

Henri Kinnunen

KANTOAALTOJEN YHDISTÄMINEN 5G-VERKOISSA

Kandidaatintyö
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Tarkastaja: Staff Scientist Joonas Säe
Toukokuu 2023

TIIVISTELMÄ

Henri Kinnunen: Kantoaaltojen yhdistäminen 5G-verkoissa
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Tietotekniikka, Tieto- ja sähkötekniikan kandidaattiohjelma
Toukokuu 2023

Kantoaaltojen yhdistäminen on matkapuhelinverkkojen menetelmä, jossa puhelin käyttää samanaikaisesti useampaa kuin yhtä verkon solua. Jokainen lisäsolu tarjoaa lisää taajuuskapasiteettia puhelimen ja verkon väliseen yhteyteen, mikä nähdään usein parantuneena tiedonsiirtonopeutena. Lisäkapasiteetti on tarpeen, sillä nykypäivänä verkoilta vaaditaan entistä enemmän, ja kantoaaltojen yhdistäminen on olennaisessa roolissa mahdollisimman suurten tiedonsiirtonopeuksien toteuttamisessa. Menetelmässä on myös potentiaalia muihinkin parannuksiin, kuten mahdollisuus laajentaa solujen maantieteellistä käyttöaluetta.

Tämän työn tavoitteena oli tutkia kantoaaltojen yhdistämisen hyötyjä ja käydä läpi prosesseja, joita menetelmä vaatii toimiakseen. Työssä keskityttiin kantoaaltojen yhdistämisen ohjelmistotason toteutukseen, eikä menty menetelmän asettamiin laitteistotason vaatimuksiin pintaa syvemmälle. Työ toteutettiin kirjallisuuskatsauksena käyttäen lähteinä 5G-verkkojen spesifikaatioita, alan kirjallisuutta ja internetistä löytyviä materiaaleja. Näistä lähdemateriaaleista koottiin tietoa menetelmän toiminnasta ja erilaisista käyttötilanteista, joihin kantoaaltojen yhdistäminen soveltuu. Lisäksi työssä pohditaan, miksi kantoaaltojen yhdistäminen soveltuu tiettyihin tilanteisiin. Työ käy myös läpi kantoaaltojen yhdistämisen eroja samankaltaisiin 5G-verkkojen ominaisuuksiin, joilla on kuitenkin oma käyttötarkoituksensa.

Työn tuloksena saatiin selville sekä prosessit että tukiaseman ja puhelimen välillä liikkuvat sanomat, joita tarvitaan kantoaaltojen yhdistämisen toiminnassa. Havaittiin, että kantoaaltojen yhdistäminen on puhelimen ja tukiaseman yhteistyötä, jossa molemmat vaihtavat tietoja keskenään ja tekevät oman roolinsa mukaiset toimenpiteet. Kävi myös ilmi, että 5G-verkossa puhelimella on hyvin vähän päätäntävaltaa ja päätökset puhelimen yhteyteen liittyen tekee tukiasema. Spesifikaatioiden ja laitevalmistajien tietojen lukeminen paljasti myös sen, että tuki kantoaaltojen yhdistämiselle vaihtelee paljon ja on kaukana siitä, mikä spesifikaatioiden puitteissa olisi mahdollista toteuttaa. Menetelmässä on paljon potentiaalia, mutta laitteiden tukemat ominaisuudet voivat rajoittaa tämän potentiaalın hyödyntämistä.

Avainsanat: 5G, kantoaaltojen yhdistäminen, CA, carrier aggregation, protokolla, 3GPP-spesifikaatiot

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1.	Johdanto	1
2.	5G-verkot	2
2.1	5G-verkkojen ominaisuudet.	2
2.2	5G-verkkojen rakenne	3
3.	Kantaaaltojen yhdistäminen	6
3.1	Yhdistämisen eri muodot ja ominaisuudet 5G-verkoissa	6
3.2	Hyödyt	8
4.	Protokollapino ja protokollat	10
4.1	Radio Resource Control	11
4.2	Medium Access Control	13
5.	Kantaaaltojen yhdistämisen toiminta 5G-verkoissa	15
5.1	SA	16
5.2	NSA	20
6.	Yhteenveto	22
	Lähteet	24

LYHENTEET JA MERKINNÄT

3GPP	3rd Generation Partnership Project
5GC	5G core
CA	Carrier Aggregation
CSI	Channel State Information
DC	Dual Connectivity
DL	Downlink
eMBB	enhanced Mobile Broadband
EN-DC	E-UTRA NR Dual Connectivity
EPC	Evolved Packet Core
FDD	Frequency Division Duplex
FR1	Frequency Range 1
FR2	Frequency Range 2
FWA	Fixed Wireless Access
HARQ	Hybrdi Automatic Repeat Request
IoT	Internet of Things
LAN	Local Area Network
MAC	Medium Access Control
MAC CE	MAC Control Element
mMTC	massive Machine Type Communications
NSA	Non-Standalone
PDCCH	Physical Downlink Control Channel
PDU	Protocol Data Unit
RAN	Radio Access Network
RRC	Radio Resource Control
SA	Standalone
sCell	Secondary cell
SMF	Session Management Function

SRB3	Signaling Radio Bearer 3
SSB	Synchronization Signal Block
SUL	Supplementary Uplink
TDD	Time Division Duplex
UL	Uplink
UPF	User Plane Function
URLLC	Ultra Low Latency Communications
WLAN	Wireless Local Area Network

1. JOHDANTO

Toimivat tietoliikenneyhteydet ovat nykypäivän yhteiskunnassa erittäin merkittävässä roolissa. Verkkojen nopeudet ja siirrettävän datan määrä kasvaa jatkuvasti [1], minkä matkpuhelinverkkojen jatkuva kehittyminen mahdollistaa. Erilaisilla teknisillä ratkaisuilla pyritään verkoissa vastaamaan alati kasvaviin vaatimuksiin, joita uudet käyttökohteet ja käyttötavat asettavat suurentuneiden käyttäjä- ja datamäärien lisäksi.

Kantoaaltojen yhdistäminen (engl. Carrier Aggregation, CA) on yksi teknisistä ratkaisuista verkon suorituskyvyn parantamiseksi monien muiden keinojen lisäksi. Vaikka itse menetelmä ei ole uusi, on se 5G-verkoissa merkittävä keino parantaa verkon kyvykkyyttä ja täyttää käyttäjien tarpeet. 5G-verkoille on paljon uusia taajuusallokaatioita, joiden tehokas hyödyntäminen vaatii eri taajuuksien sulavaa yhdistämistä operaattoreiden verkoissa. Olennaisia kysymyksiä työn kannalta ovat, miten kantoaaltojen yhdistäminen on toteutettu 5G-verkoissa, mitä hyötyä sillä voidaan saavuttaa ja miksi tällä menetelmällä on kyseiset hyödyt mahdollista saada.

Tutkielman tavoitteena on kuvata yleisellä tasolla kantoaaltojen yhdistämiseen liittyvää teoriaa sekä menetelmällä saavutettuja verkon parannuksia ja ominaisuuksia. Lisäksi työssä käydään läpi kantoaaltojen yhdistämisen haasteita ja erikoisuuksia, joihin käyttäjä voi joissain tapauksissa törmätä. Tavoitteena ei ole siis antaa täydellistä teknistä kuvausta kantoaaltojen yhdistämisen toiminnasta, vaan kuvata menetelmän potentiaali sekä toimintatapa nimenomaan 5G-verkkojen näkökulmasta.

Aluksi työssä johdatellaan lukija 5G-verkkoihin ja verkkojen tarjoamiin palveluihin. Tämän jälkeen käsitellään kantoaaltojen yhdistämistä yleisesti menetelmänä ottamatta kantaa verkkosukupolveen ja käsitellään, mitä sillä voidaan saavuttaa yleisellä tasolla sekä erityisesti 5G-verkoissa. Sen jälkeen käydään läpi tarkemmin menetelmän toimintaa 5G-verkoissa ja sitä, miten verkot toteuttavat kantoaaltojen yhdistämistä ja minkälaisia prosesseja siihen sisältyy. Viimeisessä luvussa kootaan yhteen menetelmästä esille tulleet asiat.

2. 5G-VERKOT

Tällä hetkellä uusin matkapuhelinverkkojen sukupolvi on 5G, joka on viime vuosina yleistynyt paljon ja on nykyään jo laajalti kuluttajien saatavilla [2]. Esimerkiksi Suomessa ensimmäiset kaupalliset 5G-verkot tulivat markkinoille 2018–2019 [3, 4], jolloin myös 3,5 GHz taajuudet huutokaupattiin maamme suurimmille operaattoreille [5]. Tämän jälkeen verkot ovat pikkuhiljaa laajentuneet maantieteellisesti uusille alueille [6, 7, 8], ja esimerkiksi itsenäinen 5G (engl. standalone, SA) on jo kuluttajien saatavilla [9, 10]. Voidaankin sanoa, että nykypäivänä 5G on Suomessa jo ihmisten käyttävissä etenkin kaupunkialueilla.

2.1 5G-verkkojen ominaisuudet

Matkapuhelinverkoissa siirrettävän datan määrä kasvaa jatkuvasti [1], mikä asettaa verkoille entistä suuremmat vaatimukset. Samalla verkkoihin pyritään kehittämään uusia ominaisuuksia, jotka eivät hyödytä pelkästään kuluttajia, vaan mahdollistaisivat verkkojen käyttämisen uusiin sovelluksiin. Verkkojen uusin sukupolvi on tällä hetkellä 5G, jonka määrittelystä vastaa 3GPP (3rd Generation Partnership Project), joka koostuu useista eri standardointiorganisaatioista tietoliikenteen alalla [11]. 3GPP on määritellyt useita eri käyttökohteita 5G:lle, joista kukin asettaa omat vaatimuksensa verkolle. [12]

Yksi käyttökohteista on mobiililaajakaista (engl. enhanced Mobile Broadband, eMBB), joka tarkoittaa käytännössä mahdollisimman suuria tiedonsiirtonopeuksia [12]. Tämä lienee tavallisten kuluttajien kannalta kiinnostavin parannus edellisistä verkkosukupolvista, sillä esimerkiksi korkealaatuisen videon katsominen vaatii nopean verkkoyhteyden. Suuret tiedonsiirtonopeudet mahdollistavat myös esimerkiksi kodin kiinteän yhteyden korvaamisen 5G:llä, sillä kiinteä langaton yhteys (engl. Fixed Wireless Access, FWA) kykenee tarjoamaan vastaavia tiedonsiirtonopeuksia kuin kiinteät yhteydet [13]. Kuluttajien kannalta tärkeä eMBB on myös operaattoreiden kannalta tärkeä osa-alue, sillä liikennemäärien kasvaessa nykyisten verkkojen kuormitus kasvaa samalla, ja ne pystyvät entistä huonommin vastaamaan käyttäjien nopeustoiveisiin. Oleellista on se, että 5G tuo merkittävät määrät uusia taajuuksia matkapuhelinverkkojen käyttöön, mikä on osaltaan mahdollistamassa verkkojen nopeuden ja kapasiteetin kasvattamisen nykyisestä.

