ antennit [12]

3.12 MIMO-kanavan kapasiteetti satunnaisen matriisin teorian kautta

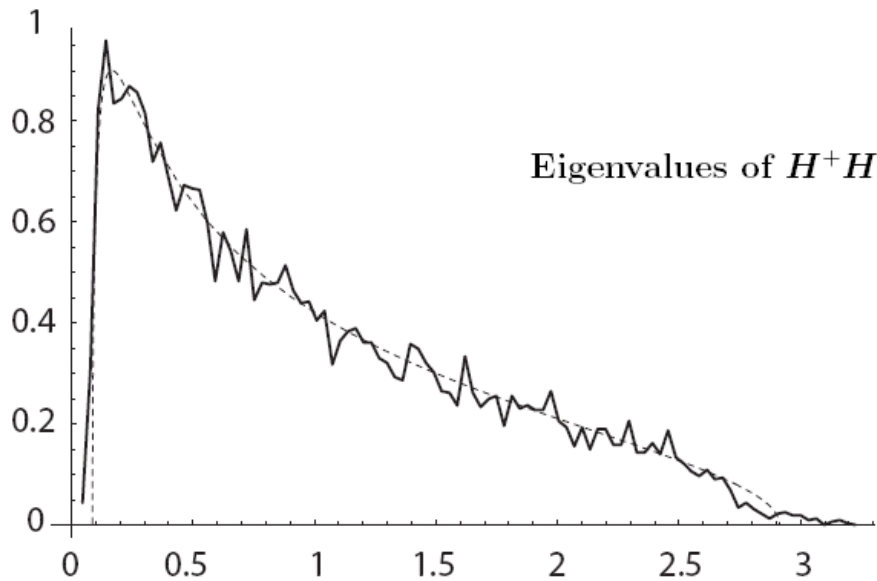
Suurella MIMO-järjestelmässä, $N_r \rightarrow \infty$. Kiinteä alfa = NT / N_r , joka tarkoittaa sitä, että kapasiteetti on jatkuvasti kohti antenna. Tämä näkyy satunnaisen matriisin teorian kautta. Oletetaan, että H on satunnainen Gaussin matriisi, ja saadaan kaavan 16 mukainen yhtälö.

$$W = \begin{cases} HH^+ & \text{if } N_r < N_t \\ H^+H & \text{if } N_r \geq N_t \end{cases} \quad [F] \quad (16)$$

Ominaisarvojen μ ja W ovat mukana. Marcenko-Pastur-laki on marginaalinen tiheysfunktio, mikä on esitetty kaavassa 17.

$$\frac{dF_\mu(\mu)}{d\mu} = \begin{cases} \frac{1}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{\mu_+}{\mu} - 1\right) \left(1 - \frac{\mu_-}{\mu}\right)}; & \text{for } \mu \in [\mu_-, \mu_+] \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (17)$$

Esimerkkinä 1000 satunnaisen matriisin koko (20-10) on esitetty kuvassa 14:



Kuva 14. Esimerkki ominaisarvoista [12]

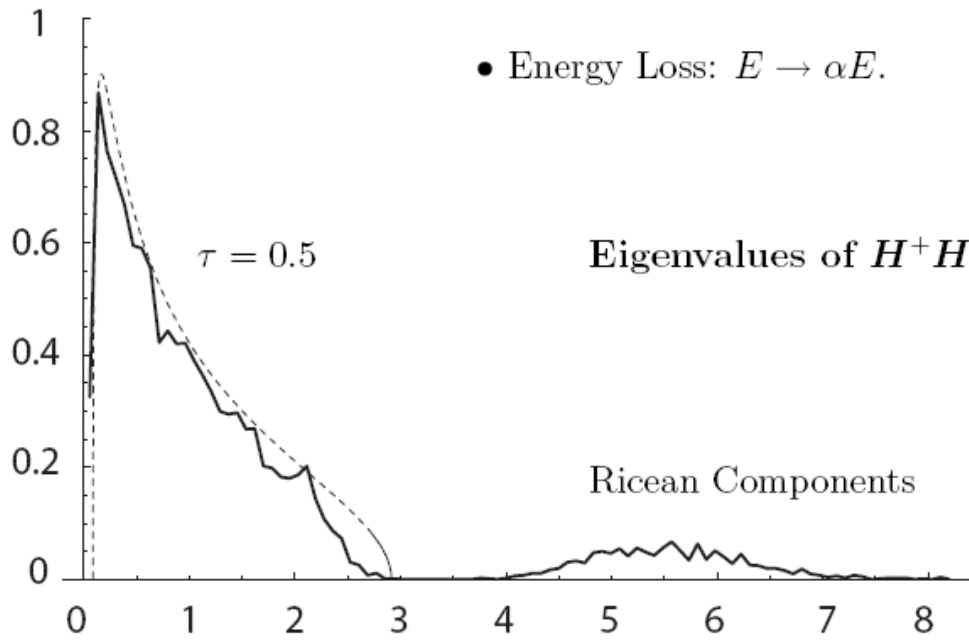
$N \rightarrow \infty$ varten empiirinen ominaisarvon jakelu suppenee ja $F_{\mu}(N): F_{\mu N}(\mu) \rightarrow F_{\mu}(\mu)$. Rayleigh on antanut MIMO-kanavalle valmiuksia kohti uutta suurta ulottuvuutta, joka on näin ollen saanut lausekkeellisen muodon kaavan 18 osoittamalla tavalla:

$$\frac{C}{N} = \frac{1}{2\pi} \int_{\mu_-}^{\mu_+} \log\left(1 + \frac{\mu N E}{2t\sigma^2}\right) \sqrt{\left(\frac{\mu_+}{\mu} - 1\right)\left(1 - \frac{\mu_-}{\mu}\right)} d\mu \quad [\text{dBm}] \quad (18)$$

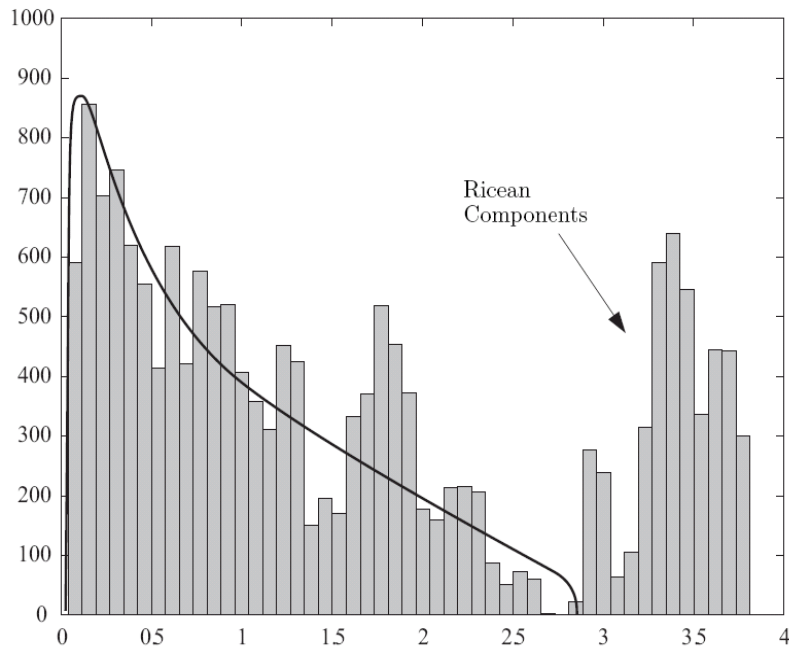
Rice varten MIMO-kanavat ovat mallinnettu kaavan 19 mukaisesti:

$$y = (\sqrt{1 - \alpha}M + \sqrt{\alpha}H)x + n \quad (19)$$

jossa M on matala-lista ja alfa on Rice tekijä. Marcenko-Pastur-lakia voidaan kuitenkin soveltaa, jos $\text{rank}(M)/N \rightarrow 0$. Sitten N on lähestymistapojen äärettömyys empiirisessä jakelussa $H: F_{\mu N}(\mu) \rightarrow F_{\mu}(\mu/\alpha)$. Ricen kanavan kapasiteetti annetaan aikaisemmin esitetyissä kaavoissa. Ricen kanava on hyvin tehokas energian menettäjä (α). Matala-listalla kanavaan ei keskimäärin vaikuta mikään raja. Kuvassa 15 verrataan analyttisen ominaisarvon jakelua. Arvo (W) = 4 / 2. [12] Kuvissa 15 ja 16 on esitetty diagrammikuvat ominaisarvoista ja neliöllisestä jakautumisesta.



