

Miikka Ruohoniemi

Millimetriaallot 5G-teknologiassa

Tietotekniikan kandidaatintutkielma

30. huhtikuuta 2019

Jyväskylän yliopisto

Informaatioteknologian tiedekunta

Tekijä: Miikka Ruohoniemi

Yhteystiedot: miikka.o.ruohoniemi@student.jyu.fi

Ohjaaja: Antti-Jussi Lakanen

Työn nimi: Millimetriaallot 5G-teknologiassa

Title in English: Millimeter Waves in 5G Technology

Työ: Kandidaatintutkielma

Sivumäärä: 20+0

Tiivistelmä: Viidennen sukupolven langaton tietoliikenneverkko (5G) on jo pian tulossa kuluttajien käyttöön. 5G tuo ratkaisun moniin tämän hetken ongelmiin langattomassa verkossa ja mahdollistaa yhä useampien laitteiden liittämisen verkkoon. Tässä tutkielmassa kerrotaan ensin yleisesti 5G-verkosta ja siihen liittyvistä tekniikoista, mutta tutkielman painopisteenä on tarkastella millimetriaaltojen osuutta 5G-teknologiassa ja kertoa niiden tuomista hyödyistä ja haasteista.

Avainsanat: 5G, millimetriaallot, langaton, langaton tietoliikenneverkko

Abstract: The fifth generation mobile network(5G) will soon be ready for use to the customers. 5G brings solutions to existing problems in mobile network and allows much more devices to be connected to the network. This thesis describes the 5G network in general, but the main focus is to look at the part of millimeter waves in 5G technology and to bring up their benefits and challenges.

Keywords: 5G, millimeter waves, wireless, mobile network

Kuviot

Kuvio 1. Millimetriaaltojen mahdolliset taajuusalueet (Al-Falahy ja Alani 2017). 8

Sisältö

1	JOHDANTO	1
2	5G-VERKKO	3
2.1	5G-tekniikan kehitettävät ominaisuudet	3
2.2	Massiivinen MIMO	4
2.3	Keilanmuodostus	5
2.4	Tiheä piensoluverkko	6
2.5	D2D	7
3	MILLIMETRIAALLOT	8
3.1	Millimetriaaltojen haasteet	8
3.2	Ehdotuksia millimetriaaltojen ongelmien ratkaisemiseksi	9
3.3	5G-verkon tavoitteiden saavuttaminen millimetriaaltojen avulla	10
4	YHTEENVETO	13
	LÄHTEET	15

1 Johdanto

Viidennen sukupolven langaton tietoliikenneverkko (5G) on pian tulossa nykyisen 4G-verkon avuksi vapauttamaan sen ruuhkautuneita yhteyksiä. Verkkoon liitettävien laitteiden määrän jatkuva kasvu tarkoittaa sitä, että 4G ei enää kykene palvelemaan kaikkia verkkoon liitettäviä laitteita, joten tarvitaan uutta teknologiaa. 5G:tä suunniteltaessa täytyy ottaa huomioon kaikki erilaiset laitteet ja koneet, mitkä voidaan liittää verkkoon. 5G:lle on osoitettu kahdeksan ominaisuutta, joissa sen täytyy pystyä parantamaan 4G:hen verrattuna (Fang, Qian ja Hu 2018; Agiwal, Roy ja Saxena 2016). 5G:tä varten on myös tutkittu monia eri tekniikoita, joilla näitä ominaisuuksia voidaan parantaa ja tässä tutkielmassa käymme näitä tekniikoita läpi.

Tämän tutkielman aiheena on tarkastella millimetriaaltoja 5G-teknologiassa. Jotta millimetriaaltojen tarkasteleminen onnistuisi, tutkitaan myös, mistä 5G-verkko rakentuu ja kerrotaan 5G-teknologiaan tulossa olevista tekniikoista. Tutkielmassa selvitetään myös, mitä millimetriaallot ovat, mihin millimetriaaltoja käytetään 5G-teknologiassa sekä miten millimetriaaltojen avulla voidaan saavuttaa 5G:lle asetetut kehitystavoitteet. 5G-verkko ei vielä tutkielman kirjoitushetkellä ole käytössä, joten aihetta on tässä vaiheessa vielä hyvä tutkia tarkemmin. Tämän vuoden aikana on tulossa monelta valmistajalta 5G-tuella varustettuja älypuhelimia, joten kaukana tästä ei kuitenkaan enää olla.

5G-teknologia on paljon tutkittu aihe ja hakutermin ”5G” löytyykin satoja tuhansia tieteellisiä artikkeleja. 5G-teknologiaan liittyvää kirjallisuutta millimetriaalloista löytyi myös melko paljon viime vuosilta, joten sitäkin aihetta on tutkittu runsaasti. Millimetriaaltojen käytöstä on tutkittu sen hyötyjä ja haasteita langattomalle 5G-teknologialle (Al-Falahy ja Alani 2017; Niu ym. 2015), sekä toimivan 5G-verkon rakentamista millimetriaaltojen avulla, huolimatta sen lyhyen aallonpituuden aiheuttamista ongelmista (Andrews ym. 2014). Näitä aiheita käsitellään lisää tässä tutkielmassa.

