

Iiro Moilanen

MU-MIMO teknologia ja testaus osana langatonta viestintää

MU-MIMO teknologia ja testaus osana langatonta viestintää

Iiro Moilanen
Opinnäytetyö
Syksy 2023
Tietotekniikan tutkinto-ohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Tietotekniikan tutkinto-ohjelma, ohjelmistokehitys

Tekijä: Iiro Moilanen

Opinnäytetyön nimi: MU-MIMO teknologia ja testaus osana langatonta viestintää

Työn ohjaajat: Olli Himanka ja Pekka Naumanen

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Syksy 2023

Sivumäärä: 59

Tämä opinnäytetyö käsittelee MU-MIMO teknologiaa ja sen testausta. Työn tausta keskittyy sähkömagneettisiin aaltoihin, langattomaan viestintään, antenniin ja sen muodostamaan keilaan, moniantennitekнологiaan etenkin MIMO ja MU-MIMO:on.

Työn tavoitteena on syventää käsitystä edellä mainituista tekniikoista, erityisesti keskittyen MU-MIMO:on. Opinnäytetyössä on myös käsitelty MU-MIMO testausta, sen merkitystä ja tehokkuutta.

Soveltuva tietoperusta kattaa sähkömagneettisten aaltojen teorian, langattoman viestinnän periaatteet, antennitekniikan, moniantennitekнологian ja MU-MIMO tekniikan peruskohtaisen ymmärtämisen.

Päätuloksena on saavutettu ymmärrys edellä mainituista tekniikoista ja erityisesti MU-MIMO tekniikasta ja sen testauksen merkityksestä. Pohdinnassa korostetaan MU-MIMO testauksen tärkeyttä langattoman viestinnän suorituskyvyn parantamisessa.

Asiasanat: langaton viestintä, tukiasemat, MIMO, MU-MIMO, testaus

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Information Technology, Programming orientation

Author: Iiro Moilanen
Title of thesis: MU-MIMO technology and testing as part of wireless communication
Supervisor(s): Olli Himanka ja Pekka Naumanen
Term and year when the thesis was submitted: Autumn 2023
Number of pages: 59

This thesis deals with MU-MIMO technology and its testing. The background of the work focuses on electromagnetic waves, wireless communication, the antenna and the beam it forms, multi-antenna technology, especially MIMO and MU-MIMO.

The aim of the work is to deepen the understanding of the above mentioned technologies, especially focusing on MU-MIMO. The thesis has also discussed MU-MIMO testing, its importance and efficiency.

The applicable knowledge base covers a basic understanding of the theory of electromagnetic waves, the principles of wireless communication, antenna technology, multi-antenna technology and MU-MIMO technology.

The main result is an understanding of the above-mentioned technologies and especially of MU-MIMO technology and the importance of its testing. The reflection emphasizes the importance of MU-MIMO testing in improving wireless communication performance.

Keywords: wireless communication, base station, MIMO, MU-MIMO, testing

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	10
2	LANGATON VIESTINTÄ SEKÄ SÄHKÖMAGNEETTISET AALLOT	11
2.1	Sähkömagneettiset aallot	11
2.2	Langattoman viestinnän historiaa lyhyesti	11
2.3	Taajuusspektri ja taajuuskaista eli "kanava"	13
2.4	Signal-to-noise ratio eli Signaali-kohinasuhde	14
2.5	Langattoman tiedonsiirron taustalla olevat teoriat	15
2.5.1	Modulaatio- ja moninkertaistamisteoriat	15
2.5.2	Informaatioteoriat	16
2.5.3	Vastaanotto- ja lähettämisantenniteoriat	16
2.5.4	Signaali ja kohina	16
2.5.5	Nyquistin teoria	16
2.5.6	Hartleyn laki ja Shannon-Hartley-theoreema	17
2.6	Spectral efficiency eli spektraalinen hyötysuhde ja kanavakapasiteetti	18
3	ANTENNI JA SEN MUODOSTAMA KEILA	21
3.1	Antennin tehtävä	21
3.1.1	Signaalin lähettäminen	22
3.1.2	Signaalin vastaanottaminen	22
3.1.3	Säteilykuviointi eli radiation pattern	23
3.2	Beamit ja Beamforming eli keilat ja keilojen säteenmuodostus	24
3.2.1	Analoginen beamforming	24
3.2.2	Digitaalinen beamforming	25
3.2.3	Hybrid beamforming	27
4	YKSI -JA MONIANTENNITEKNOLOGIA	29
4.1	SISO	29
4.2	SIMO	30
4.3	MISO	31
4.4	MIMO	31
4.5	MIMO-matriisi	33
4.6	MU-MIMO	34
4.6.1	Hyödyt	35

4.6.2	Haasteet.....	36
4.7	MIMO vs MU-MIMO	36
4.8	SU-MIMO vs MU-MIMO	36
4.9	MU-MIMO vs Massive MIMO	38
5	MUUTAMIA MERKITTÄVIÄ TIEDONSIIRTOTEKNIIKOITA MIMO:SSA JA MU-MIMO:SSA	39
5.1	Channel state information eli CSI	39
5.2	UE pairing.....	40
5.3	Layers ja rank indicator	40
5.4	SRS	41
5.5	Precoding ja Decoding	42
5.6	MIMO spatial diversity ja spatial multiplexing	43
6	MU-MIMO TESTIYMPÄRISTÖ	44
6.1	Testausympäristö	44
6.1.1	Tukiasema	45
6.1.2	Radio	47
6.1.3	Phase shifter eli vaiheensäätöpiiri.....	48
6.1.4	Kuormageneraattori eli testeri	49
7	MU-MIMO TESTAUS JA MENETELMÄT	50
7.1	Conducted mode- testaus	50
7.2	OTA-testaus	51
7.3	Uuden toiminnallisuuden testaaminen.....	52
7.3.1	Testaus suunnitelma ja raportointi	52
7.3.2	Testilinjan pohjustus testaamista varten	52
7.3.3	Testien suorittaminen, tarkastelu ja raportointi.....	53
8	POHDINTA	54
9	LÄHTEET	55

SANASTO

1G	Langattoman viestinnän ensimmäinen sukupolvi
2G	Langattoman viestinnän toinen sukupolvi
3G	Langattoman viestinnän kolmas sukupolvi
3GPPP	3rd Generation Partnership Project, matkapuhelinverkkojen kehityselin
4G	Langattoman viestinnän neljäs sukupolvi
5G	Langattoman viestinnän viides sukupolvi
6G	Kehitteillä oleva langattoman viestinnän kuudes sukupolvi
AC	Vaihtovirta
Algoritmi	Prosessin looginen ohje-tai toimintasuunnitelma
Bit	Bit on tietotekniikan perusyksikkö. Arvoltaan 0 tai 1.
BLER	Block error rate on mittari virheprosentin kuvaamiseen tiedonsiirrossa
BTS	Basestation eli tukiasema
cmW	Cm wave eli senttimetri aalto
CQI	Channel Quality Indicator eli kanavan laadun indikaattori
CSI	Channel state information eli kanavan tilan indikaattori
dB	Desibeli eli mittayksikkö esimerkiksi signaalin voimakkuuden kuvaamiseen

DL Throughput	Downlink eli lähetystiedonsiirtonopeus tukiasemalta UE:lle
DSP	Digital Signal Processing
E	E kuvaa sähkökentän voimakkuutta
FDD	Frequency Division Duplex
FR	Frequency range eli taajuusalue
Hz	Hertsi, mittayksikkö
Kanava	Tietyn taajuuskaistan siirtotie informaatiolle
Komissiointi	Esimerkiksi tukiaseman asennus, konfigurointi ja käyttöönotto.
KPI	Key performance indicator eli suorituskykymittari
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MISO	Multiple Input Single Output
mmW	Mm wave eli millimetri aalto
MU-MIMO	Multi User Multiple Input Multiple Output
NSA	Not stand alone -tukiasema
PMI	Precoder Matrix Indicator on indikaattori sille mitä esikooderia tukiasema käyttää signaalin siirtämisessä käyttäjälaitteelle
QAM	Quadrature Amplitude Modulation on modulaatiotekniikka
RAT	Radio Access Technology
Referenssi	Vertailukohta tai lähtökohta
RF	Radio frequency
RI	Rank Indicator
Rx	Receiver eli signaalin vastaanotin
SA	Stand alone -tukiasema

SIMO	Single Input Multiple Output
SISO	Single Input Single Output
Solu	Tukiaseman muodostama vaikutusalue
SNR	Signal to Noise Ratio
SRS	Sounding reference signal
TDD	Time Division Duplex
Tx	Transmitter eli signaalin lähetin
UE	User Equipment eli käyttäjälaite kuten matkapuhelin
UL Throughput	Uplink eli lähetystiedonsiirtonopeus UE:lta Tukiasemalle

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on perehtyä 5G verkoissa käytettävään moniantennitekniikkaan eli MU-MIMO teknologiaan, joka tulee sanoista Multi User Multiple Input Multiple Output. Lisäksi käydään läpi myös testiympäristöä, josta avataan toiminnallisuutta, johdotettua testiympäristöä ja ilmarajapinta testiympäristöä sekä itse 5G MU-MIMO:n testaamista. Alkuun avataan langattoman viestinnän perusteita sekä historiaa, jonka jälkeen avataan tarkemmin antennitekniikkaa, SIMO:n, MIMO:n sekä MU-MIMO:n perusteita, sekä muutamia olennaisia osa-alueista nimenomaan MU-MIMO teknologiaan vaikuttavista tiedonsiirtotekniikoista. Lopuksi pohdin hieman MU-MIMO:n tulevaisuutta ja testaamisen merkitystä. Koska aihe on varsin laaja, niin opinnäytetyön tarkoituksena ei ole mennä liian syvällisiin ja kompleksisiin asiakokonaisuuksiin vaan tarkoitus on pysytellä perusteissa, joista on hyvä lähteä syventymään asioihin kiinnostuksen herätessä.

2 LANGATON VIESTINTÄ SEKÄ SÄHKÖMAGNEETTISET AALLOT

Langaton viestintä on tiedonsiirtoa langattomasti kahden tai useamman laitteen välillä. Tässä opin-
näytetyössä nämä laitteet ovat tukiasema ja käyttäjälaite, jolla käytetään langattomasti verkkoa eli
kansankielellä nettiä. Tämä käyttäjälaite voi olla siis esimerkiksi puhelin. (1.)

2.1 Sähkömagneettiset aallot

Sähkömagneettiset aallot ovat sähkökentän ja magneettikentän yhdistelmä, jotka etenevät avaruudessa tai aineessa. Ne ovat tärkeä osa tiedonsiirtoa langattomissa viestintäjärjestelmissä, kuten matkapuhelinverkoissa ja langattomissa tietoverkoissa. (2.)

Tiedonsiirrossa sähkömagneettiset aallot toimivat kantajina, joiden avulla datainformaatio välitetään esimerkiksi tukiaseman ja käyttäjälaitteen välillä. Tiedot voidaan muuntaa sähkömagneettisiksi aalloiksi modulaation avulla, jolloin informaatio koodataan aaltomuodon tai taajuuden muutoksina. (2.)

Sähkömagneettiset aallot etenevät vapaasti avaruudessa ilman tarvetta johtaville johdoille tai kaapeleille. Ne voivat kulkea ilman, veden ja muiden materiaalien läpi, mikä mahdollistaa langattoman viestinnän. Veden läpi ne kulkevat tosin erittäin heikosti. (2.)

Tässä opinäytetyössä käsitellään MU-MIMO teknologiaa, joka käyttää tukiaseman avulla hyväkseen nimenomaan radioaaltoja, jotka kuuluvat sähkömagneettisten aaltojen piiriin taajuuskaistan ollen noin 30 hertsistä aina 3 000 gigahertsiin. (Kuva 2.) (2.)

2.2 Langattoman viestinnän historiaa lyhyesti

Langattoman viestinnän alku sijoittuu 1800-luvun puolenvälin tienoille, kun vuonna 1865 James Clerk Maxwell julkaisi teorian siitä, miten valo on sähkömagneettinen aaltoliikkeen muoto ja miten se etenee avaruudessa aaltoliikkeen muotoisesti valon nopeudella. Tätä ilmiötä varten Maxwell loi hänen omaa nimeään kantavat yhtälöt eli Maxwellin yhtälöt. (3.)

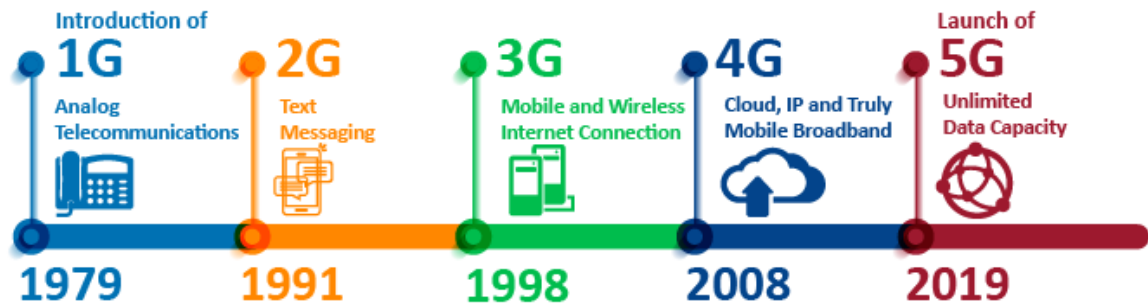
Maxwellin luomat teoriat olivat radion perusta ja niillä pystyttiin tutkimaan myöskin röntgen-, gamma- ja infrapunasäteilyä. Maxwellin teorioista ensimmäisen käytännön toteutuksen toteutti kuitenkin Heinrich Hertz, joka havainnollisti ensimmäisenä sähkömagneettisen säteilyn laitteella, joka tuotti radioaaltoja. Radioaaltojen taajuusspektristä mittayksikköä kutsutaan hertsinä (Hz) ja tämä on nimetty Heinrich Hertz:n mukaan. (3.)

Venäläinen Aleksandr Popov jatkoi Hertzin aloittamaa työtä ja on nykyisen tiedon mukaan ensimmäinen henkilö, joka loi radio yhteyden kahden laitteen välille. Kuitenkin kunniaa on annettava vahvasti myös Guglielmo Marconiolle, joka kiinnostui 1800-luvun loppupuolella Maxwellin ja Hertzin tutkimuksista ja alkoi työstää omia käytännön toteutuksia radioyhteyksien toteuttamiseen. Vuonna 1895 hän muodosti radioyhteyden muutaman kilometrin päähän, ja muutama vuosi myöhemmin 1899 hän muodosti radioyhteyden jo Englannin ja Ranskan välille. Hän sai myös patentin radiolähtimelleen. Tästä huolimatta, monien käänteiden seurauksena itse radion patentti kuuluu nykyään Nikola Teslalle, joka patentoi samana vuonna Marconionin kanssa omia toteuttamia radiokeksintöjä. (3.)

1920-luvun loppupuolella alkoi tulla kehitys askeleita lennättimellä eli radiolla tehtävän langattoman tiedonsiirron suhteen mm. Harry Nyquistin ja Ralph Hartleyn toimesta. Claude Shannon loi 1940-luvulla käsitteen kanavakapasiteetista sekä kehitti teorian informaation lähettämisestä, hyödyntäen Harry Nyquistin ja Ralph Hartleyn aikaisempia teorioita. Tämä kehitystyö johti Shannon-Hartley-teoreeman syntymiseen, joka on keskeinen käsite informaation siirrossa. Teoria on keskeisessä roolissa yhä tänäkin päivänä, kun suunnitellaan sekä kehitetään tietoliikennettä. (3.)

Itse langaton verkko ja sen kehitys kaari on alkanut noin 1980-luvun alussa niin kutsutusta 1G:stä ja kehittynyt vuosien saatossa noin kymmenen vuoden sykleissä aina 2020-luvun 5G:hen asti. (Kuva 1.) (4.)

The Evolution of 5G



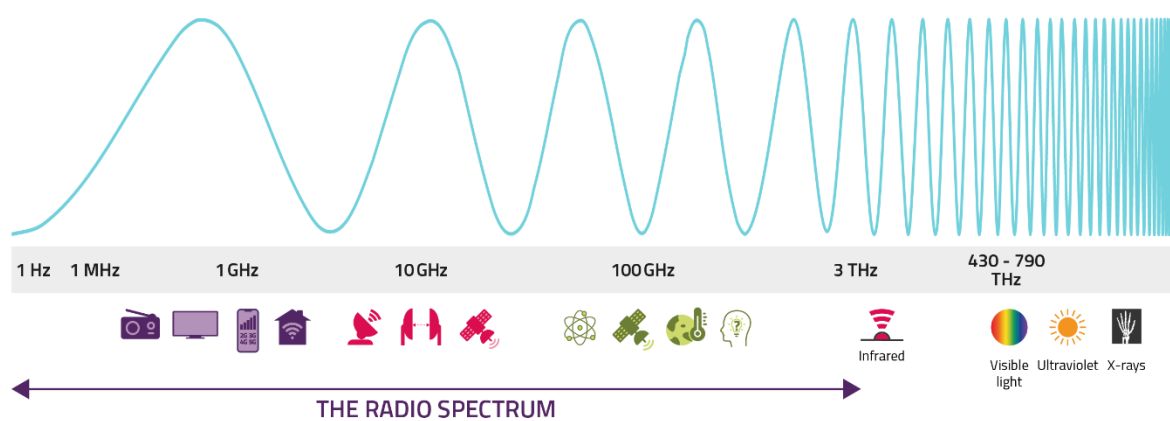
KUVA 1. Mobiiliverkkojen kehitys ajan jaksoissa. (4)

2.3 Taajuuspektri ja taajuuskaista eli "kanava"

Taajuuspektri eli frequency spectrum on elektromagneettisen spektrin alue, joka kattaa eri taajuuksilla olevat sähkömagneettiset aallot. Se kuvaa eri taajuuksien jakautumista. Esimerkiksi kun puhumme radioaalloista, niiden taajuuspektri ulottuu tietyltä alueelta tietylle alueelle taajuuspekt-rissä, kun taas tietty esimerkiksi tietty tukiasema voi olla tietyn taajuuskaistan sisällä. (Kuva 2.) (11.)

Taajuuskaista, josta puhutaan myös nimellä "kanava" on tietty osa isompaa kokonaisuutta eli taa-juuspekttriä ja esimerkiksi langattomissa verkoissa tietty taajuuskaista varataan tiettyä tarkoitusta varten esimerkiksi matkapuhelinverkoille. Langattomassa viestinnässä kanavat ovat siis kuin virtu-aalisia "putkia" tai kaistoja, joiden kautta tieto siirtyy. MU-MIMO:ssa tarkoitus on parantaa tietyn käytettävän taajuuskaistan eli kanavan tiedonsiirtoa eli kanavakapasiteettia. (11.)

