

Artturi Syri

FCP-VIESTIEN KÄSITTELYN OPTIMOINTI L1LOW-RADIO-OHJELMASSA

FCP-VIESTIEN KÄSITTELYN OPTIMOINTI L1LOW-RADIO-OHJELMASSA

Artturi Syri
Opinnäytetyö
Kevät 2023
Tietotekniikan tutkinto-ohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Tietotekniikan tutkinto-ohjelma, ohjelmistokehitys

Tekijät: Artturi Syri

Opinnäytetyön nimi: FCP-viestien käsittelyn optimointi L1Low-radio-ohjelmassa

Työn ohjaajat: Jukka Jauhiainen, Jussi Laitinen

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Kevät 2023

Sivumäärä: 38 + 2 liitettä

Opinnäytetyön tilaajana oli Nokia Oyj ja Mobile Networks -tulosyksikön Oulussa toimiva L1Low-tiimi. Opinnäytetyön tarkoituksena oli optimoida 5G NR -ilmarajapinnan toimintaa ohjaavan radioyksikön L1Low-ohjelmistokomponentin kontrollitason viestien käsittelyä. Kontrollitason viestit kertovat radioyksikölle mitä fyysisiä resursseja tietyn radiosignaaliin lähetyksessä käytetään ja miten radiosignaali kohdistetaan vastaanottavaan laitteeseen radiosignaaliin keilanmuodostuksella. Tavoitteena oli lyhentää käsittelyn suoritukseen kuluvaa aikaa optimoimalla viestin tietojen radioyksikön RAM-muisteihin kirjoittamista.

Työ aloitettiin tutustumalla LTE- ja 5G NR -ilmarajapinnan toimintaan. Tässä lähteinä toimivat LTE- ja 5G NR -ilmarajapintojen toimintaa käsittelevät kirjat sekä ORAN-dokumentit. Optimointitehtävät aloitettiin tehtävien spesifikaation mukaisesti yhdistämällä RAM-muistin muistiväylää pienemmät kirjoitettavat tietueet ja kirjoittamalla ne RAM-muistiin isommissa kokonaisuuksissa käyttäen koko muistiväylää. Tämä ei tuonut parannusta käsittelyyn, vaan lisäsi sitä L1Low-ohjelmistokoodin kompleksisuuden kasvun takia. Sen jälkeen L1Low'n ohjelmistokoodista etsittiin ja löydettiin useita optimoitavia kohtia. Näihin tehtiin optimoinnit ja oikeanlainen toiminta testattiin yksikkö- ja komponenttitesteillä. Käsittelyn nopeutus mitattiin komponenttitesteillä verraten tuloksia ennen optimointeja saatuihin tuloksiin.

Työn lopputuloksena todettiin optimointien toimivan oikealla tavalla niin yksikkö- kuin komponenttitesteissä. Kontrolliviestien käsittelyn kestoja optimoinnit paransivat ensimmäisellä optimoinnilla kirjoituksessa keskimäärin 7,6 % ja toisella optimoinnilla keskimäärin 28 %. Nämä tulokset täyttivät käsittelyn kestolle asetetut vaatimukset ja mahdollistivat radioyksikön oikeanlaisen toiminnan. Optimoinnit otettiin välittömästi käyttöön kentällä käytössä olevissa radioyksiköissä.

Asiasanat: Control Plane -viesti, optimointi, radio-ohjelmisto, keilanmuodostus, OFDM

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Degree Programme in Information Technology, Option of Software Development

Author: Artturi Syri

Title of thesis: Optimization of FCP-message handling in L1Low-radio software

Supervisors: Jukka Jauhiainen, Jussi Laitinen

Term and year when the thesis was submitted: Spring 2023

Number of pages: 38 + 2 appendices

The client of the thesis was Nokia Mobile Networks business group's L1Low tribe in Oulu. The purpose of the thesis was to optimize handling of control plane messages in radio software in radio unit. Control plane message contains instructions for sending radio signal over air-interface. The goal was to reduce the time spent in message processing by optimizing RAM writes.

Thesis was started by getting to know the operation of the LTE and 5G NR air—interface from books and ORAN documents. Optimization tasks were started by testing changes according to the task's definitions. Original tasks definitions proposed to combine smaller items than RAM memory bus width and write those to the RAM using the entire memory bus at once. This approach was not successful and did not cause a reduction in the duration of the message processing. The software code of radio was checked and thus a couple of optimization possibilities were found, which were then carried out.

The optimizations were tested with unit tests and system component tests, and they worked as expected. The time reduction was compared to the result before optimizations. Optimization reduced processing time by an average of 35 %. The results achieved the goals, and the optimizations were immediately deployed in the radio units.

Keywords: Control Plane -message, optimization, radio software, beamforming, OFDM

SANASTO

3GPP	3rd Generation Partnership Project, radioverkkojen kehityksestä ja standardisoinnista vastaava järjestö
5G NR	5G New Radio. 5G-standardi
beamforming	Radioaaltojen keilanmuodostus
bit	Bitti, pienin tietotekniikan tuntema tieto, 1 tai 0
kantoaalto	Määriteltyä keskitaajuutta ja kaistanleveyttä käyttävä radioaalto
C-Plane	Control Plane, kontrollitason viesti radioyksikölle
DL	Downlink, tietoliikenne verkosta päätelaitteeseen
DU	Distributed Unit, kantataajuusyksikkö
ECPRI	Encached Common Public Radio Interface
FCP-viesti	Fast Control Plane -viesti, Nokian käyttämä nimitys C-plane viestistä
FDD	Frequency Division Duplex, taajuusjakoinen duplex eli lähetys- ja vastaanottoaikaista ovat eri taajuuksilla
FDMA	Frequency Division Multiple Access, taajuusjakoinen moniiliityntäteknikka
FFT	Fast Fourier Transformation, matemaattinen menetelmä aikajakaisen signaalin muuttamiseksi taajuusjakoiseksi