Toisaalta 5G pyrkii myös tarjoamaan mahdollisimman luotettavia ja pienen viiveen yh-

teyksiä erilaisiin käyttötarpeisiin. Tästä osa-alueesta käytetään nimitystä erittäin pienen viiveen kommunikaatio (engl. Ultra Low Latency Communications, URLLC). Mahdollinen käyttökohde tällaiselle yhteydelle on esimerkiksi koneiden etäohjaus, jolloin tarvitaan mahdollisimman pieni viive. Myös yhteyden luotettavuus ja toimintavarmuus on tärkeää, sillä yhteyden pätkiminen tai katkeaminen tarkoittaisi missä tahansa etähallinnassa laitteen kontrollin menettämistä. [12]

Kolmas selkeä osa-alue on massiivinen koneiden kommunikaatio (engl. massive Machine-Type Communications, mMTC), jossa tavoitteena on mahdollistaa erilaisten laitteiden ja sensoreiden yhdistyminen verkkoon. Tällöin puhutaan esineiden internetistä (engl. Internet of Things, IoT) ja IoT-laitteista. Kriteerejä ovat esimerkiksi mahdollisimman pieni virrankulutus pitkän akunkeston saavuttamiseksi, laitteiden erittäin suuri määrä jollain alueella ja mahdollisimman pieni hinta. Tämä mahdollistaa suurissa määrin halpojen IoT-laitteiden valmistamisen, takaa niille pitkän toimintaiän sekä mahdollistaa niiden sijoittamisen pienelle alueelle ilman verkon ruuhkauttamista. Myös nämä näkökulmat on otettu huomioon verkkojen spesifikaatioita suunniteltaessa. [12]

Kaikkia näitä toiminnallisuuksia ei kuitenkaan ole toteutettu välittömästi, vaan verkkojen määrittely noudattaa niin sanottuja standardijulkaisuja (engl. Release, Rel.), joista jokainen tuo aina joukon uusia ominaisuuksia ja parannuksia. Ensimmäinen 5G-julkaisu oli Rel. 15, joka vastasi enimmäkseen eMBB:n tarpeisiin. Sen jälkeen on tullut uudempiä versioita, joissa on myös paljon URLLC- ja mMTC-ominaisuuksia.

2.2 5G-verkkojen rakenne

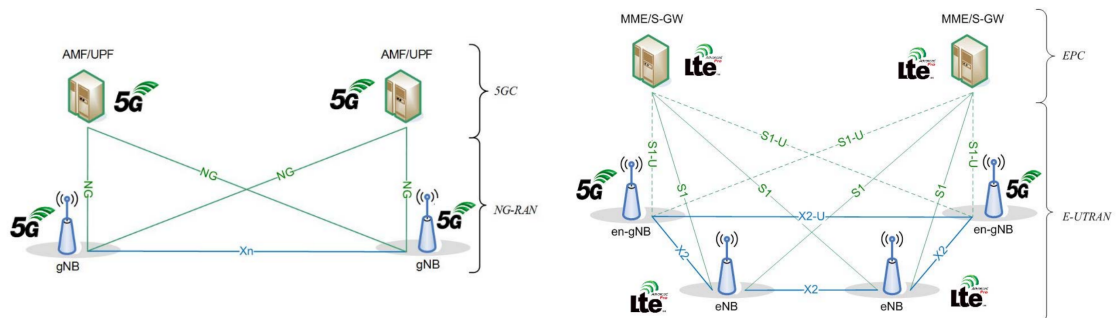
5G:n kokonaisuus koostuu tiivistetysti kolmesta eri osasta, jotka on esitetty kuvassa 2.1. Yksi osa on SIM-kortti ja päätelaite, jolla verkkoon liitytään. SIM-kortilla on tilaajan tiedot, joita käyttämällä päätelaite voi liittyä verkkoon. Pelkkä SIM-kortti ja mikä tahansa 5G-puhelin eivät vielä riitä, vaan päätelaitteen täytyy tukea juuri kyseisen verkon ominaisuuksia. Esimerkiksi puhelinten tuettujen taajuuksien ja toiminnallisuuksien välillä on paljonkin eroja. Toinen osa on itse radioverkko eli RAN (Radio Access Network), joka kattaa verkon tukiasemat eli gNB:t. Tukiasema on se verkon osa, joka hoitaa radiolinkin kautta yhteyden puhelimeen. Radiotiehen liittyvää prosessointia hoidetaan tukiasemassa. Kolmas osa on 5G-ydinverkko (engl. 5G core, 5GC), joka vastaa muun muassa autentikoinnista, IP-osoitteen antamisesta ja monista muista verkon toiminnassa tarvittavista palveluista. [12, 14]

Tällainen 5G-verkko on itsenäinen 5G (engl. Standalone, SA). On olemassa myös ei-itsenäinen 5G (engl. Non-Standalone, NSA), jossa 5GC:n tilalla on 4G:n ydinverkko eli EPC (engl. Evolved Packet Core). Tällainen verkko vaatii toimiakseen myös 4G-tukiasemia kontrolliliikenteen hoitamista varten. Tähän ratkaisuun syvennytään tarkemmin luvun lopussa.



Kuva 2.1. 5G-verkon arkkitehtuuri. [14]

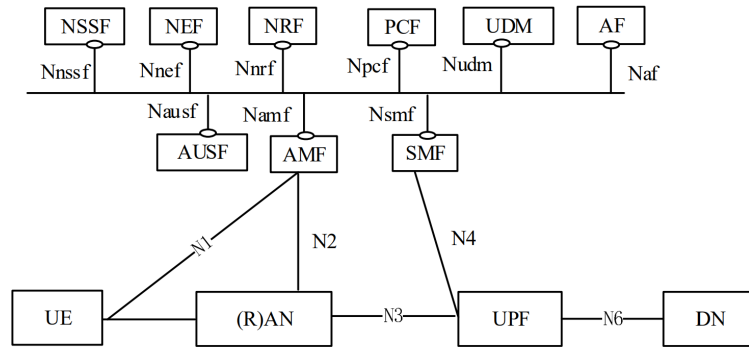
Radioverkko koostuu tukiasemista, jotka vastaavat aina jonkin tietyn maantieteellisen alueen radiopeitosta. Nämä tukiasemat ovat sitten kytketty 5G-ydinverkkoon ja mahdollisesti myös toisiinsa tukiasemiin. Kuvassa 2.2 on esitetty, minkälaisia yhteyksiä tukiasemien ja ydinverkon välillä voi olla. Tukiasemaan on kytketty radioyksiköt, joissa tapahtuu varsinaisen analogisen radiosignaalin muodostaminen ja vastaanotto. Yksi radioyksikkö hoitaa taas yhden tai useamman solun liikennettä. Jokaisella solulla on yksilölliset parametrit kuten solu-ID, taajuus, kaistanleveys, lähetysteho ja niin edelleen. [15]



Kuva 2.2. 5G-verkon yhteydet. Vasemmalla SA-verkko ja oikealla NSA-verkko. [12]

Ydinverkko koostuu useista eri komponenteista, jotka tarjoavat omia palveluitaan muille verkon osille. 5GC:n tarjoamia palveluita on esimerkiksi käyttäjäliikenteen palvelu (engl. User Plane Function, UPF), joka toimii yhdyspisteenä ulkoisiin verkkoihin ja on se piste, jonne tukiasema ohjaa käyttäjän liikenteen. Pääsy- ja liikkumishallintapalvelu (Access and Mobility Management Function, AMF) vastaa käyttäjän autentikoinnista ja rekisteröinnistä verkkoon. Sessioiden hallintapalvelu (Session Management Function, SMF) vastaa esimerkiksi PDU-sessioiden (engl. Protocol Data Unit) avaamisesta, IP-osoitteen antamisesta ja UPF:n valinnasta. Lisäksi tarvitaan paljon muitakin, esimerkiksi rekisterit tilaajien tietojen ja oikeuksien tallentamiseen. Nämä kaikki ovat tarvittavia palveluita, jotta 5G-verkko toimii ja siitä voidaan liikennöidä esimerkiksi internettiin. Operaattoriverkoissa on myös toiminnallisuudet muun muassa käyttäjien laskutusta varten. Kuva 2.3 esittää 5GC:n komponentit ja niiden väliset yhteydet. [12, 14]

NSA-verkossa merkittävin ero on se, että operaattorilla ei tarvitse olla ollenkaan 5GC:tä, vaan pelkästään ennestään olemassa olevan 4G-verkko ja siihen rinnalle tulevat 5G-



Kuva 2.3. Ydinverkon arkkitehtuuri. [12]

tukiasemat riittävät. Tällaisessa verkossa verkon signalointi menee 4G-tukiaseman kautta ja 5G-tukiasema on tarjoamassa lähinnä lisänopeutta verkon toimintaan. Kuvassa 2.2 on esitetty NSA-verkossa tarvittavat yhteydet. NSA-verkossa sekä 5G- että 4G-tukiasemat ovat kytketty samaan 4G-ydinverkkoon, ja kaikki ydinverkon toiminnallisuudet hoidetaan samalla tavalla kuin 4G-verkoissa, eikä käytettävissä ole 5G-ydinverkon tuomia lisäpalveluita, ainoastaan 5G-tukiasemien tuoma radiokapasiteetti. Koska 5G-tukiasema tarvitsee myös kontrolliliikennettä, on 4G- ja 5G-tukiaseman välillä X2-yhteys tätä varten. Eli kun päätelaite haluaa lähettää tai vastaanottaa kontrolliliikennettä 5G-tukiaseman kanssa, täytyy se ensin liikennöidä 4G-tukiaseman kautta, joka välittää sen sitten 5G-tukiasemalle.

3. KANTOAAALTOJEN YHDISTÄMINEN

Kantaaaltojen yhdistäminen on langattoman tietoliikenteen menetelmä, jossa päätelaite lähettää tai vastaanottaa dataa käyttäen samanaikaisesti useampaa eri kantaaltoa [16]. Tavallisesti puhelimella on käytössään vain yksi taajuuskaista, jos puhutaan aikajakoisesta dupleksista (engl. Time Division Duplex, TDD), tai kaksi taajuuskaistaa, jos puhutaan taajuusjakoisesta dupleksista (engl. Frequency Division Duplex, FDD). Tämä tarkoittaa sitä, että puhelimella on yhteys vain yhteen soluun kerrallaan. Kun kantaaltojen yhdistäminen on käytössä, puhelin on samanaikaisesti yhteydessä useampaan soluun, joista jokainen on oma kantaallonsa. Useamman kantaallon (toisin sanoen solun) käyttäminen mahdollistaa puhelimen käyttäjän kokonaiskaistanleveyden kasvattamisen, mikä tarkoittaa hyötyjä sekä käyttäjän että operaattorin kannalta.

