

Simo Lehtinen

**Viidennen sukupolven matkapuhelinverkkojen
arkkitehtuuri**

Tietotekniikan kandidaatintutkielma

27. huhtikuuta 2017

Jyväskylän yliopisto

Tietotekniikka

Tekijä: Simo Lehtinen

Yhteystiedot: sijualle@student.jyu.fi

Ohjaaja: Marjaana Nokka

Työn nimi: Viidennen sukupolven matkapuhelinverkkojen arkkitehtuuri

Title in English: Architecture of the fifth generation of cellular networks

Työ: Kandidaatintutkielma

Sivumäärä: 23+0

Tiivistelmä: Tulevaisuudessa maailman mobiiliverkoissa kulkevan datan määrä kasvaa yhä kiihtyvällä tahdilla ja kirjallisuudessa on siksi pohdittu mobiiliverkkojen seuraavaa suurta kehityssaskelta. Tässä tutkielmassa käydään läpi viidennen sukupolven matkapuhelinverkoissa hyödynnettäviä teknologioita, sekä mahdollisia tapoja rakentaa 5g-verkko. Etenkin suurta verkon kapasiteettia vaativilla alueilla verkon rakenne tulee muuttumaan ja tällöin mobiiliverkot eivät ole enää yhtä makrosolupainotteisia kuin ennen.

Avainsanat: 5g, mobiiliverkko, arkkitehtuuri, piensolu, makrosolu, heterogeeninen verkko, millimetriaallot

Abstract: In future the amount of data in the world's mobile networks will increase and thus in literature there have been thoughts about the next great step in the development of mobile networks. This thesis goes through technologies usable in the fifth generation cellular networks and the ways to build a 5g-network. Especially in the areas requiring large network capacity the structure of the network will change and then the mobile networks won't be as macrocell oriented as they were before.

Keywords: 5g, mobile network, architecture, small cell, macrocell, heterogeneous network, millimeter waves

Kuviot

Kuvio 1. Potentiaalisia taajuuksia (Agiwal, Roy ja Saxena 2016)	3
Kuvio 2. Tukiaseman kehitysvaiheita (Peng ym. 2016)	9
Kuvio 3. (a) MMB-verkko ja (b) MMB- ja 4g-verkon hybridi (Pi ja Khan 2011).....	11
Kuvio 4. Wang ym. 2014 ehdotus heterogeenisen verkon arkkitehtuurista	12
Kuvio 5. NGMN:n (Next Generation Mobile Networks) visio viipaloidusta verkosta (NGMN 2015)	14

Sisältö

1	JOHDANTO	1
2	5G:N TAVOITTEIDEN MAHDOLLISTAVIA TEKNOLOGIOITA.....	3
	2.1 Millimetriaallot	3
	2.2 MIMO-tekniikat	4
	2.3 Heterogeeninen verkko.....	4
	2.4 Ohjelmisto-ohjattu verkko	5
	2.5 Verkkotoimintojen virtualisointi	5
	2.6 Itseorganisoituvat verkot	6
	2.7 D2D-tekniikat	6
3	5G:N POTENTIAALISIA ARKKITEHTUUREITA	8
	3.1 C-RAN	8
	3.2 MMverkon arkkitehtuuri	10
	3.3 Esimerkki HetNet-verkon toteutuksesta.....	11
	3.4 Slicing.....	13
4	JOHTOPÄÄTÖKSET.....	15
	LÄHTEET	17

1 Johdanto

Tulevina vuosina maailman mobiiliverkoissa liikkuvan datan määrä tulee kasvamaan kiihtyvällä tahdilla. Vuoden 2016 lopussa mobiilidataliikennettä arveltiin olleen 7.2 eksatavua kuukaudessa, ja vuoden 2015 lopussa liikennettä arvioitiin olleen 4.4 eksatavua kuukaudessa. Vuonna 2021 kuukausittaisen mobiilidataliikenteen määrän arvioidaan olevan 49 eksatavua kuukaudessa (Cisco 2016).

Mobiilidatan määrän kasvun syitä ovat mm. käyttäjäkunnan koon kasvu, kasvava datan määrä henkeä kohti sekä yhä useamman laitteen liittäminen mobiiliverkkoon tulevaisuuden konseptien kuten esineiden internetin ja älykkäiden kaupunkien myötä (Hassani ja Haidine 2015). Nykyisiin 4g-tekniikkoihin perustuvan teknologian arvellaan olevan riittämättömät vastaamaan tähän mobiilidatan kasvutahtiin, joten monet mobiiliverkkojen kehittäjät ja tutkijat ovat siirtyneet pohtimaan mobiiliverkkojen seuraavaa sukupolvea. (Andrews ym. 2014)

5g-verkolle ei ole vielä olemassa virallista standardia. Esimerkiksi Mobile and wireless communications Enablers for the Twenty-twenty Information Society (METIS) -projektin mukaan 5g:llä tulisi olla 4g:hen verrattuna kapasiteettia 10–100 -kertaiseen verkkoon liitettyjen laitteiden määrään ja vieläpä 10–100 -kertaiseen keskimääräiseen datankäyttöön käyttäjää kohden. Samalla 5g-verkoissa päätelaitteiden välisen viiveen tulisi olla viisi kertaa nykyistä pienempi (Popovski ym. 2013).

Tässä tutkielmassa pyritään saamaan kokonaiskuva siitä minkälainen 5g-verkosta mahdollisesti tulee. 5g-verkoista on paljon julkaisuja mutta virallista standardia 5g-verkolle ei vielä ole. Tämän takia julkaisut sisältävät usein spekulatiota siitä, minkälainen viidennen sukupolven mobiiliverkko tulee mahdollisesti olemaan. Näihin julkaisuihin perustuvalla kirjallisuuskatsauksella pyritään kartoittamaan millaisilla teknologioilla ja arkkitehtuureilla 5g-verkko voisi vastata sille esitettyihin vaatimuksiin, kuten korkeaan verkon kapasiteettiin ja nopeuteen.

On todennäköistä että 5g:n arkkitehtuuri tulee selvästi poikkeamaan 4g:stä. Siinä missä 4g:n kehitys keskittyi pääasiassa makrosoluihin, tulee 5g:n kehitys keskittymään enemmän myös paikallisiin pienempiin soluihin, kuten mikrosoluihin (Chen ja Zhao 2014). Pienempien

solujen hyödyistä on näyttöä jo aikaisempien mobiilisukupolviverkkojen ajoilta, ja solujen koko on kutistunut jatkuvasti (Andrews ym. 2014).