G	generation, radioverkon sukupolvi
Hz	hertsi, taajuuden yksikkö, käytetään kerrannaisyksiköiden etuliitteiden kanssa (k, M, G)
IFFT	Inverse Fast Fourier Transformation, matemaattinen menetelmä taajuusjakaisen signaalin muuttamiseksi aikajakoiseksi
ilmarajapinta	Tukiaseman ja päätelaitteen välinen radiosignaaliyhteys
interferenssi	Radioaaltojen yhdistyminen, voi joko vahvistaa aaltoa tai vaimentaa
kaistanleveys	Taajuuskaistan tai kanta-aallon pienimmän ja suurimman taajuuden erotus, määrittää radiosignaalin suurimman tiedonsiirto-kyvyn.
L1LOW	Radion fyysisestä toiminnasta vastaava ohjelmistokomponentti
LTE	Long Term Evolution, neljännen sukupolven tekniikan radioverkoista käytetty nimitys
MIMO	Multiple In Multiple Out, usean eri antennin yhtäaikaista käyttöä tiedonsiirrossa ilmarajapinnan yli
modulointi	Bittien koodaaminen radiosignaaliksi radioaallon amplitudia ja vaihe-eroa referenssisignaaliin muuttamalla
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing, tekniikka, jossa kanta-aalto on jaettu apukanta-aaltoihin

OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDM:än perustuva moniliityntätekniiikka
PRB	Physical Resource Block, 12 apukantoaallon resurssielementit, käytetään datan lähetykseen ja vastaanottoon
radio frame	Radioaaltojen lähetyks- ja vastaanottoikkuna, kesto aika riippuu teknologiasta, LTE ja 5G NR -ilmarajapinnassa 10 ms
RAM	Random Access Memory, muisti, jota suoritettava ohjelma käyttää
RAN	Radio Access Network, radioliityntäverkko
RE	Resource Element, yksittäinen symboli
RB	Resource Block, LTE-ilmarajapinnassa 12 apukantoaallon yhden slotin symbolit, 5G NR -ilmarajapinnassa 12 apukantoaaltoa
RU	Radio Unit, radioyksikkö
SCS	Sub Carrier Spacing. Apukantoaaltojen keskitaajuuksien erotus, määrittää lähetettävien symbolien määrän sekunnissa
slot	Subframe jakautuu slotteihin, LTE-subframessa 2 slottia, 5G-subframessa riippuu käytetystä numerologiasta
subcarrier	Apukantoaalto. LTE- ja 5G NR -verkoissa kantaalto on jaettu kaistanleveydeltään kapeampiin toisiaan häiritsemättömiin apukantoaaltoihin

subframe	LTE ja 5G NR -radioverkoissa radio frame jakautuu 10:een 1ms kestävään alaikkunaan
symboli	OFDM-tekniikassa pienin radiosignaalin välittämä tieto, modulaatiosta riippuen välittää 2-8 bittiä/symboli
Taajuuskaista/kaista	Radioyhteyden käyttämä taajuusalue
TDMA	Time Division Multiple Access, aikajakoinen moniliittymätekniiikka
UE	User Equipment, radioverkkoa käyttävä päätelaite
UL	Uplink, tietoliikenne päätelaitteelta verkkoon
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access, laajakaistainen koodijakoinen moniliittymätekniiikka

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ.....	3
ABSTRACT.....	4
SANASTO.....	5
SISÄLLYS.....	9
1 JOHDANTO.....	10
2 LANGATTOMIEN RADIOVERKKOJEN ILMARAJAPINNAT 1G – 4G.....	12
2.1 1G-verkot.....	12
2.2 2G-verkot.....	12
2.3 3G-verkot.....	13
2.4 4G-verkot.....	14
2.4.1 OFDM.....	15
2.4.2 Kantoaalto ja apukantoaalto.....	15
2.4.3 FFT ja symboli.....	16
2.4.4 Cyclic prefix.....	17
2.4.5 Slot, resurssielementti, resurssilohko, subframe ja radio frame.....	18
2.4.6 DL OFDM, OFDMA ja UL SC-FDMA.....	20
2.4.7 FDD ja TDD LTE-ilmarajapinnassa.....	22
2.4.8 Tiedonsiirtonopeus LTE-ilmarajapinnan yli, MIMO ja kantoaaltojen yhdistäminen.....	23
3 5G-VERKOT.....	25
3.1 5G core-verkko ja RAN.....	25
3.2 5G NR -ilmarajapinta.....	27
3.3 5G NR -radio frame ja resurssilohko.....	28
3.4 Beamforming.....	30
4 L1LOW-OHJELMISTOKOMPONENTTI.....	31
4.1 FCP-viesti.....	31
5 FCP-VIESTIEN KÄSITTELYN OPTIMOINTI L1LOW-OHJELMISTOKOMPONENTTISSA...	34
6 YHTEENVETO.....	35
LÄHTEET.....	36
LIITTEET.....	39

1 JOHDANTO

Matka- ja älypuhelinien sekä muiden radiokommunikoivien laitteiden käyttämä radioverkko on kehittynyt viimeisen 40 aikana valtavasti. Käytössä olevien radioverkkojen teoreettinen tiedonsiirtonopeus kiinteän verkon ja UE:n eli radioverkkoa käyttävän päätelaitteen välillä on kasvanut ensimmäisen sukupolven (1G) 2,4 kbit/s:n nopeudesta aina viidennen sukupolven (5G) 10 Gbit/s nopeuteen, ja verkon viive on laskenut jopa 1 ms:iin. (1; 2.) Kehitysasteella olevan 6G-verkon teoreettinen tiedonsiirto on jopa 1000 Gbit/s (3). Sukupolvien rajat eivät ole selkeitä. Uudemmissa polvissa on hyödynnetty luonnollisesti edellisten polvien teknologiaa. Toisaalta markkinoinnin takia puhtaasti aikaisemman sukupolven tekniikalla toteutettuja verkkoja on kutsuttu uuden sukupolven verkoiksi.

