

Mikko Kokkonieni

Millimetriaaltojen hyödyntäminen 5G-verkoissa

Tietotekniikan kandidaatintutkielma

10. toukokuuta 2016

Jyväskylän yliopisto

Tietotekniikan laitos

Tekijä: Mikko Kokkoniemi

Yhteystiedot: mikko.a.kokkoniemi@student.jyu.fi

Ohjaaja: Tytti Saksa

Työn nimi: Millimetriaaltojen hyödyntäminen 5G-verkoissa

Title in English: Utilization of Millimeter Waves in 5G Networks

Työ: Kandidaatintutkielma

Sivumäärä: 22+0

Tiivistelmä: 5G verkkojen keskeisimpänä teknisenä eroavaisuutena nykyisiin mobiiliverkkoihin verrattuna on huomattavasti lyhyemmän signaalin aallonpituuden käyttäminen. Tässä tutkielmassa keskitytään kyseisen aallonpituuden kuvaamiseen, sen haasteisiin ja löydettyihin ratkaisuihin.

Avainsanat: 5G, langattomat järjestelmät, millimetriaallot

Abstract: The key difference of 5G networks compared to today's mobile networks is the usage of significantly shorter signal wavelength. This thesis will focus on describing those wavelengths, possible challenges and found solutions.

Keywords: 5G, wireless systems, millimeter wave

Sisältö

1	JOHDANTO	1
2	MILLIMETRIAALLOT TIEDONSIIRTOTEKNOLOGIANA.....	3
	2.1 Keskeisiä käsitteitä	3
	2.2 Mm-aaltotukimuksen lähihistoriaa.....	3
3	5G-VERKOT JA MILLIMETRIAALLOT	6
	3.1 Kaistanleveys	6
	3.2 5G runkoverkot.....	8
	3.3 Millimetriaaltojen käyttöön liittyvät tekniset haasteet ja rajoitteet	10
4	RATKAISUJA TEKNISIIN RAJOITTEISIIN JA HAASTEISIIN.....	12
	4.0.1 5G-verkkojen heterogeenisuus.....	12
	4.1 Teknologian kaupallistaminen	14
5	JOHTOPÄÄTÖKSET.....	15
	KIRJALLISUUTTA	16
	LIITTEET	19

1 Johdanto

Käyttäjien suorituskykyvaatimukset tietoliikenneverkoille kasvavat lähivuosina eksponentiaalisesti, minkä vuoksi jo nyt kehitetään aktiivisesti vasta hiljattain yleiseen käyttöön otetun 4G-teknologian seuraajaa. 5G-teknologioilta odotetaan paljon, ja niiden tulisi vastata Gupta ja Jha (2015) mukaan ainakin kuuteen haasteeseen, joita 4G-teknologioilla ei olla kyetty tehokkaasti ratkaisemaan. Näitä ovat suurempi tietoliikennekapasiteetti ja -nopeus, pienempi vasteaika, valtavasti lisääntyvä verkkoon yhdistettyjen laitteiden määrä, edullisempi hinta ja tasalaatuinen käyttökemus. Samoja asioita painotetaan myös EU:n *Mobile and wireless communications Enablers for Twenty-twenty Information Society* (METIS) -projektissa (Pirinen 2014).

On arvioitu, että vain vuosikymmenessä mobiiliverkkojen kautta kulkeva datamäärä kasvaa monta sataa kertaa suuremmaksi kuin tällä hetkellä. Kun vuonna 2010 tietoliikenneverkkoja kuormitettiin alle kolmen eksatavun verran, lähentelee kuormitus vuonna 2020 jo neljäsataa eksatavua (Cisco 2016). Kuten Andrews, Buzzi & Choi ym. (2014) sanoo, nykyisten verkkojen inkrementaalisisella kehittämisellä ei päästä edes lähelle sitä tasoa, jolla mobiiliverkkojen on oltava vuosikymmenen kulluttua. Tarvitaan uudenlaisia teknologioita, jotka paitsi vastaavat tulevaisuuden eksponentiaalisiin vaatimuksiin, myös pitävät energian kulutuksen ja muut teknologian aiheuttamat kustannukset kohtuullisina — tai kuten Pirinen (2014) sanoo: tarvitaan muutakin kuin uusi radioliityntäteknologia.

3G ja 4G-verkoissa viestinnässä käytetyt radiotaajuudet on rajattu suhteellisen kaapealle alueelle alkaen joistakin sadoista megahertseistä muutamiin gigahertseihin. Tällöin radioaallon pituus on muutamasta senttimetristä noin metriin. Nostamalla radiosignaalin taajuutta merkittävästi päästään ns. millimetriaaltojen (*millimeter wave*) alueelle. Millimetriaaltojen spektrin arvioidaan olevan kymmenestä saataan kertaa halvempi jokaista hertsiä kohden kuin 3G- ja 4G-verkkojen spektrin. Myös esimerkiksi tihentämällä tukiasemia voidaan saada 10 – 100-kertaiset säästöt (Andrews ym. 2014). Tässä tutkielmassa olen päätyntynyt rajaamaan 5G-teknologioiden tarkastelun millimetriaaltoihin: niiden tuomiin ratkaisuihin ja mahdollisuuksiin — mutta

toisaalta myös teknologian ongelmakohtiin.

Tutkielmassa selvitetään kirjallisuutta analysoimalla voidaanko millimetriaaltoja hyödyntää viidennen sukupolven langattomissa verkoissa ja mitä hyötyjä millimetriaaltojen käyttämisellä saavutetaan, mutta toisaalta myös minkälaisia ratkaisuja on kehitetty teknologian haasteisiin ja rajoituksiin.