Kuva 15. Ominaisarvon analyttinen jakelu.[12]

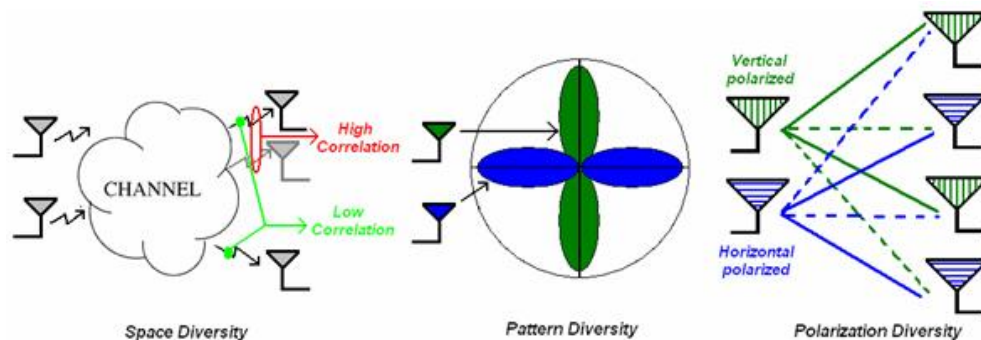


Kuva 16. Levinneisyys, jossa yksikön arvot mitattiin U-arvoilla [12]

3.13 MIMO-antennit

MIMO:n langattomassa tekniikassa käytetään monia antennia lähettämään ja vastaanottamaan kapasiteettia samalla lähtöteholla ja kaistanleveydellä.

MIMO-antennien ensisijainen tavoite on vähentää korrelaatiota vastaanotettujen signaalien välillä hyödyntäen monimuotoisuuden eri muotoja. MIMO-antennien diversiteettimuotoja ovat avaruusdiversiteetti (space diversity) (harvennetut antennit, jotka ovat kaukana erillään toisistaan), suuntakuviodiversiteetti (Pattern diversity) (antenneja käytetään erilaisissa tai erimuotoisissa säteilymalleissa), ja polarisaatio-diversiteetti (Polarization diversity)(antenneja käytetään erilaisilla polarisaatioilla). Kuvassa 17 esitetyt kolme monimuotoisuuden muotoa ovat kuvallisesti esitetty tapahtuma. [18.]



Kuva 17. MIMO-antennien kaikki kolme muotoa [18]

4 MIMO:a tukevat standardit

802.11-standardit

IEEE 802.11 on IEEE:n standardi langattomille WLAN-lähiverkoille. 802.11-standardin kehitys on jaettu eri työryhmiin. Jokainen työryhmä keskittyy eri piirteisiin standardissa. Järjestys ei aina ole täysin looginen, esimerkiksi standardi 802.11a voidaan nähdä standardin 802.11b seuraajana.

802.11 oli ensimmäinen WLAN-tekniikka, jonka nimellinen nopeus oli 1 tai 2 megabittiä sekunnissa. 802.11 toimi vapaalla 2,4 gigahertsin taajuudella.

IEEE julkaisi 26.7.1997 ensimmäisen WLAN-standardinsa, joka käytti nimeä 802.11. IEEE esitteli jo vuonna 1990 ensimmäisen versionsa standardista, josta kehittyi kuuden eri version kautta 1997 julkaistu 802.11-standardi. 802.11 määrittää pääasiassa OSI (Open Systems Interconnection Reference Model) -mallin fyysisen kerroksen ja siirtokerroksen alemman osan, joka tunnetaan nimellä MAC (Media Access Control).

Standardin määrittelemät verkkoyhteyksien nopeudet ovat 1 megabittiä sekunnissa ja 2 megabittiä sekunnissa. 802.11 toimii 2,4...2,4835 gigahertziä sekunnissa vapaalla ISM (Industrial, Scientific and Medical) -taajuusalueella, ja se määrittelee välitystekniikoiksi infrapunan ja radiotien.

Radiotaajuustekniikoista ovat käytössä suorasekvenssiharjaspektri- (DSSS) ja taajuushyppelyhajaspektritekniikat (FHSS, Frequency Hopping Spread Spectrum). DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) -tekniikan tiedonsiirto tapahtuu lähettämällä tieto 11-bittisinä sarjoina (Barkerin sarja) verkkokojeiden välillä. Verkkotopologioiksi standardi määrittelee adhoc-verkon, jossa mobiiliasemat (ms) ovat suoraan yhteydessä toisiinsa sekä infrastruktuuriin. Vuonna 2000 IEEE-työryhmä perusti erillisen tutkimusryhmän kehittämään 802.11b-standardin laajennusta tukiasemien (Access point, AP) kautta.[7; 2.]

802.11n-standardi

802.11n-laajennuksen tarkoituksena on parantaa WLANin suorituskykyä aiempiin standardeihin, kuten 802.11a ja 802.11g, verrattuna. Laajennus on taajuusyhteensopiva joko jommankumman tai molempien aiempien standardien kanssa, mutta yhteensopivuustilassa nopeus on vanhan standardin nopeus. 802.11n määrittää suurimmaksi bruttonopeudeksi 600 megabittiä sekunnissa, joskin todellisuudessa sille luvataan noin 100–200 megabittiä sekunnissa nopeutta, jolloin nopeus olisi samaa luokkaa kuin perinteiset 100 megabittiä sekunnissa Ethernet-kaapelilla. Samalla n-määritelmä tukee MIMO-tekniikkaa, jossa käytetään useampaa antennia ja useampaa ilmatien kanavaa yhtä aikaa. Uusi MIMO-tekniikka antaa tasaisemman kantaman ja mahdollistaa useat ilmakeinavat. IEEE standardoi 802.11n:n 11. syyskuuta 2009.[7; 2.]

802.11a-standardi

802:lla on taajuusalueella 5.150–5.350 ja 5.475–5725.0 gigahertziä (tarkat taajuusrajat eri maissa erilaiset) toimiva verkkotekniikka, jonka nimellisnopeus on 54 megabittiä sekunnissa. Se on hyvin samankaltainen tekniikka kuin 802.11g, mutta ylempällä taajuusalueella, jossa on enemmän kuin kolme toisiaan häiritsemätöntä kanavaa.

