

Tuukka Jurvakainen

Uusien 5G-tekniologioiden energiatehokkuus

Tietotekniikan kandidaatintutkielma

17. toukokuuta 2016

Jyväskylän yliopisto

Tietotekniikan laitos

Tekijä: Tuukka Jurvakainen

Yhteystiedot: `tuiljurv@student.jyu.fi`

Työn nimi: Uusien 5G-tekniologioiden energiatehokkuus

Title in English: New 5G technologies and energy efficiency

Työ: Kandidaatintutkielma

Sivumäärä: 19+0

Tiivistelmä: Mobiiliverkkojen datamäärän kasvaessa räjähdysmäisesti tarvitaan uutta 5G-tekniologiaa lisäämään langattomien verkkojen kapasiteettia. 5G-verkkoja kehitettäessä yksi tärkeä tutkimuskysymys on, kuinka saada niistä energiatehokkaita. Tässä tutkielmassa käydään läpi tieteellistä keskustelua aiheesta. Tieteellisestä keskustelusta keskeisimmiksi tekniologioiksi 5G-verkkoihin nousevat muun muassa laitteistotekniikan kehittyminen, millimetriaallot, kognitiivinen radioverkko, massiivinen MIMO ja heterogeeninen verkko. Tarvitaan kuitenkin lisää tutkimusta ja kehitystyötä, jotta uusista 5G-verkoista saadaan riittävän energiatehokkaita.

Avainsanat: 5G, energiatehokkuus, millimetriaallot, heterogeeninen verkko, massiivinen MIMO, kognitiivinen radioverkko

Abstract: The amount of mobile data will grow radically and that's why we need new 5G technology to increase capacity of wireless networks. When we develop 5G networks, the important research question is how to make them energy efficient. In this study we go through scientific studies about this topic. We find out that key technologies of 5G networks are hardware solutions, millimeter waves, cognitive radio network, massive MIMO and heterogeneous network. We still need more studies and development work to make new 5G technologies energy efficient enough.

Keywords: 5G, energy efficiency, millimeter waves, heterogeneous network, massive MIMO, cognitive radio network

Sisältö

1	JOHDANTO	1
2	5G-TEKNOLOGIOIDEN VAATIMUKSET JA TOTEUTUSTAVAT	3
	2.1 Vaatimukset	3
	2.2 Toteutustavat.....	4
3	5G-TEKNOLOGIOIDEN ENERGIATEHOKKUUS.....	7
	3.1 Vaatimukset	7
	3.2 Toteutustavat.....	8
	3.3 Haasteet.....	9
4	YHTEENVETO	13
	KIRJALLISUUTTA	15

1 Johdanto

Mobiiliverkkojen kuormitus tulee kasvamaan räjähdysmäisesti seuraavan kymmenen vuoden aikana ja nykyisten 4G-verkkojen kapasiteetti ei tule riittämään kasvavaan datamäärään, vaan siihen tarvitaan uutta 5G-teknologiaa (Andrews ym. 2014; Hu ym. 2014; Niu ym. 2015; Peng ym. 2015; Rappaport ym. 2013; Wang ym. 2012, 2014; Yang ym. 2015). Vuonna 2010 Länsi-Euroopassa mobiilidatan määrä oli yhteensä 186 teratavua, mutta ennusteet kertovat sen kasvavan 12540 teratavuun vuoteen 2020 mennessä, mikä tarkoittaa noin 67-kertaista kasvua (Peng ym. 2015). Maailmanlaajuinen mobiililiikenteen kasvu vuodesta 2010 vuoteen 2025 ennustetaan olevan noin 174 prosenttia (Peng ym. 2015). Mobiilidatan määrä siis kasvaa hurjasti, mutta kasvaako sähkönkulutus? Kuinka tärkeä aihe energiatehokkuus on uusissa 5G-verkkoissa suunniteltaessa? Voimmeko vaikuttaa 5G-verkkojen energiatehokkuuteen ja millaisilla tekniikoilla? Tässä tutkielmassa pyritään käymään läpi ja summaamaan tieteellistä keskustelua aiheesta.

Aihetta lähestytään tässä tutkielmassa energiatehokkuuden kannalta, sillä sähkönkulutus ja sen tuotannon aiheuttamat hiilidioksidipäästöt ovat tällä hetkellä yksi maailman suurimmista ongelmista, sillä ne kiihdyttävät ilmastonmuutosta (Wang ym. 2012). Kaikkien uusien teknologioiden tulisi ottaa huomioon tämä ongelma, sillä informaatio- ja tietoliikenneteollisuus on ja tulee olemaan kasvavalla vauhdilla yksi suurimmista yksittäisistä päästöjen aiheuttajista (Wang ym. 2012). Se yksistään aiheuttaa tällä hetkellä noin 2 prosenttia kaikista maailman kasvihuonekaasupäästöistä (Wang ym. 2012).