Uusimmassa kuluttajien käytössä olevassa 5G NR -verkossa ilmarajapinnan RU:n eli radioyksikön ja UE:n välistä radiosignaalin käsittelyä on siirretty radioyksikköön. Tämä on radion fyysistä toimintaa eli OSI-mallin L1-tason toimintaa. Siirtämällä toiminnallisuutta radioyksikköön pyritään mahdollistamaan RU:n ja UE:n välisen ilmarajapinnan mahdollisimman nopea ja reaaliaikainen toiminta. Tämä vaatii radioyksiköltä prosessointitehoa ja sen fyysisiä toimintoja ohjaavalla reaaliaikaisella L1Low-ohjelmistokomponentilta mahdollisimman tehokkaita algoritmeja. Opinnäytetyössä perehdytään ilmarajapinnan toimintaan langattomissa radioverkoissa aikaisemmista radioverkkosukupolvista uusimpaan käytössä olevaan 5G NR -radioverkkoon saakka.

Opinnäytetyön tarkoitus on optimoida 5G NR -radioverkossa DU:lta eli kantataajuusyksiköltä saapuvien RU:n toimintaa ohjaavien FCP-viestien käsittelyä L1Low-komponentissa ja siten lyhentää viestien käsittelyyn kuluva aikaa. Käsittelyt ovat kriittisessä osassa ilmarajapinnan toiminnan ja oikea-aikaisuuden kannalta. L1low-ohjelmistokomponentti lukee FCP-viestit ja tallentaa tiedot RAM-muistiin, joka on varattu ohjaamaan radion fyysistä toimintaa. Opinnäytetyössä esitellään optimointeja, joiden tarkoitus on lyhentää viestien sisältämien tietojen lukemiseen ja tallentamiseen kuluva aikaa.

Opinnäytetyössä esitellyt optimoinnit tulevat onnistuessaan käyttöön kentällä oleviin Nokian radioyksikköihin. Optimointien onnistuminen voidaan mitata vertaamalla FCP-viestien käsittelyaikaa todellisella radioyksiköllä nykyisellä L1low-ohjelmistolla ja optimoidulla L1low-ohjelmistolla.

Työn tilaajana toimii Nokia Oyj ja tarkemmin Mobile Networks (MN) -tulosityksikkö. Mobile Networks kehittää ja ylläpitää olemassa olevia radioverkkoja ja niihin liittyviä laitteita ja ohjelmistoja. Se myös tutkii ja kehittää tulevan sukupolven (6G) radiotekniikkaa.

2 LANGATTOMIEN RADIOVERKKOJEN ILMARAJAPINNAT 1G – 4G

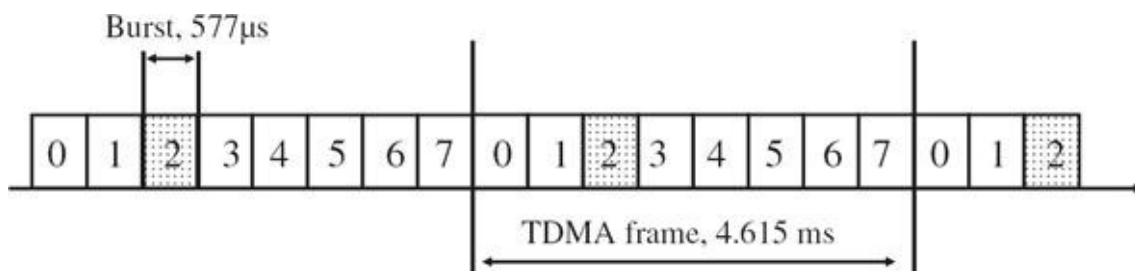
Langattomien radioverkkojen ilmarajapinnassa on tapahtunut valtavasti kehitystä 1G-radioverkosta uusimpaan kuluttajakäytössä olevaan 5G NR -radioverkkoon. Uusien radioverkkosukupolvien kehityksessä on hyödynnetty ja parannettu edellistä sukupolvea sekä muutettu tai poistettu rajoitteellisia ja puutteellisia tekniikoita. Kehityksessä on hyödynnetty myös paljon muun tietotekniikan kehityksen suomia mahdollisuuksia. Esimerkiksi tietokoneiden ja suorittimien laskentatehon kasvaminen on ollut suuressa roolissa kehityksessä. Tämä on mahdollistanut raskaampien algoritmien suorittamisen radiosignaalin käsittelyssä niin RU:ssa kuin UE:ssä.

2.1 1G-verkot

1G-verkkojen tiedonsiirto perustui puhtaasti analogiseen tekniikkaan, joka oli samankaltaista kuin perinteisissä analogisissa radioissa. Ne olivat ensimmäisiä automaattisia radioverkkoja ja verkon yli liikkui pelkästään puhedata. 1G-verkot olivat ensimmäisiä verkkoja, jotka käyttivät FDMA:ta, eli eri UE:t kommunikoiivat tukiaseman, eli langattoman verkon kiinteään verkkoon yhdistävän radion ja sitä ohjaavan tietokoneen, kanssa käyttäen eri taajuisia kantoaaltoja. Kantoaalto tarkoittaa määriteltä kaistanleveyttä käyttävää radioaaltoa, joka välittää dataa. Ensimmäisen sukupolven radioverkko avattiin pohjoismaissa 1981 nimellä NMT (Nordic Mobile Telephone System) 450-750 MHz:n taajuusalueella. 1G-verkoissa oli vakavia ongelmia tietoturvan sekä kapasiteetin kanssa. (2.)

2.2 2G-verkot

Toisen sukupolven(2G) radioverkot tunnettiin nimellä GSM (Global System for Mobile Communication). GSM-standardin mukainen verkko avattiin kuluttajille ensimmäisenä Suomessa 1991. (2.) Verkko on täysin digitaalinen ja se yhdistää FDMA:n ja TDMA:n eli hyödyntää sekä taajuus- että aikajakoista tiedonsiirtoa tukiaseman ja UE:n välillä. Tällöin UE:t on jaettu eri taajuuskaistoille eli ne käyttävät tiedonsiirtoon samaa kantoaaltoa, mutta samalla kantoaallolla voi olla monta UE:ta. Jokaisella UE:lla on radio frame (kuva 1), eli GSM-verkoissa 4,615 ms:n kestoisen radioliikenneikkunan, aikana oma lyhyempikestoisen 577 µs:n aikaikkuna (slot, pusrake), jolloin tiedonsiirto UE:n ja tukiaseman välillä ilmarajapinnan yli tapahtuu. (4.)