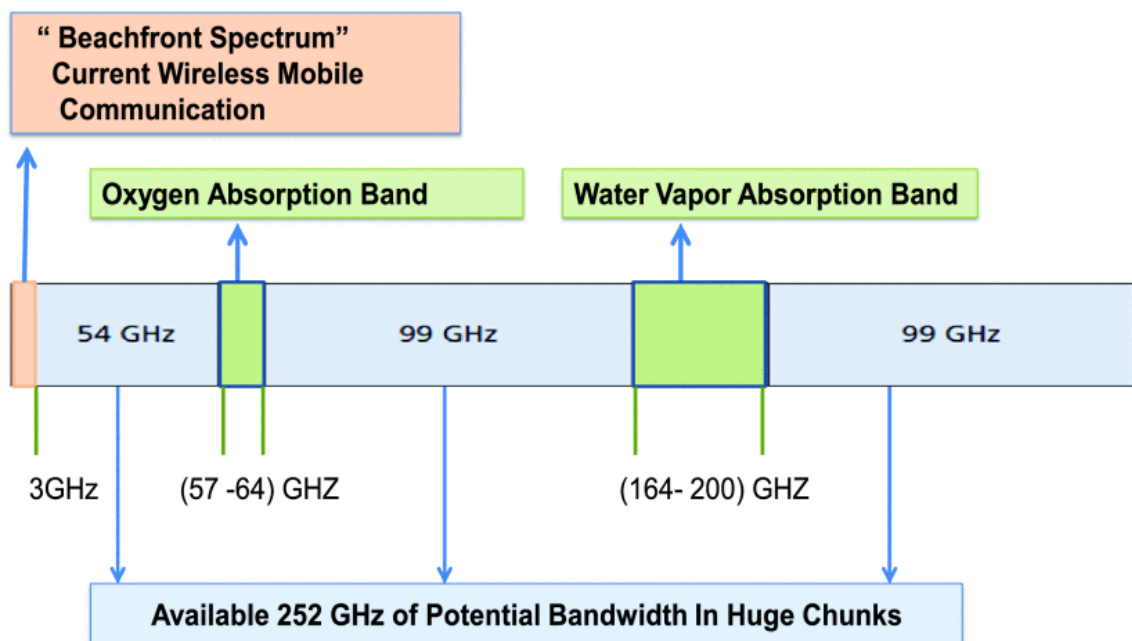
Tutkielman luvussa 2 esitellään ensin muutamia teknologioita, jotka ovat lähteiden perusteella todennäköisiä viidennen sukupolven mobiiliverkon mahdollistajia. Luvussa 3 käydään läpi neljä erilaista toteutusta 5g-verkon rakenteelle. Lopulta luvussa 4 käydään läpi lähteiden näkemyksiä 5g-verkon lopullisesta toteutuksesta.

2 5g:n tavoitteiden mahdollistavia teknologioita

Tässä luvussa käydään läpi muutamia lähteissä mainittuja teknologioita, jotka voisivat muodostaa pohjan 5g-verkolle.

2.1 Millimetriaallot

Mobiiliverkkojen käytettävissä olevien mikroaallojen taajuuksien spektri on kohtalaisen pieni, sillä se rajoittuu pariin gigahertsiin. Tämä kaistanleveys on käymässä ahtaaksi etenkin ruuhka-aikoina paikoissa, joissa on paljon mobiiliverkon käyttäjiä. Tulevaisuudessa tarvitaan lisää kaistaa, vaikka tämän nykyisen käytettävissä olevan kaistan käyttöä optimoitaisiin. Paljon käyttämätöntä spektriä löytyy millimetriaalloista, joissa taajuudet vaihtelevat 30:stä 300:an gigahertsiin, ja joissa aallonpituudet vaihtelevat yhden ja kymmenen millimetrin välillä. (Andrews ym. 2014)



Kuvio 1. Potentiaalisia taajuuksia (Agiwal, Roy ja Saxena 2016)

Yksi millimetriaallojen suurimmista käytännön haasteista on niiden huono eteneminen. Vapaassa tilassa tapahtuva etenemisen vaimentuminen on millimetriaalloilla suurempaa kuin

aiemmin käytetyillä matalilla taajuuksilla. Millimetriaallot läpäisevät myös huonosti kiinteitä objekteja, joten niiden hyödyntämiseksi tulee kiinnittää enemmän huomiota sekä verkon rakenteeseen että käyttäjän ja tukiaseman väliseen etäisyyteen. Tietyillä aallonpituuksilla olevat millimetriaallot ovat täysin soveltumattomia mobiililiikenteeseen, kuten kuvassa 1 todetaan, mutta millimetriaalloista löytyy silti erittäin paljon potentiaalista kaistaa mobiiliverkkojen käyttöön. (Agiwal, Roy ja Saxena 2016)

2.2 MIMO-tekniikat

Langattoman tiedonsiirron kapasiteetin ja toimintavarmuuden kasvattamista käyttämällä useampaa antennia on tutkittu jo pitkään. Nämä MIMO-tekniikat (Multiple-input multiple-output) ovat osa nykyisiä standardeja ja niitä hyödynnetään ympäri maailmaa. Tyypillisessä MIMO-toteutuksessa tukiasemissa käytetään kohtalaisen pientä antennimäärää (esim. alle 10) ja useammasta antennista saatu hyöty jää pieneksi. Suuremman hyödyn saamiseksi on esitetty ideoita massiivisesta MIMOsta, missä yhdessä tukiasemassa on käytössä moninkertainen määrä antennia (esim. yli 100). (Swindlehurst ym. 2014)

Larsson ym. 2014 mukaan massiivisella MIMOlla on paljon potentiaalia. Esimerkiksi mobiiliverkon kapasiteetti voisi nousta massiivisella MIMOlla jopa yli 10-kertaiseksi. Samaan aikaan verkon virrankulutus ja viive tulisivat laskemaan rajusti.

2.3 Heterogeeninen verkko

Erittäin tiheä solujen sijoittelu on yksi lupaava ratkaisu verkon kapasiteetin nostamiseen. Tätä ratkaisua kutsutaan usein heterogeeniseksi verkoksi (HetNet). Yleisesti on kaksi tapaa toteuttaa HetNet: joko kattamalla verkon alue pienemmillä samaa teknologiaa käyttävillä soluilla kuten micro-, pico- tai femtosoluilla, tai sitten kattamalla verkon alue piensoluilla, jotka käyttävät eri radioliityntäteknologioita (esim. HSPA, LTE, WiFi jne). Ensimmäisestä käytetään usein termiä monitasoinen HetNet (multitier HetNet), jälkimmäisestä taas termiä moniradiotekniikka-HetNet (multi-RAT HetNet). Qualcomm on esittänyt että piensoluja lisäämällä voidaan nostaa verkon kapasiteettia lähes lineaarisesti. Solujen koon pienentäminen kuitenkin nostaa solujen välistä häiriötä ja tuo siten uusia haasteita verkon toteuttamiseen.