Toinen tärkeä syy tutkia aihetta energiatehokkuuden kannalta on uusien mobiiliverkkojen kustannustehokkuus ja ylläpito. Liikaa sähköä kuluttavaa verkkoa ei yksinkertaisesti kannata rakentaa, vaikka se olisi riittävän tehokas, sillä siitä tulee liian kallis (Andrews ym. 2014). Hyvin suunniteltu ja energiatehokas 5G-verkko taas tulee pitkällä välillä kannattavaksi, ei pelkästään ilmaston kannalta, vaan myös rahallisesti sekä kuluttajan että ylläpitäjän kannalta (Andrews ym. 2014). Energiatehokkuuden onkin sanottu olevan suurin tutkimuskysymys 5G-verkon suunnitte-

lussa (Andrews ym. 2014).

Tutkielman luvussa 2 käydään läpi yleisiä 5G-tekniologioiden vaatimuksia ja mahdollisia tekniologioita 5G-verkkojen toteutukseen. Luvussa 3 käydään läpi 5G:n mahdollisten tekniologioiden vaatimuksia ja toteutustapoja energiatehokkuuden näkökulmasta. Luvussa käsitellään myös 5G:n haasteita energiatehokkuuden osalta. Luvussa 4 tehdään johtopäätöksiä ja vedetään yhteen koko tutkielma.

2 5G-teknologioiden vaatimukset ja toteutustavat

Tässä luvussa käydään läpi yleisiä 5G-teknologioiden vaatimuksia ja mahdollisia teknologioita 5G-verkkojen toteutukseen. Näitä teknologioita ovat muun muassa laitteistotekniikan kehittyminen, millimetriaallot, kognitiivinen radioverkko, massiivinen MIMO ja heterogeeninen verkko.

2.1 Vaatimukset

Tässä osiossa esitellään vaatimuksia, joita 5G-verkoille on esitetty tieteellisessä keskustelussa. Vaatimukset liittyvät verkon nopeuteen, tietoturvaan ja energiatehokkuuteen. Näistä vaatimuksista tullaan kokoamaan standardi, jonka mukaan määritellään, millaista langatonta verkkoa voimme kutsua 5G-verkoksi. 5G:llä ei ole vielä yleispätevää standardia, mutta Andrews'n tutkijaryhmä esitti artikkelissaan vuonna 2014, että sen standardointi aloitetaan todennäköisesti noin vuosina 2016–2017 (Andrews ym. 2014). Tavoitteena olisi saada yksi, yhtenäinen ja maailmanlaajuinen standardi 5G:lle (Gohil ym. 2013). Ensimmäiset 5G-verkot tulisi saada kaupalliseen käyttöön vuoteen 2020 mennessä (Andrews ym. 2014).

Andrews'n tutkijaryhmä esittää vuonna 2014 julkaistussa artikkelissaan seuraavia vaatimuksia 5G-teknologioille. 4G:hen verrattuna 5G:n kokonaistiedonsiirtonopeuden (bittinä sekunnissa per alueyksikkö) vaatimuksena on olla noin 1000-kertainen. Rajanopeus (engl. edge rate), eli nopeus jolla voidaan palvella 95:tä prosenttia käyttäjistä, tavoitteena on olla vähintään noin 100 megabittinä sekunnissa, mikä on 100-kertainen 4G:hen verrattuna. Mahdollisesti tavoite rajanopeudelle voisi olla jopa 1 gigabitti sekunnissa, mikä on 1000-kertainen 4G:hen verrattuna. Edestakainen viive (engl. latency) 5G:ssä tulisi olla 1 millisekunti, kun 4G:ssä se on noin 15 millisekuntia. Huippunopeuden 5G-verkoissa, eli lukema jolla operaattori verkkoa myy ja markkinoi, tavoitteena on olla kymmeniä gigabittejä sekunnissa. Yhden verkon makrosolun tulisi myös pystyä palvelemaan jopa 10 000:a tai useampaa matalan tason laitetta. Nämä vaatimukset pyrkivät vastaamaan alati kasvavaan laite- ja data-

määrään langattomissa verkoissa. (Andrews ym. 2014)

Edellä esitettiin 5G-verkkojen tehokkuuteen liittyviä vaatimuksia. Verkon tehokkuuden lisäksi vaatimuksena voidaan pitää, että kustannusten ja energiakulutuksen ei tulisi ainakaan kasvaa 4G:hen verrattuna (Andrews ym. 2014). Energiankulutuksen tulisi jopa pienentyä verkkoon kytkettyä ja verkkoa välittävää laitetta kohden (Wang ym. 2012). Kyse on siis eräänlaisesta tasapainottelusta verkon tehokkuuden, kustannusten ja energiatehokkuuden välillä.