3.1 Yhdistämisen eri muodot ja ominaisuudet 5G-verkoissa

Kantaaaltojen yhdistämistä on olemassa kolmea erilaista muotoa. Näistä ensimmäinen muoto on kaistan sisäinen ja yhtenäinen (intra-band contiguous), jossa kantaallot ovat samalta taajuuskaistalta eikä kantaaltojen väliin jää vapaata taajuuskaistaa. Tämä mahdollistaa useamman taajuuksiltaan peräkkäisen solun yhdistämisen niin, että saadaan suurempi kaistanleveys kuin yhdellä kantaallolla olisi mahdollista. Yksi käyttökohde tälle on millimetriaaltojen alueella, jossa suurin spesifikaation sallima kantaallon leveys on 400 MHz, mutta kantaaltojen yhdistämisen avulla on mahdollista saada kokonaisuudessaan tätä enemmän kaistaa. Esimerkiksi 8 x 100 MHz kantaalloilla voidaan saavuttaa jo huomattavasti suurempia nopeuksia. [16] Juuri tällä tavalla on saavutettu laitevalmistajien mainostamat useiden gigabittien nopeudet yli 6 GHz taajuuksilla [17].

Kaistan sisäinen ja epäyhtenäinen (intra-band non-contiguous) tarkoittaa useamman kantaallon yhdistämistä niin, että niiden väliin jää käyttämätöntä taajuuskaistaa. Tällainen vaatii sekä tukiasemalta että puhelimelta erillisen tuen ja on hankalampi toteuttaa kuin yhtenäinen kantaaltojen yhdistäminen. [18, s. 44–45 ja 128]

Viimeinen kantaaltojen yhdistämisen muoto on kaistojen välinen ja epäyhtenäinen (inter-band non-contiguous), jolloin yhdistetään kantaaltoja eri taajuuskaistoilta. Tämä asettaa eniten vaatimuksia sekä puhelimelle että tukiasemalle. Esimerkiksi puhelimen elektroniikka on tällöin monimutkaisempaa ja kalliimpaa kuin yhtenäisessä kantaaltojen yhdistämi-

sessä. [18, s. 44–45 ja 128] Hyötynä on kuitenkin se, että operaattori pystyy yhdistämään eri taajuuskaistojen taajuuslupiaan ja pystyy näin saamaan huomattavasti paremman kokonaiskaistanleveyden. Alle 6 GHz taajuuksilla operaattoreiden taajuusluvut ovat kapeita, jolloin tämä mahdollistaa näiden taajuuksien tehokkaan käytön [19]. Menetelmän haasteena on kuitenkin puhelimien puutteellinen tuki, koska kaikki laitteet eivät kaikkia taajuusyhdistelmiä tue.

Menetelmänä kantoaaltojen yhdistäminen ei ole mikään uusi, vaan se on tullut matkapuhelinverkkoihin jo LTE Advanced Release 10:n mukana. Useissa sen jälkeisissä julkaisuissa on tullut uusia ominaisuuksia ja kantoaaltojen yhdistäminen on siis kehittynyt paljon jo 4G-verkkojen aikana ja ensimmäinen 5G-verkkojen versio eli Release 15 tukee muun muassa seuraavia ominaisuuksia [16]:

- maksimissaan 16 alalinkin (engl. downlink, DL) kantoaaltoa ja 16 ylälinkin (engl. uplink, UL) kantoaaltoa
- tuki kaistan sisäiselle ja kaistojen väliselle sekä yhtenäiselle että epäyhtenäiselle yhdistämiselle
- yhdistäminen taajuusalue 1 (engl. frequency range 1, FR1) ja taajuusalue 2 (engl. frequency range 2, FR2) välillä
- yhdistäminen eri dupleksointitapojen välillä
- yhdistäminen eri numerologioiden välillä
- pelkästään alalinkin solut (engl. DL only).

Vaikka suuri osa kantoaaltojen yhdistämisen ominaisuuksista palvelee mobiililaajakaisapuolta 5G-verkoissa, on myös uudemmissa julkaisuissa tullut vielä parannuksia CA:n toimintaan. Kantoaaltojen yhdistäminen ei ole siis 5G-verkkojenkaan julkaisujen välillä muuttumaton, vaikka myöhemmät julkaisut painottuvat paljolti muihin käyttökohteisiin.

Laitevalmistajien tuki erilaisille CA-ominaisuuksille tulee kuitenkin huomattavasti spesifikaatioita perässä, eikä tukiasemapuolella ole tällä hetkellä tarjolla läheskään niin laajasti ominaisuuksia, kuin spesifikaatioihin on määritelty. Esimerkiksi vuoden 2022 helmikuussa Nokia ja Ericsson tarjosivat mahdollisuutta 8CC mmW kantoaaltojen yhdistämiseen tai alle 6 GHz taajuuksilla mahdollisuuksia 2–3 solun yhdistämiseen joko TDD- tai FDD-tekniikalla. Ericsson kertoo myös, että ylälinkin yhdistäminen toimii vain kahdella solulla millimetriaaltojen alueella. Muut CA-ratkaisut tukevat vain alalinkin yhdistämistä. Nämä tuetut ominaisuudet ovat kaukana siitä, mitä kaikkea potentiaalia spesifikaatiot sallivat. Ei ole myöskään varmaa, että tukiasemiin tulee ikinä tukea läheskään kaikille spesifikaatioissa määritellyille CA-ominaisuuksille. Ominaisuudet eivät ole pakollisia, eikä kaikkea ole välttämättä kannattavaa toteuttaa. [20, 21]

Myös päätelaitepuolella tuki erilaisille CA-ominaisuuksille vaihtelee hyvin paljon ja uusia ominaisuuksia tulee uusien piirisarjojen myötä. Kuluttajan on kuitenkin erittäin hankala

tietää, minkälaista kantoaaltojen yhdistämistä puhelimet tukevat, sillä puhelinvalmistajat eivät usein tätä tietoa ilmoita missään selkeästi. Valmistajien sivuilla on usein tieto vain tuetuista taajuuskaistoista ja tieto SA/NSA-tuesta. Samaa puhelinta saatetaan myydä usein myös erilaisilla komponenteilla, ja sisällä oleva laitteisto voi vaikuttaa mahdolliseen tukeen. Myös ohjelmiston tuki tai valmistajan mahdollisesti asettamat ohjelmalliset rajoitukset hankaloittavat todellisen tiedon saamista. Esimerkiksi piirisarjoja valmistavan Qualcommin tiedoista selviää, että ensimmäinen Qualcommin 5G-modeemi (X50) tukee vain 100 MHz kokonaiskaistanleveyttä alle 6 GHz taajuuksilla, jolloin kantoaaltojen yhdistämisen hyödyntämispotentiaalia ei ole vielä samalla tavalla kuin uudemmissa modeemeissa. Uudempi X70-modeemi tukee jo 300 MHz käytettävää kaistaa alle 6 GHz taajuuksilla ja myös kantoaaltojen yhdistämistä [22, 23]

3.2 Hyödyt

Yksi selkeimpiä kantoaaltojen yhdistämisen hyötyjä on päätelaitteen suurempi tiedonsiirtonopeus. Shannon–Hartley-teoreeman mukaan tiedonsiirtokanavan nopeus riippuu lineaarisesti käytetystä kaistanleveydestä [24], jolloin suurempia nopeuksia voidaan saavuttaa käyttämällä suurempaa kantoaallon kaistanleveyttä tai vaihtoehtoisesti lähettämällä dataa useamman kantoaallon kautta. 5G-verkko mahdollistaa useita erilaisia kaistanleveyksiä, mutta 3GPP-spesifikaatiot eivät salli yhden solun kaistanleveydeksi niin suurta arvoa, kuin kantoaaltojen yhdistämisellä on mahdollista saavuttaa. Tällöin ainoaksi järkeväksi vaihtoehdoksi jää useamman kantoaallon yhdistäminen paremman kapasiteetin takaamiseksi. Tällainen tilanne on esimerkiksi FR2-verkkojen tapauksessa, kun spesifikaatioiden suurin sallima kaistanleveys on 400 MHz, mutta sitäkin suurempia kaistanleveyksiä saatetaan haluta käyttää erittäin suurten nopeuksien saavuttamiseksi. Tällaisessa tapauksessa voidaan yhdistää esimerkiksi 8 x 100 MHz soluja samasta radiosta. Näin saadaan karkeasti kaksinkertainen nopeus verrattuna siihen, mikä olisi ollut mahdollista pelkästään yhdellä solulla. Lisäksi puhelimen ei välttämättä tarvitse edes tukea 400 MHz soluja, vaan tuki voi esimerkiksi löytyä pelkästään pienempien kaistanleveyksien soluille ja niiden yhdistämiselle. Tällaisessa tilanteessa voisi olla perusteltua tehdä 400 MHz solun sijaan 4 x 100 MHz soluja.

Myös alle 6 GHz taajuusalueella operaattoreilla saattaa olla käytössään yli 100 MHz taajuuskaista, joka menee yli spesifikaation suurimman sallitun yhden solun kaistanleveyden alle 6 GHz taajuuksilla. Suomessa DNA:lla, Elisalla ja Teliällä on kaikilla 130 MHz yhtenäistä taajuuskaistaa 3,5 GHz alueella, jolloin koko tämän kapasiteetin hyödyntäminen samanaikaisesti yhdellä laitteella vaatii yhteyttä useampaan soluun [19]. Ilman erityisempää syytä yhtenäistä taajuuskaistaa ei kannattaisi kuitenkaan jakaa useammalle solulle ja sitten yhdistää niitä, koska yksi suuren kaistanleveyden solu on tehokkaampi kuin useampi solu yhdistettynä, vaikka kokonaiskaistanleveys olisikin molemmissa tilanteissa sama

[25, s. 29–30].

Kantoaaltojen yhdistäminen mahdollistaa myös taajuuksien tehokkaamman käytön, kun operaattori ei tarvitse suurta yhtenäistä taajuuskaistaa saadakseen suuren kaistanleveyden päätelaitteen käyttöön. Operaattorilla voi olla useammalta eri taajuusalueelta pieniä pätkiä, joita yhdistämällä saadaan kokonaisuudessaan enemmän kaistaa kuin mikään yksittäinen taajuusalue voisi tarjota. Koska 5G-verkot tarjoavat tuen yhdistämiseen myös eri numerologioiden ja dupleksointitapojen välillä, ovat mahdollisuudet eri taajuusalueiden ja erilaisten käyttötarpeiden solujen yhdistämiseen entistä paremmat.