Taajuuskaistan tehokas hallinta ja jakaminen on tärkeää, jotta voidaan varmistaa langattoman vies-tinnän suorituskyky, kattavuus ja kapasiteetti. Taajuuskaistan tehokas käyttö mahdollistaa useam-pien käyttäjien, laitteiden ja palveluiden tukemisen samanaikaisesti sekä tarjoaa paremman tiedon-siirtokapasiteetin ja suorituskyvyn. (12; 13.)



KUVA 2. Radion taajuusspektri, joka sijoittuu noin 30 hertistä aina 3 000 gigahertsiin(GHz) asti. (14)

5G:ssä taajuuskaistojen alue on luokiteltu 3GPP:n mukaan kahteen kategoriaan:

1. FR1 (frequency range 1) on alle 6 GHz:n alue 450-6 000 Mhz, jolloin puhutaan vielä senttimetriaalloista. (cmW). Ja esimerkiksi 3500 Mhz taajuudella aallon pituus on noin 8.7cm (53.)
2. FR2 (frequency range 2) on reilusti yli 6 GHz:n alue 24 250-52 600 Mhz, jolloin puhutaan sitten jo millimetriaalloista (mmW). Ja esimerkiksi 30 000 Mhz eli 30Ghz taajuudella aallon pituus on noin 0.99cm (53.)

Karkeasti voisi sanoa, että FR1 senttimetrialueen taajuudet tarjoavat hyvän kompromissin kattavuuden, kapasiteetin ja suorituskyvyn välillä, ne eivät kuitenkaan välttämättä tarjoa samaa huippunopeutta kuin korkeammat taajuudet, kuten millimetriaallot. Siksi 5G-verkot hyödyntävät usein eri taajuusalueita eri tarkoituksiin ja ympäristöihin saavuttaakseen parhaat hyödyt erilaisiin käyttötapoihin ja tarpeisiin. (15; 16.)

2.4 Signal-to-noise ratio eli Signaali-kohinasuhde

SNR (Signal-to-noise ratio) eli signaali-kohinasuhde on mittari, joka kuvaa signaalin voimakkuuden suhdetta taustakohinaan. Se ilmaisee signaalin voimakkuuden verrattuna siihen taustakohinan tasoon, joka vaikuttaa signaalin laatuun ja havaittavuuteen. (10.)

Signaali-kohina-suhde on tärkeä tekijä viestinnän järjestelmissä, kuten langattomissa verkoissa, radiolähetyksissä ja digitaalisessa viestinnässä. Suurempi signaali-kohinasuhde tarkoittaa parempaa signaalin laadun suhdetta taustakohinaan ja siten parempaa tiedonsiirron laatua. (10.)

Signaali-kohinasuhde lasketaan jakamalla signaalin teho signaalin kohinan teholla. Teoreettisesti sitä ilmaistaan desibeleissä. Positiivinen signaali-kohinasuhde tarkoittaa, että signaalin teho on suurempi kuin kohinan teho, kun taas negatiivinen signaali-kohinasuhde tarkoittaa, että kohinan teho on suurempi kuin signaalin teho. (10.)

Korkeampi signaali-kohinasuhde tarkoittaa, että signaali on vahvempi suhteessa kohinaan, mikä parantaa tiedonsiirron luotettavuutta ja mahdollistaa suuremman tiedonsiirtokapasiteetin. Optimaalinen signaali-kohinasuhde vaihtelee sovelluksesta riippuen, ja eri järjestelmissä voi olla erilaiset signaali-kohinasuhde vaatimukset. (10.)

SNR on siis yksi tärkeimmistä tekijöistä, joka vaikuttaa tiedonsiirron luotettavuuteen ja laatuun. Parempi SNR parantaa signaalin vastaanottoa, vähentää virheiden määrää ja mahdollistaa paremman suorituskyvyn langattomissa viestintäjärjestelmissä. (10.)

2.5 Langattoman tiedonsiirron taustalla olevat teoriat

Langattoman tiedonsiirron taustalla on useita keskeisiä teorioita, jotka ovat olleet perustana langattomien järjestelmien suunnittelulle, kehitykselle ja tehokkaalle toiminnalle. Luettelen tässä muutamia tärkeitä teorioita, jotka auttavat parantamaan ja suunnittelemaan tehokkaampaa verkkoa. (5.)

2.5.1 Modulaatio- ja moninkertaistamisteoriat

Näitä teorioita käytetään signaalien siirtämiseen langattomissa järjestelmissä. Modulaatio mahdollistaa datan siirtämisen sähkömagneettisina aaltoina ja sen muuntamisen digitaalisen tiedon muodosta analogiseen muotoon, joka voi matkustaa ilman johtoja. Moninkertaistamisteoriat kuten MIMO, hyödyntävät useita antennielementtejä sekä lähetys- että vastaanottoasemilla parantaakseen spektrin hyötysuhdetta ja kanava kapasiteettia. (5.)

2.5.2 Informaatioteoriat

Esimerkiksi Claude Shannonin informaatioteoria on keskeinen langattoman viestinnän perusta. Se määrittelee tiedon siirron matemaattisia rajoja, kuten kanavan kaistanleveyden ja signaali-kohinasuhteen vaikutuksen teoreettiseen kanavan kapasiteettiin. (6.)

2.5.3 Vastaanotto- ja lähettämisantenniteoriat

Antenniteoriat liittyvät esimerkiksi antennien muodostamien keulojen suuntaamiseen, suunnitteluun, sijoitteluun ja monimuotoisuuteen langattomissa järjestelmissä. Näillä teorioilla pyritään parantamaan signaalin vastaanottoa ja lähettämistä sekä optimoimaan suorituskykyä. (7.)

2.5.4 Signaali ja kohina

Nämä teoriat keskittyvät häiriöiden ja kohinan hallintaan langattomissa järjestelmissä. Ne auttavat ymmärtämään, miten häiriöt ja kohina vaikuttavat signaalin laatuun ja miten niitä voidaan vähentää. (5.)

2.5.5 Nyquistin teoria

Signaalin näytteistys tarkoittaa analogisen signaalin muuntamista digitaaliseen muotoon ottamalla näytteitä eli samploimalla signaalista säännöllisin väliajoin. Tämä prosessi on olennainen osa digitaalista signaalinkäsittelyä ja digitaalista tiedonsiirtoa. (8.)

Nyquistin teoria perustuu siihen, että digitaalinen signaali täytyy näytteistää riittävän tiheästi, jotta alkuperäinen analoginen signaali voidaan toistaa tarkasti digitaalimuodossa. Tämä teoria määrittelee näytteistystaajuuden, joka on vähintään kaksi kertaa signaalin suurimman taajuuden eli Nyquistin taajuuden verran. (8.)

Jos signaali näytteistetään taajuudella, joka on pienempi kuin Nyquistin taajuus, signaali voi menettää tärkeitä osia itse informaatiostaan, ja aiheuttaa "ali-näytteistyksen" ilmiön, joka voi johtaa vääristymiin sekä signaalin epätarkkaan toistamiseen eli laskostumiseen. (8.)

Lyhyesti sanottuna Nyquistin taajuus on puolet näytteenottotaajuudesta. Jos esimerkiksi signaalin korkein taajuus on 10 kHz, signaali tulisi näytteistää vähintään 20 kHz:n taajuudella, jotta kaikki signaalin tiedot tallentuvat oikein. (8.)

Nyquistin teoria on keskeinen periaate digitaalisessa signaalinkäsittelyssä ja digitaalisen datan oikeassa tallentamisessa sekä siirtämisessä. Tämä periaate on kriittinen digitaalisten järjestelmien suunnittelussa varmistaakseen oikean näytteistykseen ja signaalin toiston digitaalisessa muodossa. Kohisevan linjan kapasiteetti määräytyy Shannon–Hartleyn teoreeman perusteella. (8.)

2.5.6 Hartleyn laki ja Shannon-Hartley-theoreema

Hartleyn laki, joka tunnetaan myös nimellä Shannon-Hartleyn teoreema, on peruseriaate informaatioteoriassa ja tietoliikenteessä, joka liittyy kanavan kapasiteetin ja signaali-kohina-suhde eli SNR väliseen suhteeseen langattomassa viestinnässä. (9.)

Tämä teoreema, joka on osa Claude Shannonin ja Ralph Hartleyn työtä, kuvaa maksimaalisen tiedonsiirtonopeuden, joka voidaan saavuttaa tietyn SNR:n ja kanavan kaistanleveyden ollessa tiedossa. Matemaattisessa muodossaan se on esitetty seuraavasti: (9.)

$$C = B \cdot \log_2(1 + SNR)$$

Missä:

C edustaa kanavan kapasiteettia (tiedonsiirtonopeus bittinä sekunnissa).

B on kanavan kaistanleveys (Hz).

SNR kuvaa signaali-kohina-suhdetta (Signal-to-Noise Ratio).

Hartleyn laki osoittaa, että kanavan kapasiteetti on suoraan verrannollinen kanavan kaistanleveyteen ja logaritmiin yhden lisätyn signaali-kohina-suhteen arvosta. Tämä teoreema on olennainen informaatioteorian ja tietoliikenteen perusteita käytettäessä, koska se tarjoaa arvokasta tietoa maksimaalisesta tiedonsiirtonopeudesta tietyillä parametreilla. Se auttaa suunnittelijoita optimoimaan ja ymmärtämään langattoman viestinnän tehokkuutta ja kapasiteettia. On kuitenkin tärkeää huomata, että tämä kaava antaa teoreettisen ylärajan tiedonsiirtonopeudelle. (9.)

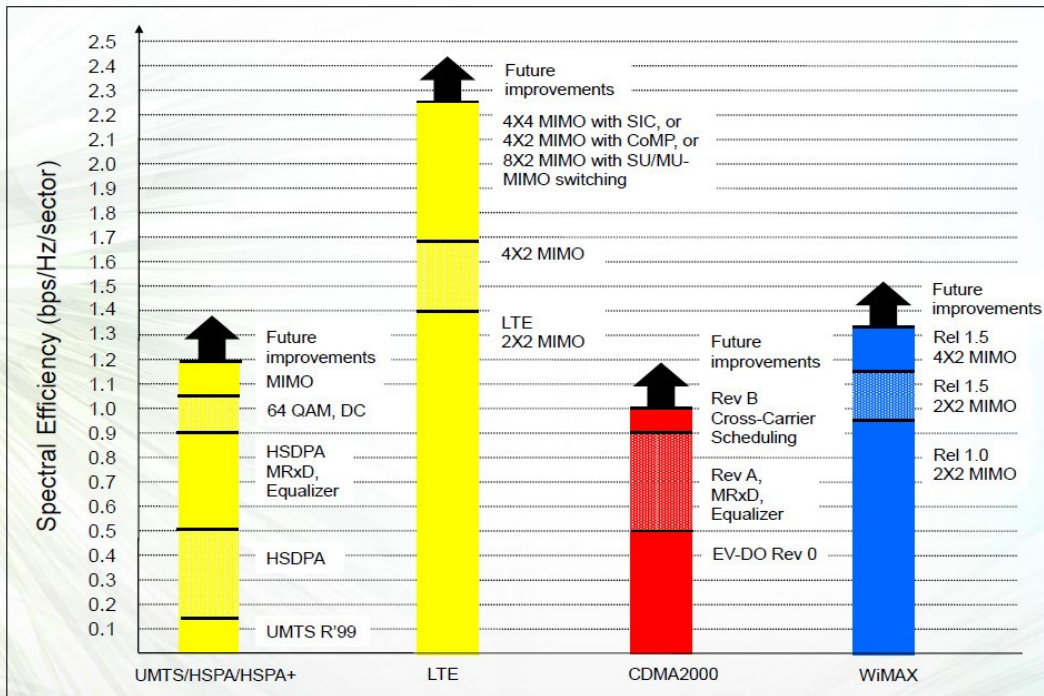
2.6 Spectral efficiency eli spektraalinen hyötysuhde ja kanavakapasiteetti

Spektraalinen hyötysuhde tarkoittaa langattomassa verkossa käytettävän taajuuskaistan tehokasta hyödyntämistä datan siirrossa. Sitä mitataan yleensä bitteinä sekunnissa per hertsi (bit/s/Hz). Mitä suurempi spektraalinen hyötysuhde on, sitä enemmän bittimäärää voidaan siirtää tiettyä taajuuskaistaa kohti. (17.) 5G-verkossa tätä hyötysuhdetta voidaan parantaa monin tavoin ja esimerkiksi tiedonsiirtokapasiteettia voidaan kasvattaa seuraavilla tekijöillä:

1. Korkeampi modulointiaste, kuten 256-QAM, joka lähettää 8 bittiä symbolia kohden, voi siirtää enemmän dataa yhdellä taajuuskaistan yksiköllä verrattuna matalampaan modulointiasteeseen, kuten 16-QAM, joka lähettää vain 4 bittiä symbolia kohden.
2. Kanavakoodaus: Tehokkaampi virheenkorjaus koodaus voi vähentää lähettämisen redundanssia, jolloin samalla taajuuskaistalla voidaan siirtää enemmän dataa.
3. Laajemman taajuuskaistan käyttäminen tukiaseman soluilla esim. 50Mhz → 100MHz.
4. CA:n eli Carrier aggregationin hyödyntäminen
5. MIMO (Kuva 3.)
6. Beamforming
7. MU-MIMO ja massive MIMO

Opinnäytetyö keskittyy näistä MIMO:n, MU-MIMO:n sekä beamformingin etuihin.

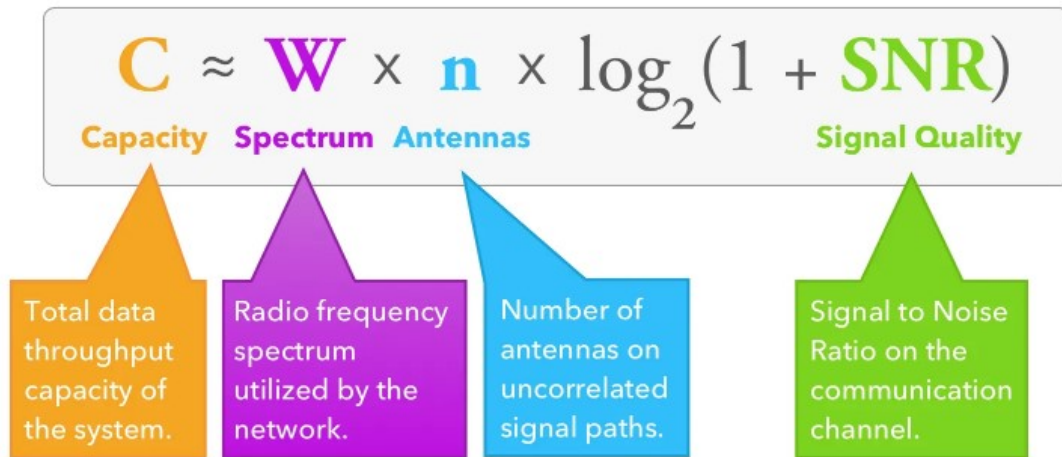
Comparison of Downlink Spectral Efficiency



Via: 3g4g.blogspot.com

KUVA 3. Useammilla MIMO-antenni määrillä parannetaan spektraalista hyötysuhdetta. (18)

Näin ollen kanavakapasiteetti ja spektraalinen hyötysuhde liittyvät toinen toisiinsa. Kanavakapasiteetti eli teoreettinen tiedonsiirron maksimi tietyssä taajuuskaistassa voidaan mitata, kun tiedetään kanavan kaistanleveys sekä SNR. Spektraalinen hyötysuhde kuvaa siten taajuuskaistan todellista hyötysuhdetta eli teoria kohtaa käytännön. Toisin sanoen kanavakapasiteetti on maksimi ja spektraalinen hyötysuhde on se mitä saadaan todellisuudessa irti. (Kuvat 3 ja 4.) (9.)



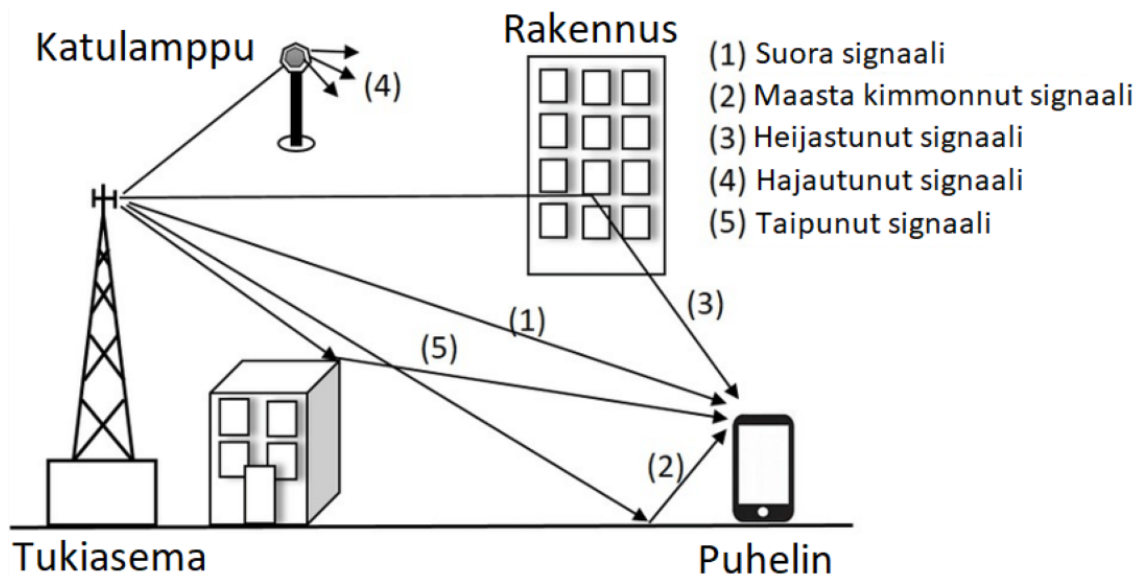
KUVA 4. Kanava kapasiteettiin vaikuttavia tekijöitä. (19)

3 ANTENNI JA SEN MUODOSTAMA KEILA

3.1 Antennin tehtävä

Tukiaseman radion antennin tehtävä on lähettää ja vastaanottaa sähkömagneettisia aaltoja eli radiosignaalia tukiaseman ja käyttäjälaitteen välillä. Se muuntaa sähköisen signaalin radioaaltoiksi, jota se voi lähettää tai vastaanottaa halutussa taajuusalueessa. Antenni muodostaa siis keilan eli beamin tukiasemalta haluttuun suuntaan, ja keila on vaikutusalue, jonka kautta käyttäjälaite voi yhdistyä tukiaseman tarjoamaan verkkoon langattomasti, jolloin data liikkuu langattomasti näiden välillä. (Kuva 8.) (7.)