KUVA 1. GSM-radioverkkojen radioframe, jonka sisällä slotit(numeroidut) (5)

GSM-verkot tarjoaa paremman äänenlaadun puheluihin sekä suuremman tiedonsiirtokyvyn, joka mahdollistaa tekstiviestien (SMS) sekä kuvaviestien lähettämisen (MMS). GSM-verkot mahdollistavat roamingin eli toiminnan muiden maiden radioverkoissa. Lisäksi tiedonsiirto GSM-verkon yli on salattua. (4.) GSM-verkon teoreettinen tiedonsiirtokky oli alun perin 9,6 kbit/s. Sitten sen päälle kehitettiin GPRS (General Packet Radio Service) sekä EDGE (Enhanced Data Rates for Global Evolution), jotka kasvattivat käytännön tiedonsiirtonopeutta aina 270 kbit/s:in saakka. (4; 5.) GSM-verkkojen kanta-aallon eli tiettyä keskitaajuutta ja taajuuskaistaa käyttävän radioaallon kaistanleveys on 200 kHz (4). Suomessa GSM-verkot toimivat 900 MHz:n taajuuskaistalla (880–960 MHz) ja 1800 MHz:n taajuuskaistalla (1710–1880 MHz) (6).

2.3 3G-verkot

Radioverkkojen tiedonsiirtokyvyn kasvaneen tarpeen vuoksi kolmannen sukupolven (3G) UMTS-verkot (Universal Mobile Telecommunications System) kehitettiin yhdistämään puheludata sekä nopeat mobiilitietoliikenneyhteydet (4). UMTS-radioverkon ilmarajapinnan tiedonsiirto perustuu WCDMA:han (Wideband Code Division Multiple Access). Tämä tarkoittaa, että samalla kanta-aallolla voi olla useita käyttäjiä, mutta tukiaseman ja UE:n välinen tiedonsiirto on koodattu siten, että vain oman koodinsa lähetetystä datapaketista tunnistava UE voi vastaanottaa datapaketin. Tämä mahdollistaa tiedonsiirron samanaikaisesti samalla kanta-aallolla tukiaseman ja usean UE:n välillä, joten se nopeuttaa tiedonsiirtoa ja vähentää viivettä. (4; 5.)

Ensimmäisen UMTS:n 3GPP-standardin (Release 99) mukaan tiedonsiirtonopeus tukiaseman ja UE:n välillä on 384 kbit/s. UMTS:ään jatkokehitettiin HSDPA (High Speed Downlink Packet Access), HSUPA (High Speed Uplink Packet Access) sekä HSPA+ (High Speed Packet Access+). HSPA+:ssa otettiin käyttöön MIMO eli usean eri antennin käyttö tiedonsiirtoon ilmarajapinnan yli samalla taajuuskaistalla ja kanta-aallolla samanaikaisesti (4; 7). Tämä mahdollisti usean erillisen

streamin eli radiolinkin tukiaseman ja UE:n välillä. Lisäksi kehitettiin dual-carrier eli tiedonsiirtoon tukiaseman ja UE:n välillä käytettiin kahta eri taajuuskaistan kantaaltoa. UMTS-verkkojen suurin teoreettinen tiedonsiirtokyky 84,4 Mbit/s saavutetaan käyttämällä MIMO:a ja dual-carrieriä. (4.)

UMTS-verkot toimivat Suomessa taajuusalueilla 1800 MHz ja 2000 MHz. Taajuuskaistat ovat parillisia ja käytössä on FDD eli lähetys- ja vastaanottoaika tukiaseman ja UE:n välillä ovat eri taajuuksilla. Esimerkiksi 1800 MHz:n parillisella taajuuskaistalla DNA:n tukiaseman vastaanottoaika on 1735,100–1759,900 MHz taajuusalueella ja lähetysaika 1830,100–1854,900 MHz taajuusalueella. (6.) Kantaallon kaistanleveys on 5 MHz (4).

2.4 4G-verkot

Neljännän sukupolven radioverkot tunnetaan nimellä LTE (Long Term Evolution) ja LTE-A (Long Term Evolution Advanced). LTE-verkot kehitettiin ratkaisemaan UMTS-verkkojen tekniikan ongelmat, esimerkiksi tiedonsiirtokapasiteetin rajallisuudessa, joka johtui UMTS-verkoissa käytetystä kantaallon 5 MHz:n kaistanleveydestä, sekä tiedonsiirron korkea virrankulutus. (4.) Lisäksi LTE-radioverkon tietoliikenne kehitettiin IP-pohjaiseksi eli se käyttää kiinteän tietoliikenneverkon kanssa samaa protokollaa. (4; 8.) Tämä yksinkertaisti ilmarajapinnan suunnittelua ja toteutusta (4).

Jos WCDMA-tekniikalla toteutetuissa UMTS-radioverkoissa haluttaisiin nostaa tiedonsiirtokapasiteettia yhdelle UE:lle, täytyisi aikaa tiedonsiirtoikkunoiden välillä lyhentää. Radioaaltojen kulkureitti ei ole suora lähettäjän ja vastaanottajan välillä, vaan se kimpoilee esteistä, jolloin sama radioaalto kulkee eri reittejä tukiaseman ja UE:n välillä. Täten sama radioaalto vastaanotetaan useita kertoja hieman eri aikoina. Tiedonsiirtoikkunoiden tihentäminen johtaa siihen, että nykyisen tiedonsiirtoikkunan vastaanottamisen aikana edellisen tiedonsiirtoikkunan pidemmän reitin kulkenut saman koodin omaava radiosignaali korruptoi uudemman signaalin. LTE-verkkojen ilmarajapinnassa WCDMA:n käytöstä on luovuttu edellä mainitusta syystä. Sen sijaan käytetään Orthogonal Frequency Division Multiplexing -nimistä (OFDM) tekniikka. (4.)