Kantoaaltojen yhdistäminen mahdollistaa myös paremman peittoalueen verkolle, kun operaattorilla on käytössään matalampia FDD-taajuuksia ja korkeampia TDD-taajuuksia. Verkon kantamaa ja peittoaluetta rajoittaa yleensä ensimmäisenä ylälinkin suorituskyky, jota pystytään parantamaan eri taajuusalueiden kantoaaltojen yhdistämisellä. Toimiva yhteys vaatii liikennettä molempiin suuntiin, mutta mikään ei rajoita, että liikenteen tulisi kaikissa soluissa toimia molempiin suuntiin. Matalammilla taajuuksilla signaali vaimenee vähemmän, jolloin signaalin laatu ja voimakkuus ei tule niin nopeasti rajoittavaksi tekijäksi. Koska ylälinkki on usein heikompi ja rajoittava tekijä, voidaan sen liikenne hoitaa matalan taajuuden FDD-solun kautta ja alalinkin liikennettä hoitaa suuremman taajuuden TDD-solulla, joka tarjoaa suurempaa tiedonsiirtonopeutta ja kapasiteettia alalinkin suuntaan. [26, 27]

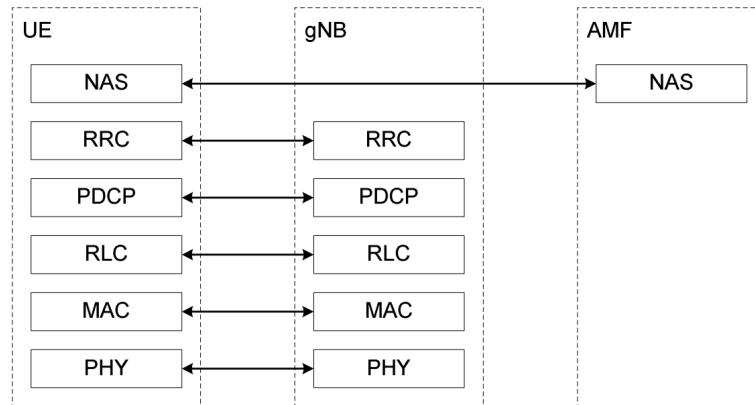
4. PROTOKOLLAPINO JA PROTOKOLLAT

Tietoliikenteessä monimutkaisia ja suuria kokonaisuuksia jaetaan pienempiin palasiin niin sanotuilla protokollapinoilla, joissa protokollalla on aina oma pienempi tehtävänsä tiedon siirron kokonaisuudessa. Näitä eri tasojen protokollia pinotaan päällekkäin muodostaen kokonaisuus, jossa on kaikki tarvittavat toiminnallisuudet. Protokolla-ajattelussa jokainen protokolla vaatii alemmalta tasolta palveluita ja tarjoaa omia palveluitaan pinossa ylemmälle tasolle. Näin saadaan yksinkertaisempia protokollia, joilla on jokaisella oma roolinsa ja joita voidaan monipuolisesti käyttää useissa eri paikoissa, vaikka koko pino ei olisikaan aina samanlainen. Protokollan voidaan ajatella keskustelevan aina saman tason vastapuolen kanssa, eikä pinon muilla protokollilla ole merkitystä, kunhan alemmat protokollat tarjoavat tarvittavat palvelut. [28]

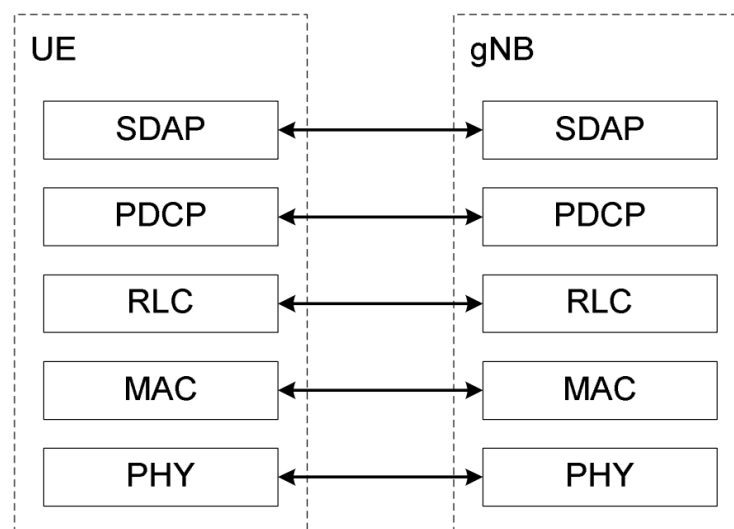
Tässä työssä käsitellään lähinnä 5G-radioverkon protokollapinoa ja erityisesti muutamaa keskeistä protokollaa sieltä, eikä mennä EPC- tai 5GC-yhteyksien protokolliin, sillä ne eivät ole kantoaaltojen yhdistämisen kannalta merkityksellisiä. 5G-verkon kannalta ei myöskään ole oleellista, minkälainen protokollapino on verkkokerroksen yläpuolella, joten sitäkään ei käsitellä.

Kuvassa 4.1 näkyy radorajapinnan kontrolliliikenteen protokollapino, joka on merkityksellinen lisäsolujen kertomisessa puhelimelle sekä solujen käyttönotossa. Kuvassa 4.2 näkyy käyttäjäliikenteen pino, joka näyttää kontrolliliikenteen pinon kanssa varsin samantaiselta. Tällä pinolla on merkitystä sen kanssa, miten puhelimen liikennettä jaetaan eri solujen välillä.

Matkapuhelinverkkojen protokollapino eroaa hyvinkin paljon esimerkiksi langattomien lähiverkkojen (engl. wireless local area network, WLAN) tai langallisten lähiverkkojen (engl. local area network, LAN) pinosta, sillä matkapuheliverkoilla on hyvin erilaiset ja yksilölliset tarpeet verkon toiminnallisuudelle ja ominaisuuksille. Kaikki kantoaaltojen yhdistämiseen ja sen toiminnallisuuteen vaikuttavat protokollat ovat 3GPP:n määrittämät ja käytössä matkapuhelinverkoissa.



Kuva 4.1. Kontrollipuolen protokollapino. [12]



Kuva 4.2. Käyttäjäliikenteen protokollapino. [12]

4.1 Radio Resource Control

Radio resource control (RRC) on 5G- ja 4G-verkoissa käytetty OSI-mallin mukaan verkkokerroksen (L3) protokolla, joka hoitaa signaloitua puhelimen ja tukiaseman välillä. Kyseistä protokollaa käytetään esimerkiksi naapurisolujen kertomiseen, solun vaihtoon liittyvissä prosesseissa, EN-DC-yhteyden (E-UTRA NR Dual Connectivity) muodostamiseen, mittausten määräämiseen ja raportointiin sekä lisäsolujen konfigurointiin. Protokolla on siis keskeisessä roolissa 5G-verkon toiminnan kannalta. Protokollan useista tehtävistä kantoaaltojen yhdistämiseen vaikuttavia ovat potentiaalisten lisäsolujen kertominen puhelimelle sekä niihin mahdollisesti liittyvät mittaukset. [29]

Vaikka työssä käsitellään kantoaaltojen yhdistämistä 5G-verkoissa, on 4G hyvin olennainen osa kokonaisuutta, koska NSA-verkossa suurin osa RRC-signaloinnista menee 4G-tukiaseman kautta. SA:n tapauksessa kaikki signalointi menee 5G:n kautta, mutta

NSA:n ollessa edelleen hyvin yleinen tapa toteuttaa 5G-verkkoja, täytyy myös käydä sen aiheuttamia erityispiirteitä läpi. Standardit sallivat esimerkiksi uuden signaalintikanavan eli SRB3:n (engl. Signaling Radio Bearer 3) käyttämisen RRC-signalointiin suoraan puhelimesta 5G-tukiasemaan, jolloin kaikki viestit eivät kierrä 4G-tukiaseman kautta X2-linkin läpi 5G:lle. Tästä voi olla tietyissä tilanteissa hyötyä, mutta se vaatii puhelimelta ja tukiasemalta erikseen sille tuen. Kuitenkaan kaikkia RRC-sanomia ei voi viestiä NSA-yhteydessä suoraan 5G-tukiasemalle, vaan tuki löytyy ainoastaan RRCReconfiguration-, RRCReconfigurationComplete- ja MeasurementReport-sanomille. [30]

Erilaisia RRC-sanomia on lukuisia erilaisia eri käyttötarkoituksiin, mutta kantoaaltojen yhdistämisen kannalta yksi oleellisin on RRCReconfiguration-sanoma. Tällä sanomalla tukiasema määrää puhelimen muokkaamaan olemassa olevaa yhteyttä verkkoon. RRC-sanomat sisältävät erilaisia vapaaehtoisia parametreja, jotka määrittävät, miten yhteyttä tulee muokata. Samoja parametreja voi olla myös muun tyyppisten RRC-sanomien sisällä, mutta parametrien toiminnallisuus ja käyttötarkoitus on silti sama. Parametreja voi olla myös toistensa alla, jolloin koko RRC-sanoman rakenne ja sisältö voi olla varsin monimutkainen ja monitasoinen.

Solujen lisääminen tapahtuu lisäämällä RRC-sanomaan sCellToAddModList-parametri ja siihen tiedot lisättävistä soluista. Parametrin hierarkiseen rakenteeseen tulee paljon tietoa lisättävistä soluista, mutta kaikkia tarpeellisia tietoja ei ole sisällytetty tämän työn laajuuteen. Kantoaaltojen yhdistämisen kannalta oleellista on kuitenkin se, että sanoma sisältää puhelimelle lisättävät solut ja voi samalla jo sisältää tiedon lisättävien solujen aktiivoinnista. Vapaaehtoinen parametri sCellState on mahdollista asettaa päälle, jolloin solu aktivoidaan suoraan lisäyksen yhteydessä. Ilman tätä kenttää solu on lisäyksen jälkeen oletuksena aktivoimaton. [29]

Vastaavasti solujen poistaminen tapahtuu, kun tukiasema lähettää RRC-sanoman, joka sisältää sCellToReleaseList-objektin, joka sisältää tiedon niistä soluista, jotka puhelimelta halutaan poistaa. Useamman solun lisääminen ja poistaminen voidaan siis tehdä yhdellä sanomalla lisäämällä vain oikeanlaiset objektit ja parametrit. Näihin RRCReconfiguration-sanomiin puhelin vastaa onnistuessaan RRCReconfigurationComplete-sanomalla ja siten kiittää, että pyydetyt muutokset yhteyteen on tehty. [29]

Matkapuhelinverkoissa tarvitaan moniin eri asioihin puhelimen suorittamia mittauksia, jotka tehdään tukiaseman pyynnöstä. Tiedot näistä mittauksista ja tarkat ohjeet mittaamiselle puhelin saa tukiasemalta RRC-sanomien sisällä. Esimerkiksi RRCReconfiguration- tai RRCResume-sanomat voivat sisältää measConfig-objektin sisällä mittaobjektit, joissa määritetään tarkemmin mittauksen parametrit. Tukiasema kertoo sanomassa esimerkiksi mitattavan taajuuden ja ohjeet tulosten raportointiin. [29]