(Rodriguez 2015)

2.4 Ohjelmisto-ohjattu verkko

Ohjelmisto-ohjattu verkko (Software Defined Networking, SDN) on menetelmä, jolla voidaan luoda älykkäitä ohjelmitavia verkkoja. SDN:ssä hallintataso (control plane), joka vastaa mm. pakettien ohjauksesta ja tiedonvälitystaso (data plane) erotetaan toisistaan. Tämä yksinkertaistaa verkon hallintaa ja helpottaa uusien palveluiden tai kokoonpanomuutosten lisäämistä verkkoon. (Chin, Fan ja Haines 2014).

SDN:ssä ohjaus siirretään pois yksittäisestä verkon solmusta erilliseen keskitettyyn ohjaimiin. SDN-kytkimiä ohjaa verkkokäyttöjärjestelmä, joka kerää tietoa verkosta ja tarjoaa ohjaimelle tietoa verkon topologiasta. Ohjain voi siten hyödyntää verkon tuntemusta optimoidakseen verkon toimintaa. Andrews ym. 2014 mukaan langattoman verkon näkökulmasta SDN:ää tulisi harkita työkaluna seuraavan sukupolven runkoverkkojen jakamiseen.

2.5 Verkkotoimintojen virtualisointi

Palveluntarjonta tietoliikennealalla on perinteisesti perustunut siihen että verkko-operaattorit ottavat käyttöön fyysisen laitteen ja varusteet jokaiselle toiminnolle, joka kuuluu annettuun palveluun. Käyttäjien vaatimukset monipuolisista ja uusista (usein lyhytikäisistä) palveluista jatkaa kasvuaan. Siksi tietoliikennepalveluiden tarjoajat joutuvat jatkuvasti ostamaan, varastoimaan ja operoimaan uutta fyysistä laitteistoa. Tämä vaatii korkeaa ja jatkuvasti kehittyvää osaamista teknikoilta, jotka rakentavat, operoivat ja hoitavat näitä laitteistoja sekä edellyttää myös jatkuvaa uuden verkkolaitteistojen kuten tukeasemien asentamista. Kaikki tämä johtaa korkeisiin investointi- ja ylläpitokuluihin. (Mijumbi ym. 2016)

Näitä kasvavia kuluja ei voi aina yksinkertaisesti muuntaa korkeammaksi verkon käyttömaksuiksi, sillä kovan kilpailun vuoksi tietoliikennepalveluiden tarjoajat ovat huomanneet että hintojen nostaminen johtaa usein asiakaskatoon. Siksi palveluntarjoajien on ollut pakko etsiä uusia keinoja rakentaa dynaamisempia verkkoja kulujen vähentämiseksi ja palveluiden monipuolisuuden parantamiseksi. (Mijumbi ym. 2016)

Verkkotoimintojen virtualisoinnin (Network Functions Virtualization, NFV) pääidea on fyysisten verkkolaitteiden erottaminen niiden toiminnoista. Tämä tarkoittaa sitä että verkon toiminto (esim palomuri) voidaan toimittaa palveluntarjoajalle tavallisen ohjelmiston esiintymänä. Tämä mahdollistaa monien verkkolaitteistotyyppien yhdistämisen. Tällä tavalla tarjottu palvelu voidaan osittaa virtuaalisiin verkkotoimintoihin (Virtual Network Functions, VNF). VNF:t voidaan sitten siirtää ja toteuttaa eri verkkokohteissa ilman tarvetta ostaa ja asentaa uutta laitteistoa. (Mijumbi ym. 2016)

2.6 Itseorganisoituvat verkot

Itsestään organisoituvat verkot (Self-organizing networks, SON) ovat tekniikkaa joka pyrkii automatisoimaan verkon muodostamiseen ja ylläpitoon liittyviä toimintoja. Melkein 80% langattomasta tiedonsiirrosta syntyy sisätiloissa. Tämän suuren liikennemäärän siirtämiseksi tarvitaan hyvin tiheitä piensoluverkkoja. Usein näiden verkkojen asentamisesta ja ylläpidosta vastaavat käyttäjät ja ne saattavat sijaita operaattorien hallinnan ulottumattomissa. Näiden sisätiloissa olevien piensolujen tulee olla itsestään konfiguroituvia ja niiden asentamisen tulee olla kohtalaisen yksinkertaista. Lisäksi niiden tulee voida älykkäästi sopeutua lähellä oleviin piensoluihin, jotta solujen välistä häiriötä saataisiin minimoitua. (Rodriguez 2015)

2.7 D2D-tekniikat

Matkapuhelinverkossa D2D-yhteydellä (Device to device) tarkoitetaan kahden päätelaitteen välistä suoraa yhteyttä. Perinteisessä matkapuhelinverkossa kaikki tietoliikenne kulkee tukiaseman kautta myös tilanteessa, jossa keskenään yhteydessä olevat päätelaitteet olisivat tarpeeksi lähellä toisiaan D2D-yhteyden hyödyntämiseksi. (Asadi, Wang ja Mancuso 2014)

Vanhemmissa puheen välitykseen perustuvissa verkoissa yleensä oletettiin että yhteyden osapuolet olisivat kaukana toisistaan. Nykyisellä datasiirron aikakaudella tämä perusoletus ei aina pidä paikkaansa ja usein syntyykin tilanteita, joissa kohtalaisen lähellä toisiaan olevat laitteet kommunikoivat toistensa kanssa. Näiden laitteiden välisen kommunikaation hoitaminen mobiiliverkon tukiaseman avulla on tehotonta. Tällöin päätelaitteiden välinen data-liikenne kulkee useamman langattoman siirron kautta, kun se voitaisiin teoriassa hoitaa yh-

dellä siirrolla, jolloin yhteyden viive olisi paljon pienempi. Matkapuhelinverkon tukiaseman kautta tehty siirto tarvitsee myös enemmän virtaa ja paikallinen D2D-siirto voisi esimerkiksi säästää päätelaitteiden akkuja (Boccardi ym. 2014).

Virransäästön lisäksi D2D on myös lupaava tapa parantaa verkon kattavuusaluetta ja verkon kapasiteettia. Esimerkiksi tukiaseman kattavuusalueella olevaa D2D:tä tukevaa laite voidaan hyödyntää välittäjäsolmuna, jolloin muut laitteet voivat olla yhteydessä tukiasemaan välittäjäsolmuksi asetetun laitteen välityksellä (Asadi, Wang ja Mancuso 2014). Boccardi ym. 2014 näkevät D2D:n tärkeänä mahdollistajana sovelluksiin, jotka vaativat hyvin pientä viivettä, etenkin tulevaisuuden verkkototeutuksissa, joissa hyödynnetään kantataajuuksien keskittämistä ja virtualisointia.