Luvussa 2 kerrotaan 5G-verkosta, avataan siihen liittyviä tutkimuskohteita sekä kerrotaan, mitä ominaisuuksia 5G-verkon pitäisi parantaa 4G-verkosta. Luvussa 3 kerrotaan millimetriaalloista ja niiden yhteydestä 5G-verkkoon, ja miten ne auttavat saavuttamaan 5G-verkolle

sovittuja tavoitteita, ja käydään myös läpi millimetriaalloista koituvia haasteita sekä niiden ratkaisuehdotuksia. Lopuksi luvussa 4 kootaan yhteen tutkielman tuloksia ja pohditaan niiden vaikutuksia tulevaan 5G-verkkoon.

2 5G-verkko

5G eli viidennen sukupolven langaton tietoliikenneverkko, on jatkoa edelliselle sukupolvelle 4G:lle. 5G:tä kehittäessä on otettava huomioon tämän ja seuraavien vuosien tarpeet langattomaan verkkoliikenteeseen. Esineiden internetin (engl. *Internet of Things, IoT*) kehityksen ja koneiden välisen viestinnän kasvun (engl. *Machine to Machine, M2M*) myötä uusia laitteita lisätään verkkoon jatkuvasti, jolloin 5G:n täytyy pystyä palvelemaan laajemmin kuin 4G:n (Al-Falahy ja Alani 2017).

5G:n kannalta tärkeitä tekniikoita ovat Al-Falahyn ja Alanin (2017) sekä Niun ym. (2015) artikkelien perusteella keilanmuodostus (engl. *beamforming*), M-MIMO (*Massive Multiple-Input, Multiple-Output*), D2D (*device to device*) sekä tiheä piensoluverkko (engl. *dense small cell deployment*). Näistä kerrotaan lisää seuraavissa alaluvuissa. Lisäksi 5G-verkon tärkeänä osana ovat millimetriaallot, joista kerrotaan tarkemmin luvussa 3, jossa myös käydään läpi edellä mainittujen tekniikoiden yhteys millimetriaaltoihin. Ensin käydään kuitenkin läpi ominaisuuksia, joita 5G-tekniikan täytyy kyetä parantamaan verrattuna edelliseen sukupolveen.

2.1 5G-tekniikan kehitettävät ominaisuudet

Fangin, Qianin ja Hun (2018) sekä Agiwalin, Royn ja Saxenan (2016) mukaan 5G-tekniikalle on asetettu kahdeksan vaatimusta, jotka uuden 5G-verkon pitäisi saavuttaa. Nämä vaatimukset ovat saatu alan teollisuuden sekä akateemisen maailman erilaisten tutkimusaloitteiden yhdistämisestä (Agiwal, Roy ja Saxena 2016). Ensimmäinen vaatimus on tiedonsiirtonopeus, jossa täytyisi saavuttaa 1–10 Gbps nopeus tavallisille 5G-verkon käyttäjille. Toinen parannettava kohde on viive, jonka pitäisi olla alle yhden millisekunnin. Lisäksi 4G-verkkoon verrattuna 5G-verkon pitäisi saavuttaa 1000-kertainen kaistanleveys, 10–100-kertainen määrä verkkoon yhdistettyjä laitteita ja 90% pienempi energiankulutus verkolle. Myös täydellinen kattavuus ja 99,99% saatavuus sekä 10 vuoden akunkesto pienitehoisille laitteille ovat 5G-verkolle asetettuja vaatimuksia. Lisäksi Al-Falahyn ja Alanin (2017) mukaan nykyään 70% langattomasta tietoliikenteestä tapahtuu sisätiloissa, joten se täytyy ottaa

huomioon 5G-verkon suunnittelussa.

Teknologian kehitys ja sen myötä uusien verkkoon liitettävien laitteiden määrät kasvavat niin kovaa vauhtia, että nykyinen 4G-verkko ei enää riitä tämän päivän tarpeisiin. Jo näiden 5G:n ominaisuuksien kehitystavoitteita katsoessa nähdään, miten paljon nykyisestä täytyy parantaa. Edellisessä kappaleessa mainittujen erojen lisäksi voidaan verrata 4G:n LTE (Long Term Evolution)-version tiedonsiirtonopeuden huippua, noin 300 Mbps:a, 5G:n minimitavoitteeseen, yhteen Gbps:iin (Datta ja Kaushal 2014). Myös 4G LTE:n muutaman sadan millisekunnin viivettä voidaan verrata 5G:n tavoitteeseen, alle yhteen millisekuntiin (Datta ja Kaushal 2014).

Näitä 5G-verkon ominaisuuksia kehitetään, koska verkkoon kytkettävien laitteiden määrä kasvaa runsaasti joka vuosi, ja tietoliikenneverkon täytyy pysyä kehityksessä mukana. 5G-verkon perustaa mietittäessä täytyy ottaa huomioon, kuinka paljon erilaisia laitteita on, ja miten niiden tarpeet verkon suhteen eroavat toisistaan. Esimerkiksi Andrews ym. (2014) ovat vertailleet ilman kuljettajaa toimivaa autoa sekä teräväpiirtoista suoratoistovideota. Niiden tarpeet eivät ole täysin samat, mutta 5G:n täytyy pystyä palvelemaan molempia.

2.2 Massiivinen MIMO

Massiivisella MIMO:lla tarkoitetaan tukiasemaa, joka sisältää suuren määrän antenneja, ja joka voi palvella useita käyttäjiä sadoilla antenneilla samaan aikaan ja samalla taajuudella (Rajoria, Trivedi ja Godfrey 2018). Myös päätelaite, joka hyödyntää massiivista MIMO:a tarvitsee monta antennia, jotta se voi saavuttaa täyden hyödyn tukiaseman antenneista (Rajoria, Trivedi ja Godfrey 2018). Lisäksi massiivisen MIMO:n kanssa yhdessä toimii tilallinen limitys, joka jakaa lähetettävän tiedon useammalle kantaallolle, jotka lähetetään samanaikaisesti eri alikantaaltaajuudella (Al-Falahy ja Alani 2017). Näin saadaan lähetettyä enemmän tietoa lyhyemmässä ajassa ja voidaan hyödyntää suurta antennien määrää.