Mahdollisia mittauksia on useita eri tyyppisiä ja puhelin voidaankin määrätä esimerkiksi mittaamaan ja raportoimaan jotakin solua johon se on jo yhteydessä tai jotain naapu-

risolua, johon ei ole vielä yhteyttä. RRC-spesifikaatio määrittelee mittaukset, mahdolliset mitattavat signaalit ja erilaiset tapahtumat, jotka laukaisevat mittaraportin lähettämisen tukiasemalle. Tyypillinen mittaus on esimerkiksi synkronisaatiosignaali-blokin (engl. Synchronization Signal Block, SSB) mittaaminen. Signaalista voidaan mitata esimerkiksi sen laatua tai pelkkää voimakkuutta. [29]

Mittaukselle määriteltäviä raportointikriteerejä on useita erilaisia useisiin erilaisiin käyttötarkoituksiin, mutta laitevalmistaja voi käyttää mittauksia haluamallaan tavalla. Spesifikaatiot ei siis pakota mittauksille mitään tiettyä käyttötarkoitusta, vaan mittauksia voi käyttää soveltaen, kuten valmistaja itse parhaaksi katsoo. Esimerkiksi A4-mittausta olisi mahdollista lisätä puhelimelle potentiaalisia lisäsoluja, sillä kyseinen mittaraportti lähetetään, kun naapurisolusta on tullut parempi kuin määritetty raja-arvo. Toisaalta A2-mittaus soveltuisi solun poistamiseen laitteelta, sillä kyseinen mittaus aktivoituu, kun päätelaitteella käytössä oleva solu menee alle raja-arvon. Tällöin lisäsolu voitaisiin poistaa, kun sen käyttäminen ei ole enää heikentynen signaali-voimakkuuden takia järkevää. Lisäksi on olemassa juuri kantoaaltojen yhdistämistä varten tehty A6-mittaus, jossa mitataan naapurisolua ja verrataan sitä johonkin lisäsoluun. Tällaisen mittauksen avulla voitaisiin esimerkiksi vaihtaa lisäsolu toiseen. Operaattorilla saattaisi olla matalan taajuuden FDD-solu pääsoluna ja sen alueella useita TDD-soluja, jotka kykenevät kantoaaltojen yhdistämiseen. Tällöin käyttäjän liikkua lisäsolun vaihtaminen toiseen olisi luontevaa. [29]

Rel. 15 päätelaitteella voi olla määriteltynä mittauksia vain kun se on RRC_CONNECTED-tilassa, mutta spesifikaatioiden uudemmat versiot sallivat myös mitausten olemassa olon muissakin RRC-tiloissa. Tämä mahdollistaa kantoaaltojen yhdistämisen nopeamman käyttöönoton, kun puhelin palaa verkkoon. Tällöin puhelin voi suoraan verkkoon palatessa mitata solut ja ottaa ne käyttöön. Muussa tapauksessa puhelimen täytyisi ensin palata verkkoon yhdelle solulle, jonka jälkeen mittaobjektien lisääminen vasta tehtäisiin. Tämä aiheuttaisi pientä viivettä CA:n toimintaan saamisessa ja siten heti yhteyden alussa tiedonsiirtonopeus olisi huonompi. [31]

Mittauksia voidaan käyttää myös esimerkiksi NSA:n tapauksessa 5G-soluuun liittymisessä. Tällöin 4G-verkossa oleva puhelin ensiksi mittaa 5G-solua ja vasta sen jälkeen 4G-tukiasema määrää muodostamaan yhteyden 5G-soluuun. Toinen tärkeä mitausten käyttökohde on puhelimen liikkuvuus solujen ja tukiasemien välillä ja useat mitaustyyppit palvelevat tätä käyttötarkoitusta.

4.2 Medium Access Control

Medium access control (MAC) on OSI-mallissa L2-tason protokolla, joka vastaa verkossa radiotien resurssien allokoinnista, hoitaa loogisten ja siirtokanavien yhteyden ja tekee virheenkorjausta. MAC-kerros vastaa myös kantoaaltojen yhdistämisessä lisäsolujen aktivoinnista, mikä tarkoittaa sitä, että niiden kautta voidaan alkaa välittämään dataa. [32]

MAC-kerroksella loogisten kanavien data multipleksoidaan siirtotien kanaville, mikä käytännössä tarkoittaa sitä, että MAC-kerros hoitaa kantoaaltojen yhdistämisessä lähetettävien bittien jakamisen useammille soluille. Itse protokolla ei kuitenkaan ota kantaa, millä perusteella data jaetaan solujen välille. Vastaanottopuolella MAC-taso kokoaa siirtotien kanavien datan ja toimittaa sen eheänä kokonaisuutena eteenpäin ylemmille protokollille loogisille kanaville. MAC on siis protokollapinon ensimmäinen taso, jossa aidosti näkyy useiden kantoaaltojen olemassaolo. Ylemmillä protokollapinon tasoilla dataa tulee yhtenä kokonaisuutena, eikä sitä ole vielä jaettu solujen kesken. [32]

Lisäsolujen aktivointi on kantoaaltojen yhdistämisessä välttämätön toimenpide, mikäli RRC-protokolla ei ole valmiiksi määrittänyt soluja aktiivisiksi. Konfiguroitu lisäsolu otetaan käyttöön, kun tukiasema lähettää puhelimelle MAC CE:n (MAC control element), jossa on biteillä kerrottu kunkin lisäsolun status. Lisäsolun käytöstä poisto hoituu samalla tavalla. Lisäsolu voidaan myös ottaa pois käytöstä ajastimeen perustuen.

MAC-spesifikaatio ei määritä tarkemmin, milloin ylimääräisten solujen aktivointi ja deaktivointi tulee tehdä, vaan määrittää minkälaisella sanomalla se suoritetaan. Itse algoritmit, joiden perusteella solujen aktivointi hoidetaan, jää laitevalmistajien päätettäväksi. Tavoitteena on kuitenkin, että tarvittaessa lisäkapasiteetti on nopeasti käytettävissä, mutta toisaalta mahdollisuus deaktivoida tarpeettomat solut säästää energiaa. [32]

5. KANTOAAALTOJEN YHDISTÄMISEN TOIMINTA 5G-VERKOISSA

Tässä luvussa kuvataan prosesseja, joita kantoaaltojen yhdistäminen verkossa vaatii ja pohditaan spesifikaatioiden jättämiä mahdollisuuksia laitevalmistajille. Koska työ perustuu kirjallisiin julkisesti saatavilla oleviin lähteisiin, eivät esimerkit kuvaa suoraan, miten nämä asiat on nykypäivän verkoissa toteutettu. Esitetyt vaihtoehdot ovatkin omaa analyysia erilaisista potentiaalisista toimintatavoista, jotka ovat spesifikaatioiden puitteissa mahdollisia toteuttaa.

Kun puhelin haluaa liittyä 5G-verkkoon, se kuuntelee, mitä soluja on tarjolla ja aloittaa prosessin sellaiseen liittymiseen. Liittymisvaiheessa puhelin siis aloittaa aina yhdellä solulla ja mahdolliset lisäsolut kerrotaan puhelimelle vasta myöhemmin. Puhelimen ei ole siis mahdollista suoraan liittyä useampaan soluun, eikä sillä välttämättä ole edes tietoa verkon muista soluista eikä verkon tuesta kantoaaltojen yhdistämiselle. Mikäli verkkoon on konfiguroitu tuki kantoaaltojen yhdistämiselle ja puhelinkin tukee CA:ta, voi tukiasema aloittaa prosessit ylimääräisten solujen lisäämiseen puhelimelle, mutta kaikki solujen lisäämiseen liittyvät päätökset tehdään tukiaseman toimesta, eikä puhelimella ole asiaan määräysvaltaa.

NSA-verkoissa verkkoon liittyminen eroaa SA-verkoista, sillä ensimmäisenä puhelin liittyy 4G-verkkoon. Tässä vaiheessa päätelaite ja 4G-tukiasema vaihtavat tietoa päätelaitteen tukemista ominaisuuksista. Mikäli puhelin ilmoittaa tukevansa EN-DC:tä, 4G-tukiasema (eNB) tyypillisesti ohjaa puhelimen mittaamaan 5G-solua ja mittaraportin saatuaan lisää puhelimelle 5G-tukiaseman (gNB) ja puhelin yhdistää siihen. Tämä mahdollistaa sen, että puhelimen on käytännössä heti samalla mahdollista saada tieto kaikista 5G-soluista, eikä ole tarpeen aloittaa prosessia vain yhdellä 5G-solulla. Signaalointi menee 4G-puolen kautta, joten ei tarvita yhteyttä ensimmäiseen 5G-soluun saadakseen tieto muistakin 5G-soluista.

Lisäksi kantoaaltojen yhdistämistä ei tule sekoittaa kaksoisyhteyteen (engl. Dual Connectivity, DC), vaikka se onkin toiminnaltaan hyvin samankaltainen. Siinä puhelin on samanaikaisesti yhteydessä useampaan tukiasemaan ja niiden soluihin. Tällöin liikenne jaetaan kahtia eri tasolla protokollapinoa. Käytännössä kahden solun DC voidaan ajatella vastaa- van kahden solun kantoaaltojen yhdistämistä sillä erolla, että toinen on tukiaseman sisäi-

nen operaatio ja toinen on kahden eri tukiaseman välinen. Taajuuskapasiteettia saadaan kuitenkin molemmista soluista käyttöön. Kantoaaltojen yhdistäminen mahdollistaa kuitenkin esimerkiksi solut, joissa on pelkästään alalinkki, jotka eivät ole mahdollisia DC:llä toteutettuna. Lisäksi useamman kuin kahden solun yhdistäminen ei onnistu pelkällä DC:llä. DC ei kuitenkaan poissulje kantoaaltojen yhdistämistä, kuten huomataan NSA-yhteyksiä käsittelevässä alaluvussa.