3 5g:n potentiaalisia arkkitehtuureita

Tässä luvussa käydään läpi neljä erilaista tapaa toteuttaa viidennen sukupolven mobiiliverkon rakenne. Ensimmäinen arkkitehtuuri on esimerkki ratkaisusta, jossa verkon toiminnallisuutta siirretään pois varsinaisesta tukiasemasta ja toiminnallisuus tarjotaan keskitettynä kokonaisuutena useamman tukiaseman käytettäväksi. Toisessa arkkitehtuurissa käydään läpi, miten millimetrialtoihin perustuva verkko voitaisiin toteuttaa joko kokonaan millimetrialtojen avulla tai heterogeenisenä verkkona hyödyntäen nykyistä mobiiliverkkoinfrastuktuuria. Kolmannessa arkkitehtuurissa esitellään toinen mahdollinen tapa rakentaa heterogeeninen verkko hyödyntämällä solujen koon vaihtelua erottamalla ulkotilojen ja sisätilojen mobiiliverkot toisistaan. Viimeisenä esitellään näkemys siitä, miten käyttötapausten kasvavan määrän ja erilaisten vaatimusten vuoksi mobiiliverkon rakennetta voitaisiin ajatella erilaisille käyttötapauksille suunniteltuina erillisinä kokonaisuuksina.

3.1 C-RAN

C-RAN (Cloud Radio Access Network) on verkkoarkkitehtuuri, jossa kantataajuusresurssit liitetään yhteen, jotta ne voitaisiin jakaa tukiasemien välillä. (Checko ym. 2015)

Tyypillisesti matkapuhelinverkko on jaettu soluihin ja jokainen verkon käyttäjä kommunikoi solussa toimivan tukiaseman kanssa. Tukiaseman päätoiminnot voidaan jakaa kantataajuusprosessointiin ja radiotoiminnallisuuksiin. Kantataajuusprosessointiin kuuluu esimerkiksi koodaus, modulaatio ja nopea Fourier'n muunnos. Radiotoiminnallisuuksiin kuuluu mm. digitaalinen prosessointi, taajuussuodatus ja tehon vahvistaminen. (Checko ym. 2015)

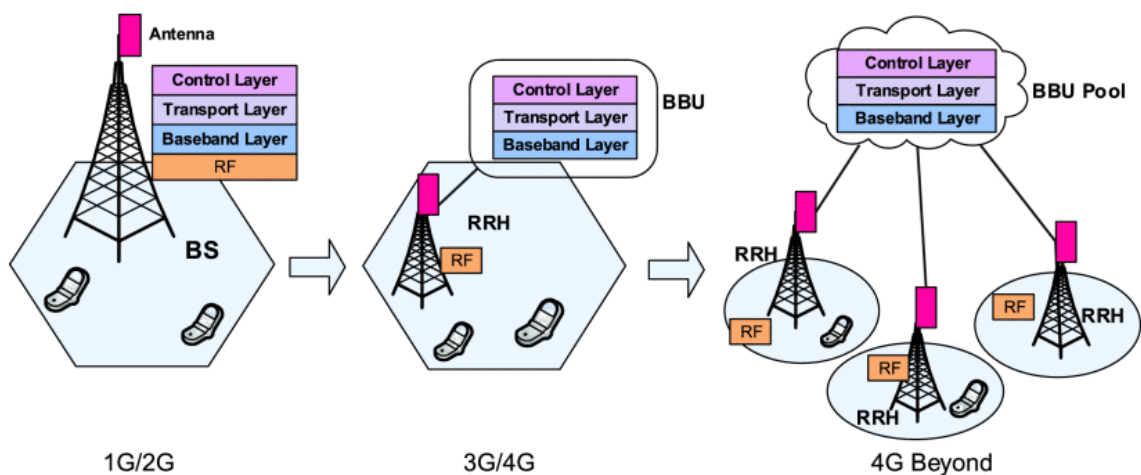
Perinteisessä arkkitehtuurissa kantataajuusprosessointi on integroitu tukiasemaan. Antenni-moduuli on yleensä sijoitettu lähelle radiomodulia, sillä niiden välillä käytetyssä koaksikaapelissa voi esiintyä häviötä. (Checko ym. 2015) Tämä rakenne oli tyypillinen etenkin 1g- ja 2g-mobiiliverkoissa. (Peng ym. 2016)

RRH-tukiasema-arkkitehtuurissa tukiasema jaetaan erilliseen signaalinprosessointiyksikköön sekä radioyksikköön, jota kutsutaan RRH:ksi (Remote Radio Head). Signaalinprosessoin-

tiyksikkö vastaa kantataajuusprosesseista ja sitä kutsutaan yleisesti kantataajuusyksiköksi tai BBU:ksi (BaseBand Unit). Vastaavasti radioyksikkö vastaa radiotoiminnallisuuksista. Tämä arkkitehtuuri otettiin käyttöön 3g-verkon rakennusvaiheessa ja se on nykyään käytössä suurimmassa osassa tukiasemia. (Checko ym. 2015)

RRH:n ja BBU:n välinen etäisyys voi olla jopa 40 kilometriä riippuen käsittely- ja etene- misviiveistä. Yleensä RRH:n ja BBU:n välillä käytetään valokuitua tai mikroaaltotaajuuk- sia. Yksi BBU voi toimia useamman RRH:n tukena, mutta perinteisesti yksittäinen RRH voi käyttää vain siihen yhdistettyä tiettyä BBU:ta. (Checko ym. 2015)

C-RAN:issa BBU:t ovat keskitetty kuvan 2 mukaisesti yhdeksi kokonaisuudeksi, jota kutsu- taan BBU-varannoksi. Näin voidaan optimoida kantataajuusyksiköiden käyttöaste eri tukia- semien välillä. BBU-varanto on virtualisoitu kokonaisuus, joka vastaa verkon kantataajuus- prosesseista. (Peng ym. 2016)



Kuvio 2. Tukiaseman kehitysvaiheita (Peng ym. 2016)

Tyypillisesti päivän aikana mobiiliverkon käyttäjämassat liikkuvat paikasta toiseen. BBU:t ovat usein mitoitettuja sijaintinsa ruuhka-aikojen tarpeisiin. Esimerkiksi kun työpäivän pää- ttyä käyttäjät siirtyvät toimistoalueilta asuinalueille niin silloin perinteisessä arkkitehtuu- rissa jää paljon käyttämätöntä prosessointitehoa alueille, joista he lähtivät pois. C-RAN:issa prosessointiteho on keskitetty BBU-varantoon, mikä mahdollistaa tasaisen prosessointitehon koko verkon alueella. On arvioitu että mobiiliverkon tarvitsema kantataajuusprosessoinnin kokonaisteho on tällöin pienempi kuin erillisten kantataajuusyksiköiden tapauksessa. (Chec-

ko ym. 2015)