Käytännön tilanteessa radion antennin lähettämät signaalit etevät ilmassa käyttäjälle monesti monitie etenemällä. Tämä tarkoittaa, että esimerkiksi tukiasema lähettää signaaleja kanavan kautta käyttäjälle, mutta signaalit voivat heijastua esimerkiksi esteistä, jolloin signaalit etenevät useampaa reittiä pitkin käyttäjälaitteelle, joka lopuksi yhdistää signaalit. (Kuva 5.) (56.)



KUVA 5. Signaalien monitie etenemä.

3.1.1 Signaalin lähettäminen

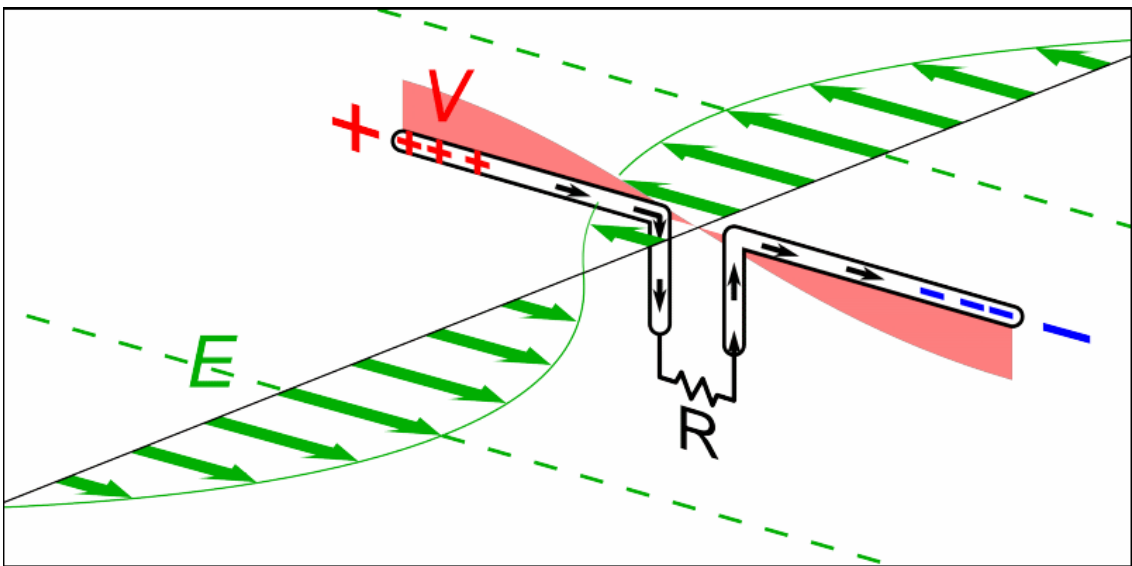
Kun antenni lähettää signaalin, se muuntaa sähköisen signaalin radioaalloiksi. Tämä prosessi tapahtuu yleensä syöttämällä antenniin vaihtovirtaa radiotaajuustehon muodossa. Tämä prosessi luo sähkömagneettisen aallon, joka säteilee ympäröivään tilaan muodostaen keilan. (kuvat 6 ja 7.) (7.)

3.1.2 Signaalin vastaanottaminen

Kun antenni vastaanottaa signaalin, se toimii päinvastaisesti. Ympäröivästä tilasta tulevat sähkömagneettiset aallot aiheuttavat sähköä johtavissa antennielementeissä pienten sähköisten virtojen syntymisen. Nämä virrat ovat signaaleja, joita voidaan käsitellä ja muuntaa takaisin sähköisiksi signaaleiksi, jotka ovat ymmärrettäviä tietokoneille tai muille elektronisille laitteille (kuva 6). (7.)

Antennin tehokkuus ja suorituskyky riippuvat sen muotoilusta, koosta, materiaaleista ja siitä, kuinka hyvin se on sovitettu käytettävään taajuusalueeseen. On olemassa monenlaisia antennityyppejä, kuten dipoliantennit, suunta-antennit, levyantennit ja paljon muita, joita käytetään erilaisissa langattomissa viestintäjärjestelmissä. (7.)

Esimerkiksi signaalia vastaanottava puolialtrodipoliantenni toimii niin, että se antennin sauvojen elektronit latautuvat vuorotellen positiiviseksi ja negatiiviseksi sauvoihin tulevan radioaallon ja tämä värähtely muuntuu "virraksi" eli sähköiseksi signaaliksi, jota voidaan sitten käsitellä radiolla. (Kuva 6.) (7.)

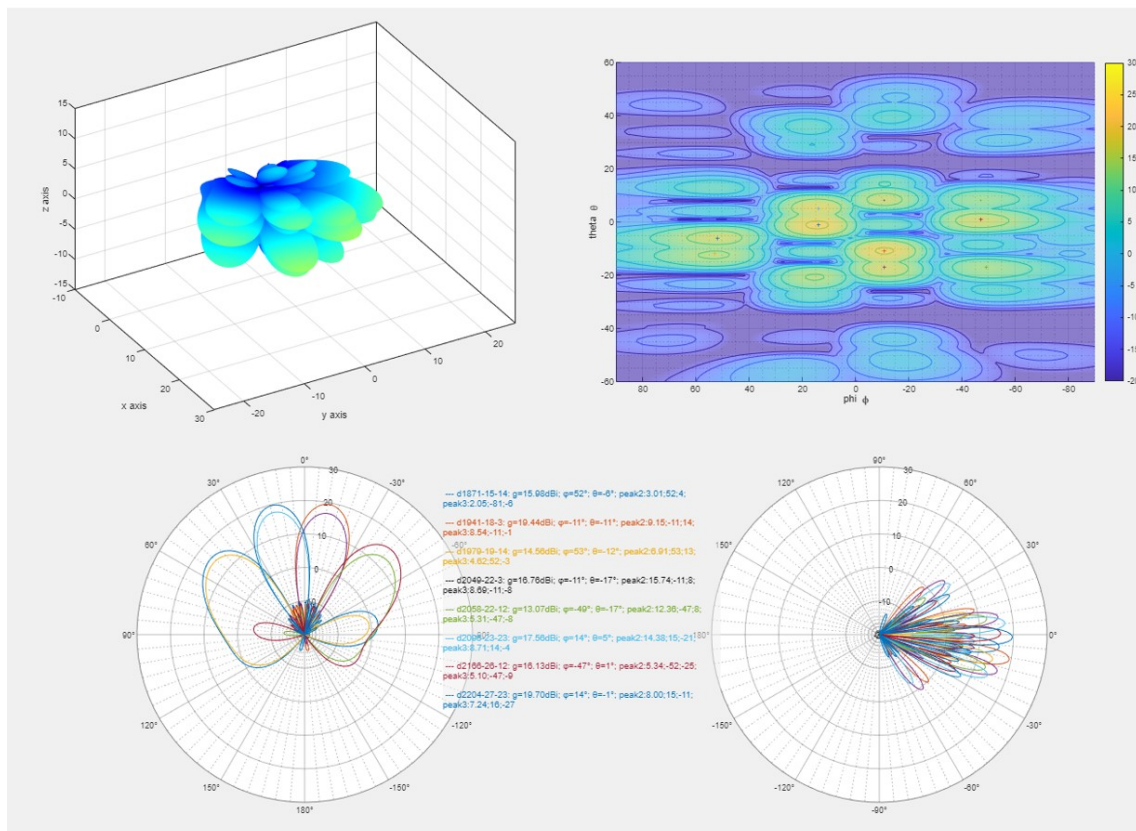


KUVA 6. Esimerkki puolialtrodipoli antennista (V), joka vastaanottaessa vastaanottaa radioaaltoja (E) ja muuntaa ne sähköiseen muotoon (R) sekä päinvastoin lähettäessä muuntaa sähköisen signaalin radioaalloiksi. (7)

Näistä yksittäisistä antenni elementeistä voidaan sitten muodostaa antenni ryhmiä, jotka parantavat merkittävästi langattomien verkkojen suorituskykyä ja kapasiteettia. (20.)

3.1.3 Säteilukuviointi eli radiation pattern

Jokainen antenni muodostaa toimiessaan jonkunlaisen keilan eli beamin. Tätä beamia voidaan kuvata nk. säteilukuviointina, joka siis kuvaa miten antenni lähettää tai vastaanottaa signaaleja eri suuntiin. Se kuvaa myöskin antennin suorituskykyä ja toimintaa eri suuntiin. Kuva voi olla esimerkiksi kolmiulotteinen kuva, joka näyttää, kuinka paljon signaalia lähetetään tai vastaanotetaan eri kulmissa ympäröivässä tilassa. (Kuva 7.) (21.)



KUVA 7. Erään sovelluksen havainnointi kuva MU-MIMO testiympäristön antennien muodostamasta säteilukuviointista 3D, Vertical -ja Horizontal näkökulmista.

3.2 Beamit ja Beamforming eli keilat ja keilojen säteenmuodostus

Niin kuin yllä jo todettiin, jokainen antenni muodostaa toimiessaan jonkinlaisen keilan eli beamin. Keiloja voidaan vahvistaa vaikkapa esimerkiksi tehon ja taajuuden muokkaamisella tai vaikkapa kohdistaa keilaa tiettyyn suuntaan, jotta se tavoittaa käyttäjälaitteen paremmin. Myöskin antennin tai antenniryhmien sijoittelulla on suuri vaikutus keilojen tehokkuuteen. Joka tapauksessa näiden toimenpiteiden tarkoitus on parantaa spektraalista hyötysuhdetta ja kanavakapasiteettia. Yksi keino parantaa keilan tehokkuutta on beamforming.

Beamformingin avainperiaate on suunnata signaali tiettyyn suuntaan tai useisiin suuntiin tukiaseman ja käyttäjälaitteen välillä käyttämällä vaihesäätimiä. Tämä parantaa signaalin voimakkuutta ja laatua tiettyjen käyttäjälaitteiden tai alueiden kohdalla. Vaihesäätimillä säädellään signaalin vaiheita, ja kun vaiheita muutetaan oikein, signaali vahvistuu tietyssä suunnassa ja heikkenee muissa suunnissa. Eritoten digitaalinen beamforming on suuressa roolissa MU-MIMO tekniikan hyödyntämisessä ja kun nämä kaksi tekniikkaa yhdistetään, saadaan aikaa huomattavasti parempaa suorituskykyä. (Kuva 8.) (22; 23; 24.)

Beamformausta on yleensä kolmea erilaista. On analoginen sekä digitaalinen beamforming. Näiden kahden lisäksi nykyään puhutaan myös hybrid beamformingista eli tavallaan analogisen ja digitaalisen beamformauksen hybrid muodosta. (22; 23; 24.)

3.2.1 Analoginen beamforming

Analoginen beamforming on tekniikka langattomissa viestintäjärjestelmissä, joka käyttää useita antennielementtejä tai antenneja signaalin suuntaamiseen tai kohdentamiseen haluttuun suuntaan. Tämä tapahtuu säätämällä signaalin vaiheita tai voimakkuuksia RF-piirien avulla ilman digitaalista prosessointia. (22; 23; 24.)

Analogisessa beamformingissa signaalien vaiheita ja voimakkuuksia säädetään antenneilla tai niiden komponenteilla, jotta signaali vahvistuisi halutussa suunnassa ja heikkenisi muualla. Tämä mahdollistaa signaalin suuntaamisen tiettyyn suuntaan tai käyttäjään ilman digitaalista signaalinkäsittelyä. (22; 23; 24.)

Analogista beamformingia käytetään yleisesti esimerkiksi vanhemmissa langattomissa järjestelmissä tai laitteissa, joissa ei ole tarvetta monimutkaisemmalle digitaaliselle signaalinkäsittelylle. Sitä voidaan käyttää esimerkiksi pienten solujen langattomissa verkkojärjestelmissä tai tilanteissa, joissa tarvitaan yksinkertaista ja kustannustehokasta tapaa suunnata signaaleja. (22; 23; 24.)

Vaikka analoginen beamforming tarjoaa tietyn asteen suuntaamiskykyä, se voi olla rajoittuneempi tai vähemmän tarkka verrattuna digitaaliseen beamformingiin, joka mahdollistaa monimutkaisemman ja tarkemman signaalien suuntaamisen. Nykyaikaisemmat langattomat järjestelmät, kuten 5G, hyödyntävät usein digitaalista beamformingia sen tarjoaman tarkkuuden ja tehokkuuden vuoksi, mutta analogisella beamformingilla voi silti olla paikkansa tietyissä sovelluksissa tai rajoitetuissa ympäristöissä. (22; 23; 24.)

3.2.2 Digitaalinen beamforming

Digitaalinen beamforming on tekniikka langattomissa viestintäjärjestelmissä, joka käyttää digitaalista signaalinkäsittelyä useiden antennien tai antennielementtien avulla signaalien suuntaamiseen tai kohdentamiseen haluttuun suuntaan tai kohteeseen. (22; 23; 24.)

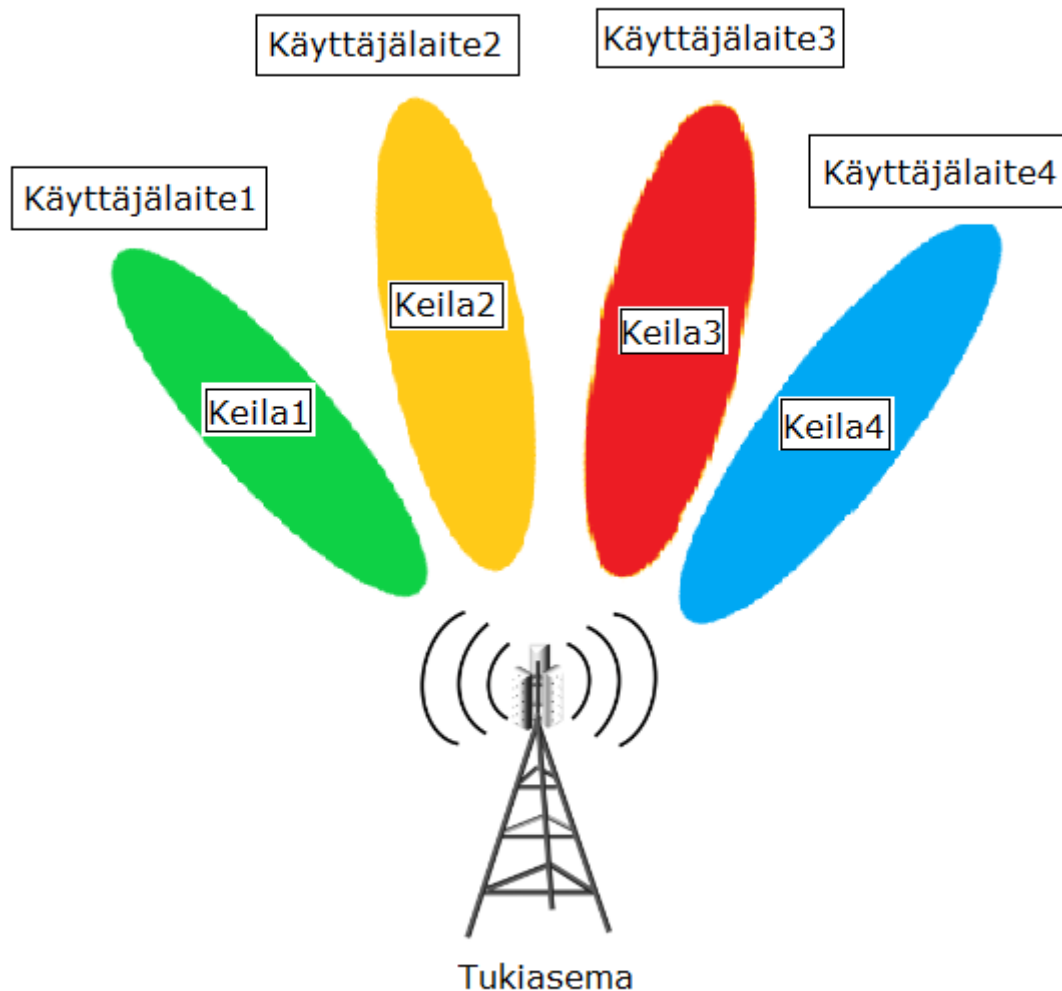
Tässä tekniikassa signaalien vaiheita ja voimakkuuksia säädelään digitaalisesti, mikä mahdollistaa signaalien tarkan suuntaamisen ja optimoinnin. Antennien signaalit yhdistetään ja käsitellään digitaalisesti siten, että signaaleja voidaan vahvistaa tai heikentää halutuissa suunnissa, mikä parantaa viestinnän tehokkuutta ja luotettavuutta. (22; 23; 24.)

Digitaalinen beamforming on yleisesti käytössä moderneissa langattomissa järjestelmissä, kuten 5G:ssä, koska se mahdollistaa monipuolisemman ja tarkemman signaalien suuntaamisen verrattuna analogiseen beamformingiin. Digitaalinen prosessointi antaa suuremman hallinnan ja joustavuuden signaalien säätämisessä eri suuntiin, mikä on erityisen hyödyllistä monikäyttäjäympäristöissä ja monitahoisissa viestintäjärjestelmissä. (22; 23; 24.)

Digitaalisen beamformingin etuja ovat muun muassa parempi suorituskyky, tehokkuus useiden käyttäjien palvelemisessa samanaikaisesti, kyky sopeutua muuttuviin ympäristöolosuhteisiin ja signaalien hienostunut hallinta eri suuntiin. Tämä tekniikka on keskeinen osa nykyaikaisia langattomia

verkkoja, joissa tarvitaan suurta tiedonsiirtonopeutta, kapasiteettia ja joustavuutta erilaisten käyttötapojen ja käyttäjien tarpeisiin. MU-MIMO:ssa hyödynetään tätä digitaalista beamformingia. (Kuva 8.) (22; 23; 24.)

MU-MIMO Beamforming



KUVA 8. MU-MIMO Beamforming, jossa tukiasema muodostaa ja suuntaa neljä keilaa halutuille käyttäjälaitteille usealla antennilla ja lähettää ja vastaanottaa dataa samanaikaisesti näiden välillä.

Haittoja kuitenkin digitaalisessa beamformauksessa ovat esimerkiksi korkeat laitekustannukset ja järjestelmän monimutkaisuus suhteessa analogiseen. Esimerkiksi digitaalisen beamformingin to-

teuttaminen MU-MIMO:ssa vaatii monimutkaista laitteistoa ja useita antennielementtejä. Tämä lisää laitteiden kustannuksia ja lisäksi vaikeuttaa tekniikan laajamittaista hyödyntämistä moniantenni-ympäristöissä monimutkaisien laitekokonaisuuksien ja useiden eri antennielementtien takia.