5G-teknologiat eivät ole vielä tutkielman kirjoitushetkellä standardoituja tai valmiita. Pirinen (2014) jopa sanoo, ettei 5G:lle edes löydy yhtä uniikkia määritelmää. Aiheesta löytyvä kirjallisuus painottuu artikkeleihin, papereihin sekä konferenssimuistioihin. Aiheesta on myös julkaistu joitakin oppikirjoja, mutta olen jättänyt ne kirjallisuuskatsauksen ulkopuolelle.

Millimetriaaltojen käyttäminen reaali maailmassa on haastavaa, sillä signaali on herkkä häiriöille, eikä läpäise pintoja hyvin (Rappaport, Sun & Mayzus ym. 2013). On kuitenkin arvioitu, että tietoliikennenopeudet kasvaisivat huomattavasti siirtymällä nykyisiltä aallonpituuksilta millimetriaaltojen alueelle. Lisäksi nykyiset tietoliikenneyhteydet eivät ruuhkautuessaan pysty jatkossa palvelemaan käyttäjiä luotettavasti, kun nykyisten taajuusalueiden sallimat kaistanleveydet eivät tiedonsiirtokapasiteetiltaan riitä vastaamaan tulevaisuuden tarpeita (El Hassani S. & Haidine A. 2015).

Tutkimusmetodina käytetään systemaattista kirjallisuuskatsausta, koska se "*on tehokas tapa testata hypoteeseja, esittää tutkimuksen tuloksia tiiviissä muodossa sekä arvioida niiden johdonmukaisuutta*", kuten A. Salminen (2011) sanoo.

2 Millimetriaallot tiedonsiirtoteknologiana

2.1 Keskeisiä käsitteitä

tietoliikenneverkko

Tässä tutkielmassa tarkoitan tietoliikenneverkoilla erityisesti matkapuhelinverkkoja.

radioliityntäteknologia

Tarkoitan tällä mm. jotain seuraavista: GSM, EDGE, LTE, Bluetooth, Wi-Fi.

spektri

Radiospektri kuuluu elektromagneettiseen spektriin taajuusalueella 3Hz – 3000 GHz.

kaistanleveys

Signaalinkäsittelyssä kahden taajuuden välinen erotus. Kaistanleveyttä vastaa tietty tiedonsiirtokapasiteetti (Mb/s).

taajuusalue

(eng: *band*)

LOS ja NLOS

Käytetään kuvaamaan yhteystapaa tukiaseman ja vastaanottavan laitteen välillä. *Line-of-sight*, eli näköyhteys ja *non-line-of-sight* eli epäsuora yhteys (jokin este tukiaseman ja vastaanottavan laitteen välissä).

lähetys-/latausyhteys

(*lähetys-/latausväylä*. eng: *uplink / downlink*) lähetysyhteys on siirtoyhteys käyttäjältä (päälaite) tukiaseman suuntaan ja latausyhteys päinvastaiseen suuntaan.

2.2 Mm-aaltotukimuksen lähihistoriaa

Mm-aaltojen taajuuksia on käytetty pitkään langattomassa viestinnässä. Jagadis C. Bose demonstroi tätä jo sata vuotta sitten. Tällä hetkellä mm-aaltojen taajuudet ovat laajasti käytössä satelliittiyhteyksissä sekä runko- ja aliverkkojen välisissä backhaul-

yhteyksissä. (Ragnan, Rappaport & Erkip 2014). Itse asiassa mm-aaltoteknologioita on jo standardoitu lyhyen matkan palveluissa standardissa IEEE 802.11ad, joka määrittelee tämän hetken nopeimmat lähiveikkoyhteydet 60 GHz:n taajuusalueella. Näitä taajuuksia ei ole kuitenkaan juuri tutkittu matkapuhelinverkkojen näkökulmasta. Tähän on mahdollisesti syynä taajuusalueen signaalien suuri etenemisvaimennus ja huonot läpäisyominaisuudet, sekä sateen ja kaasujen suuri vaikutus signaaliin (Bogale & Le 2015).

Langattomien tietoliikenneyhteyksien kehittäminen vaatii maailmanlaajuisia yhteistyötä, eikä kehitystyöstä voi Rappaport ym. (2013) mukaan jättää eri maiden hallintoa ja telealan yrityksiä ulkopuolelle. Mielenkiintoisia tutkimushankkeita on käynnistetty eri puolilla maailmaa.

Etelä-Korea on käynnistänyt useita tutkimus- ja kehittämishankkeita (T&K), ja maan tarkoituksena onkin perustaa "Giga Korea" vuoteen 2020 mennessä. T&K-hankkeisiin kuuluu mm. leveämmän spektrin ottaminen käyttöön, ympäristöystävällisempien verkkojen ja laitteiden kehittäminen sekä uusien verkkotopologioiden kehittäminen (L. HyeonWoo 2012). Samsung demonstroi maailman ensimmäistä 5G:n millimetri-aaltoteknologiaa jo huhtikuussa 2013 (Roh W. 2014). Demonstraatio oli lupaava, ja indikoi sitä, että 5G teknologioiden käyttöönotto vuoteen 2020 mennessä on realistisesti saavutettavissa.