802.11a-standardi koki edeltäjiinsä verrattuna suurempia muutoksia. Määritetty toimintataajuus on 5 gigahertziä aiemman 2,4 gigahertzin sijaan. Taajuutta nostettiin, koska tarvittiin lisää kaistaa verkkoyhteyksien nopeuksien kasvattamiseksi. Myös siirtotekniikka koki muutoksen. Uusi standardi määritteli tiedonsiirtoa varten OFDM-tekniikan, joka perustuu signaalin jakamiseen pienempiin alaisignaaleihin. Jaetut signaalit siirretään yhtäjaksoisesti eri taajuuksilla. Muutoksien myötä saatiin verkkoyhteyksien nopeus kasvatettua 54 megabittiin sekunnissa.

802.11a-standardi ei eduistaan huolimatta ole kokenut 802.11b:n kaltaista suosiota. Tähän on syynä hinnoiltaan kalliimmat verkkolaitteet ja korkeamman taajuuden aiheuttama kantaman pienentyminen verrattuna samoissa oloissa käytettyyn 802.11b-standardin tekniikkaan.[7; 2.]

802.11g-standardi

802.11g-standardi on käytännössä syrjäyttänyt vanhemman b-standardin yleisessä käytössä. Tämän standardin mukaiset laitteet toimivat a-version tapaan nopeudella 54 megabittinä sekunnissa, mutta 2,4 gigahertzin taajuudella. Lisäksi se on täysin yhteensopiva aikaisemman 802.11b-standardin kanssa. A-versio ei ollut yhteensopiva b-standardin kanssa. 802.11g-laitteet sopivat paikkoihin, joissa vaaditaan suurta kaistaa, esimerkiksi messuhalleihin tai auditorioihin.

Vuonna 2003 IEEE ratifioi tutkimustyön tuloksena 802.11g-standardinsa. 802.11g-standardi on risteytys 802.11a- ja 802.11b-standardeista, koska se käyttää tiedonsiirtoon CCK-OFDM (Complimentary Code Keying- Orthogonal Frequency Division Multiplexing) -tekniikkaa ja tarjoaa vaihtoehtoiseksi siirtotavaksi PBCC (Packet Binary Convolutional Code) -tekniikan. Standardi määrittää radiotaajuustekniikoista DSSS- (Direct Sequence Spread Spectrum), HR-DSSS- (High Rate- Direct Sequence

Spread Spectrum) ja OFDM-tekniikat. Se kykenee liikennöimään nopeuksilla 54 megabittiä sekunnissa ja 11 megabittiä sekunnissa, käyttää 2,4 gigahertzin taajuutta ja on siksi täysin yhteensopiva vanhemman 802.11b-standardin kanssa.[7; 2.]

802.16-standardi

IEEE 802.16 on sarja Wireless Broadband -standardeja. Nykyinen versio on IEEE 802.16–2009, joka on muutettuna versioon nimellä IEEE 802.16j-2009. IEEE 802.16:n on kirjoittanut työryhmä, jonka IEEE Standards Board perusti vuonna 1999 kehittämään normeja maailmanlaajuisen laajakaistapalvelujen WMAN:iin (Wireless Metropolitan Area Networks). Työryhmä on yksikkö IEEE 802 LAN (Local Area Networks)/ MAN (Metropolitan Area Networks) Standards Committeessa. Vaikka 802.16-standardit ovat viralliselta nimeltään WMAN IEEE. Ne ovat kaupalliselta nimeltään "WiMAX" (Worldwide Interoperability for Microwave Access). Wimaxin tarkoituksena on edistää ja todistaa yhteensopivuus ja yhteentoimivuus laajakaistaisille langattomille tuotteille, jotka perustuvat IEEE 802.16-standardiin. Suosituin IEEE 802.16-standardi on Mobile WMAN, joka oli alun perin määritelty 802.16e-2005-muutokseen.

Kuvassa 18 on osoitettu mitkä standardit statukset liittyvät toisiinsa.

- IEEE 802.16 (entinen 802.16.1) -Air-liitäntä 10–66 gigahertzin , eli LMDS (Local Multipoint Distribution Service). 802.16 hyväksyttiin joulukuussa 2001. 802.16 antoi standardiin laajakaistan, jonka langaton siirto on 10–66 gigahertzin taajuusalueella, sillä on vain line of sight (LOS) -valmiudet.
- IEEE 802.16.2:n rinnakkaiselo laajakaistan kanssa langattomassa järjestelmässä.

		MIMO	Relay
3G- 3.5G	Local Area Network	IEEE802.11n (mandatary)	IEEE802.11s (study)
	Fixed/Mobile Wireless Access	IEEE802.16e/m (optional)	IEEE802.16j (study)
	3G Cellular	3GPP LTE (optional)	
4G			

Kuva 18 Standardien status [18]

4.6 4G ja LTE-standardi

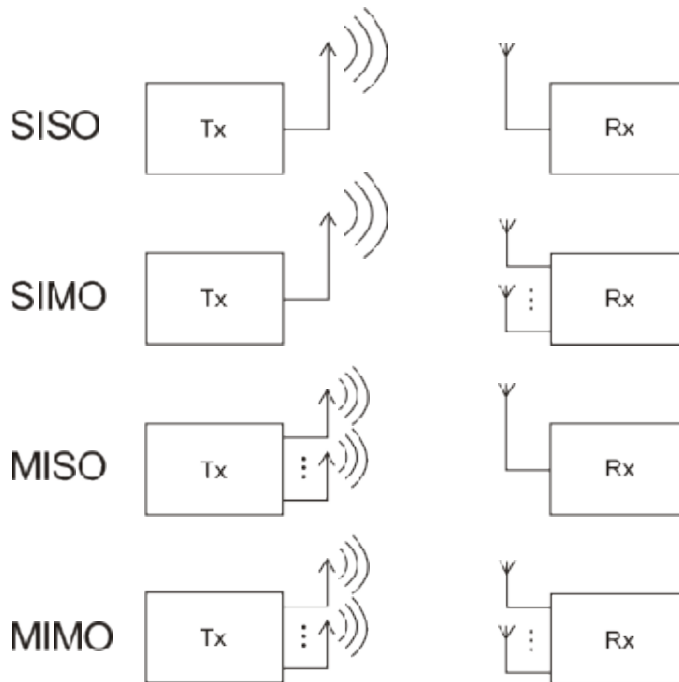
4G (Fourth generation) on yleisnimitys matkapuhelintekniikoille, jotka tulevat kolmannen sukupolven 3G (Third generation) jälkeen. 4G on todennäköisesti yhdistelmä erilaisia verkkoja. Siinä yhdistyvät 3G, GSM, WLAN, Bluetooth, VoIP (Voice Over Internet Protocol), ja järjestelmät yhdistetään yhdeksi virtuaaliseksi verkoksi, jonka kautta tarjotaan IP (Internet Protocol) -pohjaisia palveluja.

Neljännän sukupolven langattomassa verkossa on datasiirtotien nopeudet arvioitu 100 megabitiksi sekunnissa (latausnopeus) ja 20 megabitiksi sekunnissa (lähetyksenopeus). ITU:n (International Telecommunication Union) määritelmä 4G:n nopeuksista poikkeaa tästä huomattavasti, latausnopeus paikallaan on 1 gigabittiä sekunnissa ja 100 megabittiä sekunnissa liikuttaessa. Suurin eteläkorealainen matkapuhelinoperaattori on jo testannut 4G-verkkoa, jossa tiedonsiirtonopeus oli mobiilipäätelaitteiden välillä 1 megabittiä sekunnissa. NTT DoCoMo testiverkoissa tiedonsiirtonopeus on ollut hetkellisesti 1 megabittiä sekunnissa ja tasaisesti 135 megabittiä sekunnissa.[19.]