3.2.3 Hybrid beamforming

Hybridi beamforming yhdistää sekä analogisen että digitaalisen beamformingin parhaat puolet. Se hyödyntää sekä analogista että digitaalista signaalinkäsittelyä signaalin suuntaamiseen tai kohdentamiseen haluttuun suuntaan.

Tämä tekniikka käyttää useita antennielementtejä tai antenneja, jotka jaetaan useisiin ryhmiin tai alaryhmiin. Näitä ryhmiä voidaan ohjata ja säätää erikseen, ja jokaisessa ryhmässä voidaan käyttää sekä analogista että digitaalista signaalinkäsittelyä signaalin suuntaamiseen. (22; 23; 24.)

Analoginen osuus käyttää fyysisiä komponentteja, kuten vaiheensiirtimiä tai vaihe-ohjattuja antennielementtejä, säätämään signaalin suuntaa karkeammin. Digitaalinen osuus puolestaan käyttää digitaalista signaalinkäsittelyä hienosäätöön ja tarkkuuden lisäämiseen signaalin suuntaamisessa. Hybridibeamforming tarjoaa tehokkaan kompromissin digitaalisen ja analogisen beamformingin välillä. Se voi vähentää monimutkaisuutta ja laskentatehon tarvetta, joka liittyy täysin digitaaliseen beamformingiin, samalla säilyttäen paremman suuntauskapasiteetin ja tarkkuuden verrattuna pelkään analogiseen beamformingiin. (22; 23; 24.)

Tätä tekniikkaa käytetään erityisesti tilanteissa, joissa tarvitaan hyvää suuntausta ja samanaikaista monikäyttäjätukea, mutta joissa on rajoituksia esimerkiksi laskentatehon tai antennien fyysisen asettelun suhteen. Hybridibeamforming on yksi lähestymistapa, jota käytetään nykyaikaisissa langattomissa järjestelmissä, kuten 5G-verkoissa, joissa tarvitaan monipuolisia ja tehokkaita ratkaisuja signaalien hallintaan. (22; 23; 24.)

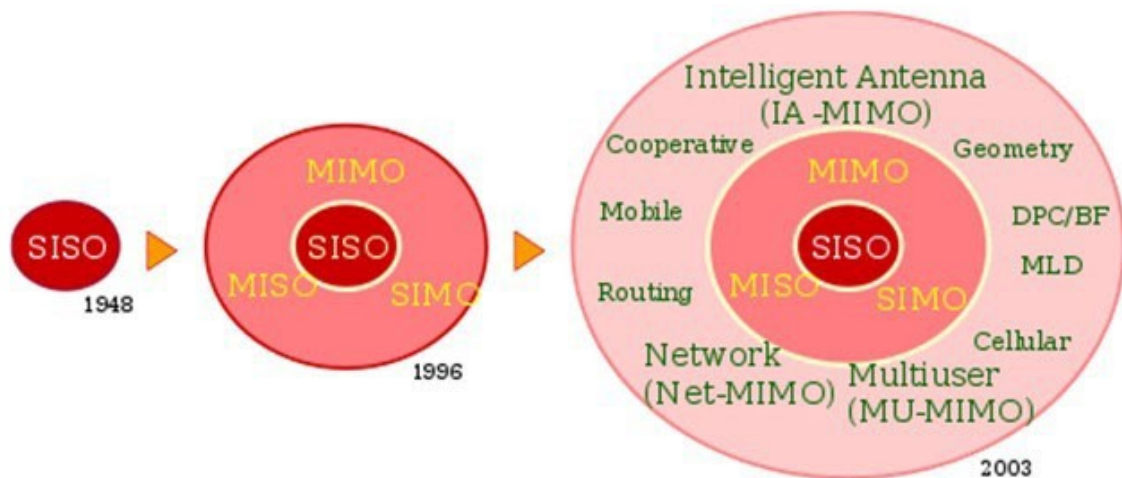
Vertailussa analogisen ja digitaalisen beamformingin välillä voidaan todeta, että analoginen beamforming on yleensä yksinkertaisempi ja kustannustehokkaampi, mutta se voi olla vähemmän tarkka ja joustava signaalien suuntaamisessa. Toisaalta digitaalinen beamforming tarjoaa suuremman tarkkuuden ja joustavuuden, mutta se vaatii enemmän laskentatehoa ja monimutkaisempaa laitteistoa.

Monissa nykyaikaisissa langattomissa viestintäjärjestelmissä, kuten 5G:ssä, saatetaan käyttää hybridibeamformingia, joka yhdistää sekä analogisen että digitaalisen beamformingin parhaat puolet tarjoten optimaalisen suorituskyvyn ja tehokkuuden. (22; 23; 24.)

4 YKSI -JA MONIANTENNITEKNOLOGIA

Tässä osiossa käydään läpi pintapuolisesti läpi SISO-, SIMO-, MISO ja MassiveMIMO tekniikoita sekä pureudutaan hieman tarkemmin MIMO ja MU-MIMO tekniikkaan. Historia MIMO:n suhteen langattoman viestinnän näkökulmasta sai alkunsa 1990-luvun lopulla, kun langattoman viestinnän alalla havaittiin tarve parantaa suorituskykyä ja kapasiteettia. Tätä aikaisempaa nk. yksiantenni tekniikkaa kutsuttiin SISO:ksi, jossa oli yksi antenni sekä lähettimessä että vastaanottimessa, jota käytettiin ja käytetään yhä esimerkiksi FM-radiolla vielä edelleenkin. (Kuva 9.) (25; 26.)

Aluksi varhaiset MIMO-järjestelmät keskittyivät lähinnä kahteen sisääntuloon ja kahteen lähtöön eli 2x2 MIMO, mutta myöhemmin kehitettiin tekniikoita, jotka mahdollistivat useampia antennoja sekä lähettimessä että vastaanottimessa. Tämä johti monimutkaisempiin MIMO-muotoihin, kuten 4x4 MIMO:on ja sen jälkeen jopa suurempiin määriin antenniyhdistelmiä. (Kuvat 10, 11, 12 ja 13.) (25; 26.)

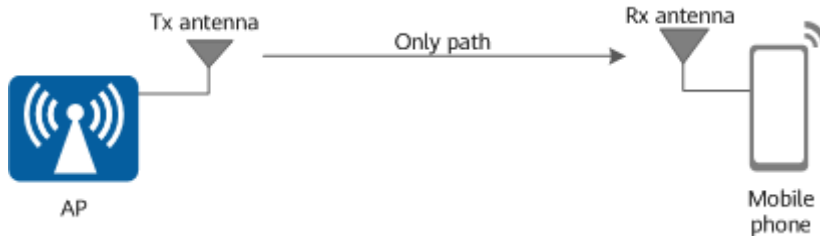


KUVA 9. MIMO:n kehitys (26)

4.1 SISO

SISO tarkoittaa "Single Input, Single Output". Se on langattoman viestinnän tekniikka, jossa on yksi sisääntulo ja yksi lähtö. Tämä tarkoittaa, että signaali lähetetään yhdeltä lähettimeltä ja vastaanotetaan yhdellä vastaanottimella ilman useiden antennien käyttöä. (Kuva 10.) (26; 27.)

SISO-tekniikkaa käytettiin perinteisesti vanhemmissa langattomissa järjestelmissä ennen MIMO-tekniikan kehittämistä. Vaikka se on yksinkertainen ja helppo toteuttaa, se ei tarjoa samoja etuja kuin MIMO-tekniikat, kuten suurempaa tiedonsiirtonopeutta, parempaa kantamaa tai monikäyttäjä-kapasiteettia. (26; 27.)

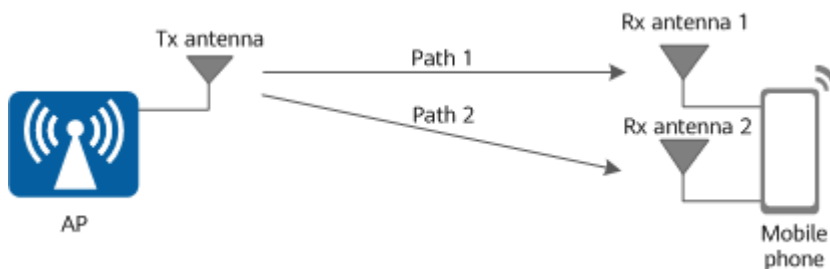


KUVA 10. SISO:n toiminnallisuus (27)

4.2 SIMO

SIMO:ssa on yksi sisääntulo ja useita lähtöjä. SIMO-järjestelmissä yksi signaali lähetetään yhdestä lähteestä, mutta sitä voidaan vastaanottaa usealla vastaanottimella tai usealla antennilla vastaanottimessa. (Kuva 11.) (26; 27.)

Tämä tekniikka mahdollistaa signaalin vastaanottamisen useista lähteistä tai useilla eri vastaanottimilla, mikä voi parantaa signaalin vastaanoton luotettavuutta tai parantaa suorituskykyä epäidealisissa radiokanavissa, joissa voi esiintyä häiriöitä tai signaalien heikentymistä. SIMO-tekniikkaa voidaan käyttää monissa eri langattoman viestinnän sovelluksissa, joissa pyritään parantamaan vastaanotetun signaalin luotettavuutta tai kapasiteettia yhdellä lähetyiskanavalla. (26; 27.)

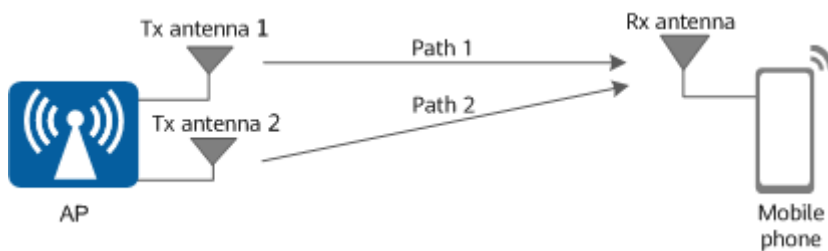


KUVA 11. SIMO:n toiminnallisuus (27)

4.3 MISO

MISO:ssa on useita sisääntuloja eli useita lähetyksantenneja ja yksi lähtö eli yksi vastaanottava antenni. Tässä tekniikassa useita signaaleja lähetetään useista antenneista ja ne vastaanotetaan yhdellä antennilla. (Kuva 12.) (26; 27.)

MISO-tekniikkaa voidaan käyttää esimerkiksi tilanteissa, joissa tarvitaan parempaa kantamaa tai signaalin vahvistamista ilman monimutkaista vastaanottotekniikkaa. Se voi myös auttaa vähentämään häiriöitä ja parantamaan signaalin laadun vastaanotossa. Vaikka MISO tarjoaa useita sisääntuloja, joka mahdollistaa signaalien monipuolisen lähettämisen, se hyödyntää vain yhtä vastaanottavaa antennia, mikä rajoittaa sen kykyä käsitellä monen samanaikaisen signaalin vastaanottoa tai monikäyttäjyhteyksiä tehokkaasti. Monikäyttäjätilanteissa tai monikanavaisissa ympäristöissä useampia vastaanottavia antenneja käyttävät MIMO-tekniikat, kuten MU-MIMO, ovat näin ollen tehokkaampi vaihtoehto. (26; 27.)



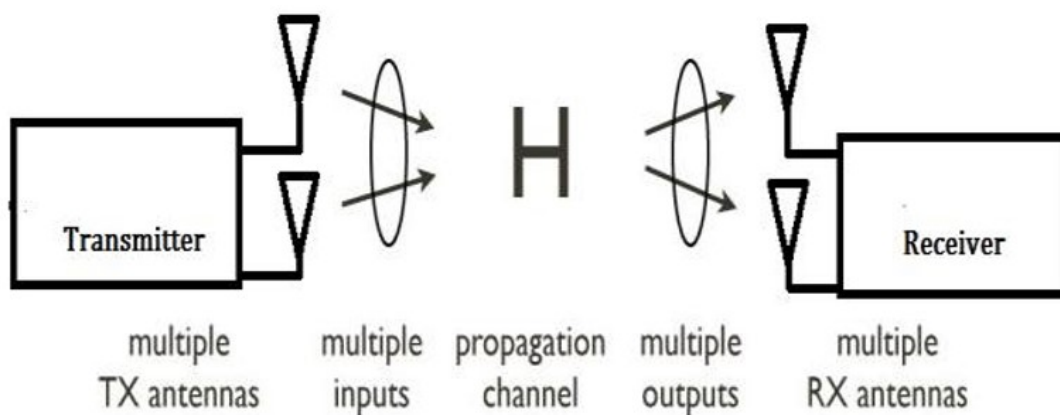
KUVA 12. MISO:n toiminnallisuus (27)

4.4 MIMO

MIMO eli Multiple Input Multiple Output-antennit, on tekniikka, joka lisää kaistanleveyttä yhdistämällä useita samanaikaisia lähettämiä ja vastaanottimia. MIMO-tekniikoita tutkittiin ensimmäisen kerran 1970-luvun alussa. 1980-luvun puolivälissä tutkijat julkaisivat artikkeleita säteen muodostamisesta, siihen liittyvästä esiasetekniikasta. Arogyaswami Paulraj ja Thomas Kailath ehdottivat spatiaalista multipleksingiä eli tilallista moninkertaistamista eli moniantennitekniikka MIMO:n hyödyntämistä useiden signaalien lähettämiseen vuonna 1993, ja heidän vuoden 1994 patenttinsa painotti langatonta lähetysovellusta. Moniantennikonseptia tutkittiin vuonna 1996. Vuonna 1998 Bell Laboratories osoitti ensimmäisenä, että MIMO-tekniikan suorituskykyä parannetaan ns. tilamultipleksoinnilla. (25; 26; 57.)

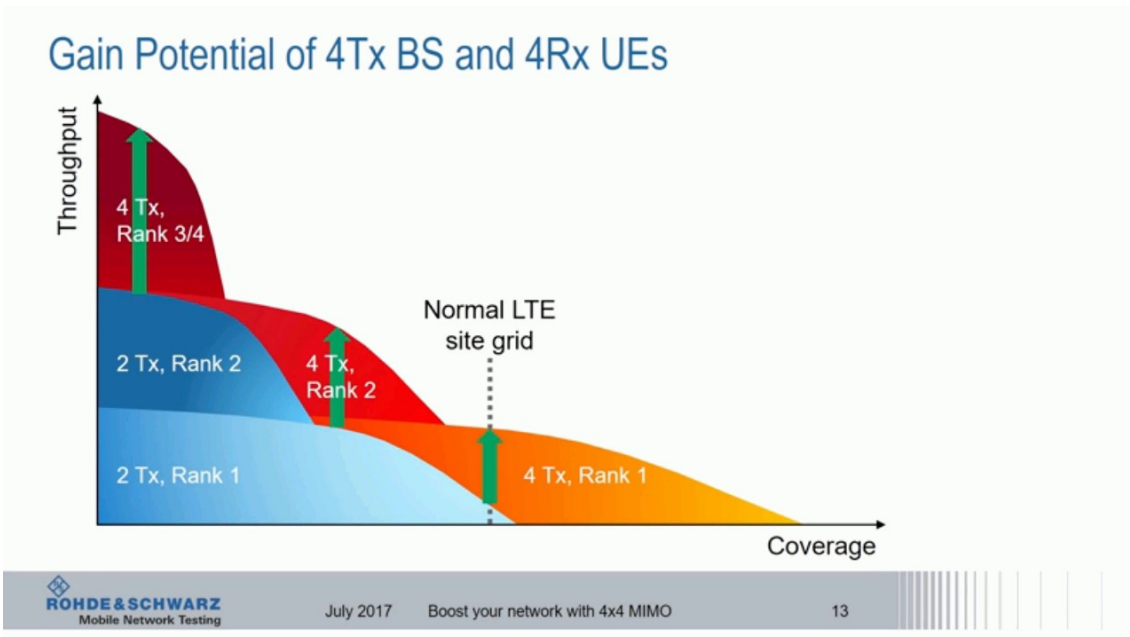
MIMO mahdollistaa useiden signaalien samanaikaisen lähettämisen useista antenneista ja niiden samanaikaisen vastaanoton useisiin vastaanottimiin. Tämä teknologia tuo useita etuja, kuten paremman tiedonsiirtonopeuden, luotettavuuden ja suuremman kapasiteetin langattomissa järjestelmissä. Se auttaa myös vähentämään häiriöitä ja parantamaan signaalin laatua, erityisesti epävakaiden tai monimutkaisten radiokanavien olosuhteissa. MIMO siis luo vastaanottajan päässä useita spatiaalisia datavirtoja, mikä lisää langattoman verkon kapasiteettia ja parantaa spektraalista hyötysuhdetta. (Kuvat 3, 13 ja 14.) (26; 27; 28; 29.)

MIMO-tekniikka on laajalti käytössä erilaisissa langattomissa järjestelmissä, kuten Wi-Fi-verkoissa ja matkapuhelinverkoissa. Se näyttelee suurta roolia 5G-tekniikan kehityksessä ja parantamisessa.



KUVA 13. 2x2 MIMO:ssa signaali kulkee "kanavaa" (H) pitkin kahden lähettävän antennin avulla kahdelle vastaanottavalle antennille käyttäjälaitteella ilmarajapinnassa.

MIMO:ssa pystytään saavuttamaan huomattavia parannuksia suorituskyvyssä. Esimerkiksi 4x4 MIMO:ssa, jossa on 4 lähettävää antenni ja 4 vastaanottavaa käyttäjän päässä, pystytään saavuttamaan huomattavia suorituskyky parannuksia kanavakapasiteetissa. (Kuva 14.) (55.)