Ylimääräinen ylälinkki (engl. Supplementary Uplink, SUL) on myös 5G-verkkojen ominaisuus, joka on hyvin samanlainen kantoaaltojen yhdistämisen kanssa, mutta nämä kaksi ovat kuitenkin eri asioita eikä niitä tule sekoittaa keskenään. Ylimääräistä ylälinkkiä voidaan käyttää kantoaaltojen yhdistämisen tapaan parantamaan verkon peittoa antamalla puhelimelle mahdollisuus käyttää matalampaa taajuutta ylälinkin suuntaan. SUL ei kuitenkaan mahdollista datan lähettämistä ylälinkin suuntaan samanaikaisesti useamman kantoaallon kautta. Puhelin joko lähettää dataa SUL:n kautta tai lähettää dataa normaaliin solujen kautta. SUL ei myöskään ole oma solunsa, vaan sen ajatellaan olevan osa jotakin toista solua, jossa on kuitenkin määritetty vaihtoehtoinen reitti kyseisen solun ylälinkin datalle käyttäen toista taajuusaluetta. [18, s. 130–133][25, s. 416–417]

5.1 SA

Kun puhelin liittyy verkkoon, se yhdistyy ihan aluksi vain yhteen soluun, jonka kautta kaikki liikenne menee puhelimen ja verkon välillä. Jotta tukiasema tietää, mitä kaikkia ominaisuuksia puhelin tukee, täytyy sen kysyä puhelimelta tätä UE Capability Enquiry-sanomalla. Tukiaseman täytyy kysyä, mitä kaikkia 5G-ominaisuuksia ja taajuusyhdistelmiä puhelin osaa, jotta se tietää, minkälaisen kantoaaltojen yhdistämisen käyttö on puhelimen kanssa mahdollista. Tukiasema joutuu myös puhelimen tukea kysymään moniin muihinkin asioihin, sillä 5G-verkkojen päätelaitteiden ei tarvitse tukea kuin murto-osaa kaikista mahdollisista verkkojen ominaisuuksista. Kun verkko on saanut tiedon puhelimen tukemista ominaisuuksista, on mahdollista aloittaa lisäsolujen lisääminen yhteyteen. Tämän jälkeen solut pitää vielä asettaa aktiivisiksi ennen kuin niiden kautta aletaan välittämään käyttäjän dataa.

Spesifikaatiot eivät ota kantaa siihen, milloin lisäsoluja tulee lisätä puhelimelle, vaan tämän toteuttaminen jää laitevalmistajien hoidettavaksi. RRC-spesifikaatio määrittää ainoastaan tiedot sanomista, millä puhelimelle lisätään uusia soluja, miten siltä poistetaan olemassa olevia soluja ja ohjeet, kuinka tällaisen sanoman saapuessa puhelimen täytyy toimia. Tämä antaa liikkumavaraa laitevalmistajille toteuttaa omiin tukiasemiinsa juuri heidän tukemilleen CA-ratkaisuille sopivat tavat. Mahdollisuuksia solujen lisäämisen toteuttavalle algoritmille on siis rajattomasti, mutta verkkojen tarpeet huomioiden pohditaan kahta mahdollista toteutustapaa.

Puhelimelle voidaan esimerkiksi lisätä kaikki verkon ylläpitäjän konfiguroimat solut auto-

maattisesti heti, kun laite liittyy verkkoon. Kuitenkin soluja voidaan lisätä vain puhelimen tuen puitteissa, eikä tämäkään ilman mittauksia toimiva tapa tarkoita sitä, että jokaista mahdollista lisäsolua sokeasti yritettäisiin puhelimelle määrittää. Tällainen automaattinen solujen lisääminen soveltuisi esimerkiksi tilanteeseen, jossa kaikkien CA:han osallistuvien solujen maantieteellinen peitto on sama. Käytännössä sama maantieteellinen peitto voidaan saavuttaa sillä, että solut tulevat täysin samasta antennista ja samalla lähetysteholla. Tämä ei toki vielä tarkoita, että puhelin kuulee kaikki solut, sillä jollain taajuudella voi olla esimerkiksi häiriöitä. Mutta teoriassa puhelimen pitäisi pystyä kommunikoimaan kaikkien solujen kanssa, jolloin lisäsolujen mittauksista ei ole mitään hyötyä. Päinvastoin se aiheuttaisi turhia mittauksia ja hidastaisi muiden solujen lisäämistä.

Toinen vaihtoehto on lisätä soluja mittauksiin perustuen. Tällöin tukiasema pyytää puhelimelta mittaraportteja kandidaattisoluihin. Puhelin tekee mittauksen ohjeiden mukaan ja toimittaa tulokset tukiasemalle, joka tekee sitten tulosten perusteella päätöksen mahdollisesta solun lisäämisestä. Esimerkiksi A4-mittausta voisi soveltaa tähän, jolloin lisäsolu lisätään vain, jos sen signaalinvoimakkuus ylittää määritetyn rajan. Tällainen soveltuu tilanteeseen, jossa esimerkiksi pääsolun peitto on laajempi kuin potentiaalisten lisäsolujen. Tällä voidaan välttää tilanne, jossa puhelimelle lisättäisiin solu, jonka peittoalueella puhelin ei todellisuudessa ole. Puhelin voisi esimerkiksi olla matalamman taajuuden pääsolun reunalla, jonne potentiaalinen korkeamman taajuuden lisäsolu ei kuitenkaan enää kuulu.

Solujen vapautuskin voi perustua mittauksiin, esimerkiksi A2-mittaus olisi tähän sopiva. Siinä tapauksessa lisäsolu voitaisiin vapauttaa, kun sen signaalin laatu tai voimakkuus alittaa määritetyn rajan. Tällainen tilanne voi tulla vastaan, jos pääsolun peitto on suurempi kuin lisäsolun ja tilaaja liikkuu pääsolun kantaman sisällä, mutta kuitenkin lisäsolun kantaman ulkopuolelle. Myös esimerkiksi solunvaihtoprosessi toiseen radioteknologiaan vapauttaa lisäsolut, sillä koko 5G-yhteys poistuu käytöstä silloin.

Toisaalta lisäsolun vapautus voisi perustua A6-mittaukseen, jossa liikutaan suuren pääsolun sisällä, mutta useamman lisäsolun välillä. Tällöin lisäsolua saadaan vaihdettua yhdellä RRCReconfiguration-sanomalla, jossa vapautetaan vanha solu ja samalla lisätään uusi.

Toisaalta tukiasema voi toimia niin, että lisäsoluja ei vapauteta niin pitkään kuin puhelin on pääsoluun yhteydessä. Jos lisäsolu on lisätty automaattisesti ja pääsolu pysyy samana, ei pitäisi olla mitään syytä muiden solujen vapauttamiselle. Tällaisessa tilanteessa solujen vapautus tapahtuisi samalla, kun yhteys pääsoluun jostain syystä katkeaa. Käytännössä lisäsolut vapautuvat siinä vaiheessa, kun tehdään solunvaihto toiseen tukiasemaan tai puhelin tippuu kokonaan verkosta. Tällöin vanhat lisäsolut on pakko poistaa käytöstä, koska CA on tukiaseman sisäinen toimenpide, eikä lisäsolut ole siis käytettävissä uuden tukiaseman pääsolun kanssa.

Spesifikaatiot jättävät myös avoimeksi sen, mitä soluja puhelimelle lisätään ja missä jär-

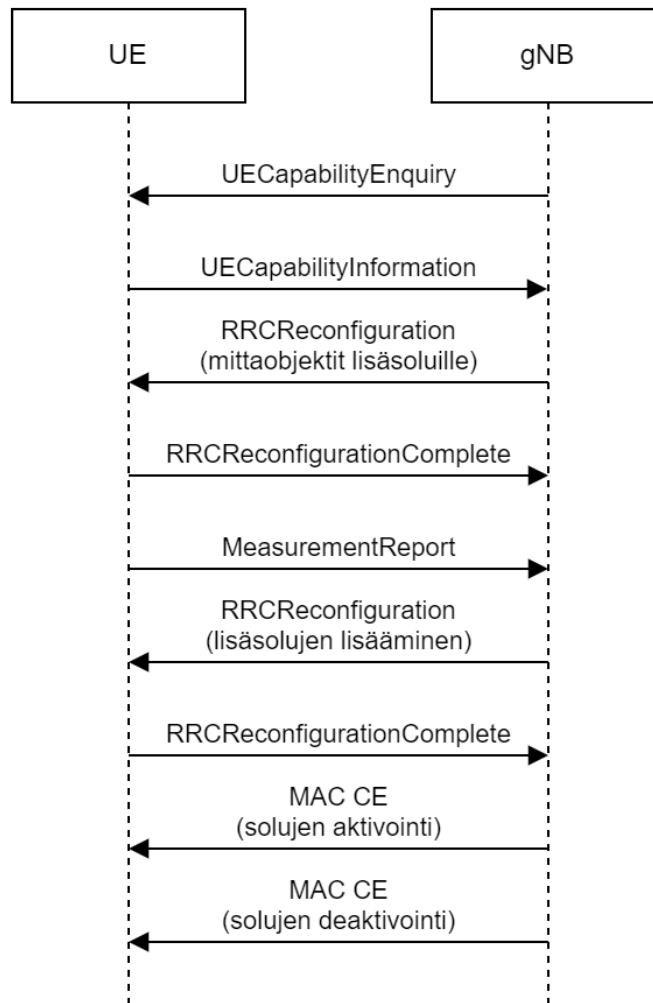
jestyksessä. On mahdollista, että puhelin on useamman lisäsolun kantaman alueella, kuin mitä se pystyy tukemaan. Tällaisessa tilanteessa voisi olla järkevää lisätä esimerkiksi vähiten kuormittunut solu. Toisaalta voitaisiin lisätä suurimman kaistanleveyden omaava solu, jolloin lisäkapasiteettia todennäköisesti saataisiin eniten. Olisi myös perusteltua lisätä ensimmäisenä se solu, jonka signaalivoimakkuus on suurin. Perusteltuja ja erilaisissa tilanteissa järkeviä vaihtoehtoja on siis useita.

Solujen lisäämisen lisäksi solut täytyy vielä aktivoida käyttöön, jotta niiden kautta aletaan välittämään data. Pelkkä lisätty solu ilman sen aktivointia ei siis vielä vaikuta puhelimen tiedonsiirtonopeuteen millään tavalla. Myös solujen aktivoinnin tapauksessa spesifikaatiot määrittelevät vain mahdolliset aktivointi- ja deaktivointitavat, mutta eivät ota kantaa, milloin solu tulisi aktivoida. Yksi mahdollinen aktivointitapa on aktivoida solu heti lisäyksen yhteydessä. Tällöin ei tarvitse lähettää edes erillistä MAC CE -sanomaa, vaan tieto aktivoinnista kulkee jo samassa RRC-sanomassa kuin missä kyseinen solu lisätään. Toisaalta solu voitaisiin aktivoida vain tarpeen vaatiessa, esimerkiksi silloin kun puhelimen ja verkon välillä on niin paljon dataliikennettä, että lisäkapasiteetista on hyötyä. Tällöin solua ei tarpeettomasti pidettäisi aktiivisena, jos siitä ei ole todellista hyötyä kapasiteetin kannalta.

Solun deaktivointi voi perustua MAC CE -sanomaan tai vaihtoehtoisesti ajastimeen. Kun puhelimelle ollaan lisäämässä uutta solua, on RRC-sanomassa mahdollista sisällyttää sCellDeactivationTimer, joka kertoo missä ajassa sCell tulee deaktivoida. Toisaalta solu voitaisiin deaktivoida myös silloin, jos liikenteen määrä laskee eikä lisäkapasiteetille ole enää tarvetta. Mikään ei kuitenkaan pakota deaktivoimaan solua missään vaiheessa, vaan solu voi olla aktiivinen koko sen ajan, kun se on puhelimelle määritettynä. Tällainen olisi toiminnaltaan erittäin yksinkertainen tapa, koska solu aktivoitaisiin heti lisäyksen yhteydessä samalla sanomalla ja solu deaktivoituisi samalla, kun se jostain syystä poistuu käytöstä.