LTE (Long Term Evolution) on 4G-tekniikka, jonka tarkoitus on kasvattaa datan siirtonopeuksia ja parantaa palveluita. Data kulkee tukiasemasta päätelaitteeseen useita radioteitä pitkin MIMO-tekniikalla. LTE on ensimmäinen 4G-tekniikka, jossa

radioliikenne tukiasemasta päätelaitteeseen on toteutettu erilaisella radiotekniikalla kuin radioliikenne päätelaitteesta tukiasemaan. Datan siirto tukiasemasta päätelaitteeseen tapahtuu OFDM-tekniikalla ja päätelaitteesta tukiasemaan SC-FDMA (Single-carrier-Frequency Division Multiple Access) -tekniikalla. Luonnoksissa datansiirron tavoitteiksi on määritelty tukiasemasta päätelaitteeseen 100 megabittiä sekunnissa ja päätelaitteesta tukiasemaan 50 megabittiä sekunnissa. Käytännössä nopeudet eivät tule olemaan näin suuria, varsinkaan tukiaseman ollessa kaukana. Long Term Evolutionin tulevaisuuden menestys tukeutuu vahvasti tekniikan yhteensopivuuteen nykyisten 3G-verkkojen kanssa ja datansiirtonopeuksiin. [20.]

5 MIMO:n käyttötavat ja sovellukset



Tx = lähetin, Rx = vastaanotin

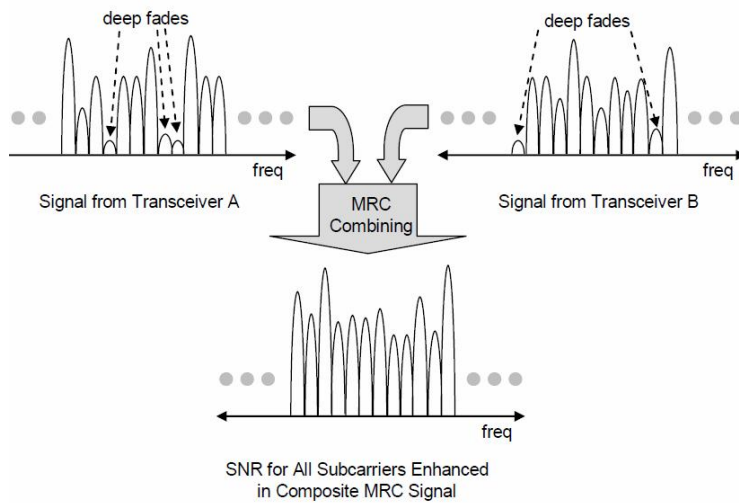
Kuva 19. SISO-, SIMO-, MISO- ja MIMO-tekniikoiden erot.[10]

Kuvassa 19 on esitetty moniantennitekniikan eri vaihtoehdot.

SISO (single input, single output) on radiojärjestelmä, jossa lähettimessä tai vastaanottimessa on vain yksi antenni.[1.]

SIMO (single input, multiple output) on radiojärjestelmä, jossa on yksi lähetin ja monta vastaanotinta, eli kyseessä on vastaanottodiversiteetti. Niin sanotussa beamforming-tekniikassa signaalit summautuvat koherentisti, joten SNR-suhde paranee 3 dB. Tätä nimitetään antenniryhmän (Array) vahvistukseksi. Toinen etu syntyy siitä, että signaali ei häivy todennäköisesti yhtä aikaa molemmista kanavista, jolloin minimi-SNR pysyy suurempana silloin kun käytetään kahta vastaanotinta kuvan 21 mukaisesti (diversity-gain). Eli SIMO ei ole vain moniantennitekniikka vaan siinä on myös erilliset vastaanottimet. Tämä tekniikka soveltuu parhaiten tukiasemiin. UE (User Equipment) -laitteessa SIMO tekee laitteesta monimutkaisemman, mikä lisää sen hintaa ja tehonkulutusta. [1.]

Käsite “MRC” tarkoittaa “maximal ratio combining”-ideaa, joka muun muassa OFDM-symbolin avulla esitettynä tarkoittaa kuvan 20 mukaista esitystä:



Kuva 20. Yhdistetty MRC-signaali. [1]

SIMO-ratkaisun etu on kuvattavissa yksinkertaisesti kuvan 21 avulla:

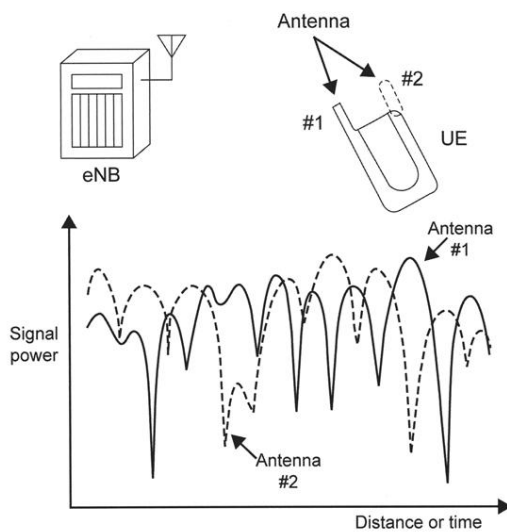


Figure 2.4-5 Example of diversity reception through loosely correlated paths

Kuva 21. SIMO:n antama etu on noin 3 dB huonossa SNR-tilanteessa [1]

MISO (Multiple input, single output) on radiojärjestelmä, joka sisältää monta lähetintä ja yhden vastaanottimen. Tätä tekniikkaa kutsutaan “transmit diversity”-tekniikaksi. Tässä tilanteessa UE-laite pysyy erittäin yksinkertaisena. Sovelluksia on muun muassa WiMAX-normissa IEEE 802.16e-2005. Koodit voidaan suunnitella “tila-aika” -

avaruuteen (Space Time Block Coding, **STBC**). Yksinkertaisin tämän idean toteutus on Alamoutin esittämä idea vuodelta 1998. Tällä menetelmällä saadaan diversiteettietu, mutta kanavan nopeus ei kasva, ellei parantunutta *SNR*-suhdetta hyödynnetä nostamalla modulaatiotasoa (esim. muuttamalla 4QAM 16QAM:ksi). Sama signaali kytketään molempiin antenneihin käyttäen ajan suhteen kääntämistä ja kompleksikonjugaattia kompleksiselle symbolille.

WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access) -verkossa voidaan HS-DSCH (High-Speed Downlink Shared Channel) datavirta jakaa kahteen rinnakkaiseen osaan ja lähettää ne eri antennien kautta seuraavan kuvan 22 mukaisesti. Koska WCDMA:ssa on mahdollista saada UE:ltä paluutietona niin sanottu CSI (Channel State Information), voi tukiasema tämän tiedon pohjalta valita parhaan mahdollisen MCS:n (Modulation and Coding Scheme) molempiin antenniportteihin. Tätä tekniikkaa kutsutaan PARC (Per-Antenna Rate Control) -arkkitehtuuriksi. PARC-tekniikka on esitetty kuvan 22 avulla ja kuvassa 23 on havainnollistettu SFBC (Space Frequency Block Coding) -tekniikka. [1]

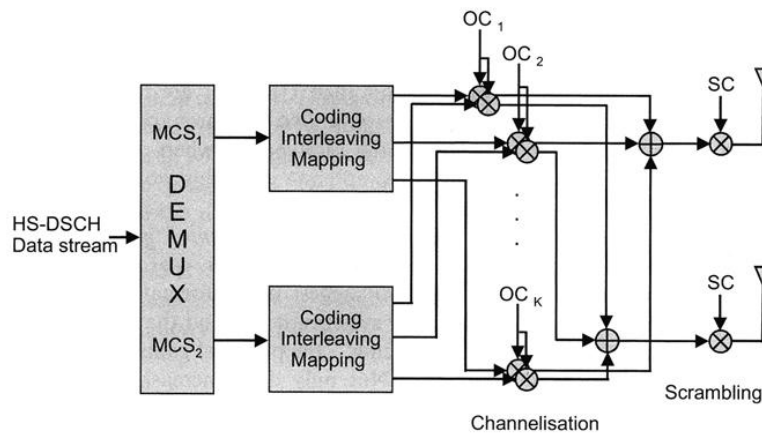


Figure 6.11 Transmitter structure for per-antenna rate control.