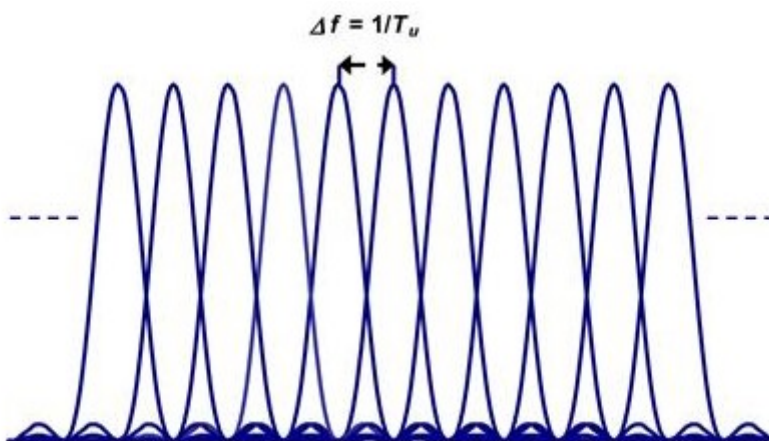
LTE-ilmarajapinnassa käytetään sekä FDD:tä että TDD:tä (4; 8). Suomessa LTE-verkot toimivat 450, 700, 800, 900, 1800, 2000 sekä 2600 MHz:n taajuuskaistoilla (6).

2.4.1 OFDM

OFDM-tekniikassa lähetettävä datavirta jaetaan rinnakkaisiin taajuusjakoisiin signaaleihin, joita kutsutaan apukantaaalloiksi. Apukantaaallot muutetaan IFFT:n (Inverse Fast Fourier Transform) avulla aikajakoiseksi kantaalloksi, joka lähetetään ilmarajapinnan yli. Vastaanottaessa aikajakoisen kantaalto muutetaan FFT:n (Fast Fourier Transform) avulla taajuusjakoiseksi apukantaaalloiksi. Nämä apukantaaaltojen signaalit yhdistetään alkuperäiseksi datavirraksi. FFT tarkoittaa eli matemaattista menetelmää aikajakoisen signaalin muuntamiseksi taajuusjakoiseksi ja IFFT päinvastaista. (4; 8.)

2.4.2 Kantaalto ja apukantaalto

LTE-ilmarajapinnassa kantaallon kaistanleveys on adaptiivinen eli se vaihtelee tarvittavan tiedonsiirtonopeuden mukaan (4). LTE käyttää kiinteää apukantaaallon kaistanleveyttä 15 kHz, joten kantaallon apukantaaaltojen määrä vaihtelee (taulukko 1) (4). Kaistanleveyden säästämiseksi sekä varmistaakseen viereisten apukantaaaltojen häiriöttömyyden apukantaaallon taajuuskaistan reunat ovat tarkalleen viereisten apukantaaaltojen keskitäajudella ja reunojen radioaallon amplitudi on aina nolla (kuva 2) (4).



KUVA 2. Apukantaaallot kantaallon sisällä. T_u on symbolin kesto (8)

Käyttökelpoisten apukantaaaltojen määrä ei ole suoraan kantaallon kaistanleveys jaettuna apukantaaallon kaistanleveydellä, koska kantaaltojen välissä on guard band eli tyhjä kaista häiriöttömän tiedonsiirron turvaamiseksi (4; 8). Esimerkiksi $1,4 \text{ MHz} / 15 \text{ kHz} = 93,33$. Tällöin kantaallon

määritellyn alataajuuden ja matalimman taajuisen apukantaaallon väliin jää $(93,33 - 72) * 15 \text{ kHz} / 2 = 160 \text{ kHz}$ levyinen tyhjä taajuuskaista, samoin kantaallon määritellyn ylätaajuuden ja korkeimman taajuisen apukantaaallon väliin. Downlinkissä (DL) eli tiedonsiirrossa tukiasemalta UE:lle apukantaaaltoja on yksi enemmän kuin uplinkissä (UL) eli tiedonsiirrossa UE:ltä tukiasemalle (Taulukko 1) (8), koska DL:ssä kantaallon keskitaajuudella olevaa apukantaaaltoa ei voi käyttää sen häiriöalttiuden takia (8). Täten käyttökelpoisten apukantaaaltojen määrä on sama DL:ssä ja UL:ssä.

TAULUKKO 1. LTE-ilmarajapinnan määritellyt kaistanleveydet, apukantaaaltojen määrät, FFT:n pistemäärä sekä näytteenottotaajuudet. (9; 10).

Kantaallon kaistanleveys(MHz)	Apukantaaaltoja UL	Apukantaaaltoja DL	FFT:n pistemäärä	Näytteenottotaajuus (MHz)
1,4	72	73	128	1,92
3	180	181	256	3,84
5	300	301	512	7,68
10	600	601	1024	15,36
15	900	901	1536	23,04
20	1200	1201	2048	30,72