Gohilin tutkijaryhmä esittää 5G-verkkoon vaatimuksena muunneltavaa, mukautuvaa ja kevyttä tietoturvaa. Samoin tutkijaryhmä esittää, että 5G-verkoissa tulisi olla suojaus häirintäsignaalia, esimerkiksi GPS-huijausignaalia, vastaan. (Gohil ym. 2013)

5G-verkkojen vaatimusten määrittelyssä pääosassa tieteellisessä keskustelussa näyttää olevan verkon nopeus (Andrews ym. 2014; Wang ym. 2014; Yang ym. 2015). Myös verkon energiatehokkuuden vaatimuksia käsitellään laajalti (Andrews ym. 2014; I ym. 2014; Wang ym. 2012). Verkon tietoturvan vaatimuksia ei juuri kukaan tässä tutkielmassa käytetyistä lähteistä maininnut, lukuun ottamatta Gohilin tutkijaryhmää (Gohil ym. 2013).

2.2 Toteutustavat

Tehokkaamman verkon toteuttamiseen on monia keinoja. Muun muassa tukiasemia lisäämällä, toisin sanoen verkon solukokoa pienentämällä, voidaan saavuttaa suurempia tiedonsiirtonopeuksia (Andrews ym. 2014). Tämä yksinkertainen, mutta tehokas tapa onkin ollut yksi aiempien sukupolvien mobiiliverkkojen keino kasvattaa tiedonsiirtonopeutta (Andrews ym. 2014).

Laitteiston tehoa parantamalla, esimerkiksi antennitekniikkaa kehittämällä, voidaan verkon tehoa kasvattaa luontaisesti (Andrews ym. 2014). Lähetys- ja vastaanottolaitteiston tekniikan kehittäminen ei kuitenkaan läheskään yksin riitä, vaan 5G-verkko vaatii parempia suunnitteluratkaisuja ja uutta teknologiaa (Andrews ym. 2014).

Suurentamalla nykyistä kapeaa kantoaallon taajuusaluetta millimetriaaltotaajuuksille, voidaan verkon datakapasiteettia kasvattaa ja edestakaista viivettä pienentää merkittävästi (Rappaport ym. 2013). Nykyinen kantoaallon taajuusalue on jo lähes täyteen ahdettu, mutta millimetriaallot voisivat ratkaista tämän taajuusalueen ruuhkan, sillä ne kattavat suuren käyttämättömän taajuusalueen 30 ja 300 gigahertsin väliltä (Niu ym. 2015; Rappaport ym. 2013). Millimetriaaltotekniikalle on jo muun muassa esitetty kaksi standardia, IEEE 802.15.3c ja IEEE 802.11ad (Niu ym. 2015). Tieteellisestä keskustelusta käy hyvin ilmi, että millimetriaaltojen kattaman taajuusalueen hyödyntäminen on yksi 5G:n avainteknologioista (Andrews ym. 2014; Boccardi ym. 2014; Niu ym. 2015; Rappaport ym. 2013).

Wangin tutkijaryhmä esittää vuoden 2014 artikkelissaan kognitiivista radioverkkoa (engl. cognitive radio network), jolla voitaisiin tehostaa ruuhkaista kantoaallon taajuusalueen käyttöä. Siinä toissijainen järjestelmä voisi jakaa taajuusaluetta reaaliajassa ensisijaisen lisensoidun järjestelmän kanssa. Tämä auttaisi ratkaisemaan sitä ongelmaa, että nykyisellään suuria osia kantoaallon radiospektristä ei hyödynnetä täydellisesti koko ajan. Kognitiivinen radioverkko pystyisi havaitsemaan nämä hetkellisesti käyttämättömät radiospektrin alueet ja ottamaan ne käyttöön. (Wang ym. 2014)

MIMO-teknologia (Multiple-Input and Multiple-Output) esiintyi ensimmäistä kertaa WiFi-järjestelmissä vuonna 2006 ja 3G-järjestelmissä pian sen jälkeen (Andrews ym. 2014). Siinä datan lähettämiseen ja vastaanottamiseen käytetään useampaa eri antennia (Andrews ym. 2014). 5G:hen on esitetty uutta teknologiaa, joka kulkee nimellä massiivinen MIMO (engl. massive MIMO) (Boccardi ym. 2014). Siinä tukiasemien antennien määrää reilusti lisäämällä voidaan saavuttaa huomattavaa spektristä tehokkuutta, joka taas kasvattaa tiedonsiirtonopeutta (Boccardi ym. 2014). Tätä ratkaisua on pidetty erityisen hyvänä verkon tehokkuuden kasvattajana, sillä tukiasemiin voidaan lisätä antennia lähes rajatta (Boccardi ym. 2014).