Kuvassa 5.1 on esitetty yksi esimerkki tukiaseman ja puhelimen välillä liikkuvista sanomista, kun kantoaaltojen yhdistäminen on toiminnassa. Kuvassa ensimmäisenä puhelin ja tukiasema vaihtavat tietoja tuetuista ominaisuuksista, minkä jälkeen puhelimelle määrätään mittauksia. Kun mittaraportin kriteerit täyttyvät, lähettää puhelin mittaraportin tukiasemalle, jonka jälkeen tukiasema lisää puhelimelle solut. Tämän jälkeen tukiasema aktivoi solut ja viimeisenä vielä deaktivoi ne. Kuva ei ota kantaa aktivointikriteereihin tai solujen lisäämisen kriteereihin, mutta tällaisia sanomia puhelimen ja tukiaseman välillä voisi liikkua.

Vaikka lisäsolujen aktivointi ei vielä automaattisesti tarkoita sitä, että puhelin lähettää tai vastaanottaa niiden kautta käyttäjädataa, kannattaa ne monesti deaktivoida, kun niiden tarjoamalle lisäkapasiteetille ei ole tarvetta. Kun solu on aktiivisena, joutuu päätelaitte tarkkailemaan mahdollisia lähetyksiä fyysisellä alalinkin kontrollikanavalla (engl. Phy-



Kuva 5.1. Esimerkki puhelimen ja tukiaseman välisistä sanomista, kun kantoaaltojen yhdistäminen on käytössä.

sical Downlink Control Channel, PDCCH) ja toimittamaan tukiasemalle kanavan tilatietoja (engl. Channel State information, CSI). Tällainen lähetysten seuraaminen ja kanavan tilan tutkiminen kuluttaa energiaa. Kun solu deaktivoidaan, ei näitä toimintoja tarvitse tehdä ja siten päätelaite säästää energiaa ja akku kestää pitempään. [18, s. 320]

Solun aktivoinnin ja deaktivoinnin on oltava erittäin nopeita prosesseja, jos solun tilaa halutaan vaihtaa tiheään sen perusteella, onko sen kapasiteetille tarvetta ja pyrkiä samalla säästämään virtaa aina kuin mahdollista. Solun lepotila (engl. Cell Dormancy) on toinen tapa säästää lisäsolujen energiaa. Tällöin PDCCH-monitorointi lopetetaan, mutta CSI-mittauksia ja keulanhallintaa (engl. Beam Management) jatketaan. Etuna on se, että tästä tilasta palautuminen vaatii vähemmän aikaa kuin deaktivoidun solun aktivoiminen. [18, s. 320]

Spesifikaatiot jättävät myös avoimeksi useamman solun CA:n tapauksessa solujen aktiivointijärjestyksen. On siis täysin laitevalmistajan vastuulla toteuttaa algoritmit siihen, missä järjestyksessä aktivoidaan soluja, kun tukiasema on tehnyt päätöksen solujen lisäämisestä. Mahdollinen tapa solujen aktiivointi- ja deaktiivointijärjestyksen toteuttamiseen voisi olla solujen kuorman seuraaminen ja aktivoida aina sellainen solu ensimmäisenä, joka on mahdollisimman vähän kuormittunut. Deaktiivointi kannattaisi hoitaa silloin päinvastaisessa järjestyksessä. Toisaalta puhelimella voi olla soluja eri kaistanleveyksillä, jolloin sitäkin voisi huomioida aktivoinnissa. Toisaalta puhelimella voi olla soluja, joissa on pelkästään alalinkki ja soluja joissa on liikennettä molempiin suuntiin. Tällaisessa tilanteessa esimerkiksi ylälinkin kuorman kasvaessa täytyy aktivoida solu, jossa menee myös ylälinkin dataa.

Koska kantoaaltojen yhdistäminen on suunniteltu 5G-verkoissa tukemaan epäsymmetristä konfiguraatiota, jossa on mukana soluja pelkästään alalinkin suuntaan, täytyy verkon tukea ylälinkin suuntaan menevän kontrolliliikenteen lähettämistä myös muiden kuin sen solun kautta, mihin kontrolliliikenne liittyy. Esimerkiksi MAC-tasolla toimii HARQ (engl. Hybrid Automatic Repeat Request), joka on virheenkorjausta ja virheellisesti vastaanotettujen pakettien uudelleenlähettämistä. Tämä toiminnallisuus vaatii pakettien vastaanottamisen kuittaamista takaisin tukiasemalle ja tyypillisesti tällainen ylälinkin suuntaan menevä kontrolliliikenne hoidetaan pääsolun kautta. On kuitenkin mahdollista, että päätelaite käyttää myös toista solua ylälinkin kontrolliliikenteelle, jolloin kaikki solut jaetaan kahteen ryhmään ja tämän ryhmän perusteella valitaan kahdesta vaihtoehdosta se solu, jonka kautta kontrolliliikenne menee. [18, s. 129–130]

Juuri tällainen toiminnallisuus mahdollistaa pelkästään alalinkin solut, jotka ovat monesti perusteltu ratkaisu sen sijaan, että kaikissa soluissa olisi sekä ylälinkki että alalinkki. Tyypillisesti liikenteen määrä on paljon suurempi alalinkin suuntaan, jolloin on perusteltua, että juuri alalinkin suuntaan panostetaan resursseja. Toisaalta on yksinkertaisempaa tehdä elektroniikkaa usean samanaikaisen alalinkin lähetyksen vastaanottamiseen kuin usean ylälinkin samanaikaiseen lähettämiseen. Siksi esimerkiksi pelkästään alalinkin soluja tarvitaan, jos halutaan yhdistää useita kantoaaltoja, mutta päätelaitteen CA-tuki ei ole ylälinkin ja alalinkin suuntaan yhtä hyvä. [18, s. 129–130]

5.2 NSA

NSA-verkoissa kantoaaltojen yhdistäminen voi olla käytössä hyvin monella tapaa. Esimerkiksi voi olla useita 4G-soluja ja yksi 5G solu, yksi 4G-solu ja useita 5G-soluja tai molemmilla teknologioilla useita soluja samaan aikaan. Työssä keskitytään kuitenkin vain 5G-solujen yhdistämiseen, jolloin merkityksellistä on vain se, että kyseessä on NSA-yhteys ja käytössä on useita 5G-soluja. 5G kantoaaltojen yhdistäminen ei siis sulje pois sitä, että 4G-puolella olisi CA käytössä, mutta se ei toisaalta vaikuta 5G-puolen toiminnin-

taan.

NSA-verkossa osa signaloinnista menee 4G-solun kautta, mikä tarkoittaa sitä, että esimerkiksi lähes kaikki RRC-sanomat menevät sieltä muutamia poikkeuksia lukuun ottamatta. Tällöin kaikki mittaraportit ja päätökset solujen lisäyksistä kommunikoidaan pääsääntöisesti 4G:n kautta, vaikka kyseessä onkin nimenomaan 5G-soluihin liittyviä asioita. SRB3 on poikkeus, joka mahdollistaa mittaraportin toimittamisen suoraan 5G-tukiasemalle ja RRCReconfiguration sanoman toimittamisen suoraan puhelimelle. Tätä voidaan hyödyntää lisäsolujen määräämisessä, sillä 4G-tukiasema ei ole siinä mukana. Tällöin signaali ei kierrä turhaan 4G:n kautta ja viive viesteissä on pienempi. [30]

MAC-tason sanomat menevät kuitenkin NSA-yhteydessä oman teknologian solujen kautta, eli 4G MAC-sanomat menevät 4G:n kautta ja 5G-soluihin liittyvät MAC-sanomat menevät 5G-solujen kautta. Tällöin molemmilla teknologioilla on oma MAC-prosessi, jotka toimivat toisistaan riippumattomasti. Eli MAC-tason toimintaan ja sanomien kulkuun ei NSA:lla ole merkitystä. NSA ei myöskään mahdollista sellaista kantoaaltojen yhdistämistä, että kaikki 5G-solut olisivat vain alalinkin suuntaan. Koska MAC-tason sanomia ei voida välittää 4G-tukiaseman kautta, on myös NSA:n tapauksessa puhelimella oltava aina vähintään yksi 5G-solu, jossa on yhteys myös ylälinkin suuntaan. [32]

Muilta osin NSA-yhteydessä 5G-tukiaseman kantoaaltojen yhdistäminen on hyvin samankaltainen prosessi kuin SA-yhteydessä. Koska toiminnallisuus on 5G-tukiaseman sisäinen, ei 4G-tukiaseman tarvitse osata muuta kuin välittää tarvittavaa kontrolliliikennettä, jos SRB3 ei ole käytössä.

6. YHTEENVETO

Tässä työssä käytiin läpi kantoaaltojen yhdistämistä 5G-verkoissa ja syvennyttiin kyseisen tekniikan hyötyihin sekä käyttäjältä piilossa oleviin teknisiin ratkaisuihin, joilla on mahdollista tarjota entistä parempia palveluja ja toiminnallisuuksia. Verkon käyttäjän kannalta saatiin kattava kuvaus erilaisista tilanteista, joissa kantoaaltojen yhdistäminen on hyödyllinen toiminnallisuus, mutta toisaalta havaittiin, että käyttäjän ei ole kovin helppoa tietää, mitä hänen puhelimensa tukee. Työ antaakin esimerkiksi vastauksia, miksi jotkin päätelaitteet eivät välttämättä kykene hyödyntämään kaikkia verkon tarjoamia ominaisuuksia.

Tekniseltä puolelta työ tiivistää paljon prosesseja sekä informaatiota kantoaaltojen yhdistämiseen liittyen ja antaa siten kuvauksen, miten CA toimii 5G-verkoissa. Teknisen puolen tarkastelulla saatiin myös paljon ymmärrystä, miksi joitakin tiettyjä hyötyjä on mahdollista saavuttaa nimenomaan CA:lla. Vaikka työ ei keskittynyt laitteistopuolen toteutukseen, kävi työssä ilmi, että juuri tarvittavan elektroniikan monimutkaisuus ja siten hinta voivat olla syynä siihen, että tuki CA:lle vaihtelee laitteittain.

Vaikka työ sisältää kattavasti lähteitä, on 5G-verkoissa paljon asioita, joita ei ole tarkasti määritetty missään. Ehkä hieman yllättäen monien toiminnallisuuksien toteuttaminen on jätetty laitevalmistajien vastuulle ja todellisista toteutustavoista on siten hankala saada tietoa. Sen takia työssä ei pystytty käsittelemään aihetta siitä näkökulmasta, miten kantoaaltojen yhdistäminen tosielämässä on toteutettu, vaan minkälaiset puitteet on tarjolla. Jatkotutkimuksena olisikin mielenkiintoista tutkia, kuinka valmistajat ovat lähteneet toteuttamaan työssä mainittuja asioita. Erityisesti algoritmit solujen lisäämiseen ja aktivoimiseen olisivat mielenkiintoinen tutkimusaihe, mutta tästä on varmasti hankala saada tietoa julkisista lähteistä. Myös eri tukiasemavalmistajien ja puhelinten piirisarjavalmistajien tukea eri ominaisuuksille olisi mielenkiintoista tutkia tarkemmin.