Massiivinen MIMO auttaa parantamaan langattoman verkon spektristä tehokkuutta (bit/s/Hz) sekä energiatehokkuutta (Rajoria, Trivedi ja Godfrey 2018). Spektrisen tehokkuuden parantaminen taas auttaa saavuttamaan luvussa 2.1 mainittuja tavoitteita, vähentämällä viivettä sekä kasvattamalla kapasiteettia (Rajoria, Trivedi ja Godfrey 2018). Lisäksi massiivinen MI-

MO parantaa signaalin vahvuutta ja näin parantaa raja-alueiden kuuluvuutta verrattuna 4G-verkossa käytettävään teknologiaan (Al-Falahy ja Alani 2017).

MIMO-tekniikkaa on käytetty jo aiemmin 4G LTE:ssä, mutta tukiasemien antennien määrät ovat olleet huomattavasti massiivista MIMO:a vähäisempiä (Andrews ym. 2014). Tämä johtuu siitä, että antennien fyysiset koot ovat olleet liian suuria, jotta olisi ollut mahdollista toteuttaa massiivinen MIMO. Millimetriaaltoihin siirtyminen 5G-verkossa ratkaisee tämän ongelman, koska siten saadaan antenneja pienemmiksi ja siten antenneja voidaan asentaa enemmän ilman fyysisen koon kasvattamista (Al-Falahy ja Alani 2017).

2.3 Keilanmuodostus

Keilanmuodostuksella tarkoitetaan sitä, kun antenni lähettää signaalia tiettyyn suuntaan ja vastaanottavan antennin täytyy ottaa signaali vastaan tästä tietystä suunnasta (Al-Falahy ja Alani 2017). Keilanmuodostuksella saadaan lähetettyä vahvempaa signaalia, mutta heikkoutena on säteen rajoitettu laajuus (Al-Falahy ja Alani 2017). Keilanmuodostus yhdistettynä massiiviseen MIMO:on ja millimetriaaltoihin odotetaan olevan tärkeä osa 5G-teknologiaa (Han ym. 2015). Nämä kolme tekniikkaa tarvitsevat selvästi toisiaan, jotta mikään niistä voi toimia kunnolla. Massiivinen MIMO tarvitsee millimetriaaltoja, jotta sen fyysinen koko ei kasva, millimetriaallot tarvitsevat keilanmuodostusta etenemistä varten ja keilanmuodostus tarvitsee massiivista MIMO:a ja sen monia antenneja, jotta säteen kapea laajuus ei ole esteenä.

Keilanmuodostusta on analogista ja digitaalista, ja 5G:tä varten on tutkittu näiden yhdistämisestä niiden molempien hyötyjen saamiseksi (Han ym. 2015; Shi ja Hong 2018). Tätä kutsutaan hybridi keilanmuodostukseksi. Shin ja Hongin (2018) mukaan analogisen keilanmuodostuksen hyötynä on kattavuus, mutta ongelmana on kapasiteetti. Digitaalisen keilanmuodostuksen hyötyjä ovat kapasiteetti ja joustavuus. Ongelmia taas ovat isoihin antennisysteemeihin yhdistettynä kallis hinta sekä suuri energiankulutus, sillä digitaalinen keilanmuodostus vaatii yhden radiotaajuusketjun yhtä antennia kohtaan (Han ym. 2015; Shi ja Hong 2018). Yhdistämällä analogisen ja digitaalisen keilanmuodostuksen, olisi mahdollisuus saada joustava ja kattava keilanmuodostustekniikka suurella kapasiteetilla ja digitaaliseen keilanmuodostukseen verrattuna pienemmällä energiankulutuksella. Myös hintaa saataisiin laskettua.

Han ym. (2015) kävivät läpi artikkelissaan kaksi eri toteutustapaa hybridi keilanmuodostukselle. Heidän tavoitteensa oli vähentää lähetin-vastaanottimien määrää ja siten pienentää hintaa sekä energiankulutusta. Näistä kahdesta parempi ratkaisu yksinkertaisemman toteutuksen ja pienemmän radiotaajuusketjujen määrän ansiosta oli $N \times M$ toteutus, jossa N on lähetin-vastaanottimien määrä ja M on antennien määrä jokaista lähetin-vastaanotinta kohtaan. Radiotaajuusketjujen määrä olisi NM . Shi ja Hong (2018) ovat sen sijaan onnistuneet vähentämään radiotaajuusketjujen määrää omassa tutkimuksessaan. Näin hybridi keilanmuodostuksella olisi mahdollista päästä spektrissä tehokkuudessa lähes digitaalisen keilanmuodostuksen tasolle pienemmällä energiankulutuksella. Spektrinen taloudellisuus parantaa kapasiteettia ja mahdollistaa isomman tiedonsiirron useammalle käyttäjälle (Han ym. 2015).