Heterogeeniseksi verkoksi (engl. heterogeneous network tai HetNet) kutsutaan langatonta verkkoa, jossa on useita tukiasemia eli solmuja, joilla on erilaiset lähetystehot ja peittävyysalueet (Hu ym. 2014; Wang ym. 2014). Tämän tekniikan hyväk-

si käyttäminen ja tehostaminen on ollut viimeisimpiä puheenaiheita 5G-verkkojen suunnittelussa, koska sillä voidaan parantaa verkon kapasiteettia ja peittävyttä, sekä säästää energiaa (Hu ym. 2014; Yang ym. 2015). Perinteisessä homogeenisessä verkossa matkapuhelin tai vastaava laite toimii yhteydessä vain kaikista voimakkaimmin toimivan solmun kanssa (Hu ym. 2014). Heterogeenisessä verkossa taas pyritään käyttämään myös matala tehoisia solmuja, joiden avulla verkon kattavuus, nopeus ja energiatehokkuus kasvavat (Hu ym. 2014).

Älykkäät suunnitteluratkaisut, uudet teknologiset innovaatiot ja laitteiston tekniikan kehittyminen ovat siis kaikki yhdessä keinoja uuden 5G-verkon luomisessa.

3 5G-teknologioiden energiatehokkuus

Luvussa 2 esiteltiin yleisiä vaatimuksia ja toteutustapoja uusille 5G-teknologioille. Tässä luvussa käsitellään yksityiskohtaisemmin 5G:n energiatehokkuuden vaatimuksia, toteutustapoja ja haasteita. Tulevaisuuden 5G-verkoissa ennustetaan olevan miljoonia tukiasemia enemmän, sekä miljardeja enemmän laitteita käyttävän tätä verkkoa verrattuna nykyiseen 4G-verkkoon (I ym. 2014). Tämä luonnollisesti lisää sähkönkulutusta. Sähkönkulutus lisää verkon käytön ja ylläpidon kustannuksia, joten siihen tulee kiinnittää huomiota (Andrews ym. 2014). Myös sähköntuotannon aiheuttamat hiilidioksidipäästöt ja niistä aiheutuva ilmastonmuutos ovat yksi maailman suurimmista ongelmista, joka vaikuttaa myös tulevien sukupolvien elämään (Wang ym. 2012). Näiden syiden takia on erityisen tärkeää pohtia, miten saada verkoista mahdollisimman energiatehokkaita.

3.1 Vaatimukset

Vähimmäisvaatimuksena 5G:n energiatehokkuudelle voidaan pitää sitä, että sähkönkulutuksen ei tulisi ainakaan kasvaa per tukiasema, eli energiatehokkuuden pitää kasvaa samassa suhteessa kuin tiedonsiirtonopeus (Andrews ym. 2014). On esitetty myös radikaalimpia vaatimuksia, että pitäisi selvästi pyrkiä sähkönkulutuksen vähenemiseen 5G-verkoissa siten, että operaattorien ja laitevalmistajien laitteiden ekologinen kuormitus luonnolle vähenisi 40–50 prosenttia (Wang ym. 2012). Toisaalta energiatehokkaan sekä nopean verkon ylläpito ja rakentaminen ei saisi olla myöskään liian kallista (Andrews ym. 2014). Ongelmana on, että useimmiten halutaan mahdollisimman nopeaa ja mahdollisimman halvalla. Tällöin ei kiinnitetä huomiota verkon energiatehokkuuteen tarpeeksi (Wang ym. 2012). Toisaalta verkon energiatehokkuudella pystytään laskemaan myös verkon ylläpidon kustannuksia, kun sähkönkulutus on hillittyä (Wang ym. 2012). Siksi niin kutsuttu vihreä teknologia ja kustannustehokkuus eivät ole mitenkään toisiaan pois sulkevia, vaan tasapaino on löydettävissä (Wang ym. 2012).

Langallisissa tietoverkoissa loppukäyttäjä vastaa 70:stä prosentista kaikesta energiankulutuksesta ja verkon tarjoaja vain 30:stä prosentista (Wang ym. 2012). Langattomissa verkoissa kuten 5G, loppukäyttäjä vastaa energiankulutuksessa vain 10:stä prosentista, kun taas verkon tarjoaja vastaa 90:stä prosentista (Wang ym. 2012). Tämän vuoksi energiatehokkuuden kannalta on tärkeää keskustella erityisesti itse verkon suunnittelusta ja sen energiankulutuksesta, eikä niinkään verkkoja käyttävistä laitteista ja niiden energiankulutuksesta.