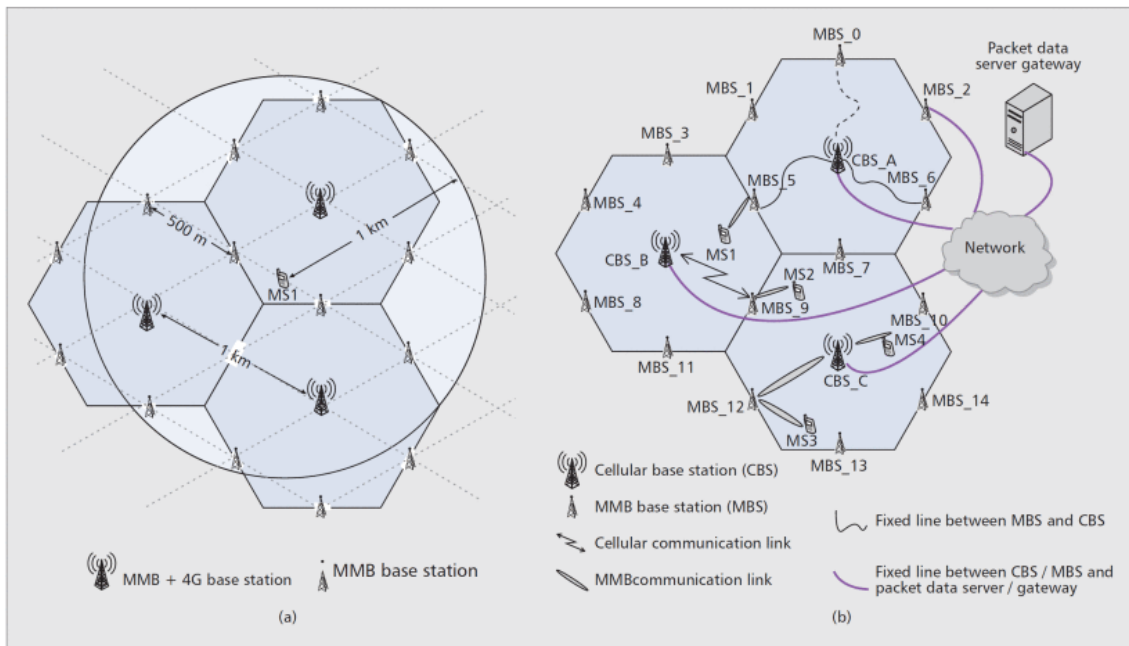
C-RAN:in arvioidaan myös säästävän energiaa sillä kantataajuusyksiköitä tarvitaan vähemmän. Lisäksi esimerkiksi yöaikaan BBU-varannosta voidaan hetkellisesti sammuttaa turhaksi käyneet BBU:t ilman että verkon kattavuus kärsii. (Checko ym. 2015)

3.2 MMverkon arkkitehtuuri

Pi ja Khan 2011 esittelevät millimetriaalto-mobiililaajakaistan (Millimeter-wave mobile BroadBand, MBB) ehdotuksena seuraavan sukupolven mobiiliverkoksi. MMB-verkko koostuu monista MMB-tukiasemista, jotka peittävät verkon alueen. Millimetriaaltojen ominaisuuksista johtuen hyvän kattavuuden varmistamiseksi MMB-tukiasemia tulee olla tiheämmässä kuin perinteisiä makrosolutukiasemia. Lähetys ja vastaanotto MMB-järjestelmässä perustuu kapeisiin säteisiin, mikä vähentää häiriötä viereisistä MMB-tukiasemista ja laajentaa MMB-linkin kantamaa. Tämä mahdollistaa merkittävän päällekkäisyyden vierekkäisten tukiasemien kattavuusalueissa. Perinteisissä mobiiliverkoissa alue jaetaan soluihin, joista jokaista solua palvelee vain yksi tai muutama tukiasema, mutta MMB-verkossa tukiasemat muodostavat eräänlaisen ruudukon, jossa on kuvan 3 mukaisesti suuri määrä soluja, joihin käyttäjä voi liittyä. Pi ja Khan 2011 mukaan MMB-tukiasemaruudukossa ei pitäisi esiintyä mobiiliverkoille tyypillistä ongelmatilannetta, jossa solun ulkoreunoilla yhteyden laatu on tavallista heikompi.

Jokaisen MMB-tukiaseman yhdistäminen langallisella yhteydellä olisi kallista ja hidasta, koska tukiasemia on paljon. Yksi ratkaisu tähän ongelmaan olisi sallia joidenkin MMB-tukiasemien yhteys runkoverkkoon toisten MMB-tukiasemien kautta. Kapeiden säteiden avulla tämä voidaan toteuttaa langattomasti ilman että aiheutetaan kovin paljon häiriötä verkossa. Tämä lisää suuresti MMB:n sijoittelun joustavuutta ja mahdollistaa tiheämmän tukiasemien sijoittelun kuin heterogeenisissä verkoissa yleensä (Pi ja Khan 2011). Myös Rodriguez 2015 ja Andrews ym. 2014 mukaan millimetriaaltoyhteys on lupaava vaihtoehto mobiiliverkon runkoverkkoyhteyksiin.

MMB:n käyttöönoton alkuvaiheessa saattaa esiintyä katvealueita niissä paikoissa, joissa MMB-tukiasemia ei ole vielä paljoa. Pi ja Khan 2011 mukaan 4g-verkoilla tulee olemaan hyvä kat-



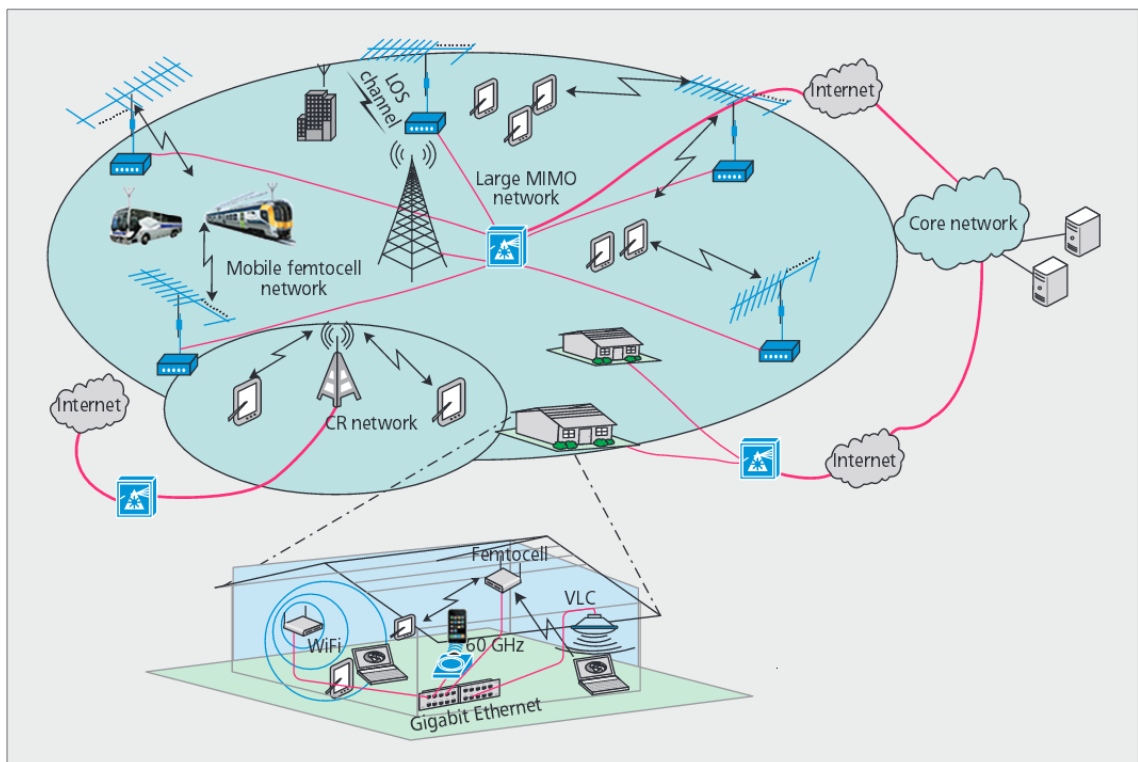
Kuvio 3. (a) MMB-verkko ja (b) MMB- ja 4g-verkon hybridi (Pi ja Khan 2011)