2.4 Tiheä piensoluverkko

Tiheä piensoluverkko on massiivisen MIMO:n ohella keino rakentaa 5G-verkkoa. Tarkoituksena on asentaa paljon piensoluja viemään kuormitusta pois isommilta tukiasemilta ja parantaa signaalin tehoa (Al-Falahy ja Alani 2017). Piensoluja voidaan asentaa sisälle ja ulos, ja näin voidaan helposti ja edullisesti lisätä verkon kapasiteettia (Al-Falahy ja Alani 2017). Piensolut täytyy asentaa tarpeeksi lähekkäin, jotta saadaan parannettua verkon spektristä tehokkuutta ja kapasiteettia (Al-Falahy ja Alani 2017). Rappaportin ym. (2013) mukaan 28 GHz ja 38 GHz taajuuksilla kaupunkiympäristössä piensolujen etäisyydet täytyy olla alle 200 metriä tasaisen kattavuuden saavuttamiseksi.

Tiheän piensoluverkon ongelmana on toisten piensolujen aiheuttama häirintä. Niun ym. (2015) mukaan tämä ongelma on ulkotiloissa merkityksetöntä suunnattujen antennien ja vähäisten heijastusten ansiosta. Al-Falahy ja Alani (2017) tuovat kuitenkin esiin, että operaattorit voivat piensolujen sijainneilla hieman vaikuttaa häirintään. Häirintää voi siis tapahtua myös ulkotiloissa, jos ei kiinnitetä huomiota piensolujen sijainteihin. Niu ym. (2015) kertovat artikkelissaan ratkaisuja sisällä tapahtuvaan piensolujen väliseen häirintään. Voimakkuuden säätö ja tiedonsiirron koordinointi tarvitaan hallitsemaan aiheutuvia häiriöitä. Lisäksi voidaan myös hyödyntää häiritsevää tietovirtaa vahvistamalla sillä jo olemassa olevaa alkuperäistä tietovirtaa.

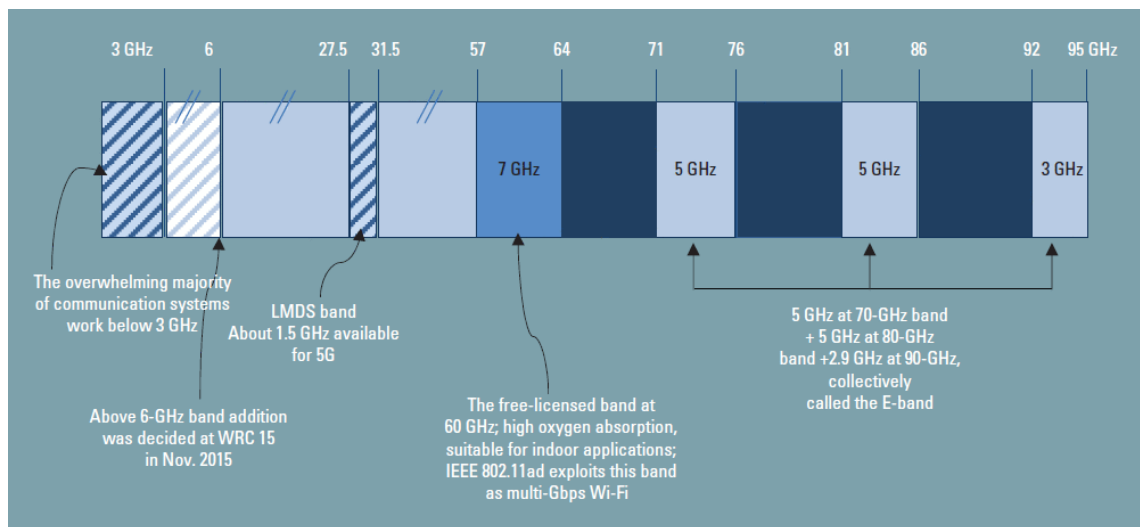
2.5 D2D

D2D auttaa 5G-verkkoa samankaltaisesti kuin tiheä piensoluverkko. D2D:n tehtävänä on hoitaa paikallisia verkkoliikenteitä ilman muun verkon kuormittamista (Al-Falahy ja Alani 2017). Tämä onnistuu siten, että laitteet voivat hoitaa oman paikallisen kommunikation keskenään (Al-Falahy ja Alani 2017). Näin voidaan vähentää viivettä, lisätä verkon kapasiteettia ja parantaa verkon energiatehokkuutta (Höyhtyä, Apilo ja Lasanen 2018). D2D:n kommunikointia ohjataan tukiasemasta, joka takaa yhteyden laadun D2D:n käyttäjille (Höyhtyä, Apilo ja Lasanen 2018). D2D systeemissä on aina vähintään yksi laite yhteydessä kommunikointia ohjaavaan tukiasemaan (Höyhtyä, Apilo ja Lasanen 2018). Tämän laitteen kautta ohjataan verkkoliikennettä muille kyseisen D2D systeemin laitteille (Höyhtyä, Apilo ja Lasanen 2018). D2D:n käyttötarkoitukset 5G:ssä ovat lähipalvelut (engl. *proximity services*), yleisen turvallisuuden kommunikointi, V2X (*vehicle-to-everything*) kommunikointi, autonomiset laivat, esineiden internetiin ja puettavaan teknologiaan (Höyhtyä, Apilo ja Lasanen 2018).

D2D:n ongelmana on ollut laitteiden välisten verkkoliikenteiden keskinäiset häiriöt. Millimetriaallot auttavat tässä ongelmassa, sillä yhdessä keilanmuodostuksen kanssa, millimetriaallot ovat hyvin suunnattuja. Millimetriaaltojen kantama on myös melko lyhyt. Tällöin häiriöt eri laiteparien välillä vähenevät ylimääräisten häiritsevien signaalien vähentyessä ja D2D pystyy palvelemaan yhä useampia käyttäjiä samanaikaisesti ja tehokkaammin pienellä alueella. (Sim ym. 2017).