3.2 Toteutustavat

5G-verkon tulisi lähteä jo suunnittelultaan siitä, että energiatehokkuus on yksi sen pääprioriteeteista (Andrews ym. 2014; I ym. 2014). Pelkällä hyvällä suunnittelulla voidaan saavuttaa suuria etuja energiatehokkuudessa. Esimerkkeinä hyvästä suunnittelusta ovat tukiasemat ja niiden määrän optimointi (Andrews ym. 2014; Hu ym. 2014). Tehokkaalla määrän optimoinnilla tukiasemia ei pystytetä turhaan, jolloin verkon sähköntarve vähenee (Andrews ym. 2014; Hu ym. 2014). Myös tehokkaasti suunnitellut algoritmit tilanteissa, joissa arvioidaan voiko tukiasema olla lepotilassa vai hereillä, ovat esimerkkejä hyvästä energiatehokkaasta suunnittelusta (Oh ym. 2010).

Massiivinen MIMO lisää verkon spektristä tehokkuutta (Boccardi ym. 2014), kuten totesimme luvussa 2, ja samalla se lisää myös verkon energiatehokkuutta (Yang ym. 2015). Massiivisen MIMOn hyödyt tulevat esiin erityisesti suurilla antenniryhmillä (Yang ym. 2015). Massiivisen MIMOn hyödyntäminen energiatehokkaasti vaatii kuitenkin myös hyvää suunnittelua (Boccardi ym. 2014). Kun pystytään optimoimaan tarpeellisten käytettävien antennien määrä algoritmisesti juuri oikein, niin energiatehokkuus ja spektrinen tehokkuus saadaan maksimoitua (Boccardi ym. 2014; Wang ym. 2014). Tutkimuksissa massiivista MIMOa käyttämällä on jo pystytty parantamaan verkon energiatehokkuutta merkittävästi (Wang ym. 2014).

Luvussa 2 esiteltiin kognitiivinen radioverkko, jossa kantoaallon taajuusalueita voitiin jakaa reaaliajassa (Wang ym. 2014). Kognitiivista radioverkkoa käyttämällä ver-

kon spektrinen tehokkuus kasvaa, joka kasvattaa myös verkon energiatehokkuutta (Wang ym. 2014).

Heterogeenisiin verkkoihin on esitetty tukiasemille monikerroksista arkkitehtuuria, jolla voidaan kohdentaa tukiasemien resursseja (Hu ym. 2014). Tätä niin kutsuttua vihreää heterogeenistä verkkoa (engl. green HetNet) esitetään yhdeksi malliksi uusiin 5G-teknologioihin (Hu ym. 2014). Siinä pystytään solmujen yhteistyöllä kohdentamaan verkon resursseja paremmin (Hu ym. 2014). Etuna saadaan sekä tehokkaampi verkko että suurempi energiatehokkuus, mutta tällä arkkitehtuurimallilla on vielä monia haasteita ratkaistavanaan (Hu ym. 2014; Yang ym. 2015). Esimerkiksi Hun tutkijaryhmän mukaan jokaisen verkon kerroksen erilainen lähetysteho ja peittävyysalue on haaste, joka vaatii lisää tutkimusta ja kehitystyötä, jotta jokaista verkon kerrosta pystytään koordinoimaan järkevästi (Hu ym. 2014).

Tieteellisessä keskustelussa on pohdittu uusiutuvan energian hyödyntämistä tukiasemissa, minkä avulla tukiasema saataisiin itse tuottamaan osa tarvitsemastaan sähköstä (Wang ym. 2012). Esimerkiksi tukiasemat, jotka tuottavat osan sähköstään tuuli- ja aurinkovoimalla, ovat mahdollinen ratkaisu (Wang ym. 2012). Esimerkiksi Japanin suurin matkapuhelin operaattori NTT on jo toteuttanut 3G-tukiaseman nimeltä DoCoMo Eco Tower, joka käyttää energiakseen pelkkää itse tuottamaansa tuuli- ja aurinkovoimaa (Wang ym. 2012). Myös kiinalaiset ovat hyödyntäneet uusiutuvaa energiaa muutamassa tuhannessa tukiasemassa (Wang ym. 2012). Kuitenkaan uusiutuvaa energiaa ei laajamittaisesti juuri hyödynnetä tietoliikennejärjestelmissä, mutta tähän tulisi tulevaisuudessa aktiivisesti pyrkiä (Wang ym. 2012). Esimerkiksi kehittyvissä maissa joidenkin tukiasemien sijainti voisi olla niin syrjässä, ettei tukiasemille ole tarjolla sähköverkkoa, mutta itse sähkönsä tuottavat tukiasemat ratkaisisivat tämän ongelman (Wang ym. 2012).