Kuva 22. HS-DSCH-datavirta. [1.]

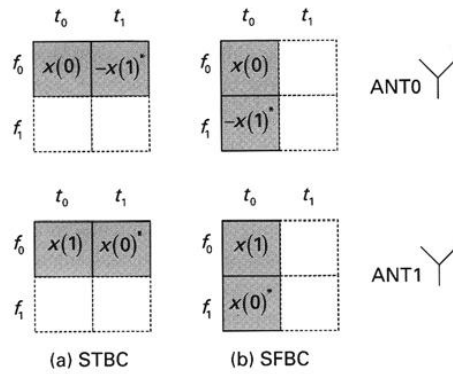


Figure 6.11. STBC and SFBC transmit diversity schemes for 2-Tx antennas.

Kuva 23. STBC (Space Time Block Code) ja SFBC (Space Frequency Block Coding) lähettimen diversiteettikartta kahdella 2 Tx-antennilla. [1]

Tätä käytetään LTE:ssä (Long Term Evolution). Normissa on tuki 2x1 ja 4x1 -MISO:lle [1.] 4x1 -tapauksessa lähettimen rakenne LTE:ssä näyttää kivalta 24:

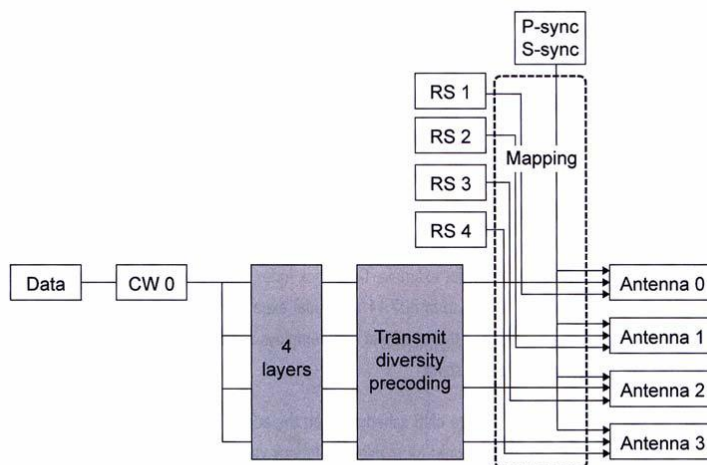


Figure 2.4-6. Configuration used for four transmitter diversity

Kuva 24. Konfiguraatiokaavio, jossa on käytetty neljää lähetintä. [1.]

Referenssisignaaleja eikä synkronointisignaaleja esikoodata, eli niiden välille ei tehdä tahallista “ylikuulumista”. [1.]

Datankäsittelyketju etenee kaaviokuvan 25 mukaisesti:

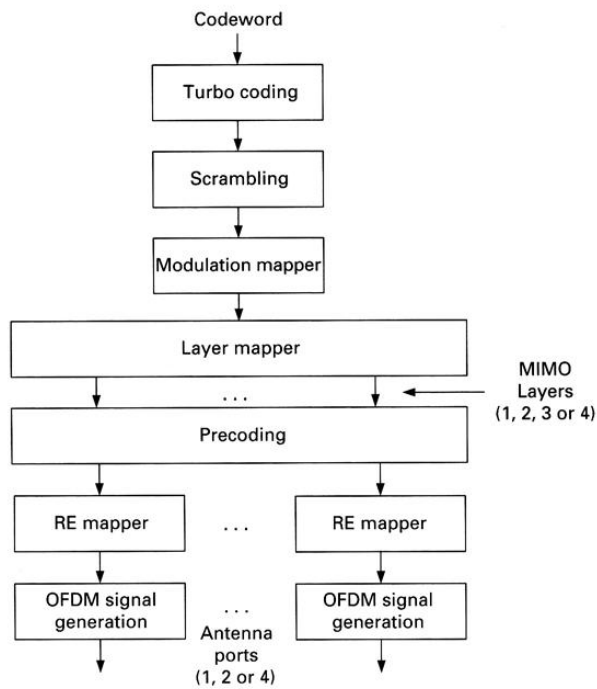
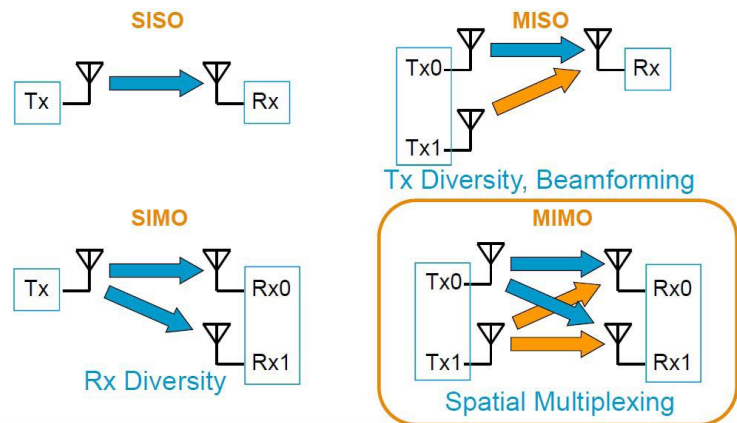


Figure 6.19. Downlink transmission chain.

Kuva 25. Datan käsittelyketjutapaus [1.]

System & Antenna Configurations, Terms

“Input” and “Output” Refer to the Channel



Kuva 26. Järjestelmä- ja antennikonfiguraatio [1.]

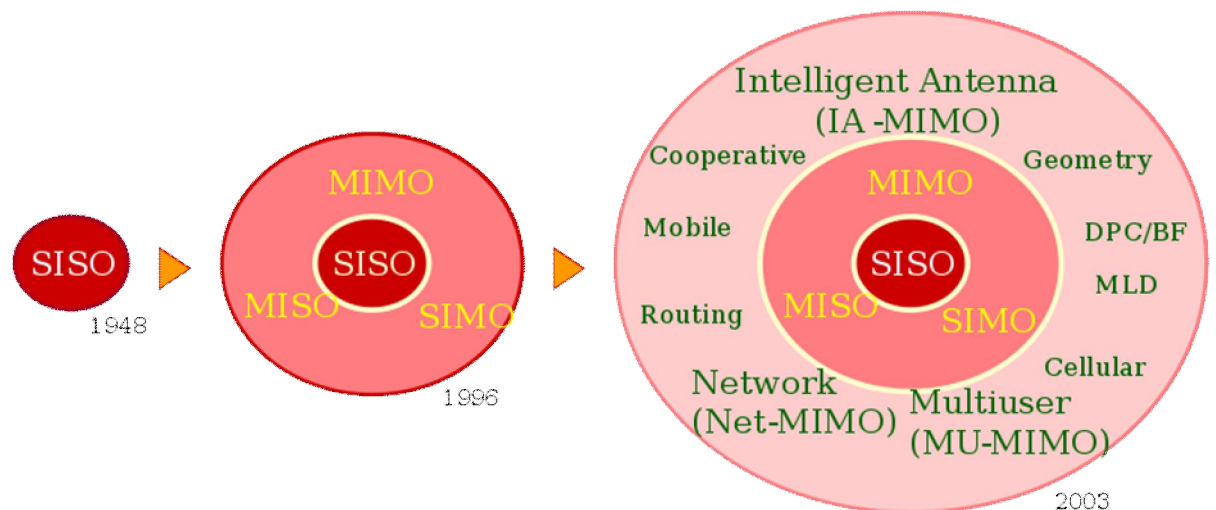
Kuvassa 26 on havainnollistettu MIMO-systeemin ja antennien konfiguraation kulku vaiheittain.