3 Millimetriaallot

Millimetriaallot ovat radioaaltoja, joiden taajuudet ovat välillä 30–300 GHz (Niu ym. 2015). Pian tulevaan 5G:hen soveltuvissa taajuusalueissa on keskitytty tutkimaan eniten taajuuksia väliltä 28–95 GHz (Niu ym. 2015; Al-Falahy ja Alani 2017), jolloin täytyy käyttää millimetriaaltoja. Kuvio 1 havainnollistaa tarkemmin, mitä taajuusalueita voitaisiin mahdollisesti käyttää 5G-verkossa.



Kuvio 1. Millimetriaaltojen mahdolliset taajuusalueet (Al-Falahy ja Alani 2017).

Aiemmat sukupolvet ovat käyttäneet tiedonsiirrossaan alle 3 GHz taajuuksia, mikä on ruuhkauttanut tietoliikenteen kyseisellä taajuusalueella verkkoon liitettävien laitteiden määrän kasvaessa. Ottamalla uusia taajuusalueita käyttöön millimetriaaltojen taajuusalueelta, voidaan estää verkon ruuhkautumista laitteiden määrän kasvaessa edelleen hurjasti (Niu ym. 2015). Kuitenkin 5G:n täytyy toimia yhdessä aiempien sukupolvien kanssa, joten taajuuksia tullaan käyttämään edelleen 700 MHz:stä alkaen (Al-Falahy ja Alani 2017; Rappaport ym. 2013).

3.1 Millimetriaaltojen haasteet

Vaikka millimetriaallot ovat jo tulossa 5G-teknologiaan, niiden käytännön haasteet vaikeuttavat 5G-verkon kehitystä. Ensinnäkin millimetriaaltojen etenemisessä ongelmia ovat suuri etenemishäviö, suuntaavuus ja herkkyys esteille heikon diffraktion takia (Niu ym. 2015). On-

gelmia tuovat myös mikropiirien ja laitteistojen ongelmat esimerkiksi tehovahvistimen (engl. *power amplifier*) vääristymät sekä satunnainen vaihesiirtokohina (engl. *phase noise*) (Niu ym. 2015). Koska millimetriaallot vaativat uutta teknologiaa, on haasteena myös saada uudet laitteistot toimimaan yhteen edellisten sukupolvien teknologioiden kanssa (Al-Falahy ja Alani 2017).

5G-teknologian yksi tavoite on vähentää energiankulutusta, ja se on myös yhtenä haasteena varsinkin laitteisto- ja ohjelmistopuolella. Ohjelmistot tarvitsevat tehokkaita ohjelmointikeinoja (Al-Falahy ja Alani 2017) ja laitteistoja täytyy optimoida uusien materiaalien ja ohjelmointikeinojen avulla (Shi ja Hong 2018; Niu ym. 2015). Ilmakehä tuo vielä omat haasteensa millimetriaaltojen käyttöön ulkoilmassa. 60 GHz:n taajuuden ympärillä ilmakehän happi, ja 164–200 GHz:n taajuudessa vesihöyry, imevät energiaa millimetriaalloista, jolloin niiden eteneminen heikentyy entisestään (Al-Falahy ja Alani 2017).

Millimetriaaltojen käytöstä saatavat tiedonsiirtonopeuksien kasvut sekä vähemmän käytössä olevat taajuudet ja suuremmat kaistanleveydet verrattuna 4G:n vastaaviin (Al-Falahy ja Alani 2017), antavat kuitenkin hyvän syyn ratkaista edellä mainittuja haasteita. Mitä 5G:stä voi tulla, riippuu siitä, millaisiin ratkaisuihin päädytään.

3.2 Ehdotuksia millimetriaaltojen ongelmien ratkaisemiseksi

Ehkä suurin ongelma millimetriaalloilla on niiden etenemishäviö. Tähän ongelmaan ratkaisuksi on ehdotettu tiheää piensoluverkkoa, jolloin signaalin häviö vähenee (Al-Falahy ja Alani 2017). Tiheällä verkolla tarkoitetaan tässä kohtaa lähteestä riippuen 100–200 metrin etäisyyksiä piensolujen välillä (Al-Falahy ja Alani 2017; Rappaport ym. 2013). Pienet etäisyydet solujen välillä luovat taas uuden ongelman käyttäjän liikkeessa usein solujen peittoalueelta toiselle, mikä voi johtaa yhteyden katkeiluun tai muihin ongelmiin siirtymässä peittoalueelta toiselle (Al-Falahy ja Alani 2017). Tätä voidaan ratkaista paremmalla tukiasemanvaihto (engl. *handover*) algoritmilla, joka auttaa tukiasemien optimaaliseen toimintaan ja vakaan yhteyden ylläpitämiseen (Al-Falahy ja Alani 2017; Niu ym. 2015). Myös toisten tukiasemien häirintä voi aiheuttaa ongelmia, jos laite on useamman tukiaseman peittoalueen sisällä. Tähän ongelmaan operaattorit voivat hieman vaikuttaa tukiasemien sijainneilla (Al-Falahy

ja Alani 2017). Niun ym. (2015) mukaan tämä ongelma on merkityksetöntä suunnattujen antennien ansiosta, mutta sisätiloissa ongelmaa esiintyy. Heidän ratkaisuehdotuksena on kehittää protokollia ja algoritmeja auttamaan voimakkuuden säädössä ja tiedonsiirron koordinoinnissa sekä hyödyntämään häiritsevää signaalia vahvistamaan ei-häiritsevää signaalia.