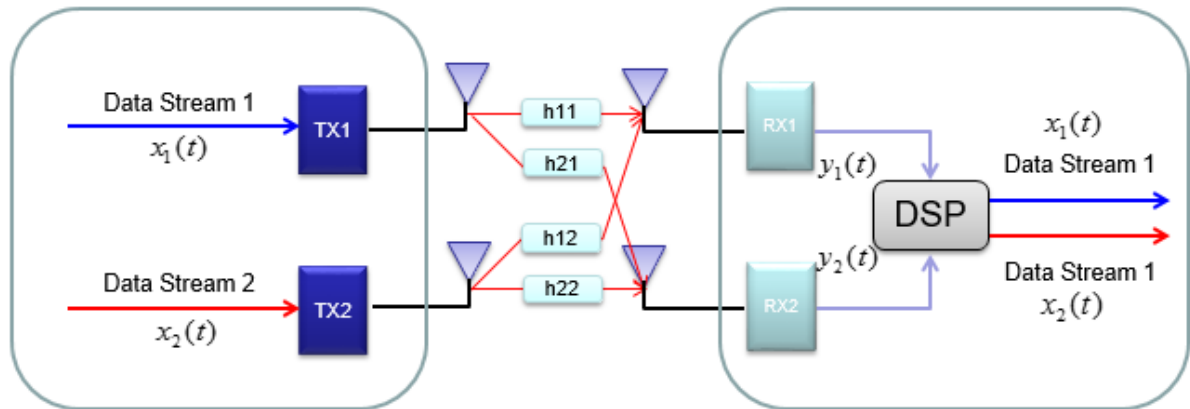
KUVA 14. Useampien antennin käyttö MIMO:ssa parantaa kanavakapasiteettia ja suorituskykyä (55)

4.5 MIMO-matriisi

MIMO-matriisi on käsite, jota käytetään kuvaillessa MIMO-järjestelmän siirto- ja vastaanottomatriiseja. Matriisi on matemaattinen käsite, joka koostuu taulukosta tai joukosta lukuja tai symboleja järjestettynä riveihin ja sarakkeisiin. (Kuva 15.) (29.)

MIMO-järjestelmässä on useita lähettäviä ja vastaanottavia antennielementtejä, ja nämä muodostavat matriiseja, jotka kuvaavat signaalin lähetystä ja vastaanottoa. Lähetysmatriisi kuvaa signaalien jakautumista lähettävien antennien välillä, kun taas vastaanottomatriisi kuvaa signaalien keräämistä vastaanottavien antennien välillä. (29.)

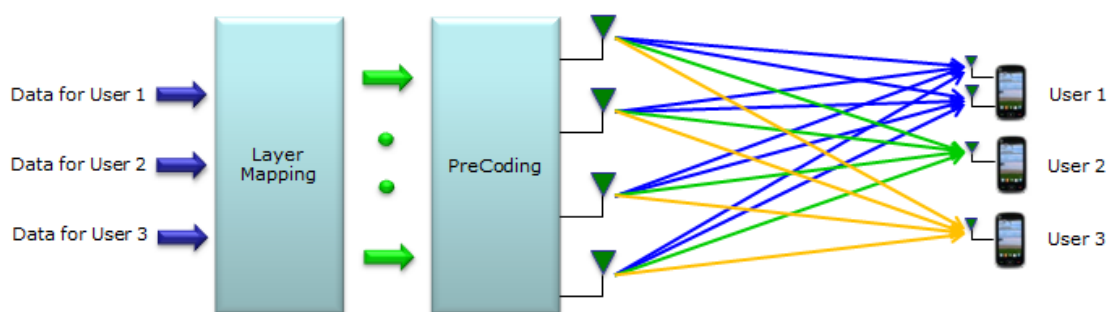
MIMO-matriisit ovat olennainen osa MIMO-järjestelmän matemaattista mallinnusta ja signaalien käsittelyä. MIMO-matriisien kautta järjestelmä pystyy hyödyntämään tilan monimuotoisuutta ja taajuusdiversiteettiä parantaakseen signaalin laatuja vähentämään häiriöitä. (29.)



KUVA 15. Esimerkki kuva 2x2 MIMO:n matriisista, jossa lähettäviin antenneihin tulee kaksi datavirtaa ja ne siirtyvät kanavan siirron kautta vastaanottimien antenneihin ja sieltä DSP:hen, joka prosessoi signaalit käyttäjalaitteelle (29)

4.6 MU-MIMO

MU-MIMO, on edistyneempi MIMO-tekniikan muoto, joka on kehitetty erityisesti monikäyttäjäympäristöihin. MU-MIMO mahdollistaa samanaikaisen tiedonsiirron useille käyttäjille samalla taajuuskaistalla. Se pystyy palvelemaan useita käyttäjiä samanaikaisesti erillisillä tiedonsiirtostrategioilla ja resurssien jakamisella. Esimerkiksi, jos tukiasemalla on useita antennielementtejä, se voi lähettää eri datavirrat eri käyttäjille samanaikaisesti, mikä lisää tiedonsiirron kapasiteettia ja parantaa kokonaisvaltaista suorituskykyä sekä parantaa taajuuskaistan hyödyntämistä. (Kuvat 16 ja 18.) (30; 31.)



KUVA 16. MU-MIMO:n toiminnallisuus, jossa useampi datavirta lähetetään esikoodauksen avulla usean antennin kautta käyttäjalaitteille samanaikaisesti. (31)

4.6.1 Hyödyt

MU-MIMO:ssa on tavoite laajentaa halutun käytössä olevan taajuuskaistan kapasiteettia ja tehokkuutta sekä suorituskykyä. MU-MIMO-tekniikassa on useita tärkeitä palasia, jotka mahdollistavat sen toiminnan ja hyödyt: (30; 31; 32; 34.)

1. **Useat antennit:** MU-MIMO perustuu useisiin lähettäviin ja vastaanottaviin antenniyhdistelmiin. Järjestelmässä on useita antennia sekä tukiasemalla että päätelaitteilla. Useiden antennien avulla voidaan luoda erillisiä tilavirtoja, jotka voivat palvella samanaikaisesti useita päätelaitteita. (Kuva 16.) (30; 31; 32; 34.)
2. **Beamforming:** MU-MIMO:ssa käytetään myös beamformingia, jossa signaali kohdennetaan kohti tiettyä päätelaitetta tai ryhmää päätelaitteita. Tukiasema muokkaa signaalia ja suuntaa sen tarkasti valittuihin päätelaitteisiin. Tämä parantaa tiedonsiirron tehokkuutta ja vähentää häiriöitä. (Kuva 8.) (30; 31; 32; 34.)
3. **Käyttäjien erottelu:** MU-MIMO-tekniikka pystyy erottamaan ja palvelemaan samanaikaisesti useita päätelaitteita. Tukiasema voi lähettää eri datavirtoja eri päätelaitteille samanaikaisesti, mikä parantaa verkon kapasiteettia ja mahdollistaa suuremman käyttäjämäärän palvelun. (Kuva 16.) (30; 31; 32; 34.)
4. **Signaalin prosessointi ja resurssien jako:** MIMO ja MU-MIMO järjestelmässä tarvitaan tehokkaita signaalin prosessointialgoritmeja ja resurssien jakomekanismeja. Nämä mekaniimit optimoivat signaalien ajoituksen, tehojen jakamisen ja taajuuskanavien käytön päätelaitteiden välillä, mikä parantaa verkon suorituskykyä ja käyttöastetta, kuten kuvassa 15. (30; 31; 32; 34.)
5. **Kanavan tilan seuranta eli channel state information:** MU-MIMO-tekniikka hyödyntää kanavan tilan seuranta päätelaitteiden ja tukiaseman välillä. Tämä mahdollistaa jatkuvan päivityksen kanavan ominaisuuksista, kuten vaimenemasta ja korrelaatiosta, jotta voidaan optimoida signaalien lähetystä ja vastaanottoa, kuten kuvassa 19. (30; 31; 32; 34.)

Näiden palasten yhteistoiminta mahdollistaa MU-MIMO-tekniikan tehokkaan hyödyntämisen langattomissa viestintäjärjestelmissä. Se parantaa tiedonsiirron kapasiteettia, lisää verkon käyttäjäkapasiteettia ja tarjoaa parempaa suorituskykyä useille samanaikaisille käyttäjille.

4.6.2 Haasteet

Vaikka MU-MIMO tarjoaakin UE:lle parempaa verkon suorituskykyä on siinä kuitenkin omat haasteensa. MU-MIMO tuottaa useita spatiaalisten virtoja tukiaseman ja käyttäjälaitteen välillä, joten sen täytyy erotella niitä hallitakseen useita yhteyksiä tehokkaasti. Tämä näkyy esimerkiksi ruuhkaisuilla alueilla, joissa laitteita ja signaalihäiriöitä on enemmän, joten tekniikan kyky erotella laitteet heikkenee, joka johtaa alhaisempaan suorituskykyyn. Toinen suuri haaste on itse MU-MIMO laiteisto ja sen kehitys, joka on kallista ja sisältää erittäin kehittyneitä ohjelmistoja sekä algoritmeja, jotka ovat haastavia ja kalliita ylläpitää ja kehittää. Nämä asiat myös johtaa helposti yhteensopivuus ongelmiin vanhempien laitteistojen kanssa. (33.)

4.7 MIMO vs MU-MIMO

Tärkein ero MIMO:n ja MU-MIMO:n välillä on, että MIMO-tekniikka keskittyy signaalien rinnakkaislähettykseen ja vastaanottoon yhden käyttäjän välillä, kun taas MU-MIMO-tekniikka mahdollistaa samanaikaisen tiedonsiirron useille käyttäjille samalla taajuuskaistalla. MU-MIMO parantaa tehokkaasti verkon kapasiteettia ja suorituskykyä erityisesti silloin, kun on tarpeen palvella samanaikaisesti useita käyttäjiä samalla alueella. (Kuva 18.) (34.)

4.8 SU-MIMO vs MU-MIMO

SU-MIMO ja MU-MIMO ovat kaksi tekniikkaa langattomissa verkoissa, jotka käsittelevät useiden antennien käyttöä tiedonsiirrossa. Niiden pääero liittyy siihen, kuinka ne käsittelevät yhteyksiä yhden tai useamman käyttäjän välillä.

1. SU-MIMO:

- Tukiasema kommunikoi yhden käyttäjän kanssa kerrallaan, hyödyntäen samalla useita antenneja sekä lähettämisessä että vastaanottamisessa. (Kuvat 17 ja 18.) (35; 54.)
- Tämä tekniikka tarjoaa parempaa suorituskykyä yhden käyttäjän yhteyksille, sillä se mahdollistaa datan lähettämisen useiden antennien avulla, mikä voi parantaa nopeutta ja luotettavuutta. (Kuva 17.) (35; 54.)


2. MU-MIMO:

- MU-MIMO mahdollistaa useiden käyttäjien samanaikaisen palvelun tukiasemasta, joka käyttää useita antennia lähettämään eri käyttäjille eri datavirtoja samanaikaisesti. (Kuvat 16, 17 ja 18.) (35; 54.)
- Tämä tekniikka parantaa verkkojen kapasiteettia ja mahdollistaa samanaikaisen tiedonsiirron useille käyttäjille samalta tukiasemalta. Esimerkiksi tukiasema voi lähettää eri datavirtoja eri käyttäjille samanaikaisesti hyödyntäen useita antennia. (Kuvat 8, 16 ja 17.) (35; 54.)

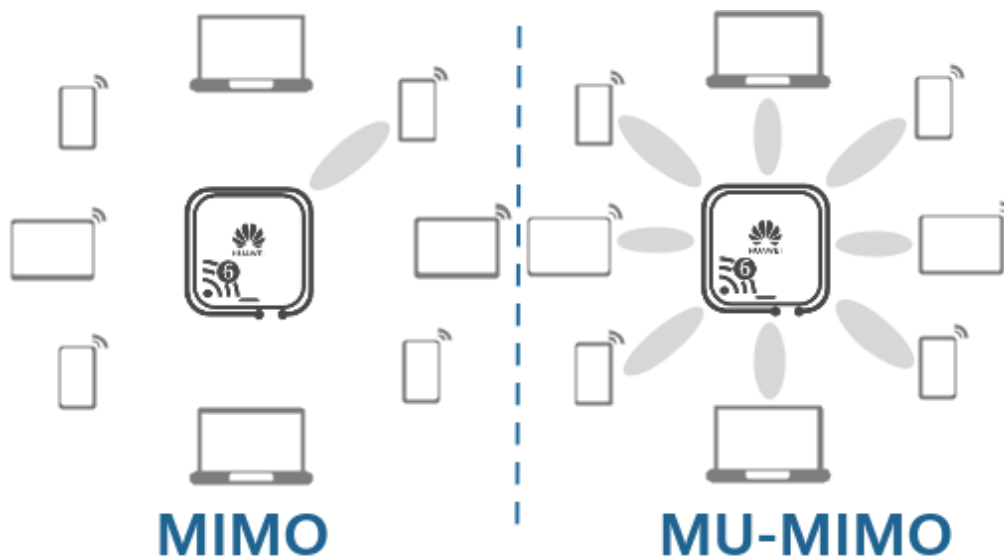
Pääero SU-MIMO:n ja MU-MIMO:n välillä on siinä, että SU-MIMO keskittyy yhden käyttäjän palvelemiseen kerrallaan useilla antennilla, kun taas MU-MIMO mahdollistaa useiden käyttäjien samanaikaisen palvelun useilla antennilla. MU-MIMO on erityisen hyödyllinen tilanteissa, joissa on useita käyttäjiä, esimerkiksi tiheissä asutusalueissa tai paikoissa, joissa on paljon langattomia laitteita. Kun taas SU-MIMO on vartenotettavampi vaihtoehto, jos halutaan vakautta ja varmuutta suorituskykyyn alueille, joissa käyttäjiä on vähemmän tai vaikkapa kun käyttäjä on liikkeessä esimerkiksi autolla. (Kuvat 17 ja 18.) (35; 54.)

SU-MIMO Vs. MU-MIMO		
Feature	MU-MIMO	SU-MIMO
Main Aspect	The cell communicates with multiple users	The cell communicates with single user
Purpose	MIMO capacity gain	Data rate increasing for single user
Advantage	Multiplexing gain	No interference
CSI	Perfect CSI is required	No CSI
Throughput	Higher throughput at high SNR	Higher throughput at low SNR

SU: Single User
MU: Multiple user

 www.Moniem-Tech.com

KUVA 17. Vertailu SU-MIMO ja MU-MIMO (54)



KUVA 18. SU-MIMO palvelee yhtä käyttäjää kerrallaan vs MU-MIMO, joka palvelee samanaikaisesti useita käyttäjiä kerrallaan. (54)

4.9 MU-MIMO vs Massive MIMO

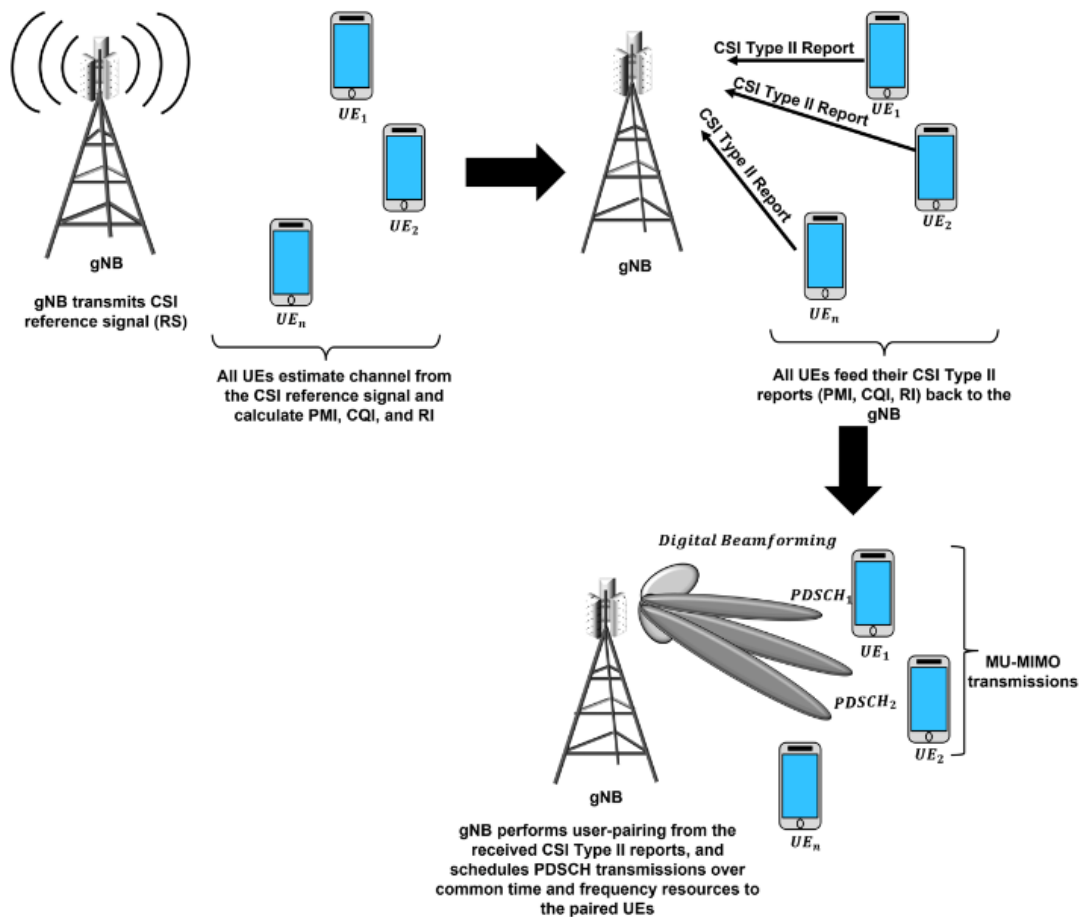
Tärkein ero MU-MIMO:n ja Massive MIMO:n välillä on antennielementtien määrä ja mittakaava. MU-MIMO käyttää useita antennielementtejä lähettävässä ja vastaanottavassa laitteessa, kun taas Massive MIMO käyttää erittäin suurta määrää antennielementtejä tukiasemassa. Massive MIMO tarjoaa suuremman kapasiteetin ja paremman suorituskyvyn verrattuna MU-MIMO:on, mutta se vaatii myös merkittävästi enemmän antennielementtejä ja signaalinkäsittelyresursseja. Ja on näin ollen vielä kalliimpaa ja haasteellisempaa toteuttaa.

5 MUUTAMIA MERKITTÄVIÄ TIEDONSIIRTOTEKNIIKOITA MIMO:SSA JA MU-MIMO:SSA

Tämä osio käy läpi muutamia olennaisimpia tekniikoita tiedonsiirron suhteen, jotka vaikuttavat niemenomaan MIMO -ja MU-MIMO tekniikan toimivuuteen.

5.1 Channel state information eli CSI

MU-MIMO-tekniikassa on tärkeää saada tietoa kanavan tilasta, eli miten signaali käyttäytyy matkalla tukiasemalta käyttäjlaitteelle. Tämä tieto auttaa optimoimaan signaalin lähettämistä ja vastaanottamista. Esimerkiksi downlink suunnan MU-MIMO:ssa tukiasema lähettää CSI referenssi signaalin kohti UE:ta ja UE:t laskevat kanavan laadun CSI referenssi signaalin suhteen ja määrittävät RI:n PMI:n ja CQI:n tukiasemalle, jonka jälkeen tukiasema suorittaa käyttäjien parituksen niille UE:lle joiden RI tasot vastaavat toisiaan.(kuvat 19 ja 20.) (36; 58.)