MIMO-tekniikkaa voidaan hyödyntää pääasiassa kahdella eri tavalla: maksimoimalla tiedonsiirtonopeus tai parantamalla tiedonsiirron luotettavuutta.

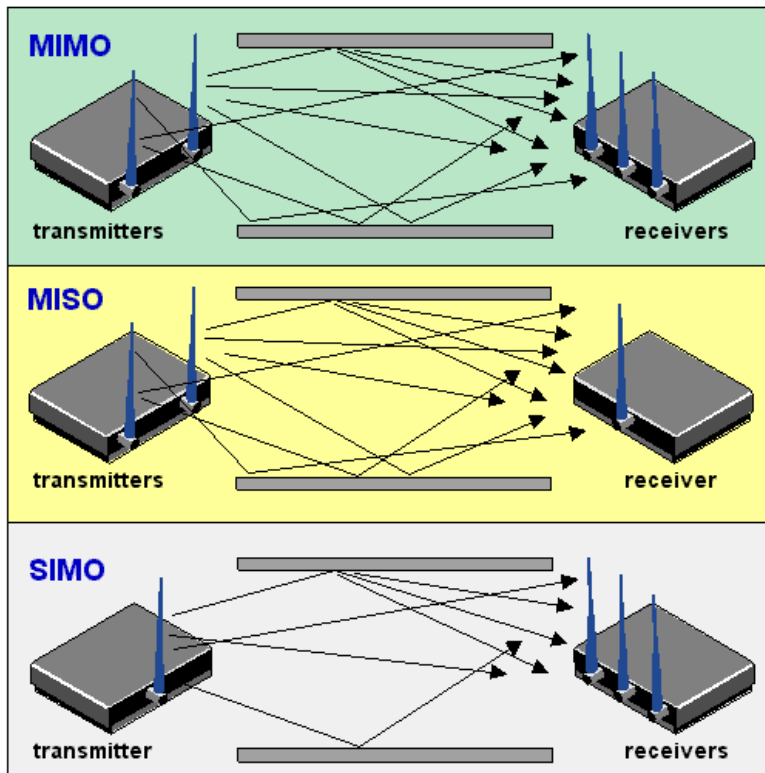
Tiedonsiirtonopeuden maksimointiin käytetään alueellista multipleksointia (*spatial multiplexing*, joskus myös MIMO-SM). Kun vastaanottajalla on käytettävissään vähintään yhtä monta antennia kuin lähettäjällä, voidaan kutakin lähettäjä-vastaanottaja-antenniparia käyttää yksilöllisesti. Tällöin lähettäjä pilkkoo sarjamuotoisen sähkeen useammalle antennille, jotka lähettävät yksilöllisen osan signaalista rinnan samanaikaisesti samalla lähetyskanavalla. Vastaanottopäässä eri aikoihin saapuvat signaalit kootaan jälleen yhdeksi tietovirraksi. Usean lähetys- ja vastaanottoantennin käytöllä voidaan saavuttaa huomattavasti suurempi tiedonsiirtokapasiteetti kuin yhdellä antennilla. Teoriassa lähetettävän datan määrä voidaan kertoa antenniparien määrällä, mutta käytännössä toteutus aiheuttaa myös häviöitä esimerkiksi signaalien häiritessä toisiaan. Etu on verrattavissa kaistanleveyden tai lähetystehon kasvattamisesta saatavaan hyötyyn.[3; 4.]

Tiedonsiirron luotettavuuteen pyritään käyttämällä aika-tilakoodausta, jolla minimoidaan häipymisestä aiheutuvia haittoja, kuten viivettä. Siinä sama signaali lähetetään useammasta antennista samanaikaisesti. Näin saavutetaan parempi virheensieto, eli pystytään luomaan yksiantennijärjestelmää luotettavampi verkko. Usein samalla paranee myös kantama.[3; 4; 10.]

Kuvassa 27 on MIMO-viestinnän historia esitetty kolmena eri ajanjaksona.



Kuva 27. MIMO-viestinnän historia [10]



Kuva 28. MIMO:n mittaustulosten havainnekuvia. [5]

5.1 Sovellukset

MIMO-sovelluksia ovat muun muassa alueellinen multipleksointi, IEEE 802.11n-standardi, matkapuhelinstandardit (esim. 3GPP- ja 3GPP2-standardit).

Varmistaakseen MIMO:n mahdollisuuksia todelliseen leviämiseen ympäristössä on suoritettu mittaustutkimuksia. Sisä- ja ulkokäytössä mittaukset osoittavat lupaavia arvoja. On havaittu kolme tyypillistä mallia, jotka on esitetty kuvassa 28.

5.1.1 Lähetin-vastaanotinkorrelaatio

Lähettimen ja vastaanottimen korrelaatio korreloi kanavapolkua. Laajalti käytetty korrelointimallin antama lauseke on kaavan 20 mukainen:

$$H = R_r (1/2) H_w R_t (1/2) \quad H = R R (1 / 2) H_w R_t (1 / 2) \quad (20)$$

jossa H_w on $N_r * N_t$ matriisiin riippumattomia merkintöjä, $R R$ ja R_t kuvaavat $N_r * N_r$ ja $N_t * N_t$ antennin korrelaatiomatriisi. Tämä perustuu korrelaatio-ominaisuuksissa vastaanottimen matriisiin vastausvektoriin, tai arvokanavien vastauksen matriisiin H .

Korkealla asemalla MIMO-kanava esiintyy, jos ympäristössä on suuri määrä sirontaa ja kanavapolun korrelaatio on pieni. Kanavan kapasiteetti voidaan arvioida kaavan 21 mukaan.

$$C \hat{=} \min (N_r , N_t) \log (1 + \text{SNR } N_r / N_t) \quad (21)$$

Alhaisella asemalla (Low-rank) MIMO-kanavat esiintyvät vapaana hajontana (scatter-free) tai pitkän matkan yhteyksinä, joilloin kanavan polulla on vahva korrelaatio.

Kapasiteetin alhaisella asemalla MIMO-kanava voidaan arvioida kaavan 22 mukaisesti:

$$C \hat{=} \log = (1 + \text{SNR } N_r) \quad (22)$$

Lisäksi, jos SNR on alhainen, korrelaatio kanavalla on vain vähäinen vaikutus kapasiteettiin. Tässä tilanteessa, kapasiteetin lähestymistapa on esitetty kaavassa 23:

$$C \min (N_r , N_t) * \text{SNR } \text{ xa } N_r / N_t \quad (23)$$

5.1.2 Avaimenreikäkanavat

Avaimenreikäympäristöissä kanavan matriisi voi vähentää huomattavasti suorituskykyä MIMO-järjestelmän vuoksi. Avaimenreikä-kanavissa kuvataan erityisesti MIMO-kanavia, jotka hajoavat kapasiteetin näkökulmasta, mutta antavat monimuotoisuutta.