Kiinassa tuetaan vahvasti IMT-2020 Promotion Group-ryhmää ja FuTURE Forumia Kiinan teollisuus ja informaatioteknologian ministeriön ja Kansallisen kehitys- ja uudistuskomission sekä Tieteen ja teknologian ministeriön toimesta. Monet kiinalaiset yritykset osallistuvat myös 5G- ja etenkin millimetriaaltotutkimukseen. Näistä näkyvimpiä lienevät Huawei, Datang Telecom ja ZTE (Agival, Roy & Saxena 2016).

Agival ym. mukaan myös Japanissa tehdään millimetriaaltojen tutkimusta. Siellä suurimmat teleoperaattorit NTT DoCoMo, KDDI, SoftBank ja E-mobile ovat selvästi ottaneet johtoaseman tutkimuksessa.

Euroopassa Nokia Siemens Networks (NSN) kehittää 3GPP LTE-standardia. NSN:n mukaan tulevat 5G-verkot tukevat tuhatkertaisia liikennemääriä vuoden 2010 lii-

kennemääriin verrattuna. Tiedonsiirrossa ideaali- ja rajanopeudet (alhaisin nopeus, jolla käyttäjää luvataan palvella) tulevat liikkumaan 10 Gb/s ja 100 Mb/s välillä — vasteajan ollessa parhaimmillaan alle yksi millisekuntia. Myös tietoiset radioverkot (*Cognitive radio networks, CRNs*) ja itsejärjestäytyvät verkot (*Self Organizing Networks, SONS*) ovat NSN:n mukaan lupaavia teknologioita. Lisäksi tulevaisuuden verkot saattavat hyödyntää joidenkin nykyisten verkkoteknologioiden kombinaatioita (Nokia Siemens Networks 2011; Cudak, Ghosh & Kovarik ym. 2013).

El Hassani ja Haidine (2015) nostavat jalustalle New Yorkin yliopistossa tehtävän millimetriaaltojen tutkimuksen NYU WIRELESS-tutkimuskeskuksessa, jossa on tutkittu erityisesti 28 GHz ja 73 GHz:n taajuuksien hyödyntämistä urbaanissa ympäristössä. NYU-WIRELESS on yksi Yhdysvaltojen näkyvimpiä millimetriaaltojen tutkimusorganisaatioita.

3 5G-verkot ja millimetriaallot

Tähän päivään mennessä läntisessä maailmassa on julkaistu neljä mobiilia tietoliikenneverkkoa vuodesta 1980 lähtien vuosikymmenen välein. Ensimmäinen analoginen FM-tietoliikennejärjestelmä julkaistiin 1981, seuraava – tässä vaiheessa jo digitaalinen – lanseerattiin vuonna 1992. 2G-verkkojen näkyvin uusi ominaisuus oli sms-viestit. 3G-teknologia julkaistiin vuonna 2001 ja 4G vuonna 2011. 5G-teknologioiden arvioidaan tulevan käyttöön vuoteen 2020 mennessä.

3.1 Kaistanleveys

Kuten taulukossa 1 on esitetty, minkään radioliityntäteknologian käyttämä kaistanleveysvaraus ei Rappaport ym. (2013) mukaan ylittänyt 780 megahertsiä vielä vuonna 2013. Sitä voidaan pitää suhteellisen pienenä, varsinkin jos peilataan suunnitella oleviin 5G-verkkojen kaistanleveysvarauksiin (Xichun, Gani, Salleh, & Zakaria 2009).

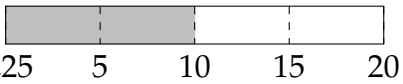
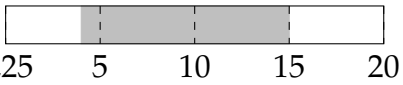
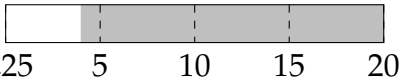
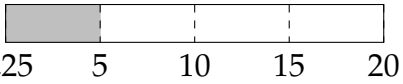
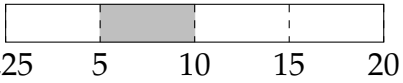
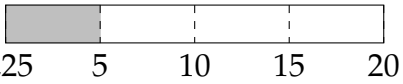
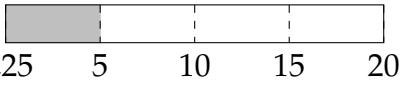
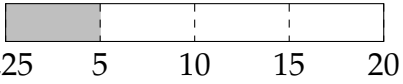
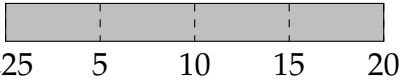
Nykyinen tukiasemadesign tukee useita erilaisia taajuusalueita. Mikä tarkoittaa, että jokaisessa lähetintornissa (*cell site*) on useita tukiasemia jokaiselle taajuudelle tai teknologialle erikseen (esim 3G, 4G, Edge). Näin voidaan palvella jokaista käyttäjää puhelimen tukemista teknologioista huolimatta. Datan liikuttaminen tapahtuu kuitenkin hyvin rajoitetulla spektrillä, mikä tarkoittaa että nykyiset langattomat mobiiliverkot tulevat ruuhkautumaan vaikeasti, mikäli spektriä ei saada tulevaisuudessa lisää käyttöön (standardi 3GPP TR 25.996 2011; standardi ITU-R M.2135 2009).

Edellä mainittu haaste on nostanut kiinnostusta millimetriaaltojen taajuusalueiden käyttönotolle. Kiinnostavat taajuudet liikkuvat 30 ja 300 GHz:n välillä, ja tarjoavat huomattavasti suuremman kaistanleveyden nykyisiin matkapuhelinverkkoihin verrattuna.