2.4.3 FFT ja symboli

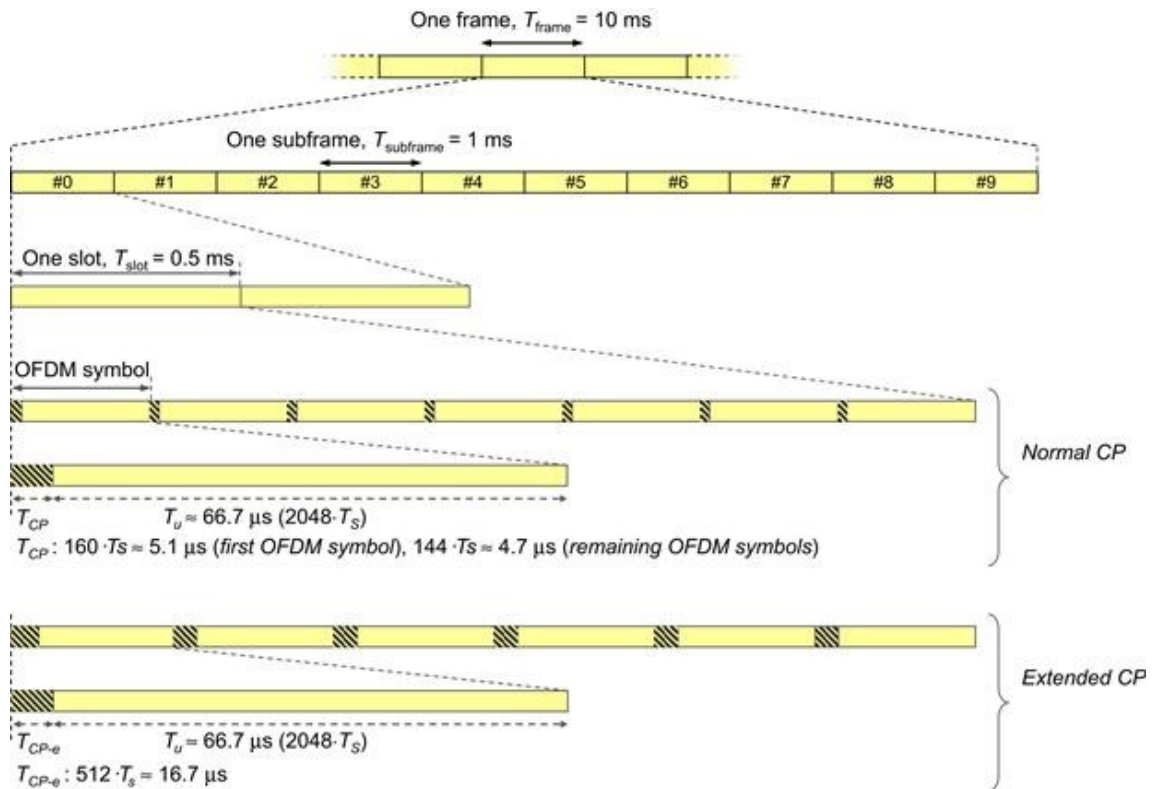
Apukantaaallon kaistanleveys ja kantaallon FFT:n pistemäärän (taulukko 1) kanssa määrittää pienimmän lähetystapahtuman keston, jota kutsutaan symboliksi (8). FFT:n pistemäärä (N) määrittää, kuinka monta eri taajuuskomponenttia pystytään erottamaan aikajakoisesta signaalista ja kuinka monta näytettä radiosignaalista tarvitaan erotukseen (11). Sen täytyy olla suurempi kuin koko kantaallolle mahtuvien apukantaaaltojen määrä. FFT:n pistemäärä on kahden potensseja, jotta voidaan käyttää laskennallisesti tehokasta radix-2 -menetelmää. (8.) Esimerkiksi kaistanleveydeltään 5 MHz kantaallon apukantaaaltojen lukumäärää seuraava suurempi kahden potenssi on $2^9 = 512 = N$. Näytteenottotaajuus (f_s), joka tarkoittaa FFT:n vaatimaa radiosignaalin näytteenottoitiheyttä taajuuksien erotusta varten, määritellään laskukaavalla apukantaaallon kaistanleveys $\Delta f * N$, eli $15 \text{ kHz} * 2048 = 30,72 \text{ MHz}$, ja siitä johdetaan LTE-ilmarajapinnan perusaikayksikkö $T_s = 1 / 30,72 \text{ MHz} = 32,6 \text{ ns}$. (8.) FFT:n koosta N ja näytteenottotaajuudesta f_s voidaan laskea lyhyemmän

mahdollisen käyttökelpoisen symbolin kesto, joka FFT:n avulla voidaan erottaa, $N / f_s = N * T_s = 1 / \Delta f$, eli $2048 / 30,72 \text{ MHz} = 2048 * T_s = 1 / \Delta f = 66,667 \mu\text{s}$ (8; 11).

Symbolin kuljettama bittien määrä riippuu käytetystä radiosignaalin moduloinnista eli bittien koodamisesta radiosignaaliin radiosignaalin amplitudia ja vaihe-eroa referenssisignaaliin muuttamalla. Symboli voi välittää 2 – 8 bittiä. (4; 8.) Tästä voidaan laskea yhden puhtaan apukantoaallon teoreettinen maksimi tiedonsiirtonopeus $1 / 66,667 \mu\text{s} * 8 \text{ bit} = 120 \text{ kbit/s}$.

2.4.4 Cyclic prefix

Symboleihin kuitenkin lisätään cyclic prefix (CP) eli edellisen symbolin loppuosa kopioidaan seuraavan symbolin alkuun. Tämä estää radioaaltojen heijastumisesta ja eri-aikaisesta saapumisesta vastaanottajalle aiheutuvan apukantoaallon sekä viereisten apukantoaaltojen häiriintymisen. Cyclic prefix valitaan olosuhteiden mm. tukiaseman ja UE:n etäisyyden sekä radioaallon heijastumisen mukaan ja se pidentää symbolin kestoja, joten se vähentää symbolien lähetystaajuutta ja tiedonsiirtonopeutta. Hyvissä olosuhteissa käytetään lyhyttä CP:tä ja huonoissa pitkää. (4; 8.) Lyhyt CP määritellään perusaikayksikön avulla $144 * T_s$, eli $144 * 32,6 \text{ ns} = 4,7 \mu\text{s}$ (T_{CP}), ja pitkä CP = $512 * 32,6 \text{ ns} = 16,7 \mu\text{s}$ (T_{CP-e}). (kuva 3) (8).