3.3 Haasteet

Luvussa 2 esitettiin, että 5G-verkkoihin lisättäisiin enemmän soluja, jolloin solukoko olisi pienempi, mutta tukiasemia olisi enemmän. Tällä keinolla pyritään kasvat-

tamaan verkon kokonaissiirtonopeutta, mutta se lisää väistämättä energiankulutusta (Andrews ym. 2014). Onkin esitetty, että 5G-verkkojen solukokoa ei tulisi pienentää, eli tukiasemia ei tulisi enää lisätä 4G-verkkoihin verraten, vaan tiedonsiirtonopeutta verkossa tulisi kasvattaa muilla menetelmillä (I ym. 2014). Toisaalta on tutkittu, että pienet mikrosolut ovat energiatehokkaampia ja jopa 10-100 kertaa halvempia isoihin makrosoluihin verrattuna, joten verkkoon voisi lisätä soluja maltillisesti (Andrews ym. 2014).

Kognitiivisen radioverkon käyttämisessä ongelmana on, että käyttäjämäärän kasvaessa verkon spektrinen tehokkuus laskee nopeasti (Wang ym. 2014). Lisäksi kognitiivisen verkon vaatima taajuusalueiden yhteiskäyttö ei ole saavuttanut suosiota, mikä on vaimentanut odotuksia tätä teknologiaa kohtaan (Boccardi ym. 2014).

Millimetriaaltoja pidetään avainteknologiana 5G-verkkoihin, mutta sen käyttöön liittyy vielä haasteita energiankulutuksen kannalta. Millimetriaaltoja käsittelevä laitteisto kuluttaa paljon virtaa, erityisesti signaalikomponentit, jotka muuntavat analogista signaalia digitaaliseksi ja toisin päin (Boccardi ym. 2014). Tähän on esitetty ratkaisuksi muun muassa yksibittisiä analogi-digitaali-muuntajia, jotka vaativat vähemmän virtaa (Boccardi ym. 2014). Boccardin tutkijaryhmä kuitenkin mainitsee artikkelissaan, että tähän teknologiaan liittyy vielä runsaasti tutkimushaasteita (Boccardi ym. 2014).

Millimetriaaltoteknologian toisena haasteena on esitetty, että korkean taajuusalueen aallot eivät läpäise helposti kiinteää materiaalia ja ne ovat alttiita häiriöille esimerkiksi sateessa ja erilaisissa kaasuisissa (Wang ym. 2014). Kuitenkin Rappaportin tutkijaryhmä toteaa suoraan, että on aivan turha pelko, että sateen tai ilmaston aiheuttamat häiriöt tekisivät millimetriaalloista hyödyttömän tekniikan (Rappaport ym. 2013). Heidän tutkimuksensa mukaan pienissä soluissa sääolosuhteiden vaihtelut eivät aiheuta merkittävää häiriötä millimetriaaltojen signaalille, etenkin 28 ja 38 gigahertsin taajuusalueella (Rappaport ym. 2013).

Langattoman verkon käyttäjät ovat 80 prosenttia ajasta sisätiloissa, joka aiheuttaa haasteita verkon energiatehokkuuden kannalta (Wang ym. 2014). Kun sisällä ole-

va käyttäjä kommunikoi ulkona olevan tukiaseman kanssa, verkon tehokkuus pienenee ja energiankulutus kasvaa signaalin joutuessa läpäisemään rakennusten seinä (Wang ym. 2014). Yhtenä 5G-tekniikan arkkitehtuurin keskeisenä haasteena on ratkaista, miten palvelu eri tavoin ulkona ja sisätiloissa olevia käyttäjiä, sekä välttää turha signaalin seinien läpäiseminen (Wang ym. 2014). Tätä pyritään ratkaisemaan esimerkiksi massiivisella MIMOlla ja heterogeenisillä verkoilla, mutta se vaatii myös lisää tehokasta algoritmista suunnittelua (Wang ym. 2014; Yang ym. 2015).

Massiivisen MIMO on erittäin lupaava tekniikka, mutta sisältää useita tutkimusta vaativia haasteita (Boccardi ym. 2014). Kanavien arvioinnin (engl. channel estimation) esitetään olevan yksi massiivisen MIMO:n kriittinen haaste ja rajoitusten lähde tällä hetkellä (Boccardi ym. 2014). Esimerkiksi liikkeessä oleva verkon käyttäjä aiheuttaa kanavien arvioinnin hankaluuksia massiivisessä MIMOssa (Boccardi ym. 2014).