taavuus ja luotettavuus siinä vaiheessa kun MMB-verkkoja aletaan rakentaa. Kuvassa 3 oleva MMB- ja 4g-verkon yhdistelmä voi lisätä kattavuutta. Hybridiverkossa yhteystoiminnot kuten järjestelmätiedot, ohjauskanavat ja palautteet lähetetään 4g-verkossa, jolloin koko millimetriverkko on käytettävissä datasiirtoon. 4g:n käyttämät alle kolmen gigahertsin taajuudet läpäisevät kiinteitä objekteja paremmin ja siten on hyödyllistä siirtää yhteyden ylläpitoon tarvittavia tietoja jo nykyisinkin käytössä olevilla taajuuksilla ja käyttää millimetriaaltoja varsinaiseen datasiirtoon.

3.3 Esimerkki HetNet-verkon toteutuksesta

Kuten aiemmin mainittiin, langattoman verkon käyttäjät pysyttelevät keskimäärin 80% ajasta sisätiloissa. Perinteinen soluarkkitehtuuri käyttää yleensä ulkotiloissa olevaa tukiasemaa, joka palvelee solua solun keskipisteestä käsin riippumatta siitä ovatko käyttäjät ulko- vai sisätiloissa. Sisätiloissa olevien verkon käyttäjien signaalin täytyy mennä rakennusten seinien läpi, mistä aiheutuu häviötä joka vahingoittaa siirtonopeutta, spektrin tehokkuutta ja langattoman siirron energiatehokkuutta. (Wang ym. 2014)

Yksi heterogeenisen arkkitehtuurin tuomista eduista on erottaa sisä- ja ulkotiloissa tapahtuva verkon käyttö, jolloin seinistä ja muista kiinteistä esteistä johtuvaa häviötä voitaisiin vähentää. Tässä tehtävässä auttaa antennien sijoittelu ja MIMO-tekniikat. Wang ym. 2014 esittämässä heterogeenisen verkon arkkitehtuurissa (kuva 4) ulkotilojen tukiasemiin lisätään suuria antenniryhmiä, ja osa antenneista sijoitetaan eri puolille solua ja yhdistetään tukiasemaan valokuidulla. Ulkotilojen mobiilikäyttäjillä on yleensä rajallinen määrä antennia käytössään, mutta nämä käyttäjät voisivat toimia yhdessä eräänlaisena virtualisoituna antenniryhmänä, jolloin olisi mahdollista luoda tukiaseman ja verkon käyttäjien välille virtuaalisia MIMO-linkkejä.



Kuvio 4. Wang ym. 2014 ehdotus heterogeenisen verkon arkkitehtuurista

Wang ym. 2014 esittämässä arkkitehtuurissa suuria antenniryhmiä asennetaan myös tarvittaessa rakennuksen ulkopuolelle kommunikoimaan joko suoralla yhteydellä tukiaseman kanssa tai välillisesti tukiaseman etäantenniryhmien kautta. Näissä rakennusten läheisyyteen sijoitetuissa antenniryhmissä on langallinen yhteys sisätiloissa oleviin langattomiin tukiasemiin, jotka kommunikoivat sisätiloissa olevien verkon käyttäjien kanssa. Tällaisen arkkitehtuurin rakentaminen on perinteistä mobiiliverkkoa kalliimpaa, mutta lopputuloksena saadaan

aikaan parempi solun keskimääräinen suoritusteho, spektrin tehokkuus, energiatehokkuus ja siirtonopeus.

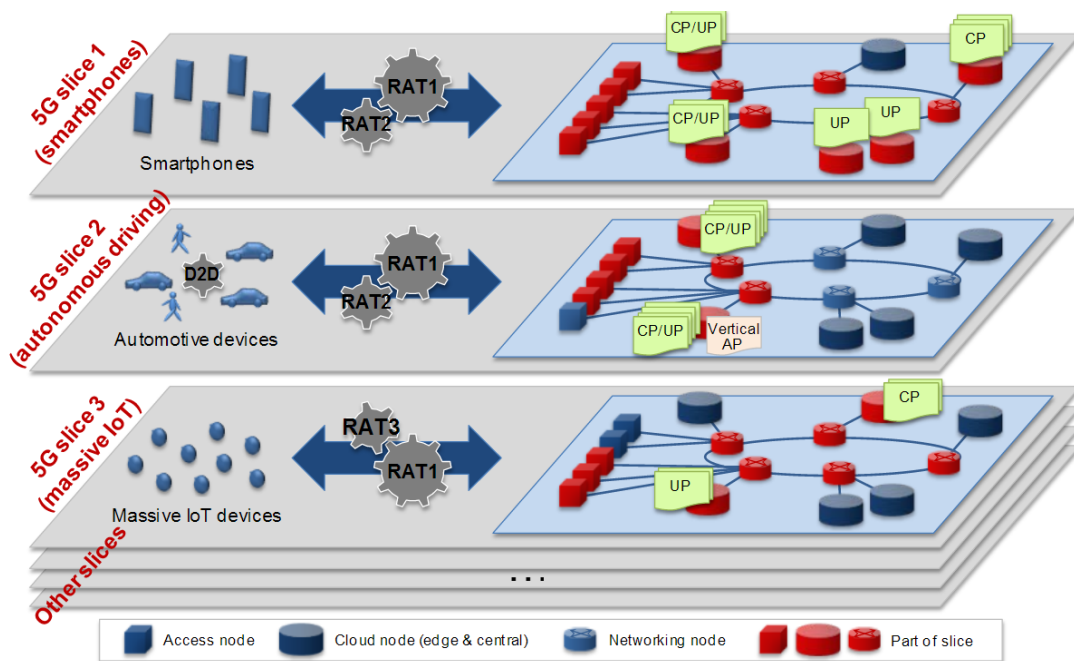
Koska tällaisessa arkkitehtuurissa sisätiloissa olevat verkon käyttäjät ovat yhteydessä vain sisätilojen tukiaseman kanssa, voidaan silloin hyödyntää monia teknologioita, jotka soveltuvat vain lyhyen matkan datasiirtoon mutta tarjoavat suuren siirtonopeuden. Tällaiseen tiedonsiirtoon sopii esimerkiksi Wi-Fi, UWB tai VLC. Myös millimetriaallot ovat hyvä vaihtoehto, sillä vaikka millimetriaaltojen läpäisykyky ja kantomatka ovat kohtalaisen huonoja, voivat ne silti sisätiloissa käytettynä nostaa siirtonopeutta.