Etenemishäviön vaikutusta voidaan pienentää tiheän piensoluverkon lisäksi myös keilanmuodostuksella ja M-MIMO:lla. Näin voidaan lähettää voimakkaampaa signaalia suoraa yhteyttä käyttäen, jolloin etenemishäviön haitat pienenevät. Keilanmuodostuksen muodostama suora yhteys antennien välillä on lähes pakollista millimetriaaltojen heikon diffraktion vuoksi (Al-Falahy ja Alani 2017). M-MIMO ja keilanmuodostus myös auttavat vähentämään sateen ja ilmakehän aiheuttamaa signaalin vaimentumista lyhyillä etäisyyksillä spektraalisen suorituskyvyn parantumisen ansiosta (Niu ym. 2015).

Sisätiloissa millimetriaaltojen heikko diffraktio vaikuttaa enemmän, sillä suoraa yhteyttä on vaikeampi toteuttaa. Täydellisen verkon saavuttamiseksi tarvittaisiin Niun ym. (2015) arvon mukaan useampia tukiasemia toimistoympäristössä. Kuitenkin jo kahdella tukiasemalla voidaan saavuttaa 98% kattavuus. Huonekalujen aiheuttamaa signaalin katkeilua voidaan välttää, kun tukiasemat sijoitetaan huoneen kattoon. Vaikka diffraktio on heikkoa, sitä on kuitenkin mahdollista käyttää hyödyksi tuomaan verkon yhteydelle lisää luotettavuutta. Se kuitenkin ei ole kovin energiatehokasta suuren häviön takia, joten sitä varten tarvitaan tehokas reititys algoritmi, joka etsii reitin pienimmällä häiriöllä. (Niu ym. 2015).

Ohjelmistojen ja laitteistojen tuomiin ongelmiin on haettu ratkaisuja uusien komponenttien, materiaalien ja muotojen avulla. Millimetriaaltojen kanssa tarvitaan uudet laitteistot ja niihin uusia algoritmeja tehokkailla ohjelmointitekniikoilla (Al-Falahy ja Alani 2017). Kuitenkaan nykyistä tekniikkaa omaavia laitteita ei voida poistaa käytöstä, koska 5G:n täytyy toimia yhdessä nykyisten verkkojen kanssa (Niu ym. 2015). Siten myös kaikki ohjelmistot täytyy luoda niin, että ne eivät sulje pois vanhempaa tekniikkaa.

3.3 5G-verkon tavoitteiden saavuttaminen millimetriaaltojen avulla

Millimetriaallot ovat osa uutta 5G-verkkoa ja auttavat verkon tavoittelemien ominaisuuksien kehittämisessä. Millimetriaalloilla on mahdollista päästä vähemmän ruuhkaisille taajuuksil-

le sekä saada sitä kautta kasvatettua kapasiteettia ja tiedonsiirtonopeutta (Al-Falahy ja Alani 2017). Samalla voidaan myös suurentaa kaistanleveyksiä nykyisistä 5-20 MHz:stä (Rappaport ym. 2013; Datta ja Kaushal 2014) lähemmäs tavoiteltavaa kaistanleveyttä kohti, mikä myös osaltaan auttaa suurempien tiedonsiirtonopeuksien saavuttamisessa. Esimerkiksi Nokia on Al-Falahyn ja Alanin (2017) mukaan saavuttanut 10 Gbps:n siirtonopeuden noin yhden millisekunnin viiveellä käyttämällä 73 GHz:n taajuutta ja 2 GHz:n kaistanleveyttä.

Jos 5G-verkossa halutaan käyttää massiivista MIMO:a, täytyy käyttää millimetrialtoja massiivisen MIMO:n fyysisen koon pienentämiseksi. Koska millimetrialtoja lähettävät ja vastaanottavat antennit ovat paljon aiempaa pienempiä, saadaan massiivisen MIMO:n kokoa pienennettyä ja siten antennien määrää kasvatettua. Massiivinen MIMO voi parantaa runsaasti signaalin vahvuutta ja raja-alueiden kuuluvuutta 4G:hen verrattuna (Al-Falahy ja Alani 2017). Näin 5G-verkon saatavuus ja kattavuus paranevat, kun käytetään massiivista MIMO:a. Lisäksi massiivinen MIMO yhdessä keilanmuodostuksen kanssa kasvattaa spektristä hyötysuhdetta, ja auttaa saamaan enemmän laitteita verkkoon ruuhkauttamatta sitä (Al-Falahy ja Alani 2017; Han ym. 2015). Näiden lisäksi tilallisen limityksen käyttäminen massiivisessa MIMO:ssa tiedon hajauttamiseen ja lähettämiseen rinnakkain, auttaa vielä entisestään vähentämään ruuhkaa, lisäämään kapasiteettia ja kasvattamaan verkon nopeutta (Al-Falahy ja Alani 2017; Han ym. 2015).