Heterogeenisessä verkossa verkkoon kytketty laite ei toimi vain kaikista voimakkaimman tukiaseman kanssa, vaan käyttää myös matalatehoisia tukiasemia tiedonsiirtoon (Yang ym. 2015). Haasteita aiheuttaa korkea- ja matalatehoisten tukiasemien yhteistyö, sekä miten tietoturva voidaan toteuttaa heterogeenisessä verkossa tehokkaasti ja kevyesti (Gohil ym. 2013; Yang ym. 2015). Kuormituksen jakautuminen matalatehoisten ja korkeatehoisten tukiasemien välillä vaatii hyvää suunnittelua ja tukiasemien välistä kommunikointia (Hu ym. 2014). Tukiasemien välinen yhteistyö lisää verkon arkkitehtuurin monimutkaisuutta (Hu ym. 2014). Heterogeenisessä verkossa myös tukiasemien määrä lisääntyy kasvattaen energiankulutusta, vaikka matalatehoiset tukiasemat ovatkin korkeatehoisia tukiasemia energiatehokkaampia (Andrews ym. 2014; Hu ym. 2014). Koska tukiasemia jouduttaisiin lisäämään, niin esimerkiksi In tutkijaryhmä piti heterogeenistä verkkoa huonona ratkaisuna, eikä kannattanut sitä (I ym. 2014).

Haasteena uusiutuvan energian hyödyntämisessä tukiasemissa pidetään sen kallista hintaa (Wang ym. 2012). Kuitenkin viime vuosina uusiutuva energia on tullut yhä halvemmaksi aurinkopaneelien ja tuulitekniikan halventuessa (Wang ym.

2012). Toisena haasteena uusiutuvan energian käytössä esitetään, että pelkästään tuuli- ja aurinkovoimalla toimivat tukiasemat ovat riippuvia sääolosuhteiden vaihtelusta (Wang ym. 2012). Tämän vuoksi Wangin tutkijaryhmä esittääkin ratkaisuksi niin kutsuttuja hybriditukiasemia, jotka toimivat vain osin tuuli- ja aurinkoenergialla, sekä osin kaupallisella sähköverkolla, akuilla tai fossiilisilla polttoaineilla (Wang ym. 2012).

4 Yhteenveto

Tutkielman johdannossa asetettiin tavoitteeksi kartoittaa kattavasti, millaisia erilaisia tekniikoita tieteellisessä keskustelussa on esitetty tulevien 5G-verkkojen energiatehokkuuden parantamiseen. Heti aluksi selvitettiin, että energiatehokkuus on yksi tärkeimmistä, jollei jopa tärkein, tutkimusteema 5G-teknologioita kehitettäessä. Sen tärkeys johtuu siitä, että se lisää verkon kustannustehokkuutta, sekä siitä, että se hillitsee sähkönkulutusta ja sitä kautta kasvihuonepäästöjä, jotka ovat tällä hetkellä yksi maailman suurimmista ongelmista. Tämän jälkeen esitettiin vaatimuksia 5G-verkkoihin sekä tutkijaryhmien artikkeleissa esiin nousseita teknologioita näitä vaatimuksia vastaamaan, kuten millimetriaallot, massiivinen MIMO, heterogeeninen verkko, kognitiivinen radioverkko, laitteiston kehittäminen ja solukoon pienentäminen. Lopuksi tarkasteltiin näitä tekniikoita energiatehokkuuden näkökulmasta.

Johtopäätöksinä nousi, että kaikki verkon tehoa kasvattavat teknologiat eivät palvele energiatehokkuutta. Esimerkiksi tukiasemien lisääminen parantaa verkon tehokkuutta, mutta se lisää myös sähkönkulutusta väistämättä (Andrews ym. 2014). Tutkijaryhmien välillä oli eriäviä näkemyksiä siitä, kuinka paljon solukokoa tulisi pienentää vai tulisiko lainkaan (Andrews ym. 2014; I ym. 2014). Esimerkiksi heterogeeninen verkko jakoi mielipiteitä, koska siinä tukiasemia lisättäisiin. Osa tutkijaryhmistä piti sitä keskeisenä teknologiana 5G:hen (Hu ym. 2014), kun taas osa halusi lähestyä verkon tehokkuuden parantamista muiden, energiatehokkaampien keinojen välityksellä (I ym. 2014). Myös millimetriaaltojen hyödyntäminen 5G-verkoissa aiheutti tutkijaryhmien mukaan haasteita energiatehokkuuden näkökulmasta, sillä sitä käsittelevä laitteisto kuluttaa paljon virtaa (Boccardi ym. 2014). Energiatehokkuutta palvelevia tekniikoita olivat laitteistotekniikan kehittyminen, kognitiivinen radioverkko, massiivinen MIMO sekä uusiutuvan energian hyödyntäminen tukiasemissa (Andrews ym. 2014; Boccardi ym. 2014; I ym. 2014; Wang ym. 2012, 2014). Kaikissa näissä tekniikoissa ilmeni kuitenkin teknisiä haasteita, jotka pitää ratkaista ennen näiden tekniikoiden käyttöönottoa.