KUVA 19. CSI:n toimivuus MU-MIMO:ssa (58)

5.2 UE pairing

UE pairing eli käyttäjien paritus, mahdollistaa monen käyttäjän samanaikaisen tiedonsiirron usean antennin avulla käyttäjä laitteissa. Käytännössä MU-MIMO parittaa samanaikaisesti samaa taajuutta käyttävät käyttäjät. MU-MIMO-parituksessa tukiasema valitsee sopivat käyttäjät ja jakaa käytettävissä olevat resurssit useiden käyttäjien kesken samanaikaisesti. Tämä tapahtuu dynaamisesti ja adaptiivisesti, jotta jokaiselle käyttäjälle voidaan tarjota paras mahdollinen yhteys nopeuden ja luotettavuuden suhteen. (32; 58.)

Tämä tekniikka on erityisen hyödyllinen tilanteissa, joissa langattomassa verkossa on useita käyttäjiä, kuten tiheästi asutuissa kaupungeissa tai alueilla, joissa tarvitaan suurta tiedonsiirtokapasiteettia. MU-MIMO-parituksen avulla verkko pystyy tehokkaammin palvelemaan useita käyttäjiä samanaikaisesti, mikä parantaa kokonaissuorituskykyä ja käyttäjäkokemusta. (32; 58.)

5.3 Layers ja rank indicator

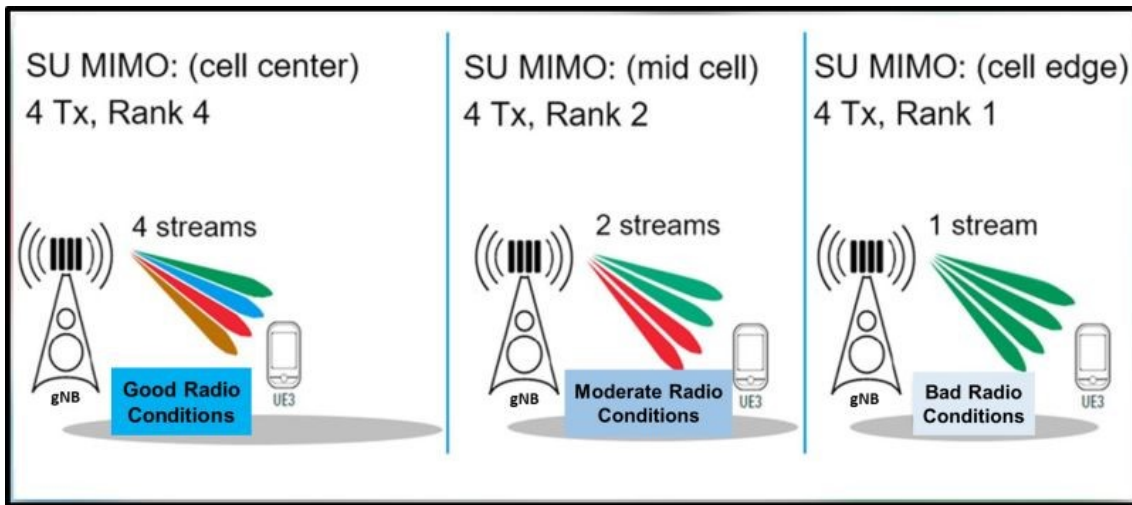
Tukiaseman muodostamista datavirroista käytetään nimitystä datavirta eli englanniksi layers tai datastreams. Jokainen datavirta on tavallaan itsenäinen datavirta, joka voi sisältää esimerkiksi tietoa, ääntä tai muita langattomia signaaleja. MU-MIMO-tekniikassa tukiasema voi lähettää useita datavirtoja eri käyttäjille samanaikaisesti käyttäen useita antennia ja samalla taajuuskaistalla. (Kuvat 16 ja 20.) (37.)

Esimerkiksi, jos tukiasemalla on useita antennia ja MU-MIMO-tekniikka käytössä, se voi lähettää jopa neljä erillistä datavirtaa neljälle eri laitteelle samanaikaisesti, jos signaaliolosuhteet ovat ideaaliset. Tämä parantaa merkittävästi langattomien verkkojen kapasiteettia ja suorituskykyä, koska useampia käyttäjiä voi palvella samanaikaisesti ilman, että se heikentää jokaisen käyttäjän yhteyden laatua. (37; 38.)

Rank indicator eli RI on UE-mittaus, jonka UE raportoi CSI raportissa tukiasemalle pyytäkseen tietyn määrän layereita eli datavirtoja, kuten kuvassa 19. Esimerkiksi jos UE ilmoittaa RI:ksi 1, niin sille osoitetaan ainoastaan yksi datavirta (kuva 20) ja vastaavasti, jos UE ilmoittaa RI:ksi 2, niin silloin se saa vastineeksi kaksi datavirtaa tukiasemalta. Parempi RI määräytyy yksinkertaisesti signaalin laadusta lähettimen ja vastaanottimen välillä. Mitä paremmat olosuhteet ja parempi signaalitaso saavutetaan näiden välillä, niin sen paremmaksi

muuttuu mahdollisuudet saavuttaa esimerkiksi RI lukema 4 SU -ja MU-MIMO tekniikassa.

(Kuva 20.) (38; 39.)



KUVA 20. Rank indicatorin toimivuus SU-MIMO:ssa, kun käyttäjä on eri solun kohdissa (38)

5.4 SRS

SRS on osa 5G:n MIMO-tekniikkaa, joka mahdollistaa useiden lähettävien ja vastaanottavien antennien käytön tukiasemalla ja päätelaitteissa. SRS-lähetysten avulla tukiasema voi arvioida päätelaitteiden kanavan tilaa, mukaan lukien vaimeneminen, signaalinhäviö, viive ja muut ominaisuudet. (40.)

Kanavan tilan tietäminen on erittäin tärkeää 5G-verkkotekniikassa, koska se mahdollistaa tukiaseman optimoida signaalien lähetystä ja vastaanottoa päätelaitteiden kanssa. Kun tukiasema tietää päätelaitteiden kanavan tilan, se voi muokata signaaleja käyttäen esimerkiksi beamforming-tekniikkaa ja MU-MIMO:a parantaakseen tiedonsiirron tehokkuutta, luotettavuutta ja kapasiteettia. (40.)

SRS-signaali lähetetään säännöllisesti päätelaitteista tukiasemalle ja päinvastoin, jotta kanavan tila pysyy ajan tasalla ja voidaan optimoida tiedonsiirtoverkon suorituskyky. Tämä auttaa 5G-verkkoa tarjoamaan parhaan mahdollisen palvelun useille samanaikaisille käyttäjille erilaisissa ympäristöissä. (40.)

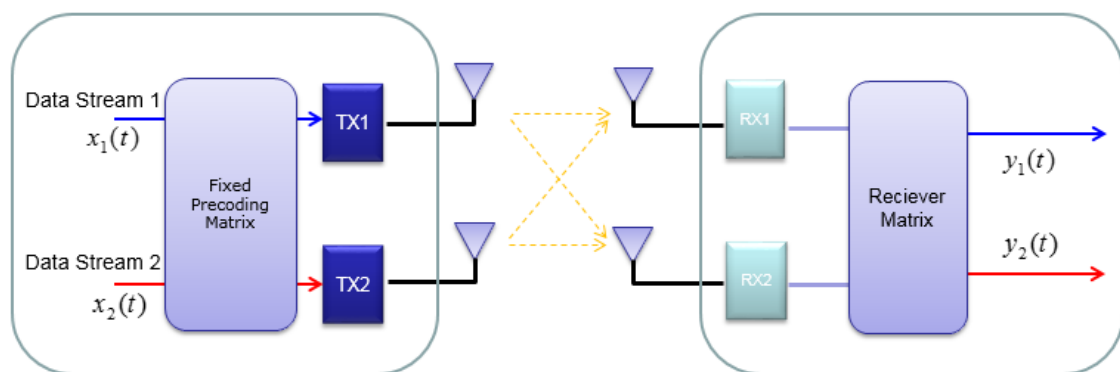
5.5 Precoding ja Decoding

Precoding eli esikoodaus ja decoding eli koodauksen purku ovat tekniikoita, joita käytetään signaalien koodaamiseen ja purkamiseen tietyillä muunnoksilla lähettämisen ja vastaanottamisen aikana, kuten esimerkiksi kuvassa 21. (41; 42.)

Precoding on tekniikka, jossa lähetettävää signaalia muokataan ennen sen siirtämistä kanavan kautta vastaanottimelle eli käyttäjälle. Tämä tehdään yleensä siksi, jotta signaalin laatu paranee tai että se sovituu paremmin vastaanottimen ominaisuuksiin tai kanavan tilaan. Precodingin tavoitteena on siis parantaa tiedonsiirron suorituskykyä ja vähentää häiriöitä. (Kuva 21.) (41; 42.)

Decoding on puolestaan vastaanotto prosessi, jossa vastaanottimessa suoritetaan vastakkainen toimenpide verrattuna siihen, mitä lähetyspäässä tapahtui. Se on menetelmä signaalin purkamiseen ja alkuperäisen informaation palauttamiseen. Vastaanotopäässä signaalia käsitellään, jotta se saadaan muunnettua alkuperäiseen muotoonsa ja saadaan esiin alkuperäinen lähetetty viesti tai data. (Kuva 21.) (41; 42.)

5G-verkoissa precoding- ja decoding-tekniikat ovat tärkeitä, koska ne auttavat parantamaan signaalien luotettavuutta ja tiedonsiirron tehokkuutta monimutkaisissa langattomissa ympäristöissä. Näitä tekniikoita hyödynnetään esimerkiksi monikäyttäjäjärjestelmien hallinnassa, signaalien vahvistamisessa, häiriöiden vähentämisessä ja datan siirtonopeuksien maksimoimisessa esimerkiksi juuri MU-MIMO -tekniikassa. (41; 42.)



KUVA 21. 2x2 MIMO:n toiminnallisuus, jossa lähetin "prekoodaa eli esikoodaa" signaalin kanavaan ja vastaanotin "decoodaa eli purkaa" receiver matrix avulla kanavasta tulevan signaalin (41)

5.6 MIMO spatial diversity ja spatial multiplexing

Moniantennitekniikassa spatial diversity eli tilallinen monimuotoisuus ja spatial multiplexing eli tilallinen moninkertaistaminen ovat kaksi erillistä tekniikkaa, joiden avulla voidaan parantaa datansiirron suorituskykyä ja luotettavuutta, erityisesti signaalin heikkenemisen ja häiriöiden vaikutuksen ollessa läsnä, joita voi olla esimerkiksi esteet, etäisyys, heijastukset tai vaikkapa ilmakehän vaikutukset. (43; 44; 45.)

Lyhyesti sanottuna tilallisen monimuotoisuuden ja tilallisen moninkertaistamisen pääasiallinen ero on, että tilallinen moninkertaistaminen pyrkii lisäämään tiedonsiirtonopeuksia ja kapasiteettia käyttämällä useita antennielementtejä samanaikaiseen tiedonsiirtoon, kun taas tilallinen monimuotoisuus keskittyy parantamaan langattoman viestinnän luotettavuutta käyttämällä useita antennielementtejä haalistumisen ja häiriöiden torjumiseksi, joten se ei välttämättä lisää tiedonsiirtonopeuksia vaan parantaa signaalin laatua. Nykyaikaisissa langattomissa järjestelmissä näitä tekniikoita voidaan käyttää yhdessä sekä korkeiden tiedonsiirtonopeuksien että luotettavuuden saavuttamiseksi. (43; 44; 45.)

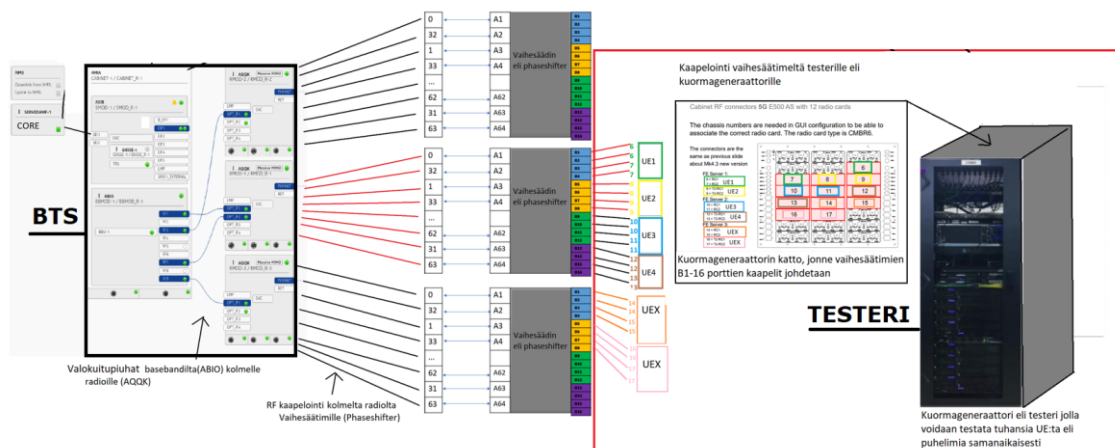
MIMO tekniikassa tilallinen moninkertaistaminen perustuu siihen, että langaton kanava tarjoaa erilaisia polkuja nk. spatiaalisia kanavia signaalille, jotka kulkevat lähettimestä vastaanottimeen hyödyntäen nimenomaan moniantennitekniikka eli MIMO:a sekä beamformingia. (43; 44; 45.)

6 MU-MIMO TESTIYMPÄRISTÖ

MU-MIMO:n testilinja ympäristöt sijaitsevat fyysisesti laboratorioissa. Käytössä voi olla esimerkiksi useita testiympäristöjä niin johdotetussa testauksessa, jossa on kaapeliyhteys radion sekä UE:n välillä, kuin OTA(Over the air) eli ilmarajapinta -testauksessa, jossa radion ja UE:n välillä ei ole kaapeliyhteyttä eli tällöin langattomat signaalit välitetään lähetyslaitteesta vastaanottolaitteeseen ilmassa.

6.1 Testausympäristö

Testiympäristöllä tarkoitetaan itse testiympäristöä tukiasemoinen ja testereineen sekä niihin sisältyviä kontrollitietokoneita ja työkaluja rajapintoinen. MU-MIMO -testiympäristö koostuu tukiasemasta, vaihesäätimestä ja testeristä sekä kaapeleista ja kuiduista näiden välillä. Kyseessä on siis nk. johdotettu eli nk. conducted-testiympäristö (kuva 22). Näiden kokonaisuuksien lisäksi testausympäristö pitää sisällään myöskin esimerkiksi kontrollitietokoneita, joilla hallitaan ja ohjataan esimerkiksi tukiasemaa, radioita, vaihesäätimiä sekä testeria ja saadaan näistä paljon tietoa mitä testauksen aikana tapahtuu tukiaseman ja käyttäjien välillä.



KUVA 22. Havainnointi kuva runkoverkon eli coren ja testerin väliltä testiympäristössä. Kuvassa ei näy kontrolli koneita, jotka kuitenkin sisältyvät itse testiympäristöön.

6.1.1 Tukiasema

Tukiasema koostuu yleensä ohjausyksiköstä eli Control Unit:sta, Baseband -yksiköstä ja radiosta. Tukiasemassa on siis yleensä ainakin yksi radio, yksi baseband -kortti, joka ohjaa core -verkolta tulevaa signaalia radioille. Lisäksi tukiasemassa on systemmoduuli-kortti, joka toimii tukiaseman hallinta-asemana. Hallinta koostuu yleensä kolmesta eri osa-alueesta, jotka ovat Control, User - ja Management-plane. Control -plane keskittyy viestien ja signaalien hallintaan ja se kuljettaa verkkoa kontrolloivat tiedot. User -plane keskittyy käyttäjiin eli se kuljettaa käyttäjien tiedonsiirto paketit ja management planella keskittyy siihen, mitä tietoa tukiasemalta annetaan ulkopuolisille alustoille esim. tukiaseman informaatiotiedot tai esimerkiksi testien tulos tiedot. Tukiasemaa sekä sen ohjelmistoa pystytään konfiguroimaan halutuille asetuksille ja säädöille riippuen millaista testausta halutaan ja minkälaisella rauta sekä-laite kokoonpanolla sitä suoritetaan.

Tukiasemat kytketään ”backhauin ” kautta joko oikeaan core -verkkoon tai simuloituun core -verkkoon. Sen tärkein tehtävä onkin siis muodostaa langaton verkkoyhteys runkoverkon eli tämän nk. core-verkon ja käyttäjälaitteen (UE) välille (kuvat 23 ja 24). Tukiasema muodostaa siis nk. solun tai soluja eli alueen, jossa UE:t yhdistyy runkoverkkoon radioyhteyksiä käyttäen. Tukiasema voi muodostaa useita soluja, mutta esimerkiksi kaupunkialueella tukiasemia voi olla useita ja niin myös soluja ja käyttäjät voivat liikkua solusta toiseen. Näin tukiasemilla pystytään luomaan langaton verkko halutulle alueelle ja näin ollen se toimii keskeisenä solmukohtana, joka ylläpitää ja hallinnoi langatonta verkkoa.

Tukiasema voi olla joko SA, NSA, tai SA+NSA. SA versiona se toimii itsenäisesti ilman tukea vanhemmilta teknologioilta, kuten 4G:lta. NSA versiossa tukiasema käyttää 4G:n kontrollikerrosta ja 5G toimii sen kautta. SA+ NSA tukiasemalla hyödynnetään siis näitä molempia ratkaisuja.

NSA-tukiasemilla on kyky tarjota 5G:n yhteyksiä ja datansiirtoa, mutta niiden suorituskyky ja kyky hyödyntää täysin 5G:n uusia toimintoja ja etuja ovat rajalliset verrattuna SA-tukiasemiin. SA-tukiasemat toimivat täysin itsenäisesti 5G-core-verkon kanssa ilman riippuvuutta 4G-infrastruktuurista, mikä mahdollistaa täyden hyödyn 5G:n tarjoamista eduista. Tulevaisuudessa SA-tukiasemien odotetaan lopulta korvaavan NSA-tukiasemat, kun 5G-verkot kehittyvät ja niihin liittyviä toiminnallisuuksia otetaan käyttöön laajemmin tarjoten täyden valikoiman 5G:n mahdollistamia etuja.