Heterogeenissä arkkitehtuurissa mobiiliverkossa on eri kokoisia soluja. Liikkuvia käyttäjiä varten Wang ym. 2014 ehdottavat ns. mobiilia femtosolua. Mobiili femtosolu sijoitetaan ajoneuvon sisäpuolelle palvelemaan ajoneuvossa olevia verkon käyttäjiä ja suuret antenniryhmät sijoitetaan ajoneuvon ulkopuolelle kommunikoidaan ulkotilojen tukiaseman kanssa. Mobiili femtosolu ja sen käyttäjät näkyvät tukiasemalle yhtenä yksikkönä ja käyttäjän näkökulmasta mobiili femtosolu näyttää tavallisena tukiasemana.

3.4 Slicing

Yksi tapa toteuttaa 5g-verkko olisi eräänlainen "viipale", joka koostuu kokoelmasta 5g-verkkotoimintoja ja tiettyjä radioliityntäteknologioita, jotka yhdistetään tiettyä käyttötapausta tai liiketoimintamallia varten kuten kuvassa 5 on esitetty. Yksittäisen viipaleen tarkoitus on hoitaa vain liikenne, joka on tarpeellista tietyn käyttötapausten kannalta. Siksi kaikilla viipaleilla ei ole samoja toimintoja, ja joistain viipaleista saattaa jopa puuttua toimintoja, joita nykypäivänä pidetään mobiiliverkoissa välttämättöminä. Viipalekonseptin tuoma joustavuus on avaintekijä nykyisten liiketoimintojen laajentamisessa ja uusien liiketoimintojen luomisessa. Kolmannen osapuolen toimijat voisivat tarvittaessa hallita tiettyjä viipaloinnin osa-alueita, jotta he voisivat tarjota asiakkaan toiveiden mukaisesti räätälöityjä palveluita. (NGMN 2015)

Esimerkiksi älypuhelimien käyttö voitaisiin toteuttaa laittamalla täysmittaiset toiminnot jaettuna koko verkkoon. Sen sijaan esimerkiksi verkkoon kytketyn auton verkkoliikenteen hoitavassa viipaleessa tarvitaan erityisesti turvallisuutta, luotettavuutta ja mahdollisimman pientä



Kuvio 5. NGMN:n (Next Generation Mobile Networks) visio viipaloidusta verkosta (NGMN 2015)

viivettä. Verkkoon liitetyt anturit eivät taas välttämättä tarvitse liikettä tukevia verkkotoimintoja. Muitakin tiettyä tarkoitusta varten olevia viipaleita voi toteuttaa rinnakkain, ja lisäksi tulisi olla eräänlainen yleinen viipale joka tarjoaa perusyhteyden jotta verkko pärjäisi myös tuntemattomien käyttötapausten kanssa. Tuetuista viipaleista riippumatta 5g-verkon tulee sisältää toiminnallisuus, joka varmistaa kontrolloidun ja turvallisen verkon toiminnan jokaisessa tilanteessa. (NGMN 2015)

Viipalearkkitehtuurissa tulee harkita miten hienojakoisia verkon toiminnoista tehdään. Vaikka hienojakoisuus parantaa verkon joustavuutta, se voi myös tehdä verkon toteutuksesta monimutkaisempaa. Tällöin erilaisten toimintayhdistelmien ja viipaleiden toteutus tulee olemaan raskasta ja verkkojen väliset ongelmat kasvavat. Siksi on tärkeää löytää sopiva kompromissi joustavuuden ja monimutkaisuuden välillä.

4 Johtopäätökset

Tässä tutkielmassa käytiin läpi viidennen sukupolven mobiiliverkon mahdollistavia teknologioita sekä verkon toteutustapoja. Ensin esiteltiin millimetriaallot, joissa on paljon hyödynnettävissä olevia taajuuksia mobiiliverkkojen käyttöön. Tajuuksien runsaudesta johtuen millimetriaalloilla on paljon potentiaalia verkon kapasiteetin kasvattamiseen sekä kaistanleveyden myötä verkon nopeuden nostamiseen. Esimerkiksi Pi ja Khan 2011 mukaan millimetriaaltojen taajuudet voisivat tarjota mobiililaajakaistojen tarvitseman kaistanleveyden parin seuraavan vuosikymmenen ajaksi ja vielä senkin jälkeen. Swindlehurst ym. 2014 mukaan on vahvoja todisteita siitä että yhdistelmällä piensoluja, millimetriaaltoja ja massiivisia MIMO-ryhmiä voidaan reilusti kasvattaa langattomien laajakaistayhteyksien kapasiteettia ja spektrin käytön tehokkuutta. Andrews ym. 2014 pitää millimetriaaltotekniikoita mobiiliverkoille lähes välttämättöminä. Millimetriaaltojen käytössä on kuitenkin haasteita niiden huonosta etenemisestä johtuen, joten niiden hyödyntämiseksi verkon rakenne tulee suunnitella tarkoin.

Chin, Fan ja Haines 2014 muistuttavat että tällä hetkellä teollisuudella ei ole vielä yksimielistä yhtenäistä näkemystä tulevaisuuden 5g-verkon arkkitehtuurista. Jotkut suosivat verkkoa, jolla on kyky itseorganisoitumiseen SON-tekniikoiden myötä ja joiden arkkitehtuuri on hajautetumpi, kun taas toiset kannattavat keskitettympää pilvipohjaista verkkoa kuten C-RANia. SDN:n kehitys voidaan nähdä eräänlaisena kompromissina tähän, sillä se tarjoaa ohjelmoitavia ratkaisuja, joita voidaan käyttää erilaisissa verkon arkkitehtuureissa. Andrews ym. 2014 mielestä SDN ja NFV yhdessä muodostavat suuntauksen, joka edustaa suurinta edistysaskelta mobiiliviestinnässä viimeisen 20 vuoden aikana ja joka tulee muuttamaan tavan jolla verkon palveluita tarjotaan. NGMN 2015 -julkaisussa esitetty näkemys verkon räätälöimisestä eri käyttötapauksia varten tulee myös hyötymään verkkotoimintojen virtualisoinnista ja ohjelmoitavuudesta kun verkkoa tai sen osaa optimoidaan käyttötapauksen vaatimuksia vastaavaksi.