Millimetriaaltoja vastaavien taajuusien tarjoama spektri voi olla jopa kaksi sataa kertaa suurempi kuin kaikkien nykyisin käytössä olevien tietoliikenneverkkojen käyt-

tämät spektrit yhteensä. Tällä hetkellä langattomassa tiedonsiirrossa ei lähiverkoyhteyskäyttöön ottamatta juurikaan käytetä yli 3 GHz:n taajuuksia. Lisäksi mm-aaltosignaalin erittäin lyhyet aallonpituudet yhdistettynä energiatehokkaisiin CMOS (*complementary metal-oxide-semiconductor*) radiopiireihin mahdollistavat uudenlaisen laitesuunnittelun, jossa on pienessä tilassa suuri määrä pienikokoisia antenneja. Tällaisilla moniantennijärjestelmillä voidaan muodostaa sähköisesti ohjattavia suuren hyödyn antavia antenniryhmiä esimerkiksi matkapuhelimen kuoreen tai jopa piirilevyn pintaan (Ragnan ym. 2014).

Nykyisten 2G, 3G, 4G ja LTE-A-verkkojen spektri ja kaistanleveydet

Kaista	Lähetysyhteys (MHz)	Latausyhteys (MHz)	Kaistanleveys (MHz)
700 MHz	746–763	776–793	
AWS	1710–1755	2110–2155	
IMT Extension	2500–2570	2620–2690	
GSM 900	880–915	925–960	
UMTS Core	1920–1980	2110–2170	
GSM 1800	1710–1785	1805–1880	
PCS 1900	1850–1910	1930–1990	
Cellular 850	824–849	869–894	
Digital Dividend	470–854		

Taulukko 1. lähde: (Rappaport ym. 2013)

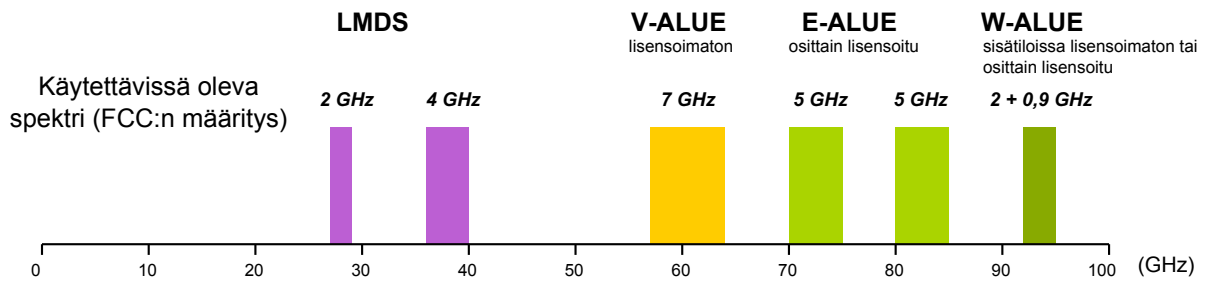
3.2 5G runkoverkot

5G-runkoverkot tulevat siirtymään kupari- ja valokuituyhteyksistä mm-aaltoyhteyksiin sallien siten uusien asemien erittäin nopean käyttöönoton ja verkkomaisen (*mesh-like*) yhteyden tukiasemien välillä (Rappaport ym. 2013). Kun pieniä soluja (ja siten tukiasemia) on 5G-arkkitehtuurin mukaisesti suuri määrä, olisi valokuituyhteyksien käyttäminen tukiasemien välillä epäkäytännöllistä ja kallista. Näin ollen mm-aaltoyhteyksien käyttäminen backhaul-yhteyksissä on perusteltua ja kustannustehokasta (Ragnan ym. 2014) .

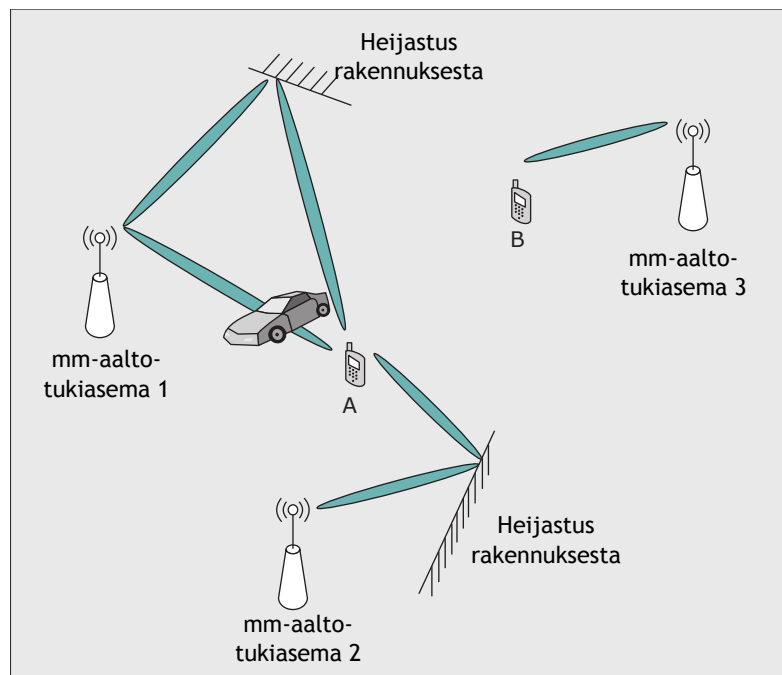
Ragnanin ryhmän aiemmat tutkimukset (2012) osoittavat, että tämän hetken backhaul-yhteyksistä 70 prosenttia toimii kuparikaapelien varassa, 10 prosenttia valokuidulla ja 15 prosenttia langattomasti. Olisi suositeltavaa käyttää langattomia yhteyksiä kupari-, ja valokuituyhteyksien sijaan, vaikkakin myös niitä tarvitaan 5G verkoissa. Tämän hetken langattomat backhaul-yhteydet on toteutettu käyttäen suurikokoisia ja kalliita antennejä, minkä vuoksi tutkimuksessa täytyy panostaa kustannustehokkaisuuteen, mutta silti luotettaviin langattomiin backhaul-teknologioihin jotta 5G-verkko on ekologisesti mahdollinen toteuttaa. (Ragnan ym. 2014)