5G-verkon kattavuuden ja saatavuuden auttamiseksi 5G-verkon täytyy toimia yhdessä 4G:n, WiFi:n ja muiden aiempien sukupolvien verkkojen kanssa (Niu ym. 2015). 5G:n hyödyt tulevat esiin tiheimmin asutuilla alueilla, missä tarvitaan paljon kapasiteettia todella usean laitteen yhdistämisen kanssa, mutta muualla 4G voi laajemman kantavuutensa ansiosta hoitaa paremmin verkon kattavuutta. Vaikka tavoitteeksi onkin asetettu 99,99% saatavuus ja 100% kattavuus, ei olisi järkevää rakentaa millimetrialloilla toimivaa tiheää piensoluverkkoa alueelle, jonka käyttöön riittäisi kapasiteetiltaan yhä 4G-verkko.

Millimetriaallot auttavat myös viiveen pienentämisessä. Tähän tärkeimmät teknologiat ovat D2D sekä tiheä piensoluverkko. Piensoluverkosta tehdään tiheämpää millimetrialtojen taajuuksia, koska millimetrialtojen signaali vaimenee nopeammin kuin matalataajuuksisten aaltojen (Niu ym. 2015). Tiheässä verkossa laitteiden ei kuitenkaan tarvitse hakea signaalia kaukaa, joten viive pienenee. Viiveen pienentämiseen auttaa myös tiheän piensoluverkon lisäämä kapa-

siteetti, joka yhdessä millimetriaaltojen taajuuksien kanssa vähentää verkon ruuhkaa. D2D voi hoitaa paikallista verkkoliikennettä, joten siinäkin haetaan hyötyä ruuhkan vähentämisestä muilta käyttäjiltä sekä käyttämällä suoraa signaalia sen sijaan, että se kiertäisi tukiaseman antennin kautta (Al-Falahy ja Alani 2017). Lisäksi käyttämällä millimetriaaltoja D2D-tekniikassa, voidaan vähentää häiriöitä verkkoliikenteessä laitteiden välillä, jolloin D2D pystyy palvelemaan yhä useampia käyttäjiä samanaikaisesti ja tehokkaammin pienellä alueella (Sim ym. 2017).

5G-verkossa millimetriaaltoja käytetään yhdessä kaikkien eri tekniikoiden kanssa. Jotta haluttuihin 5G-verkon tavoitteisiin voitaisiin päästä käyttämällä millimetriaaltoja, täytyy kehittää uutta teknologiaa millimetriaaltojen erilaisen etenemisen ja laittoistovaatimusten takia (ks. luku 3.1) (Al-Falahy ja Alani 2017). Lisäksi laitteiden ohjelmistot tarvitsevat uusia algoritmeja toimiakseen yhteen millimetriaaltojen kanssa ja parantamaan verkon energiankulutusta (Niu ym. 2015; Shi ja Hong 2018). Shi ja Hong (2018) ovatkin löytäneet algoritmin hybridi keilanmuodostukselle, jolla saattaisiin energiatehokkuutta parannettua ilman digitaalisen keilanmuodostuksen hyötyjen menettämistä (ks. luku 2.3). Näiden lisäksi tiheä piensoluverkko voi parantaa verkon hyötysuhdetta, kun piensolut on asennettu tarpeeksi lähekkäin toisiaan, kuten millimetriaaltojen kanssa täytyy myös tehdä (Al-Falahy ja Alani 2017).

4 Yhteenveto

Tutkielmassa käytiin aluksi läpi tärkeitä tutkimisen aiheita 5G-verkkoa ajatellen. Tässä vastataan myös luvussa 1 esitettyyn kysymykseen, mistä 5G-verkko rakentuu ja mitä tekniikoita siihen tarvitaan. Massiivinen MIMO, tiheä piensoluverkko, D2D, keilanmuodostus ja millimetriaallot nousivat tutkimuksissa esille.

Massiivinen MIMO hoitaa 5G-verkossa suuren määrän tietoliikennettä ja lisää 5G-verkon kattavuutta ja kapasiteettia. Tiheä piensoluverkko lisää myös verkon kapasiteettia, mutta pienellä energiankulutuksella. Tiheä piensoluverkko mahdollistaa myös millimetriaaltojen käytön 5G-verkossa lyhentämällä piensolujen etäisyyksiä millimetriaalloille sopiviksi. D2D hoitaa paikallisia verkkoliikenteitä, mikä vähentää verkon viivettä, lisää kapasiteettia ja parantaa energiatehokkuutta. Nämä muodostavat pohjan 5G-verkolle, joka kommunikoi päätelaitteiden kanssa. Lisäksi keilanmuodostus auttaa 5G-verkkoa kehittymään toimivaksi verkoksi tehostamalla millimetriaaltojen signaalia suuntaamalla sen haluttuun suuntaan.

Luvussa 1 esitettiin myös kysymykset, mitä millimetriaallot ovat sekä mihin niitä käytetään 5G-teknologiassa. Näihin kysymyksiin saatiin tutkielmassa vastauksia. Millimetriaallot ovat lyhyitä radioaaltoja taajuudeltaan 30–300 GHz, ja niiden avulla on tarkoitus saada lisää taajuusalueita 5G-verkon käytettäväksi. Millimetriaaltoja käytettäisiin ruuhkan helpottamiseksi nykyisillä taajuusalueilla ja kasvattamaan tiedonsiirtonopeuksia. Lisäksi millimetriaaltojen vaatiman suuntaavuuden ansiosta yhteyksien välinen häirintä vähenisi.