Chen ja Zhao 2014 mukaan tulevaisuuden 5g-verkko tulee olemaan heterogeeninen kerrosittainen verkko. Heidän mukaansa 4g:hen asti vallalla ollut makrosolupainotteinen suunnittelu ei pysty vastaamaan sisätiloissa ja ns. hotspoteissa syntyvään suureen dataliikenteen

tarpeeseen. Siksi 5g:n kehitys tulee haarautumaan makrosoluihin ja pienempiin paikallisiin soluihin. Myös Andrews ym. 2014 mukaan verkkojen heterogeenisyys tulee kasvamaan siirtäessä kohti 5g:n aikakautta ja keskeinen tulevaisuuden kysymys tulee olemaan se miten eri radioliityntäteknologiat sovitetaan yhteen.

Siihen, mitä verkkoteknologioita 5g-verkkoon kuuluu, ja minkälainen rakenne 5g-verkolla on saadaan varmoja vastauksia vasta kun 5g-verkot ovat standardoituja ja niitä aletaan rakentaa ja ottaa käyttöön. Kirjallisuuskatsauksessa esiin tulleet teknologiat ja arkkitehtuurit antavat kuitenkin hyvän perustan sille, millainen tämä toteutus tulee todennäköisesti olemaan.

Lähteet

- Agiwal, M., A. Roy ja N. Saxena. 2016. "Next Generation 5G Wireless Networks: A Comprehensive Survey". *IEEE Communications Surveys Tutorials* 18, numero 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, numero 6 (): 1065–1082. ISSN: 0733-8716. doi:10.1109/JSAC.2014.2328098.
- Asadi, A., Q. Wang ja V. Mancuso. 2014. "A Survey on Device-to-Device Communication in Cellular Networks". *IEEE Communications Surveys Tutorials* 16, numero 4 (): 1801–1819. ISSN: 1553-877X. doi:10.1109/COMST.2014.2319555.
- Boccardi, F., R. W. Heath, A. Lozano, T. L. Marzetta ja P. Popovski. 2014. "Five disruptive technology directions for 5G". *IEEE Communications Magazine* 52, numero 2 (): 74–80. ISSN: 0163-6804. doi:10.1109/MCOM.2014.6736746.
- Checko, A., H. L. Christiansen, Y. Yan, L. Scolari, G. Kardaras, M. S. Berger ja L. Dittmann. 2015. "Cloud RAN for Mobile Networks - A Technology Overview". *IEEE Communications Surveys Tutorials* 17, numero 1 (): 405–426. ISSN: 1553-877X. doi:10.1109/COMST.2014.2355255.
- Chen, S., ja J. Zhao. 2014. "The requirements, challenges, and technologies for 5G of terrestrial mobile telecommunication". *IEEE Communications Magazine* 52, numero 5 (): 36–43. ISSN: 0163-6804. doi:10.1109/MCOM.2014.6815891.
- Chin, W. H., Z. Fan ja R. Haines. 2014. "Emerging technologies and research challenges for 5G wireless networks". *IEEE Wireless Communications* 21, numero 2 (): 106–112. ISSN: 1536-1284. doi:10.1109/MWC.2014.6812298.
- Cisco. 2016. *Cisco VNI Mobile Forecast*. Saatavilla WWW-muodossa, <http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/mobile-white-paper-c11-520862.html>, viitattu 20.2.2017.

- Hassani, S. E., ja A. Haidine. 2015. "Roadmap towards beyond 4G: Key technologies and challenges for 5G". Teoksessa *2015 International Conference on Wireless Networks and Mobile Communications (WINCOM)*, 1–6. doi:10.1109/WINCOM.2015.7381324.
- Larsson, E. G., O. Edfors, F. Tufvesson ja T. L. Marzetta. 2014. "Massive MIMO for next generation wireless systems". *IEEE Communications Magazine* 52, numero 2 (): 186–195. ISSN: 0163-6804. doi:10.1109/MCOM.2014.6736761.
- Mijumbi, R., J. Serrat, J. L. Gorricho, N. Bouten, F. De Turck ja R. Boutaba. 2016. "Network Function Virtualization: State-of-the-Art and Research Challenges". *IEEE Communications Surveys Tutorials* 18, numero 1 (): 236–262. ISSN: 1553-877X. doi:10.1109/COMST.2015.2477041.
- NGMN. 2015. *NGMN 5g white paper*. Saatavilla WWW-muodossa, https://www.ngmn.org/uploads/media/NGMN_5G_White_Paper_V1_0.pdf, viitattu 11.3.2017.
- Peng, M., Y. Sun, X. Li, Z. Mao ja C. Wang. 2016. "Recent Advances in Cloud Radio Access Networks: System Architectures, Key Techniques, and Open Issues". *IEEE Communications Surveys Tutorials* 18, numero 3 (): 2282–2308. ISSN: 1553-877X. doi:10.1109/COMST.2016.2548658.
- Pi, Z., ja F. Khan. 2011. "An introduction to millimeter-wave mobile broadband systems". *IEEE Communications Magazine* 49, numero 6 (): 101–107. ISSN: 0163-6804. doi:10.1109/MCOM.2011.5783993.
- Popovski, P., V. Braun, H.-P. Mayer, P. Fertl, Z. Ren, D. GozalvesSerrano, E. Strom ym. 2013. *Scenarios, requirements and KPIs for 5G mobile and wireless system*. Saatavilla WWW-muodossa, https://www.metis2020.com/wp-content/uploads/deliverables/METIS_D1.1_v1.pdf, viitattu 20.2.2017.
- Rodriguez, toimittaja, Jonathan, toimittanut. 2015. *Fundamentals of 5G mobile networks*. 336. West Sussex, United Kingdom: John Wiley / Sons Limited. <http://site.ebrary.com/lib/jyvaskyla/Doc?id=11050661>.

Swindlehurst, A. L., E. Ayanoglu, P. Heydari ja F. Capolino. 2014. “Millimeter-wave massive MIMO: the next wireless revolution?” *IEEE Communications Magazine* 52, numero 9 (): 56–62. ISSN: 0163-6804. doi:10.1109/MCOM.2014.6894453.

Wang, C. X., F. Haider, X. Gao, X. H. You, Y. Yang, D. Yuan, H. M. Aggoune, H. Haas, S. Fletcher ja E. Hepsaydir. 2014. “Cellular architecture and key technologies for 5G wireless communication networks”. *IEEE Communications Magazine* 52, numero 2 (): 122–130. ISSN: 0163-6804. doi:10.1109/MCOM.2014.6736752.