Kaistanleveyden kasvattaminen on Bhushan, Li & Malladi ym. (2014) mukaan kaikista tehokkain ja suoraviivaisin tapa vastata ennustettuihin 5G-verkon tiedonsiirtovaatimuksiin. Kun alemmilla taajuuksilla spektrin saatavuus on riittämätön, mm-aaltojen taajuusalueella on käytettävissä valtava määrä maailmanlaajuisesti täysin käyttämätöntä spektriä, joka voisi tuoda ratkaisun todella isoihin kaistanleveyden vaatimuksiin seuraavan vuosikymmenen aikana. Suuret kaistanleveydet mahdollistavat myös yksinkertaisempien signaalirajapintojen käyttämisen hyvien tiedonsiirtonopeuksien saavuttamiseksi sen sijaan, että käytettäisiin monimutkaisia teknologioita suuren spektritehokkuuden saavuttamiseksi pienemmillä kaistanleveyksillä. Eli kun spektriä on käytettävissä enemmän, ei sitä tarvitse hyödyntää niin tehokkaasti kuin nykyisissä mobiiliverkoissa, ja silti tiedonsiirtonopeudet kasvavat valtavasti.

Millimetriaaltojen spektri on laaja ja osa siitä saattaa osoittautua sopivammaksi 5G-



Kuva 1: Yli 20 GHz spektri. Kuva: (Ghosh ym. 2014)



Kuva 2: NLOS ja LOS millimetriaalto-yhteydellä. Kuva: (Bhushan ym. 2014)

verkkoihin kuin muu spektri. (Agival ym. 2016) mukaan nyt tarvitaan syvällistä tietämystä taajuuksien ominaisuuksista, mikä auttaa parempaan verkon suunnitteluun, mutta myös mahdollistaa tehokkaamman spektrin kiintiöinnin. Tämä puolestaan mahdollistaa tehokkaiden kanavamallien kehittämisen.

Tutkimusmaailmaa kiinnostavat ryhmän Ghosh, Thomas & Cudak ym. (2014) mukaan erityisesti millimetritaaajuudet 20–90 GHz:n välillä. Erityisesti LMDS-alueen taajuudet, eli 28 ja 38 GHz:n taajuudet ovat kiinnostavia, koska kyseisellä alueella on kolmesta neljään gigahertsiä käyttökelpoista kaistanleveyttä. Toinen erityisen kiinnostava alue on E-taajuusalue, eli 70 ja 80 GHz:n taajuudet. E-alueella on jopa yhteensä 10 GHz potentiaalista kaistaa, ja se on jo valmiiksi osittain lisensoitua. Mi-

käli 5G käyttäisi E-alueita, jouduttaisiin tekemään uusia sääntöjä, mutta käyttäen tällä hetkellä sallittua kaistanleveyttä voitaisiin sääntelyn näkökulmasta helpottaa 5G:n käyttöönottoa.

Kuvassa 1 olevat taajuudet noudattavat Yhdysvaltojen Federal Communications Commission (FCC) taajuussääntelyitä. Samat taajuudet ovat kuitenkin käytettävissä monessa muussakin maassa, ja muissakin maissa on hyvin samantyyppisiä sääntelyitä 28 ja 38 GHz:n alueella. 60 GHz:n taajuus on globaalisti lisensoimaton ja käytettävissä ainakin Euroopassa, Japanissa, Koreassa, Australiassa, Kiinassa, USA:ssa ja Kanadassa. E-taajuudet on lisensoitu Euroopassa hyvin samaan tapaan kuin USA:ssakin.

3.3 Millimetriaaltojen käyttöön liittyvät tekniset haasteet ja rajoitteet

Suurin syy siihen, että millimetriaaltospektri käy tyhjäkäynnillä on suhteellisen onnettomat aaltoliikkeen etenemisominaisuudet, kuten voimakas etenemisvaimennus, ilmakehän ja sateen vaikutus signaaliin, sekä heikot diffraktio- ja esteidenläpäisyominaisuudet. Myös vahva vaihekohina ja kohtuuttomat laitekustannukset ovat omalta osaltaan vaikuttaneet millimetriaaltospektrin vähäiseen hyödyntämiseen tähän asti (Andrews ym. 2014).

Yksittäistä mm-aaltoyhteyttä ei voida pitää luotettavana, sillä signaalin eteneminen häiriintyy herkästi, ja yhteys todennäköisesti katkeaa esimerkiksi käden ollessa älypuhelimien antennin päällä. Mm-aaltoyhteyttä tukevat laitteet tulevatkin luultavimmin sisältämään hajautetusti suuren määrän pieniä antennia, jotta ainakin osa antennista olisi yhteydessä tukiasemaan. Monien antennien yhtäaikainen käyttö lisää kuitenkin merkittävästi akun kulutusta, mikä on yksi avainkysymyksistä teknologian kaupallistamisen näkökulmasta. Toinen tärkeä kysymys on, että kuinka valmistetaan suorituskykyinen, mutta silti tarpeeksi edullinen antenni niin, että se on helposti integroitavissa muihin piireihin (Kyro 2012; Ragnan ym. 2014).