[12]

Kun h :n arvo = 1, saadaan kaavan 24 mukainen muoto.

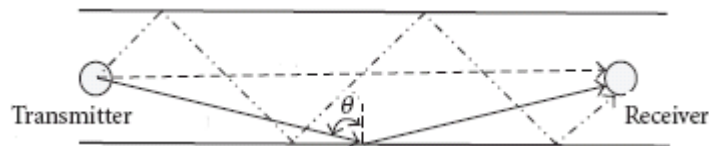
$$H = h N_r h N_t + H \quad (24)$$

5.1.3 Aaltoputken kanavat

Aaltoputken kanava käyttää ohjenuoranaan aaltoteorian mallia, jossa kanavan lisäksi tehdään aaltoputkityyppisen kaltaisissa ympäristöissä, kuten käytävillä tai kaduilla. Kanavan matriisi voidaan esittää kaavan 25 mukaisesti.

$$H = VZA \quad H = VZA \quad (25)$$

jossa Z on $L \times L$ diagonaalimatriisi, L on määrän lisääminen. $V \in \mathbb{R}^{N_r \times L}$ on liikennemuotomatriisi, joka edustaa $L \times A \times N_T$ impulssikohtien matriisia. Kanavan kapasiteetti vähenee etäisyyteen nähden suoraan alaspäin. Tämä on esitetty kuvassa 29.[12.]



Kuva 29. Kanava matriisi.[12.]

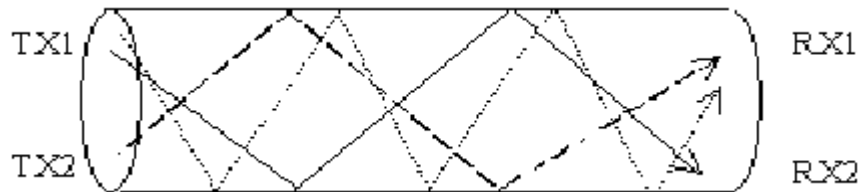
5.2 Muut kanavat

5.2.1 Kaapelikanavat

Kaapeliniippu koostuu useiden parien kuparikaapeleista, jotka toimivat MIMO-siirtoverkolla, etenkin korkeilla taajuuksilla. MIMO:n käsittely voi merkittävästi vähentää kaukopään ylikuulumista (FEXT (Far End Crosstalk)). FEXT-ilmiö vähentää kapasiteettia kaapelikanavassa. Kaapelimatriisissa lävistäjän ehdot ovat kanavan hyödyt ja diagonaalien ulkopuolella tekijät muodostavat FEXT:n. Kokeelliset tulokset perustuvat fysikaalisiin mittauksiin, jotka on tehty viidessä parikaapelissa. [12.]

5.2.2 Optiset kuitukanavat (MMF)

”Multimode” tarkoittaa monimuotoisuutta, joka rajoittaa kuidun kapasiteettia ja tätä etenemisilmiötä kutsutaan modulaarisesti dispersioksi. Multimode aiheuttaa kuidussa tilan lisäystä, joka rajoittaa kaistanleveyttä, eli kapasiteettia kuidussa. Modulaarisesta dispersiosta on havainnollistettu kuvassa 30.



Kuva 30. MMF (Multi Mode Fiber) optinen kanava. [12.]

Järjestelmä sisältää T -laserit ja r fotonii-ilmäisimet. Kanavamatriisi voidaan esittää kaavan 26 muodossa:

$$h_{ij} = \sum_{k=1}^Q g_{ijk} e^{j\omega_c \tau_{pk}} \quad (26)$$

jossa Q on määrän liikennemuotojen MMF (Multi Mode Fibre), g_{ijk} on kanavavahvistus, KTH tilaan j th lähettimen n teen vastaanotin, WC on kantotaajuus, τ_{pk} on vaiheen viivästyminen KTH -tilassa.

Kun $Nr = NT$ kaistanleveys on saavutettavissa vasta kun $Nr \tilde{A}$ -BSISO on ihanteellisessa ympäristössä. Näiden määreillä on samat pituudet ja yhteenlaskettu energia SISO-optisessa kanavassa. [12.]

5.2.3 Vapaan tilan optiset kanavat (FSO)

Vapaan tilan optisia kanavia käytetään rakentamaan suuren kapasiteetin linkkejä. Ne parantavat sen suorituskykyä samalla tavalla kuin langaton RF (Radio frequency) MIMO-järjestelmän avulla alueellista monimuotoisuutta. Järjestelmään kuuluu useita laserlähettämiä ja useita valokuvailmaisinvastaanottimia. Kanavan voimakkuuden mukauttaminen, ja suora havaitsemiseen voidaan ilmaista kaavan 27 mukaisesti

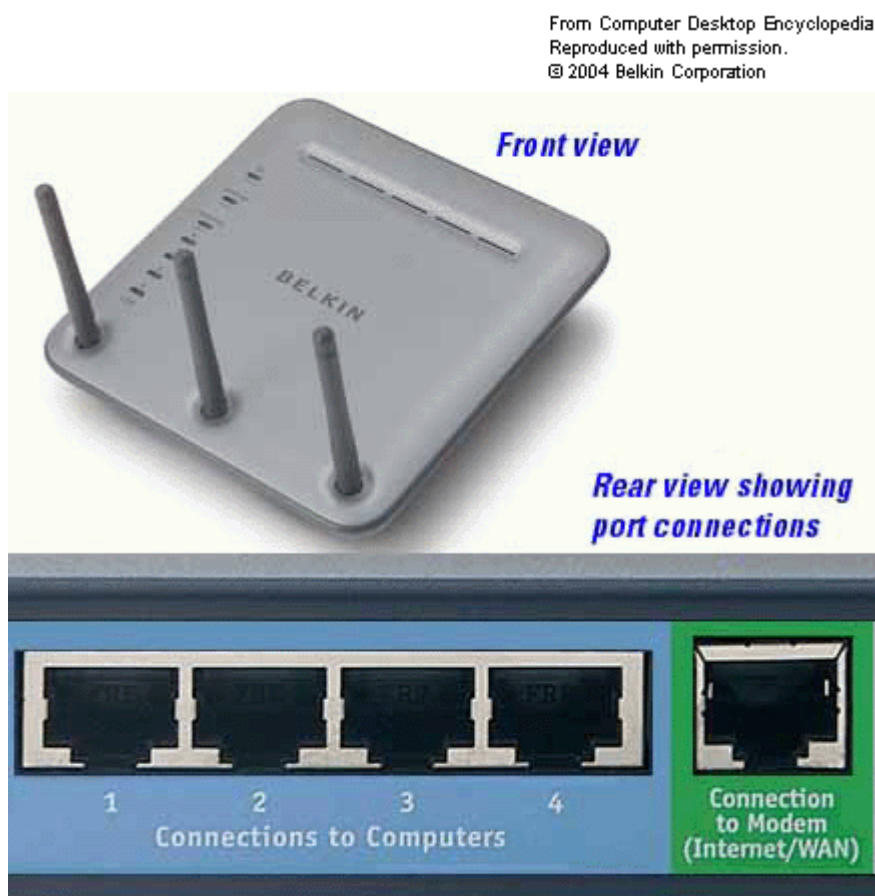
$$y(t) = r x(t) \otimes h(t) + n(t) \quad (27)$$

jossa \otimes tarkoittaa konvoluutiota, R edustaa valonilmaisimen herkkyyttä (PD), $n(t)$ edustaa häipymistä ja $h(t)$ edustaa kanavan impulssivastetta. Häipyminen johtuu ilmakehän turbulenssista. Ilmakehän turbulenssin takia häipyminen lieventää MIMO:n käsittelyä ja silloin myös kanavan kapasiteetti ja SNR lisääntyvät. [12.]