Tutkijaryhmien välillä oli myös eroja sen suhteen, kuinka paljon verkon energian-

kulutusta tulisi vähentää. Toisille riitti, ettei se ainakaan kasva verkossa olevaa laitetta kohden (Andrews ym. 2014), toisen näkemyksen mukaan sitä tulisi selvästi vähentää (I ym. 2014). Kaikki kuitenkin myönsivät, että jotain pitää tehdä kasvavalle sähkönkulutukselle.

Uusilla 5G-teknologioilla on siis vielä paljon haasteita ratkaistavanaan sekä toiminnan että energiatehokkuuden suhteen, ennen kuin niitä voidaan ottaa käyttöön. Tämä kävi tieteellisestä kirjallisuudesta selväksi, sekä myös se, että ei voida olla varmoja, riittävätkö nämä tekniset ratkaisut tekemään verkoista energiatehokkaita. Lisää tutkimuksia näistä uusista 5G-teknologioista tarvitaan, ja sitä kautta mahdollisesti jopa uusia teknologisia innovaatioita.

Kirjallisuutta

- Andrews, J.G. & Buzzi, S. & Choi, W. & Hanly, S.V. & Lozano, A. & Soong, A.C.K. & Zhang, J.C. 2014. *What Will 5G Be?*. Selected Areas in Communications, IEEE Journal , 6, s. 1062–1082.
- Boccardi, F. & Heath, R. & Lozano, A. & Marzetta, T. & Popovski, P. 2014. *Five Disruptive Technology Directions for 5G*. IEEE Communications Magazine, 2, s. 74–80.
- Gohil, A. & Modi, H. & Patel, S. 2013. *5G Technology of Mobile Communication: A Survey*. 2013 International Conference on Intelligent Systems and Signal Processing (ISSP), s. 288–292.
- Hu, R. & Qian, Y. 2014. *An Energy Efficient and Spectrum Efficient Wireless Heterogeneous Network Framework for 5G Systems*. IEEE Communications Magazine, 5, s. 95–101.
- I, C. & Rowell, C. & Han, S. & Xu, Z. & Li, G. & Pan, Z. 2014. *Toward Green and Soft: A 5G Perspective*. IEEE Communications Magazine, 2, s. 66–73.
- Niu, Y. & Li, Y. & Jin, D. & Su, L. & Vasilakos, A. 2015. *A survey of millimeter wave communications (mmWave) for 5G: opportunities and challenges*. Wireless Networks, 8, s. 2657–2676.
- Oh, E. & Krishnamachari, B. 2010. *Energy Savings through Dynamic Base Station Switching in Cellular Wireless Access Networks*. Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2010), 6-10 December 2010, s. 1–5.
- Peng, M. & Li, Y. & Zhao, Z. & Wang, C. 2015. *System Architecture and Key Technologies for 5G Heterogeneous Cloud Radio Access Networks*. Network, IEEE , 2, s. 6–14.
- Rappaport, T. & Sun, S. & Mayzus, R. & Zhao, H. & Azvar, Y. & Wang, K. & Wong, G. & Schulz, J. & Samimi, M. & Gutierrez, F. 2013. *Millimeter Wave Mobile Communications for 5G Cellular: It Will Work!*. Access, IEEE , 1, s. 335–349.
- Wang, L. & Rangapillai, S. 2001. *A Survey on Green 5G Cellular Networks*. Signal Processing and Communications (SPCOM), 2012 International Conference on, 22-25 July 2012, s. 1–5.
- Wang, C. & Halder, F. & Gao, X. & You, X. & Yang, Y. & Yuan, D. & Aggoune, H. & Haas, H. & Fletcher, S. & Hepsaydir, E. 2014. *Cellular Architecture and Key Technolo-*

gies for 5G Wireless Communication Networks. IEEE Communications Magazine, 2, s. 122–130.

Yang, N. & Wang, L. & Geraci, G. & Elkashlan, M. & Yuan, J. & Di Renzo, M. 2015. *Safeguarding 5G Wireless Communication Networks Using Physical Layer Security*. IEEE Communications Magazine, 4, s. 20–27.