Aaltoliikkeen huonot etenemisominaisuudet ja katkonainen yhteys ovat herättäneet merkittävää skeptisyyttä millimetriaaltojen taajuusalueen mahdollisuuksista järjes-

telmissä, jotka vaativat luotettavaa pitkän matkan yhteyttä tai NLOS-yhteyttä (Rapport ym. 2013). Esimerkiksi tiilen tyyppiset materiaalit voivat vaimentaa signaalia jopa 40—80 dB ja ihmisen kehokin voi aiheuttaa itsessään jopa 20-35 dB:n vaimenemisen (Khan & Pi 2011). Toisaalta ihmisen keho ja monet heijastavat rakennusten pintamateriaalit aiheuttavat mm-aaltosignaalin tärkeää siroamista, mikä mahdollistaa onnistuneen NLOS-yhteyden (kuva 2). Ilmankosteuden ja sateen aiheuttama vaimennus eivät ole Ragnanin ryhmän mielestä juurikaan ongelma millimetriaaltojen hyödyntämisessä lyhyen matkan yhteyksissä, sillä etenemisvaimennus oli ryhmän mittauksissa noin 1 dB 200 metrin matkalla. (Ragnan ym. 2014)

4 Ratkaisuja teknisiin rajoitteisiin ja haasteisiin

Friisin kaavan mukaan omnidirektionaalinen (jokaiseen suuntaan kohdistuva) etenemisvaimennus vapaassa tilassa kasvaa taajuuden neliönä (Rappaport 2002). Tämän perusteella millimetriaaltojen tulisi olla tiedonsiirtoteknologiana erittäin epäsuotuisa suuren etenemisvaimennuksen johdosta. Kun antennin koko pysyy samana ja aallonpituudet lyhenevät, antennin saanti kuitenkin paranee. Tämän seurauksena millimetriaallot eivät Ragnan ym. (2014) mielestä itsessään välttämättä johda suureen etenemisvaimennukseen vapaassa tilassa.

Ragnan-Rappaportin tutkimusryhmä ennustaa myös, että viestintä tulee nojaamaan laajasti adaptiiviseen säteen muotoiluun — paljon laajemmin kuin nykyisissä 4G-teknologioissa. Tähän liittyy vahvasti tarkasti suunnatut yhteydet, joiden johdosta linkit tulevat olemaan epärelevantteihin suuntiin eristettyjä, mikä taas johtaa siihen, että signaalihäiriöt tulevat olemaan paljon pienempi ongelma kuin nykyisissä pienisoluisissa verkoissa.

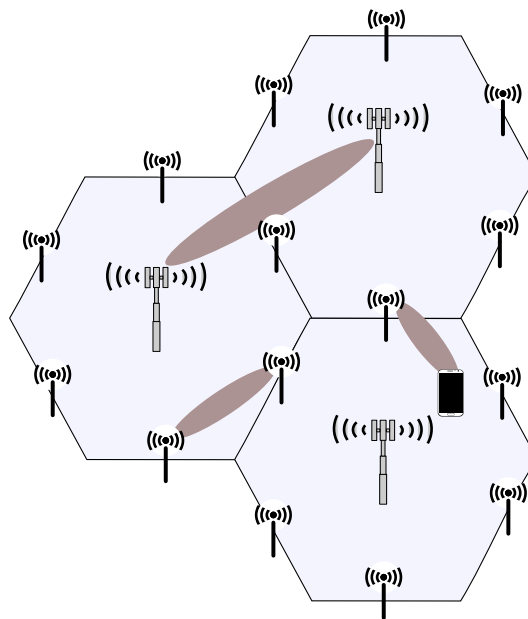
4.0.1 5G-verkkojen heterogeisuus

Millimetriaaltojen etenemisessä on kiistatta ongelmallisia rajoitteita, minkä vuoksi millimetriaaltopohjaiset matkapuhelinverkot eivät voi yksin tarjota yhtenäistä ja luotettavaa tiedonsiirtokapasiteettia kaikille käyttäjille. Tämän vuoksi millimetriaaltopohjaisten verkkojen täytyy olla luontaisesti heterogeenisia, sisältäen tavanomaisia UHF/mikroaalto-tukiasemia ja pienempiä millimetriaalto-tukiasemia, kuten kuvassa 3 on esitetty (Ragnan ym. 2014).

Arkkitehtuuriltaan heterogeeninen 5G-verkko on pienisolainen, mikä onkin 5G-verkkojen keskeisimpiä piirteitä. Tukiasemia on tällöin paljon, ja ne ovat lähekkäin. Nopea signaalihäiriön käsittely, tietoiset radioverkot ja itsejärjestäytyvät verkot mahdollistavat tiheän verkon hallinnan, mutta vaikka nämä ovatkin lupaavia 5G-tekniikoita, on niitä vielä tutkittava. (Agival ym. 2016)

Solujen suuren tiheyden lisäksi toinen heterogeenisten verkkojen tunnusomainen piirre on monen operaattorin tuki. Sisätilasolut ja solut, jotka on asennettu yksityisten rakennusten seiniin, voidaan ehkä paremmin hallinnoida kolmannen osapuolen toimesta. Tämän tahon tulisi tarjota roaming-tukea teleoperaattoreiden asiakkaille. Siinä missä roaming on yleisesti käytetty nykyisissä verkoissa, aikaskaalat mm-aaltoyhteys-roamingille tulisivat olemaan paljon lyhyempiä. Lisäksi, kun käytetään operaattoreiden yhdistelmiä, voisi olla toivottavaa, että laite voi olla yhdistettynä usean palveluntarjoajan soluun samaan aikaan (Ragnan ym. 2014).