Tukiasemat hyödyntävät FDD ja TDD teknologiaa. FDD eli Frequency Division Duplex on langattomissa viestintäjärjestelmissä käytetty tekniikka, joka jakaa käytettävissä olevan taajuuskaistan kahteen erilliseen kaistaan: uplinkiin ja downlinkiin. Tämä tarkoittaa sitä, että tiedonsiirto tapahtuu eri taajuuskaistoilla vastavuoroisesti sekä lähetyssuunnassa että vastaanottosuunnassa. (46.)

FDD-menetelmä mahdollistaa samanaikaisen kahdensuuntaisen viestinnän: käyttäjät voivat lähettää ja vastaanottaa tietoja samanaikaisesti, koska uplink- ja downlink-liikenteellä on omat erilliset taajuusalueensa. (46.)

TDD eli Time Division Duplex on langattomissa viestintäjärjestelmissä käytetty tekniikka, joka jakaa käytettävissä olevan taajuuskaistan ajan suhteen eri aikaväleihin uplink- ja downlink-liikenteen välillä. Tämä tarkoittaa, että sama taajuuskaista jaetaan ajallisesti siten, että eri aikaväleillä toimii joko uplink tai downlink liikenne. (46.)

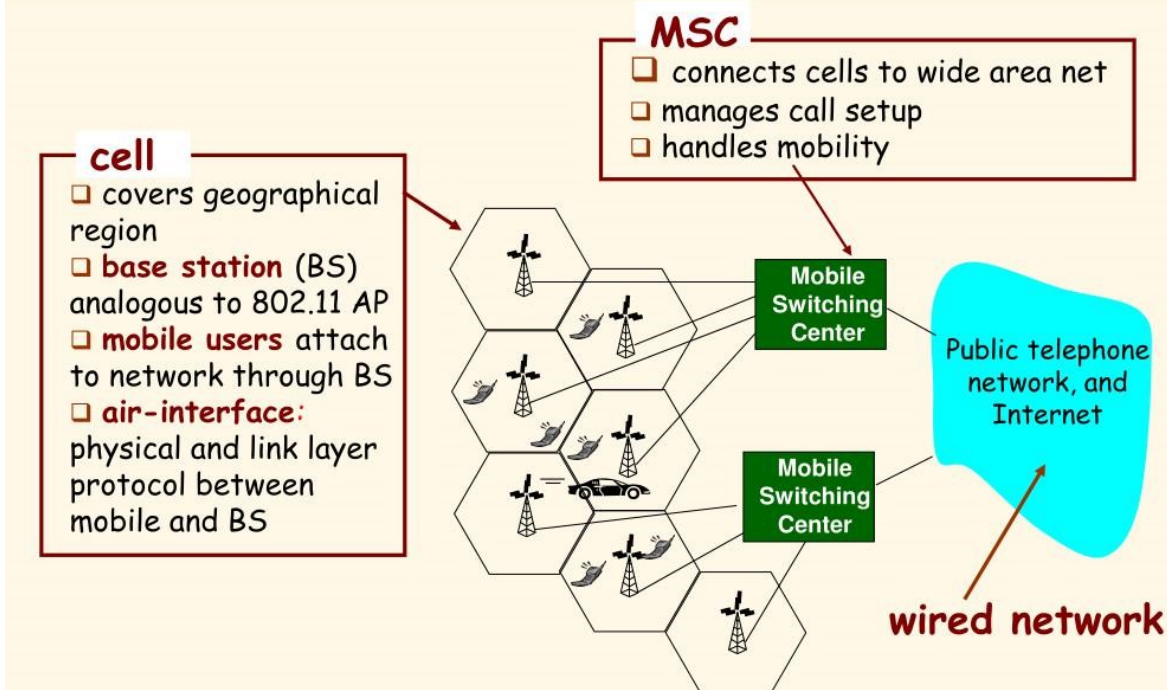
TDD-tekniikassa jakaminen tapahtuu aikajakosuhteella, mikä mahdollistaa aikaväleihin perustuvan liikenteen erottamisen. Esimerkiksi yksi aikaväli voidaan varata uplink-liikenteelle ja seuraava downlink-liikenteelle. Tämä jatkuva vaihtelu uplinkin ja downlinkin välillä tapahtuu nopeasti ja dynaamisesti. (46.)

TDD tarjoaa joustavuutta resurssien hallinnassa, koska saman taajuuskaistan resursseja voidaan jakaa dynaamisesti eri suuntiin tarpeen mukaan. Tämä voi olla hyödyllistä tilanteissa, joissa liikenteen määrä tai suunta vaihtelee nopeasti, ja se mahdollistaa myös tehokkaamman spektrin käytön, kun resurssit jaetaan dynaamisesti aikaväleillä. (46.)

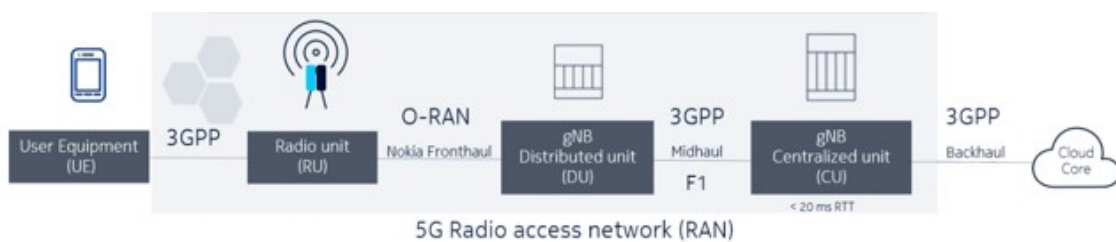
Vertaillen FDD:tä ja TDD:tä:

- **Kaistanjako:** FDD jakaa kaistan taajuuden perusteella, kun taas TDD jakaa kaistan ajan perusteella. (46.)
- **Samanaikainen viestintä:** FDD mahdollistaa samanaikaisen kahdensuuntaisen viestinnän erillisillä kaistoilla, kun taas TDD mahdollistaa samanaikaisen viestinnän jakamalla aikavälejä. (46.)
- **Joustavuus:** TDD tarjoaa joustavuutta resurssien dynaamiseen jakamiseen uplink- ja downlink-liikenteen välillä, kun taas FDD tarjoaa vakaita ja erillisiä kaistoja, mutta saattaa olla haasteellisempi resurssien dynaamisessa jakamisessa. (46.)

Cellular Network Architecture



KUVA 23. Runkoverkon eli tässä kuvassa "public telephone network and internet" avulla luodaan MCS:n kautta tukiasemilla solu-verkosto, joita kautta UE:t pääsevät langattomasti verkkoon (47)



KUVA 24. 5G Radio Access Network:n (RAN) toiminnallisuus, joka käsittää tapahtumasarjan, jossa UE yhdistetään langattomasti ydinverkkoon radioyhteyksiä käyttäen.

6.1.2 Radio

Tukiaseman radion tehtävänä on lähettää ja vastaanottaa langattomia signaaleja antennien avulla käyttäjälaitteiden ja tukiaseman välillä. Tukiaseman radio koostuu mm. radiolähettimestä, radiovastaanottimesta, antenneista ja ohjauyksiköstä, jotka mahdollistavat tiedonsiirron langattomassa viestinnässä. (48.) Radion tehtäviä on siis esimerkiksi:

1. **Signaalin lähettäminen:** Tukiaseman radio ottaa vastaan tiedonsiirtopyynnön käyttäjälaitteelta ja muuntaa digitaalisen tiedon langattomaksi signaaliksi. Se moduloi signaalin, joka sisältää tiedot, ja lähettää sen ilmassa eteenpäin kohti määränpäättä. Radion tehtävänä on varmistaa, että signaali lähetetään oikealla taajuudella, teholla ja modulaatiolla. (48.)
2. **Signaalin vastaanottaminen:** Tukiaseman radio vastaanottaa langattomat signaalit käyttäjälaitteilta. Se vastaanottaa signaalin, joka sisältää käyttäjälaitteen lähettämät tiedot, ja demuloi sen digitaaliseen muotoon. Radion tehtävänä on varmistaa, että vastaanotettu signaali on vahva ja laadukas. (48.)
3. **Signaalin käsittely:** Radion tehtävänä on käsitellä vastaanotettu signaali ja valmistella se eteenpäin siirrettäväksi verkkoon tai päätelaitteelle. Se suorittaa signaalien purkamista, virhekorjausta, koodausta ja muita prosesseja, jotka parantavat tiedonsiirron luotettavuutta ja suorituskykyä. (48.)
4. **Taajuuskanavan hallinta:** Tukiaseman radio vastaa taajuuskanavien hallinnasta. Se valitsee oikean taajuuskanavan tiedonsiirrolle ja varmistaa, että käytössä olevat taajuuskaisemat ja kanavat jaetaan tehokkaasti käyttäjälaitteiden välillä. (48.)
5. **Interferenssin hallinta:** Radion tehtävänä on havaita ja hallita mahdollisia häiriöitä ja interferenssiä, jotka voivat vaikuttaa tiedonsiirron laatuun. Se voi suorittaa taustakohinan vaimennusta, signaalin erottelua ja muita menetelmiä interferenssin vähentämiseksi ja parhaan mahdollisen signaalilaadun takaamiseksi. (48.)

Tukiaseman radio on keskeinen osa langattoman viestinnän toiminnallisuutta, jonka avulla tiedonsiirto tapahtuu käyttäjälaitteiden ja runkoverkon välillä. (Kuva 24.) (48.)

6.1.3 Phase shifter eli vaiheensäätiöpiiri

Phase shifter tarkoittaa suomeksi "vaiheensäätiöpiiriä", joka on elektroninen komponentti, joka mahdollistaa sähkövirran tai signaalin vaiheen säätämisen tietyn tason yli.

Vaiheensäätiöpiiri on komponentti johdotetun ympäristön MU-MIMO tekniikassa ja testauksessa (kuva 22), ja sen tehtävänä on säätää ja hallita signaalien vaihetta MU-MIMO järjestelmässä. Vaiheensäätiöpiiri mahdollistaa tarkkaan kohdistetun signaalin lähetys- ja vastaanottojärjestelmässä, mikä parantaa tiedonsiirron suorituskykyä ja kapasiteettia. Näin ollen vaiheensäätiöpiirin tärkeimpiä tehtäviä ovat esimerkiksi:

1. **Beamforming:** Vaiheensäätöpiiri mahdollistaa keilan muodostuksen MU-MIMO järjestelmässä. Keilan muodostuksella signaali voidaan kohdistaa halutulle käyttäjälle tai päätelaitteelle, vähentäen samalla häiriöitä ja parantaen signaalin voimakkuutta kyseisessä suunnassa. Vaiheensäätöpiiri ohjaa signaalin vaihetta ja amplitudia eri antennielementeissä saavuttaakseen toivottuja säteilykuviota ja signaalin kohdentumista. (Kuva 7.) (49.)
2. **Interferenssin hallinta:** MU-MIMO-järjestelmässä vaiheensäätöpiiri auttaa vähentämään interferenssiä, joka voi syntyä, kun useat signaalit lähetetään ja vastaanotetaan samanaikaisesti eri antennielementeistä. Säättämällä signaalien vaiheita tarkasti vaiheensäätöpiiri voi vaimentaa haitallista interferenssiä ja parantaa signaalin vastaanottoa. (49.)
3. **Kanavan tilan seuranta ja päivitys:** Vaiheensäätöpiiri voi seurata kanavan tilaa ja päivittää signaalien vaiheita tarpeen mukaan. Kanavan tilan muutokset, kuten liikkuvat esteet tai heikot signaalit, voivat vaikuttaa signaalin kohdentamiseen. Vaiheensäätöpiirillä voi reagoida näihin muutoksiin ja sillä voidaan säätää signaalien vaiheita ja varmistaa optimaalinen throughput MU-MIMO:ssa UL ja DL suuntiin. (49.)

Vaiheensäätöpiirin tehtävä on siis optimoida signaalin kohdentuminen ja vähentää häiriöitä useiden antennielementtien ympäristöissä. Näin ollen se auttaa parantamaan tiedonsiirron tehokkuutta, luotettavuutta ja kapasiteettia.

6.1.4 Kuormageneraattori eli testeri

Kuormageneraattori (Load generator) eli testeri on laite, jolla voidaan testata tukiasemaa jopa monilla tuhansilla käyttäjälaitteilla samanaikaisesti ilman, että tarvitsee virittää monia tuhansia matkapuhelimia, tabletteja tai muita vastaavia esineitä fyysisesti ilmoille. Sitä ohjataan control PC:llä. Testit tehdään testerin sovelluksella ja linkitetään sieltä sitten tarvittaviin muihin alustoihin esimerkiksi testien automatisointia varten. Testeri siis keskittyy verkon testaamiseen, monitorointiin ja varmuuden takaamiseen käyttäjälaitteen näkökulmasta.

7 MU-MIMO TESTAUS JA MENETELMÄT

Testaamisen tärkein tavoite on löytää mahdolliset ongelmat ennen kuin testattu toiminnallisuus päätyy asiakkaalle. Testaamisen tarkoituksena on esimerkiksi mitata MU-MIMO teknologian suorituskykyä todellisissa käyttötilanteissa, jotta voidaan arvioida sen tehokkuutta ja luotettavuutta. Tällainen testaus voidaan suorittaa käyttämällä testilaitteita, jotka pystyvät simuloimaan MU-MIMO tilanteita, tai todellisia laitteita, jotka on varustettu MU-MIMO teknologialla.

MU-MIMO testauksen avulla voidaan mitata useita suorituskyvyn KPI-arvoja, kuten datanopeutta, viiveitä, signaalin vaimenemista ja virheiden määrää. Tämä auttaa kehittäjiä arvioimaan MU-MIMO teknologian tehokkuutta ja suorituskykyä erilaisissa käyttötilanteissa ja optimoimaan sen suorituskyvyn käyttäjän tarpeiden mukaisesti.

7.1 Conducted mode- testaus

Kun testilinja on conducted se tarkoittaa, että testattava laite tai komponentti on liitetty fyysisesti testausvälineisiin tai testiympäristöön johdotetun yhteyden avulla. Se sisältää esimerkiksi seuraavia asioita:

1. **Johdotettu liitäntä:** Testattava laite tai komponentti kytketään testauslaitteisiin, kuten signaalianalyysilaitteisiin, signaaligeneraattoreihin tai mittauslaitteisiin, johdotetun yhteyden avulla, kuten kuvassa 22. Tämä mahdollistaa tarkat mittaukset ja testauksen eri parametreille, kuten signaalitaso, taajuusvaste ja signaalin laatu.
2. **Sähköiset mittaukset:** Testausvälineillä mitataan erilaisia sähköisiä ominaisuuksia, kuten esimerkiksi signaalin voimakkuus, taajuusvaste, signaali-kohinasuhde (SNR) ja häiriöherkkyys. Näiden mittausten avulla voidaan arvioida laitteen toimintaa, suorituskykyä ja yhteensopivuutta.

Johdotettu testaus tarjoaa tarkat mittaukset ja testauksen mahdollisuuden, kun testattavat käyttäjälaitteet voidaan liittää fyysisesti testiympäristöön. Tämä mahdollistaa syvällisen analyysin ja varmistaa laitteen tai komponentin toimivuuden, suorituskyvyn ja yhteensopivuuden 5G -verkon vaa-

timusten kanssa. Yleensä johdotetulla testauksella pyritään testaamaan toiminnallisuutta huomattavasti paremmissa olosuhteissa verrattuna esimerkiksi OTA testaukseen ja näin ollen se toimii yleensä ensi askeleena testauksessa ennen kuin testaus siirretään OTA testaukseen.

7.2 OTA-testaus

Ilmarajapinta eli OTA(Over the air) -testaus on testaus menetelmä, jossa testataan esimerkiksi 5G-verkkoa langattoman ilmarajapinnan eli radioyhteyden osalta(RAN) (Kuva 23). Ilmarajapinta on alue, jossa langattomat signaalit välitetään lähetyslaitteesta vastaanottolaitteeseen ilmassa.

Ilmarajapinta eli OTA(Over the air)- testaus sisältää erilaisia testejä ja mittauksia, joiden avulla arvioidaan ja varmistetaan 5G-verkon suorituskyky, luotettavuus ja yhteensopivuus. Näitä testejä voidaan suorittaa laboratorio-olosuhteissa tai todellisessa käyttöympäristössä. Se on usein jo toimivan johdotetun testauksen jatkumoa. (50; 51; 52.)

Testauksen tavoitteena voi olla esimerkiksi:

1. **Signaalilaadun arviointi:** Mitataan signaalien voimakkuutta, häiriötä, signaali-kohinasuhdetta (SNR) ja vastaanoton herkkyyttä. (50; 51; 52.)
2. **Kapasiteetin testaus:** Arvioidaan 5G-verkon kykyä käsitellä suurta dataliikennemäärää ja samanaikaisten käyttäjien määrää. (50; 51; 52.)
3. **Nopeat liikkuvuustestit:** Testataan 5G-verkon suorituskykyä ja yhteensopivuutta tilanteissa, joissa käyttäjä liikkuu nopeasti, kuten ajoneuvoissa tai junissa. (50; 51; 52.)
4. **Interferenssin testaus:** Arvioidaan 5G-verkon herkkyyttä ja suorituskykyä muiden läheisten langattomien laitteiden tai verkkojen aiheuttaman interferenssin suhteen. (50; 51; 52.)
5. **Kattavuuden testaus:** Mittausten avulla arvioidaan 5G-verkon kattavuusalueita, signaalien voimakkuutta eri etäisyyksillä ja esteiden vaikutusta yhteyteen. (50; 51; 52.)
- 6.

Ilmarajapinta testaus on tärkeää varmistaaksemme, että verkko toimii suunnitellulla tavalla ja täyttää suorituskykyvaatimukset. Testaustulosten perusteella voidaan tehdä tarvittavia parannuksia verkon suunnitteluun, konfigurointiin ja optimointiin. (50; 51; 52.)

7.3 Uuden toiminnallisuuden testaaminen

MU-MIMO-linjan uuden toiminnallisuuden testaaminen voi olla esimerkiksi jatkumoa aiemmin testatuille 8DL8UL -solujen toiminnallisuuksille. Uuden toiminnallisuuden testauksessa voidaan käyttää ympäristössä esimerkiksi kolmea TDD 16DL8UL 100 MHz solua, jossa tukiasema on SA:na. Solujen taajuusalueena voi toimia FR1, tarkemmin n77-alue eli 3300-4200 MHz. Testauksessa voidaan keskittyä esimerkiksi ainoastaan 16:sta datavirran downlink-suunnan toiminnallisuuteen ja tavoitteena voi olla esimerkiksi saavuttaa tietty suorituskkyky tiettyjen tukiaseman ja vaihesäätimen säätöjen avulla näiden datavirtojen suorituskyyvyn suhteen tukiaseman ja käyttäjälaitteen välillä.