Tutkielman viimeisen tutkimuskysymyksen tarkoituksena oli selvittää, miten millimetriaalloilla voidaan saavuttaa 5G-verkolle suunnitellut tavoitteet. Tähän kysymykseen löytyy vastaukset edellä mainituista tekniikoista. Millimetriaallot ovat osatekijänä kaikissa seuraavissa tekniikoissa: massiiviseen MIMO:on, tiheään piensoluverkkoon, keilanmuodostukseen sekä D2D:hen. Massiivista MIMO:a ei voisi toteuttaa fyysisten rajoitusten takia ilman millimetriaaltojen antennien pienempää kokoa. Tiheä piensoluverkko sekä keilanmuodostus tarvitaan, jotta millimetriaallot voivat toimia 5G-verkossa ja säilyttävät tarpeeksi vahvan signaalin tiedon siirtämiseen energiatehokkaasti. D2D-tekniikassa vahvasti suuntautuneet millimetriaallot vähentävät häirintää eri laiteparien välillä. Jokainen näistä tekniikoista tuo hyötyjä 5G-

verkolle ja millimetriaaltojen avulla kaikki nämä hyödyt voidaan yhdistää ja näin 5G-verkko voi saavuttaa sille suunniteltuja tavoitteita.

Jo 5G:stä löytyneiden tieteellisten artikkelien määrä kertoo siitä, että aihetta on tutkittu paljon. Koko ajan löydetään myös uusia keinoja kehittää tämänhetkistä tuloksista yhä enemmän ja yhä yksityiskohtaisemmin. Millimetriaaltojen taajuusalue ulottuu 300 GHz:in asti, mutta lähes kaikki tutkimus sijoittuu 28 GHz:n ja 95 GHz:n väliin. Tulevaisuudessa tutkimuksia voisi myös tehdä yhä korkeammista taajuuksista, koska siihen suuntaan kehitys näyttäisi olevan menossa.

Lähteet

- Agiwal, M., A. Roy ja N. Saxena. 2016. "Next Generation 5G Wireless Networks: A Comprehensive Survey". *IEEE Communications Surveys Tutorials* 18 (3): 1617–1655. ISSN: 1553-877X. doi:10.1109/COMST.2016.2532458.
- Andrews, J. G., S. Buzzi, W. Choi, S. V. Hanly, A. Lozano, A. C. K. Soong ja J. C. Zhang. 2014. "What Will 5G Be?" *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 32 (6): 1065–1082. ISSN: 0733-8716.
- Datta, P., ja S. Kaushal. 2014. "Exploration and comparison of different 4G technologies implementations: A survey", 1–6. doi:10.1109/RAECS.2014.6799517.
- Al-Falahy, N., ja O. Y. Alani. 2017. "Technologies for 5G Networks: Challenges and Opportunities". *IT Professional* 19 (1): 12–20. ISSN: 1520-9202. doi:10.1109/MITP.2017.9.
- Fang, Dongfeng, Yi Qian ja Rose Qingyang Hu. 2018. "Security Requirement and Standards for 4G and 5G Wireless Systems". *GetMobile: Mobile Comp. and Comm.* (New York, NY, USA) 22, numero 1 (toukokuu): 15–20. ISSN: 2375-0529. doi:10.1145/3229316.3229322. <http://doi.acm.org/10.1145/3229316.3229322>.
- Han, S., C. I. Z. Xu ja C. Rowell. 2015. "Large-scale antenna systems with hybrid analog and digital beamforming for millimeter wave 5G". *IEEE Communications Magazine* 53, numero 1 (tammikuu): 186–194. ISSN: 0163-6804. doi:10.1109/MCOM.2015.7010533.
- Höyhtyä, Marko, Olli Apilo ja Mika Lasanen. 2018. "Review of Latest Advances in 3GPP Standardization: D2D Communication in 5G Systems and Its Energy Consumption Models". Copyright - Copyright MDPI AG 2018; Last updated - 2019-01-18, *Future Internet* 10 (1): 3. <https://search-proquest-com.ezproxy.jyu.fi/docview/2002889434?accountid=11774>.
- Niu, Yong, Yong Li, Depeng Jin, Li Su ja Athanasios V. Vasilakos. 2015. "A survey of millimeter wave communications (mmWave) for 5G: opportunities and challenges". *Wireless Networks* 21 (8): 2657–2676. ISSN: 1572-8196. doi:10.1007/s11276-015-0942-z. <https://doi.org/10.1007/s11276-015-0942-z>.

Rajoria, Shweta, Aditya Trivedi ja W. Wilfred Godfrey. 2018. "A comprehensive survey: Small cell meets massive MIMO". *Physical Communication* 26:40–49. ISSN: 1874-4907. doi:<https://doi.org/10.1016/j.phycom.2017.11.004>. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187449071730112X>.

Rappaport, T. S., S. Sun, R. Mayzus, H. Zhao, Y. Azar, K. Wang, G. N. Wong, J. K. Schulz, M. Samimi ja F. Gutierrez. 2013. "Millimeter Wave Mobile Communications for 5G Cellular: It Will Work!" *IEEE Access* 1:335–349. ISSN: 2169-3536. doi:10.1109/ACCESS.2013.2260813.

Shi, Q., ja M. Hong. 2018. "Spectral Efficiency Optimization For Millimeter Wave Multiuser MIMO Systems". *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing* 12, numero 3 (kesäkuu): 455–468. ISSN: 1932-4553. doi:10.1109/JSTSP.2018.2824246.

Sim, G. H., A. Loch, A. Asadi, V. Mancuso ja J. Widmer. 2017. "5G Millimeter-Wave and D2D Symbiosis: 60 GHz for Proximity-Based Services". *IEEE Wireless Communications* 24, numero 4 (elokuu): 140–145. ISSN: 1536-1284. doi:10.1109/MWC.2017.1600098.