5G-verkon käyttämä spektri luultavasti koostuu sekä vakiintuneista että uusista taajuuksista. Eri taajuudet palvelevat eri tarkoituksia ja teleoperaattoreiden avainhaasteena onkin keskittyä parantamaan taajuuksien laajempaa käyttöä eikä vain taajuuksien käytön tehokkuutta. Tutkimuskentän konsensus on, että korkeammat taajuusalueet ovat 5G-verkkoja täydentäviä taajuuksia, kun taas matalat, alle 6 GHz:n taajuudet ovat edelleen ensisijaisia taajuuksia 5G-spektrissä (Agival ym. 2016).



Kuva 3: Hybridiverkko, jossa sekä mm-aaltoyhteydet että 4G-tukiasemat. Kuva: (Agival ym. 2016)

4.1 Teknologian kaupallistaminen

Perinteisesti millimetriaaltolaitteissa on käytetty sarvi-, heijastin- ja linssiantenneja, jotka ovat tehokkaita, mutta myös isokoisia, painavia ja kalliita. Siten ne eivät sovi matalahintaisiin kaupallisiin laitteisiin, mikä olisi millimetriaaltoteknologian laajamittaisen käytön kannalta välttämätöntä. Ratkaisuna Kyrö esittää väitöskirjassaan kevyitä tasomaisia antenneja, jotka on helppo printata eristävän pinnan päälle. Tasomaisilla, piireihin integroiduilla antenneilla voitaisiin myös vähentää merkittävästi yhteyden menetyksiä ja lähetin-vastaanottimien kuluja (Kyro 2012).

Lyhyiden aallonpituuksien vuoksi piirien valmistustekniikan täytyy Kyrön mukaan olla paljon tarkempi kuin tällä hetkellä, mikä lisää kustannuksia. Lisäksi tavanomaiset edulliset alustamateriaalit eivät ole yleensä käyttökelpoisia mm-aallon taajuuksilla. Tällä hetkellä on selvästi kaksi erityyppistä ratkaisua edulliseksi mm-aaltoantenniksi: "on-chip", eli piiriin integroitu antenni ja "in-package", eli piirin kanssa samaan pakkaukseen kuuluva antenni. Jatkossa käytetään antenniratkaisujen englanninkielisiä nimityksiä.

On-chip-antennien suurin hyöty on erittäin edulliset valmistuskustannukset ja se, että antenni on suoraan piirin päällä, jolloin piiri-antennipaketin koko saadaan hyvin pieneksi. Toisaalta on-chip-antenniratkaisujen tehokkuus on pieni. Tehoa voidaan Kyrön mukaan parantaa käyttämällä jalostettuja rakenteita, kuten oikeilla alustan materiaalivalinnoilla ja optimaalisella paksuudella, sekä käyttämällä dielektrisiä linssejä. In-package-antennien etuna on parempi tehokkuus kuin on-chip-antenneilla, mutta ratkaisu on monimutkaisempi, kalliimpi ja suurikokoisempi, koska siinä käytetään erillistä antennia.

Keskeinen kaupallistamisen edellytys on yhteydet sisätiloissa oleviin käyttäjiin. Kohdullinen verkon kattavuus edellyttää, että mm-aaltosoluja sijoitetaan sisätiloihin. Sisätilojen pieniä soluja kutsutaan femtosoluiksi, ja kolmannet osapuolet voivat sopia paremmin hallinnoimaan niitä kuin teleoperaattorit. (Ragnan ym. 2014)

5 Johtopäätökset

Mobiilidatan jyrkkä kasvu ja älypuhelinien lisääntynyt käyttö luovat ennennäkemättömiä haasteita langattomien tietoliikenneyhteyksien palveluntarjoajille, koska käyttäjiä uhkaa globaalisti kaistan puute. Millimetriaallot lienevät osa tämän ongelman ratkaisua 5G-verkoissa.

Rappaport ym. (2013) ennustaa, että suurimmat erot tulevassa 5G teknologiassa nykyisiin langattomiin tietoliikenneverkkoihin nähden on paljon laajemman spektrin hyödyntäminen käyttämättömien millimetriaaltojen alueella, tarkasti suunnatut säteenmuotoiluantennit sekä mobiililaitteissa että tukiasemassa, pidempi akkukesto mobiililaitteissa, matalampi riski yhteyskatkoksiille, paljon nopeammat yhteydet suuremmalla peittoalueella, pienemmät infrastruktuurikulut ja parempi kyky palvella useita käyttäjiä yhtäaikaaisesti.

Kanavamallien tutkimus mm-aaltoyhteyksissä on hyvin aktiivista, mutta silti Agival ym. (2016) mukaan tarvitaan valtavasti lisää tietoa millimetriaaltojen kanavista ulkoympäristössä. Erityisesti kysymykset etenemisvaimennuksesta, signaalin varjostumisesta ja nopeasta häipymisestä, NLOS-säteenmuodostuksesta ja esteiden läpäisystä vaativat lisää tutkimusta.