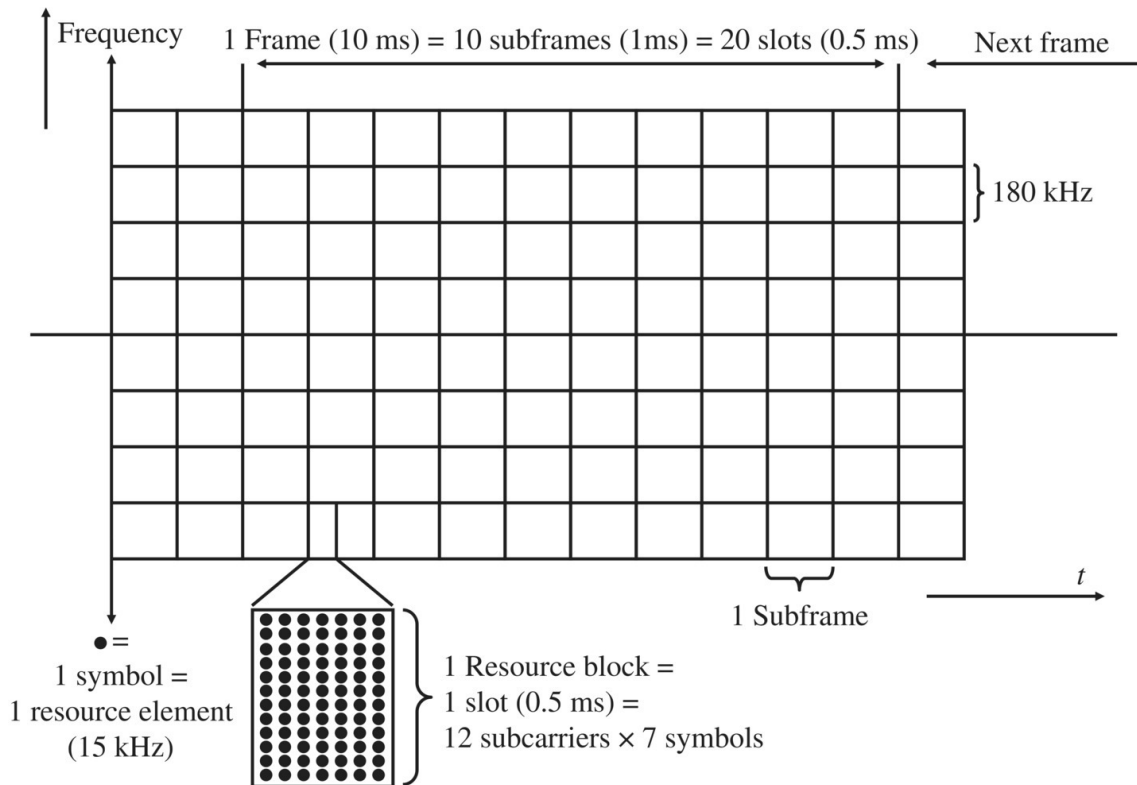
KUVA 3. LTE-ilmaraajapinnan radioframe, subframe, slot ja symboli aikajakoisesti (8)

2.4.5 Slot, resurssielementti, resurssilohko, subframe ja radio frame

LTE-ilmaraajapinnassa yksi 10 ms:n kestoinen radio frame jakautuu 10:een 1 ms:n kestoiseen subframeen, jotka taas jakautuvat kahteen 0,5 ms:n kestoiseen slottiin (kuva 3; kuva 4). Slotissa on lyhyellä CP:llä 7 symbolia ja pitkällä CP:llä 6 (kuva 3) (4; 8). Lyhyen CP:n kanssa slottiin mahtuu $T_{slot} / (N \cdot T_s + 144 \cdot T_s) = 0,5\text{ ms} / (2048 \cdot 32,6\text{ ns} + 144 \cdot 32,6\text{ ns}) = 7,0073$ symbolia. Tämä tasataan siten, että ensimmäisen symbolin CP pidennetään $160 \cdot T_s$ kestoiseksi. Täten $7 \cdot 2048 \cdot 32,6\text{ ns} + 6 \cdot 144 \cdot 32,6\text{ ns} + 160 \cdot 32,6\text{ ns} = 0,0005\text{ s} = 0,5\text{ ms}$. Pitkällä CP:llä slotin symbolimääräksi saadaan $0,5\text{ ms} / (2048 \cdot 32,6\text{ ns} + 512 \cdot 32,6\text{ ns}) = 6$. (8.) Täten lyhyellä CP:lla yhden apukantaallon tiedonsiirtonopeudeksi saadaan $7 / 0,5\text{ ms} \cdot 8\text{ bit} = 112\text{ kbit/s}$ ja pitkällä CP:llä $6 / 0,5\text{ ms} \cdot 8\text{ bit} = 96\text{ kbit/s}$.

LTE-ilmaraajapinta voidaan kuvata taajuus- ja aikajakoisesti kuvan 4 tavalla. Resurssielementti tarkoittaa yhden apukantaallon yksittäistä symbolia. Se on pienin fyysinen yksikkö ilmarajapinnassa. Resurssilohko pitää sisällään 12:n apukantaallon yhden slotin eli lyhyellä CP:llä yhteensä $12 \cdot 7 = 84$ resurssielementtiä ja pitkällä CP:llä $12 \cdot 6 = 72$ resurssielementtiä. Täten yhden resurssilohkon

kaistanleveys on 180 kHz. (4; 8.) Yhden resurssilohkon levyisen kaistan maksimi tiedonsiirtonopeus on lyhyellä CP:llä $84 / 0,5\text{ms} * 8 \text{ bit} = 1,344 \text{ Mbit/s}$.