Kyseinen 16:sta datavirran downlink suunnan ympäristö voidaan ajatella esimerkiksi kuvien 8 ja 16 perusteella niin, että jokainen keila muodostaa neljä omaa datavirtausta downlink suuntaan eli tukiasemalta käyttäjälaitteelle. Näin ollen yksi 16DL8UL -solu pystyy muodostamaan neljä keilaa ja jokainen keila sisältää 4 datavirtausta, jolloin solun toimiessa saavutetaan yhteensä 16:sta datavirtausta downlink suunnassa yhdeltä solulta. (kuvat 8; 16 ja 20.)

7.3.1 Testaus suunnitelma ja raportointi

Testaus saa alkunsa siitä, että tiedetään lähtökohta eli jo testattu ja toimivaksi todettu toiminnallisuus tai joku jo tiedetty toiminnallisuuden taso, josta saadaan nk. referenssi tulos eli vertailu pohja. Sen jälkeen lähdetään tavoittelemaan itse uutta toiminnallisuutta ja sen kriteereitä esimerkiksi suorituskyyvyn suhteen. Tätä vasten suunnitellaan testit ja tehdään testejä varten hyvä ja kattava testaus suunnitelma, jota sitten noudatetaan määrätietoisesti ja aikataulun mukaisesti.

7.3.2 Testilinjan pohjustus testaamista varten

Testilinjan pohjustuksella tarkoitan tukiaseman, vaihesäätimen sekä testerin säätämistä oikeanlaisiksi uuden toiminnallisuuden testaamista varten, joka pohjautuu testaussuunnitelmaan. Tämä pohjustus pitää sisällään useita erivaiheita, mutta pääaiheita ovat:

1. Tukiaseman säätäminen testausta varten oikeisiin säätöihin esimerkiksi kaapeloinnin, raudan ja ohjelmistojen suhteen. (Kuva 22.) Myöskin tukiaseman konfiguraatiota joudutaan usein säätämään toiminnallisuuden mukaan.
2. Vaihesäätimen säätö esimerkiksi vaihekulmien -ja vaimennuksien suhteen

3. Testerillä tehtävien testien rakentaminen

7.3.3 Testien suorittaminen, tarkastelu ja raportointi

Kun testilinja on saatu pohjustettua sopivaksi toiminnallisuuksien testaamista varten, aletaan suorittaa itse testejä. Esimerkiksi 16:sta layerin downlink suunnan testaamisessa lähdetään liikkeelle yhden UE:n testistä, ja varmistetaan, että jokainen layer yksistään toimii oikealla tavalla. Eli käytännössä varmistetaan toiminnallisuuden toimivuudesta palanen kerrallaan.

Näin ollen prosessi etenee yleensä määrätietoisesti askel kerrallaan. Esimerkiksi yhden 16DL8UL solun toimivuutta voidaan tarkastella ensin niin, että tarkastellaan yhden layerin toimivuus yhdellä UE:lla. Näin ollen voidaan todeta, että yksi UE toimii RANK 1:nä jokaisella yksittäisellä datastriimillä eli layerillä mitä tukiasema tuottaa käyttäjälle. Sen jälkeen voidaan tarkastella sama kahdella streamilla ja todeta että UE toimii hyvin ja sekä parittuu jokaisessa kahden streamin osiossa. Jos UE parittuu hyvin tämä käytännössä tarkoittaa jo, että itse MU-MIMO toiminnallisuus toimii jo jossain määrin.

Näiden toimintojen onnistuneen testaamisen jälkeen voidaan siirtyä testaamaan, että UE toimii hyvin RANK4:nä eli jokainen 4 streamin kokonaisuus toimii hyvin sekä parittuu yhdellä UE:lla. 16DL8UL solussa käytetään siis yhteensä 16 streamia downlink suunnan toiminnallisuuden testaamisessa, joten testiin vaaditaan vähintään neljä RANK 4 UE:ta eli 1 UE per 4 downlink suunnan streamia, jotta voidaan tarkastella, miten kokonaisuus toimii MU-MIMO:n kannalta eli esimerkiksi parittuuko UE:t ja vastaako jokainen UE RI tasolla RANK 4:sta, minkälaiset BLER tasot on ja niin edelleen.

Ylipäätään testaamista tarkastellaan läpi testien KPI tasolla, jotka määräytyvät testin määreiden, tavoitteiden ja esimerkiksi toiminnallisuuden mukaan. Esimerkiksi juuri tämän kyseisen toiminnallisuuden avain KPI:t olivat esimerkiksi UE paritus prosentti, Downlink suunnan throughput ja UE:den RANK taso. Testeistä raportoidaan sitä mukaan esimerkiksi ohjelmisto kehittäjille ja johtoportaille sitä mukaan, kun havaitaan vikoja ja ylipäätään testauksen etenemistä raportoidaan eteenpäin, oli se sitten onnistunutta tai ei.

8 POHDINTA

Nykyään MU-MIMO on jo laajasti käytössä tukiasemissa ja Wi-Fi-reitittimissä ja toki uusimmat käyttäjä -laitteetkin tukee tekniikkaa mikä parantaa langattoman verkon suorituskykyä useiden samanaikaisten käyttäjien kanssa. Uskon, että 5G:n kehityksessä ja tulevassa 6G-tekniikassa MU-MIMO teknologia tulee olemaan tulevaisuudessa entistä isommassa roolissa ja, että tulevaisuudessa MU-MIMO jatkaa kehitystään tarjoten entistä suurempaa skaalautuvuutta, suorituskykyä ja parempaa kykyä palvella useita käyttäjiä samanaikaisesti. Haasteita tarjoaa tietysti yhteensopivuus haasteet, korkeat kustannukset sekä erittäin monimutkaiset järjestelmä sekä ohjelmisto vaatimukset. Näihin haasteisiin lääke löytyy monista eri ulottuvuuksista, ja tulevaisuus näyttää mihin ihminen pystyy tämänkin saralta.

MU-MIMO-testaaminen on tärkeä osa MU-MIMO-teknologian kehittämistä ja käyttöönottoa, jotta voidaan varmistaa sen tehokkuus ja luotettavuus langattomissa verkkoympäristöissä. Tässä opinnäytetyössä käytyt asiat käsittelivät muutamia pää osa-alueita MIMO ja MU-MIMO tekniikasta ja sen testaamisesta. Toki aihekokonaisuus on merkittävän laaja, joten todellinen haaste oli sisällyttää ja kiteyttää tätä teknologiaa ja sitä edeltäviä teknologioita. Tämän takia opinnäytetyön aihealueet ovat jokseenkin pintapuolisia osittain. Tarkoitus oli, että lukijalle jää hyvä käsitys siitä, mitä MU-MIMO tekniikka pitää sisällään ja miten sitä testataan ja jos kiinnostus herää on mahdollisuus perehtyä asiakokonaisuuksiin sitten paremmin tämän työn osa-alueiden pohjalta.

Aloin vastikään työskennellä testaajana MU-MIMO-tekniikan parissa, mikä on motivoinut myös opinnäytetyön kirjoittamiselle.

9 LÄHTEET

1. Wikipedia 2023. Wireless. Hakupäivä 3.9.2023. <https://en.wikipedia.org/wiki/Wireless>.
2. Wikipedia 2023. Electromagnetic radiation. Hakupäivä 3.9.2023. https://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetic_radiation.
3. Wikipedia 2023. Langattoman tiedonsiirron historia. Hakupäivä 3.9.2023. <https://en.wikipedia.org/wiki/Wireless>.
4. Optimum 2023. The benefits of 5G in Manufacturing. Hakupäivä 3.9.2023. <https://optimumpps.co.uk/benefits-of-5g-manufacturing>.
5. Kevin Sookocheff 2019. Wireless Networks and Shannon's Law. Hakupäivä 3.9.2023. <https://sookocheff.com/post/networking/wireless-networks-and-shannons-law>.
6. Wikipedia 2023. Information theory. Hakupäivä 10.9.2023. https://en.wikipedia.org/wiki/Information_theory.
7. Wikipedia 2023. Antenna_radio. Hakupäivä 10.9.2023. [https://en.wikipedia.org/wiki/Antenna_\(radio\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Antenna_(radio)).
8. Wikipedia 2023. Nyquist-Shannon sampling theorem. Hakupäivä 10.9.2023. https://en.wikipedia.org/wiki/Nyquist-Shannon_sampling_theorem.
9. Collimator 2023. What is shannon hartley theorem? Hakupäivä 10.9.2023. <https://www.collimator.ai/reference-guides/what-is-shannon-hartley-theorem>.
10. Wikipedia 2023. Signaali-kohinasuhde. Hakupäivä 10.9.2023. <https://fi.wikipedia.org/wiki/Signaali-kohinasuhde>.
11. Wikipedia 2023. Sähkömagneettinen spektri. Hakupäivä 10.9.2023. https://fi.wikipedia.org/wiki/S%C3%A4hk%C3%B6magneettinen_spektri.
12. Techtarget 2023. Frequency band. Hakupäivä 10.9.2023. <https://www.techtarget.com/searchnetworking/definition/band>.
13. Techtarget 2023. Spectrum efficiency. Hakupäivä 10.9.2023. <https://www.techtarget.com/searchmobilecomputing/definition/spectrum-efficiency>.
14. Ofcom 2023. Spectrum roadmap. Hakupäivä 10.9.2023. [Spectrum-Roadmap_GHz.png \(2481×929\) \(ofcom.org.uk\)](https://www.ofcom.gov.uk/consult/condocs/spectrum-roadmap/spectrum-roadmap-ghz-2481-929.pdf).
15. Techplayon 2023. 5G NR Frequency bands. Hakupäivä 17.9.2023. <https://www.techplayon.com/5g-nr-frequency-bands/>.

16. Sharetechnote 2023. 5G FR Bandwidth. Hakupäivä 17.9.2023. https://www.sharetechnote.com/html/5G/5G_FR_Bandwidth.html.
17. Wikipedia 2023. Spectral efficiency. Hakupäivä 17.9.2023. https://en.wikipedia.org/wiki/Spectral_efficiency.
18. Mobile Broadband Explosion 2012. 4GAmericasComparisonOfDownlinkSpectralEfficiency. Hakupäivä 17.9.2023. <https://2.bp.blogspot.com/-aKYvbqyEdpl/UEjjNUd4neI/AAAAAAAAELk/ljCHOgZG3eM/s1600/4GAmericasComparisonOfDownlinkSpectralEfficiency.jpg>.
19. Moniem-tech 2020. Capacity. Hakupäivä 17.9.2023. <https://moniem-tech.com/wp-content/uploads/sites/3/2020/11/Untitled.png>.
20. Wikipedia 2023. Antenna array. Hakupäivä 17.9.2023. https://en.wikipedia.org/wiki/Antenna_array.
21. Wikipedia 2023. Radiation pattern. Hakupäivä 17.9.2023. https://en.wikipedia.org/wiki/Radiation_pattern.
22. Serbescu, Dan 2021. Types of beamforming in 5G. LinkedIn. Hakupäivä 17.9.2023. <https://www.linkedin.com/pulse/types-beamforming-5g-dan-serbescu/>.
23. Chaudhari, Qasim 2023. What is the Difference between Analog, Digital and Hybrid Beamforming? Wirellessp. Hakupäivä 23.9.2023. <https://wirelesspi.com/what-is-the-difference-between-analog-digital-and-hybrid-beamforming/>.
24. Huawei 2023. What is Beamforming? Hakupäivä 23.9.2023. <https://info.support.huawei.com/info-finder/encyclopedia/en/Beamforming.html>.
25. Wikipedia 2023. MIMO. Hakupäivä 24.9.2023. <https://en.wikipedia.org/wiki/MIMO>.
26. Evercom 2023. Understanding of SISO, SIMO, MISO and MIMO. Hakupäivä 24.9.2023. <https://www.evercomtech.com/understanding-siso-simo-miso-mimo>.
27. Huawei 2023. What is MIMO? Hakupäivä 24.9.2023. <https://info.support.huawei.com/info-finder/encyclopedia/en/MIMO.html>.
28. Rouse, Margaret 2012. Multiple-In/Multiple-Out. Techopedia. Hakupäivä 24.9.2023. <https://www.techopedia.com/definition/5075/multiple-inmultiple-out-mimo>.
29. Sharetechnote 2023. 4G/LTE-Basic Procedures. Hakupäivä 24.9.2023. https://www.sharetechnote.com/html/BasicProcedure_LTE_MIMO.html.
30. Networkworld 2022. What is MU-MIMO, and why is it essential for Wi-Fi 6 and 6E? Hakupäivä 8.10.2023. <https://www.networkworld.com/article/965066/what-is-mu-mimo-and-why-is-it-essential-for-wi-fi-6-and-6e.html>.

31. Sharetechnote 2023. 5G/NR-MU-MIMO. Hakupäivä 8.10.2023. https://www.sharetechnote.com/html/5G/5G_MassiveMIMO_MU_MIMO.html.
32. Telrad 2023. MU-MIMO More capacity, without additional spectrum. Hakupäivä. 8.10.2023. https://telrad.com/wp-content/uploads/dlm_uploads/2019/03/MU-MIMO_White_Paper.pdf.
33. Oleksy, Katarzyna 2023. What is the downside of MU-MIMO? ISP.PAGE. Hakupäivä 8.10.2023. <https://isp.page/news/what-is-the-downside-of-mu-mimo/#gsc.tab=0>.
34. Huawei 2023. What is MU-MIMO? Hakupäivä 8.10.2023. <https://info.support.huawei.com/info-finder/encyclopedia/en/MU-MIMO.html>.
35. 5GWorldPro 2022. SU-MIMO Vs MU-MIMO in 5G. Hakupäivä 8.10.2023. <https://www.5gworldpro.com/blog/2020/12/11/su-mimo-vs-mu-mimo-in-5g/>.
36. Wikipedia 2023. Channel state information. Hakupäivä 13.10.2023. https://en.wikipedia.org/wiki/Channel_state_information.
37. Electronic products 2010. A primer on MIMO in LTE. Hakupäivä 4.11.2023. <https://www.electronicproducts.com/a-primer-on-mimo-in-lte/#:~:text=The%20term%20%E2%80%9Clayer%E2%80%9D%20is%20synonymous,beam%20steering%2C%20or%20spatial%20multiplexing>.
38. Sayed, Ibrahim 2021. What is Rank Indicator in 5G? LinkedIn. Hakupäivä 4.11.2023. https://www.linkedin.com/posts/ibrahim-sayed-88a7747-5g_5g-5gnr-5gtechnology-activity-6820623482615824384-isfX.
39. ShareTechnote 2023. 4G/LTE-Basic Procedures, Rank Indicator. Hakupäivä 4.11.2023. https://www.sharetechnote.com/html/BasicProcedure_LTE_MIMO.html#Rank_Indicator_Condition_Number.
40. ShareTechnote 2023. 5G/NR- SRS, SRS in nutshell. Hakupäivä 4.11.2023. https://www.sharetechnote.com/html/5G/5G_SRS.html.
41. ShareTechnote 2023. 4G/LTE-Basic Procedures, Precoding. Hakupäivä 4.11.2023. https://www.sharetechnote.com/html/BasicProcedure_LTE_PHY_Precoding.html.
42. Wikipedia 2023. Precoding. Hakupäivä 11.11.2023. <https://en.wikipedia.org/wiki/Precoding>.
43. Electronicsnotes 2023. MIMO Spatial Multiplexing. Hakupäivä 12.11.2023. <https://www.electronics-notes.com/articles/antennas-propagation/mimo/spatial-multiplexing.php>.

44. Remcom 2023. MIMO Beamforming, Spatial Multiplexing and Diversity in Wireless InSite. Hakupäivä 12.11.2023. <https://www.remcom.com/wireless-insite-mimo-beamforming-spatial-multiplexing-and-diversity>.
45. Wikipedia 2023. Spatial multiplexing. Hakupäivä 12.11.2023. https://en.wikipedia.org/wiki/Spatial_multiplexing.
46. Ghayas, Adnan 2021. FDD vs TDD: What are FDD and TDD in mobile networks? Hakupäivä 18.11.2023. <https://commsbrief.com/fdd-vs-tdd-what-are-fdd-and-tdd-in-mobile-networks/>.
47. WPI 2023. Cellular Network Architecture. Hakupäivä 18.11.2023. <https://image1.slideserve.com/2388161/slide3-l.jpg>.
48. Wikipedia 2023. Radio. Hakupäivä 18.11.2023. <https://en.wikipedia.org/wiki/Radio>.
49. COMMSCOPE 2020. Beamformers explained. Hakupäivä 19.11.2023. <https://www.intuitive-design.co.uk/clients/GSM/24429/Whitepaper-Beamformers-Explained.pdf>.
50. ShareTechnote 2023. 5G/NR – OTA. Hakupäivä 19.11.2023. https://www.sharetechnote.com/html/5G/5G_OTA.html.
51. Verkotan 2020. OTA testing. Hakupäivä 19.11.2023. <https://verkotan.com/2020/ota-testing/>.
52. Rohde&Schwarz 2023. 5G OTA/massive MIMO testing. Hakupäivä 19.11.2023. https://www.rohde-schwarz.com/fi/solutions/test-and-measurement/wireless-communication/cellular-standards/5g-test-and-measurement/massive-mimo/massive-mimo_233844.html?mid=10902&midx=generic-5g-ota-massive-mimo_generic-5g-combinations_search_text-ad_r-eu_&kw=mimo%205g.
53. everythingRF 2023. Frequency to Wavelength Calculator. Hakupäivä 2.12.2023. <https://www.everythingrf.com/rf-calculators/frequency-to-wavelength>.
54. MONIEM-TECH 2019. What is the difference between SU-MIMO and MU-MIMO? Hakupäivä 2.12.2023. <https://moniem-tech.com/questions/what-is-the-difference-between-su-mimo-and-mu-mimo/>.
55. Hoffman, Joe 2017. 4x4 MIMO-More Than Gigabit LTE. LinkedIn. Hakupäivä 3.12.2023. <https://www.linkedin.com/pulse/4x4-mimo-more-than-gigabit-lte-joe-hoffman>.
56. Wikipedia 2023. Multipath propagation. Hakupäivä 3.12.2023. https://en.wikipedia.org/wiki/Multipath_propagation.
57. Griffiths, Richard 2020. The wonders of 5G beamforming. Huawei BLOG. Hakupäivä 12.12.2023. <https://blog.huawei.com/2020/08/17/the-wonders-of-5g-beamforming/>.

58. Mathworks 2023. NR Cell Performance with Downlin MU-MIMO. Hakupäivä 12.12.2023.
<https://se.mathworks.com/help/5g/ug/nr-cell-performance-with-downlink-mu-mimo.html>.