Kirjallisuutta

- Agiwal, M., A. Roy, & N. Saxena. 2016 *Next Generation 5G Wireless Networks: A Comprehensive Survey*. IEEE Communications Surveys & Tutorials. DOI 10.1109/COMST.2016.2532458
- Andrews J., S. Buzzi, W. Choi, S. V Hanly, A. Lozano, C. K Soong & Zhang 2014. *What Will 5G Be?*. IEEE Journal on selected areas in communications, vol. 32, no 6. s. 1065–1082.
- Bhushan, N., J. Li, D. Malladi, R. Gilmore, D. Brenner, A. Damnjanovic, R. T.Sukhavasi, C. Patel, S. Geirhofer. 2014. *Network densification: the dominant theme for wireless evolution into 5G*. IEEE Communications Magazine, Vol. 52, no 2. s. 82–89.
- Bogale, T. E, L. B Le. 2015 *Massive MIMO and Millimeter Wave for 5G Wireless HetNet: Potentials and Challenges*. Ilmestyy: IEEE vehicular technology magazine, arXiv:1510.06359v1.
- Cudak, M., A. Ghosh, T. Kovarik, R. Ratasuk, T. Thomas, F. Vook & P. Moorut. 2013 *Moving towards mmwave-based beyond-4G (B4G) Technology*. IEEE Veh. Technol. Soc. Conf. s. 1–17
- Cisco. 2016 *Visual Networking Index*. Saatavilla WWW-muodossa <URL: <http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/service-provider/visual-networking-index-vni/>>. Viitattu 14.2.2016.
- El Hassani, S. & A. Haidine. 2015. *Roadmap towards beyond 4G: Key technologies and challenges for 5G*. 2015 International Conference on Wireless Networks and Mobile Communications (WINCOM). IEEE, s. 1–6
- Ghosh, A., T. A Thomas, M. C Cudak, R. Ratasuk, P. Moorut, F. W Vook, T. S Rappaport, G. R MacCartney, S. Sun. 2014 *Millimeter-Wave Enhanced Local Area Systems: A High-Data-Rate Approach for Future Wireless Networks*. IEEE Journal on selected areas in communications. Vol 32, no 6. s. 1152–1163
- Gupta, A. & R. K Jha 2015. *A Survey of 5G Network: Architecture and Emerging Technologies*. IEEE Access, Vol. 3. s. 1206–1232
- HyeonWoo, L. 2012. *4G and B4G R&D activities in Korea*. in Proc. Int. Mobile Com-

- mun. Symp., s. 1–6
- Khan, F. & Z. Pi. 2011 *An introduction to millimeter wave mobile broadband systems*. IEEE Communications Magazine. Vol. 49, no. 6. s. 101–107
- Kyro, M. 2012 *Radio wave propagation and antennas for millimeter-wave communications*. PhD diss. Aalto University.
- Nokia Siemens Networks. 2011 *2020: Beyond 4G: Radio Evolution for the Gigabit Experience*. Saatavilla WWW-muodossa
<URL: http://www.nokiasiemensnetworks.com/_le/15036/2020-beyond-4gradio-evolution-for-the-gigabit-experience>. Viitattu 9.3.2016.
- Pirinen, P. 2014. *A brief overview of 5G research activities*. 2014 1st International Conference on 5G for Ubiquitous Connectivity (5GU). IEEE, s. 17–22
- Ragnan, S., T. S Rappaport, E. Erkip. 2014 *Millimeter-Wave Cellular Wireless Networks: Potentials and Challenges*. Proceedings of the IEEE. vol 102 s. 366–385
- Rappaport, T. S, S. Sun, R. Mayzus, H. Zhao, Y. Azar, K. Wang, G. N Wong, J. K Schulz, M. Samimi & F. Gutierrez. 2013 *Millimeter Wave Mobile Communications for 5G Cellular: It Will Work!*. IEEE Access, Vol. 1. s. 335–349
- Rappaport, T. S. 2002 *Wireless Communications: Principles and Practice*. 2. painos. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice-Hall.
- Roh, W. 2014. *5G mobile communications for 2020 and beyond — vision and key enabling technology*. MC R&D Center, Samsung Electronics Corp.
- Salminen, A. 2011 *Mikä kirjallisuuskatsaus?*. Vaasan yliopisto. Saatavilla WWW-muodossa <URL: http://www.uva.fi/materiaali/pdf/isbn_978-952-476-349-3.pdf>. Viitattu 9.3.2016.
- Standard 3GPP TR 25.996. 2011 *Spatial Channel Model for Multiple Input Multiple Output (MIMO) Simulations*. Saatavilla WWW-muodossa
<URL: <http://www.3gpp.org/DynaReport/25996.htm>>. Viitattu 15.3.2016.
- Standard ITU-R M.2135. 2009 *Guidelines for Evaluation of Radio Interference Technologies for IMTAdvanced*. Saatavilla WWW-muodossa
<URL: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2135-1-2009-PDF-E.pdf>. Viitattu 14.3.2016.

Xichun, L., A. Gani, R. Salleh, & O. Zakaria. 2009 *The future of mobile wireless communication networks*. in Proc. Int. Conf. Commun. Softw. s 554–557

Liitteet

Friisin kaava:

$$\frac{P_r}{P_t} = G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2$$

missä P_r on vastaanottava antenni ja P_t lähettävä antenni. G_t ja G_r ovat antennien saannit ja R antennien etäisyys toisistaan. λ on aallonpituus.