Koska aiheeseen liittyy paljon asioita, jotka riippuvat täysin laitevalmistajien omasta toteutustavasta, on työssä käsitelty vain erilaisia mahdollisuuksia ominaisuuksien toteuttamiseen. Esitetyt esimerkkiskenaariot ja algoritmit ovat omaa pohdintaa, mutta kuitenkin perusteltuja ja toteuttamiskelpoisia tapoja. Aihetta olisi myös mielenkiintoista tutkia siitä näkökulmasta, miten eri operaattorit ovat ottaneet kantoaaltojen yhdistämisen käyttöön, koska laitevalmistajien tuki ja kaupallisten verkkojen käytössä olevat ominaisuudet eivät välttämättä kulje käsikädessä. Operaattoreiden käyttämistä CA-ratkaisuista ei kuitenkaan

löytynyt juurikaan tietoa julkisista lähteistä. Yksi lähestymistapa voisi kuitenkin olla lähteä kokeilemaan puhelimella ja 5G-liittymällä operaattoriverkkoja, ja katsoa RRC-sanomista, minkälaisiin soluihin puhelin on yhteydessä.

Paljon paremmin löytyi tietoa laitevalmistajien ja operaattoreiden yhteistyössä tehdyistä nopeusennätyksistä. Tämä myös vahvisti tiedon siitä, että lähes aina markkinoidut nopeusennätykset on saavutettu juuri kantoaaltojen yhdistämistä hyödyntäen. Yhden kanta-aallon maksimikaistanleveys asettaa jo sen rajoitteen, että koko 5G-verkkojen tarjoamaa nopeuspotentiaalia ei voi hyödyntää mitenkään ilman CA:ta.

Tukiasemien ja päätelaitteiden tuki CA:lle paranee koko ajan ja tulevaisuudessa CA:n merkitys 5G-verkoissa luultavasti kasvaa, kun verkkoja otetaan yhä enemmän käyttöön. Suuri osa CA:han vaikuttavista määrittelyistä on jo olemassa, mutta mikään ei estä, etteikö tulevilla verkkojen versioilla tulisi uudistuksia ja parannuksia CA:n toimintaa, joka lisäisi entisestään CA:n potentiaalia.

Työtä tehdessä kävi myös ilmi, että kaikkien laitteiden ei todellakaan tarvitse tukea kaikkia mahdollisia ominaisuuksia, mikä herättää kysymyksen, minkälaisille ominaisuuksille laitteille on tulossa tuki, ja mistä tämän voisi saada tietää. Capability-sanomista toki viimekädessä selviää, tukeeko puhelin juuri kyseisen verkon ominaisuuksia, mutta tällä tavalla asian selvittäminen on melko työlästä. Suurimpia nopeuksia tavoiteltaessa päätelaitteen tarkka tuki ominaisuuksille voi olla olennaisessa roolissa, mutta tällä tuskin on kuluttajille kovin suurta merkitystä.

Työn laajuudesta johtuen monia asioita CA:han liittyen jäi myös käsittelemättä ja monet asiat käsiteltiin hyvin pintapuolisesti. Tietoa kantoaaltojen yhdistämisen toiminnasta löytyi myös pieninä palasina useista eri lähteistä ja alan kirjoissakin useista eri luvuista, eikä työ sen takia varmasti kata kaikkia erikoisuuksia, sillä jotain on varmasti jäänyt huomaamatta. Myös 4G-verkkojen kantoaaltojen yhdistämisen toiminnasta oli paljon tietoa saatavilla ja välillä tätä tietoa pystyi soveltamaan 5G-verkkoihin. Kantoaaltojen yhdistämisen peruseräpäätökset onnistuttiin kuitenkin esittämään onnistuneesti.

LÄHTEET

- [1] *Ericsson Mobility Report*. Ericsson. Kesäkuu 2022. URL: <https://www.ericsson.com/49d3a0/assets/local/reports-papers/mobility-report/documents/2022/ericsson-mobility-report-june-2022.pdf>.
- [2] *European 5G scoreboard*. URL: <https://5gobservatory.eu/observatory-overview/interactive-5g-scoreboard/> (viitattu 05. 05. 2023).
- [3] *Yksi maailman ensimmäisistä 5G-verkoista avattiin Suomessa – Asiantuntija: "Mullistaa operaattoreiden ansaintamallit"*. 27. kesäkuuta 2018. URL: <https://yle.fi/a/3-10277546> (viitattu 05. 05. 2023).
- [4] *Telia aloittaa 5G-laitteiden ja -liittymien myynnin*. 9. lokakuuta 2019. URL: <https://www.telia.fi/telia-yrityksena/medialle/epress?articleId=98a3981d-8027-4a97-abb8-aa63f8eac97b> (viitattu 05. 05. 2023).
- [5] *5g-taajuuksien huutokauppa päättyi odotetusti – valtio nettosi 77 miljoonaa*. 1. lokakuuta 2018. URL: <https://yle.fi/a/3-10432652> (viitattu 05. 05. 2023).
- [6] *Kuuluvuuskartta*. URL: <https://www.dna.fi/kuuluvuuskartta> (viitattu 05. 05. 2023).
- [7] *Kuuluvuus*. URL: <https://elisa.fi/kuuluvuus/> (viitattu 05. 05. 2023).
- [8] *Kuuluvuus*. URL: <https://www.telia.fi/asiakastuki/kuuluvuuskartta?intcmp=5g-verkko-kuuluvuuskartta> (viitattu 05. 05. 2023).
- [9] *Elisa avasi Pohjoismaiden ensimmäisen 5g-standalone-verkon*. 19. heinäkuuta 2021. URL: <https://www.mikrobitti.fi/uutiset/elisa-avasi-pohjoismaiden-ensimmaisen-5g-standalone-verkon/0f3d1e35-d53a-4cea-81ae-fa3a69d8a9d5> (viitattu 05. 05. 2023).
- [10] *DNA ottaa käyttöön oikean 5g:n – asiakkaille ensi vuonna*. 19. marraskuuta 2021. URL: <https://www.mikrobitti.fi/uutiset/dna-ottaa-kayttoon-oikean-5gn-asiakkaille-ensi-vuonna/b1b404b9-3e13-4cb8-ab64-4640a1f7dd38> (viitattu 05. 05. 2023).
- [11] *Introducing 3GPP*. URL: <https://www.3gpp.org/about-us/introducing-3gpp> (viitattu 12. 05. 2023).
- [12] *Digital cellular telecommunications system (Phase 2+) (GSM); Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); LTE; 5G; Release description; Release 15*. 21.915. Version 15.0.0. 3GPP. Lokakuu 2019.
- [13] *What is 5G Fixed Wireless Access (FWA)?* URL: <https://www.metaswitch.com/knowledge-center/reference/what-is-5g-fixed-wireless-access-fwa> (viitattu 05. 05. 2023).
- [14] *5G System Overview*. URL: <https://www.3gpp.org/technologies/5g-system-overview> (viitattu 05. 05. 2023).

- [15] *Open RAN functional splits, explained*. URL: <https://www.5gtechnologyworld.com/open-ran-functional-splits-explained/> (viitattu 05. 05. 2023).
- [16] *Carrier Aggregation on Mobile Networks*. URL: <https://www.3gpp.org/technologies/carrier-aggregation-on-mobile-networks> (viitattu 05. 05. 2023).
- [17] *Nokia achieves world-record 5G speeds*. 19. toukokuuta 2020. URL: <https://www.nokia.com/about-us/news/releases/2020/05/19/nokia-achieves-world-record-5g-speeds/> (viitattu 05. 05. 2023).
- [18] Erik Dahlman, Stefan Parkvall ja Johan Sköld. *5G NR : the next generation wireless access technology*. Second edition. London, United Kingdom: Academic Press, 2021.
- [19] *Matkaviestinverkkojen taajuudet ja luvanhaltijat*. URL: <https://www.traficom.fi/fi/viestinta/viestintaverkot/matkaviestinverkkojen-taajuudet-ja-luvanhaltijat> (viitattu 05. 05. 2023).
- [20] *The power of 5G Carrier Aggregation*. URL: <https://www.ericsson.com/en/blog/2022/2/the-power-of-5g-carrier-aggregation> (viitattu 14. 05. 2023).
- [21] *Nokia leapfrogs to 3.9 Gbps with its industry leading 5G Carrier Aggregation solutions*. URL: <https://www.nokia.com/blog/nokia-leapfrogs-to-39-gbps-with-its-industry-leading-5g-carrier-aggregation-solutions/> (viitattu 14. 05. 2023).
- [22] *Snapdragon X50 5G Modem-RF System*. URL: <https://www.qualcomm.com/products/technology/modems/snapdragon-x50-5g-modem> (viitattu 15. 05. 2023).
- [23] *Snapdragon X70 Modem-RF System*. URL: <https://www.qualcomm.com/products/technology/modems/snapdragon-x70-modem-rf-system> (viitattu 15. 05. 2023).
- [24] Andreas F. Molisch. *Wireless communications*. 2nd ed. Chichester: Wiley, 2011.
- [25] Antti Toskala, Harri Holma ja Takehiro Nakamura. *5G Technology: 3GPP New Radio*. Newark: John Wiley & Sons, Incorporated, 2020.
- [26] *5G Carrier Aggregation explained*. URL: <https://www.nokia.com/about-us/newsroom/articles/5g-carrier-aggregation-explained/> (viitattu 03. 05. 2023).
- [27] *Carrier aggregation in 5G*. URL: <https://www.ericsson.com/en/ran/carrier-aggregation> (viitattu 05. 05. 2023).
- [28] *What is the OSI Model?* URL: <https://www.cloudflare.com/en-gb/learning/ddos/glossary/open-systems-interconnection-model-osi/> (viitattu 05. 05. 2023).
- [29] *5G; NR; Radio Resource Control (RRC); Protocol specification*. 38.331. Version 16.1.0. 3GPP. Heinäkuu 2020.
- [30] *Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); LTE; 5G; NR; Multi-connectivity; Overall description; Stage-2*. 37.340. Version 16.1.0. 3GPP. Heinäkuu 2020.
- [31] *Key insights: Early measurements for improved carrier aggregation and dual connectivity setup*. URL: <https://www.ericsson.com/en/blog/2020/10/carrier-aggregation-dual-connectivity> (viitattu 28. 05. 2023).
- [32] *5G; NR; Medium Access Control (MAC) protocol specification*. 38.321. Version 16.1.0. 3GPP. Heinäkuu 2020.