6 Ominaisuudet, edut ja heikkoudet

MIMO-järjestelmien suunnittelijoiden keskeisenä haasteena on eri aikaan vastaanotettujen signaalien yhdistämisen suorittavien ohjelmistopohjaisten algoritmien kehittäminen.[3.]

Kuvassa 31 on esimerkki MIMO:n langattomasta reitittimestä.



Kuva 31. MIMO:n langaton reititin [14.]

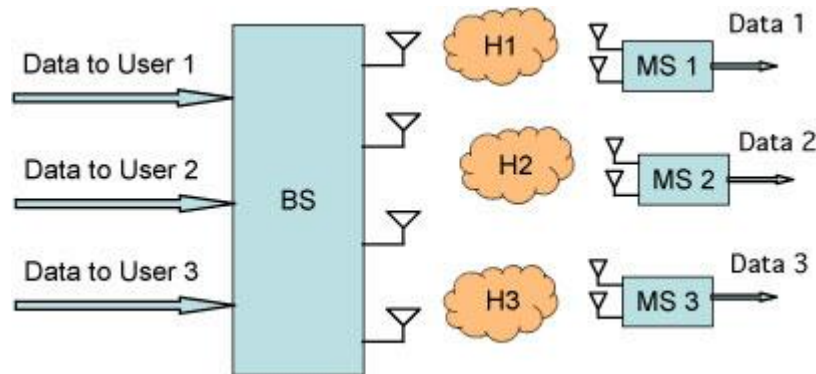
MIMO-tekniikan etuihin kuuluvat muun muassa maksimoitu tiedonsiirto, 3G ja parannetun tiedonsiirron luotettavuus.

Tiedonsiirron luotettavuuteen pyritään käyttämällä aika-tilakoodausta, jolla minimoidaan häipymisestä aiheutuvia haittoja, kuten viivettä. Tiedonsiirtonopeuden maksimointiin käytetään alueellista multipleksointia. Moniantennijärjestelmä vaatii paljon monimutkaista laskentaa prosessoreilta.

7 Kehitysnäkymät

MIMO tulee esittämään tärkeää osaa tulevaisuuden langattomassa LAN-systeemissä. Spatiaalinen prosessi on ehkä paras (jos ei ainut vaihtoehto) tapa tarjota parempaa toimintaa sekä suoritustehossa että kantomatkassa. 802.11n:n tavoite on määrittää tekninen standardi yhdelle WLAN-radiokanavalle, jonka suorituskkyky on ainakin 108 megabittiä sekunnissa. MIMO-kantaiset WLAN-tuotteet, joiden suorituskyyvyt ovat 144–200 mega bittiä sekunnissa, tulevat olemaan saatavilla 802.11n:n uudessa julkaisussa.

Tulevaisuudessa MIMO-antennit rakentuvat mobiili-PC:lle ja kämmentietokoneille (Personal Digital Assistant). MIMO on yksi tärkeimmistä teknologioista tällä vuosikymmenellä.[17] Kuvassa 32 on esitetty monen käyttäjän MIMO-järjestelmä.



Kuva 32. Monien käyttäjän MIMO- kaavio [18]

MIMO on lupaava teknologia tulevaisuuden langattomalle tiedonsiirtosysteemille sen etujen, kehitysmahdollisuuksien ja ominaisuuksien vuoksi.[18.]

8 Yhteenveto

Insinööriyöni on selvitystyö moniantennitekniikasta ja sen vaikutuksesta radiotekniikassa. MIMO-tekniikka ja sen sovellukset ovat hyvin monikäyttöisiä tekniikoita, jotka luovat hyvät mahdollisuudet laaja-alaiseen käyttöön eri radiotietoliikenteen aloilla.

MIMO ja sen sovellukset tulevat olemaan hyvin tärkeä osa radiotietoliikenteen tulevaisuutta, sen tuomien etuuksien ja ominaisuuksien vuoksi. Radiotietoliikenne tulee siis aikanaan tulevaisuudessa olemaan hyvin riippuvainen MIMO-tekniikasta.

Lähteet

- 1 Radiotekniikka ja MIMO. (WWW-dokumentti). <http://www2.stadia.fi/~ahool/>. Luettu 21.1.2010.
- 2 IEEE 802.11. (WWW-dokumentti). Wikipedia. <http://fi.wikipedia.org/wiki/>. Luettu 21.1.2010.
- 3 MIMO. (WWW-dokumentti). Wikipedia. <http://fi.wikipedia.org/wiki/>. Luettu 21.1.2010.
- 4 MIMO -periaatteet. (WWW-dokumentti). Wikipedia. <http://upload.wikipedia.org/wikipedia>. Luettu 21.1.2010.
- 5 MIMO. (WWW-dokumentti). Yourdictionary. <http://www.yourdictionary.com/images/computer>. Luettu 21.1.2010.
- 6 MIMO. (WWW-dokumentti). <http://users.ece.utexas.edu/~rheath/research/mimo/>. Luettu 21.1.2010.
- 7 IEEE 802.11. (WWW-dokumentti). Wapedia. <http://wapedia.mobi/fi/>. Luettu 21.1.2010.
- 8 MIMO-tekniikka. (WWW-dokumentti). Wiziq-tutorial. <http://www.wiziq.com/tutorial/>. Luettu 21.1.2010.
- 9 MIMO. (WWW-dokumentti). Wiziq-tutorial. <http://www.wiziq.com/tutorial/>. Luettu 21.1.2010.
- 10 MIMO. (WWW-dokumentti). Wikipedia. <http://en.wikipedia.org/wiki/>. Luettu 4.2.2010.
- 11 Wimax ja MIMO. (WWW-dokumentti). Wikipedia. <http://en.wikipedia.org/wiki/>. Luettu 6.2.2010.
- 12 MIMO historia. (WWW-dokumentti). <http://www.ece.ualberta.ca/~HCDC/mimohistory>. Luettu 13.2.2010.
- 13 Älykkäät antennit. (Smart antenna) (WWW-dokumentti). Wikipedia. <http://en.wikipedia.org/wiki/>. Luettu 15.2.2010.
- 14 MIMO. (WWW-dokumentti). Yourdictionary. <http://www.yourdictionary.com/index.php/computer/>. Luettu 15.2.2010.
- 15 IEEE 802.16. (WWW-dokumentti). Wapedia. <http://wapedia.mobi/fi/>. Luettu 15.2.2010.
- 16 Granlund, Kaj Tietoliikenne 2. painos. Helsinki: WSOY 2007.

- 17 MIMO. (WWW-dokumentti). Sohaware.
<http://www.sohoware.com/support/pdf/>. Luettu 21.2.2010.
- 18 MIMO. (WWW-dokumentti).
<http://users.ece.utexas.edu/~rheath/research/mimo/>. Luettu 21.2.2010.
- 19 4G. (WWW-dokumentti). Wikipedia
<http://fi.wikipedia.org/wiki/>. Luettu 21.2.2010.
- 20 LTE. (WWW-dokumentti). Wikipedia.
<http://fi.wikipedia.org/wiki/>. Luettu 25.2.2010.
- 21 MIMO. (WWW-dokumentti). Wikipedia
<http://en.wikipedia.org/wiki/>. Luettu 25.2.2010.