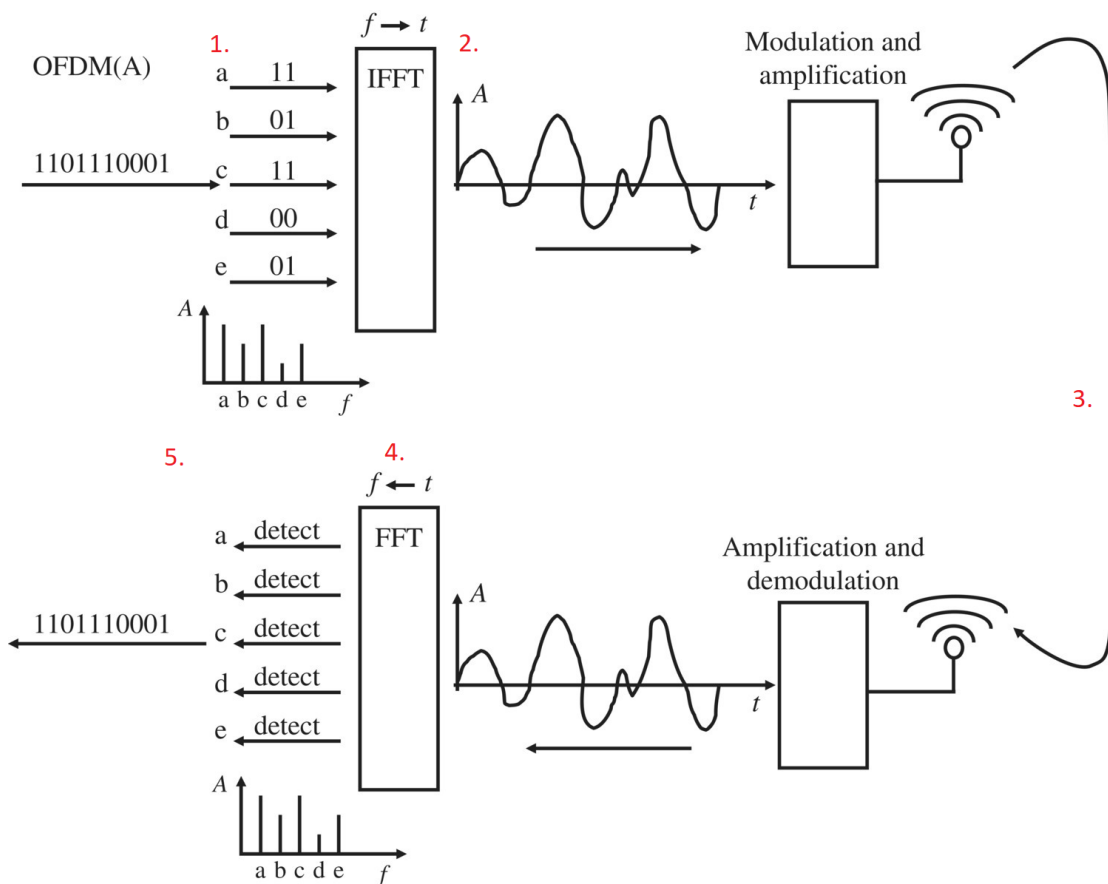
KUVA 4. LTE radio frame ja resurssitaulukko (4)

Kahdesta slotista koostuvan subframen kesto (1 ms) on ilmarajapinnan skedulointiaika (ajastusaika). Se tarkoittaa, että tukiasema päättää 1 ms:n välein, mitkä UE:t käyttävät ilmarajapintaa ja mitä resurssilohkoja kullekin UE:lle käytetään. Nämä tiedot välitetään UE:lle PDCCH-viesteillä eli Physical Downlink Control Channel-viesteillä. PDCCH-viestit lähetetään kaikille tukiaseman UE:ille ja UE:t tunnistavat viestin tarkistussumman perusteella sille kuuluvan viestin. PDCCH-viestin tietojen perusteella UE tietää mitä resurssilohkoja se käyttää DL:n että UL:n tiedonsiirtoon ilmarajapinnan yli. (4; 8.)

Radio framen rooli on erilainen kuin subframen ja slotin. Sen avulla skeduloidaan tarvittavien viestien lähetyksen pidemmille aikaväleille kuin yhden radio framen kesto. Esimerkiksi 40 ms välein eli 4 radio framen välein lähetetään MIB-viesti eli Master Information Block-viesti, jota UE:t käyttävät luodakseen yhteyden tukiasemaan. (4.)

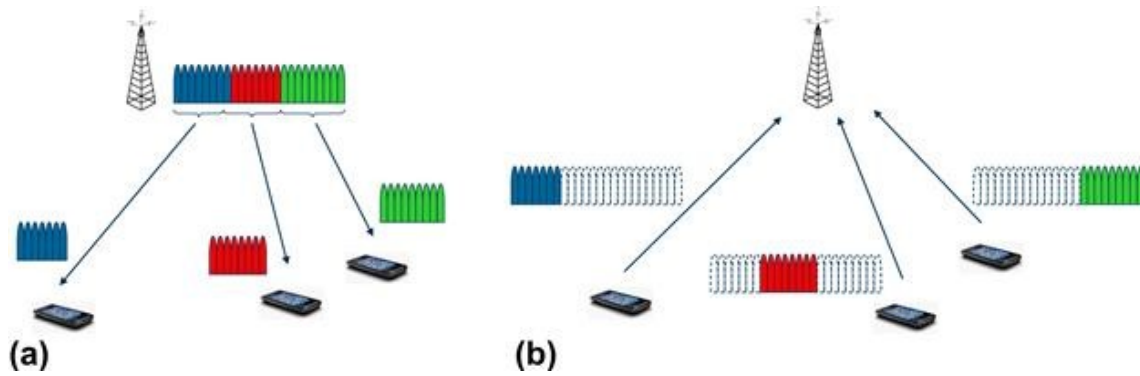
2.4.6 DL OFDM, OFDMA ja UL SC-FDMA

LTE-ilmarajapinnassa DL toteutetaan kuvan 5 mukaan. Tätä tekniikkaa kutsutaan OFDM:ksi, jossa kapean kaistanleveyden apukantaalloit yhdistetään täyden kaistanleveyden kantaalloiksi. Kuvan 5 kohdassa 1. digitaalisessa muodossa oleva lähetettävä datavirta jaetaan useaan rinnakkaiseen datavirtaan, jotka jäsennetään taajuusjakoisiksi apukantaalloiksi. Seuraavaksi kohdassa 2. IFFT:n avulla taajuusjakoiset apukantaalloit yhdistetään aikajakoiseksi kantaalloiksi. Kohdassa 3. aikajakoinen kantaallo lähetetään ilmarajapinnan yli tukiasemalta UE:lle. Kohdassa 4. tehdään FFT-muunnos eli aikajakoinen kantaallo muutetaan taajuusjakoisiksi komponenteiksi. Apukantaalloit tunnistetaan komponenteista ja niiden välittämä data yhdistetään alkuperäiseksi datavirraksi (kuva 5, kohta 5). (4.)



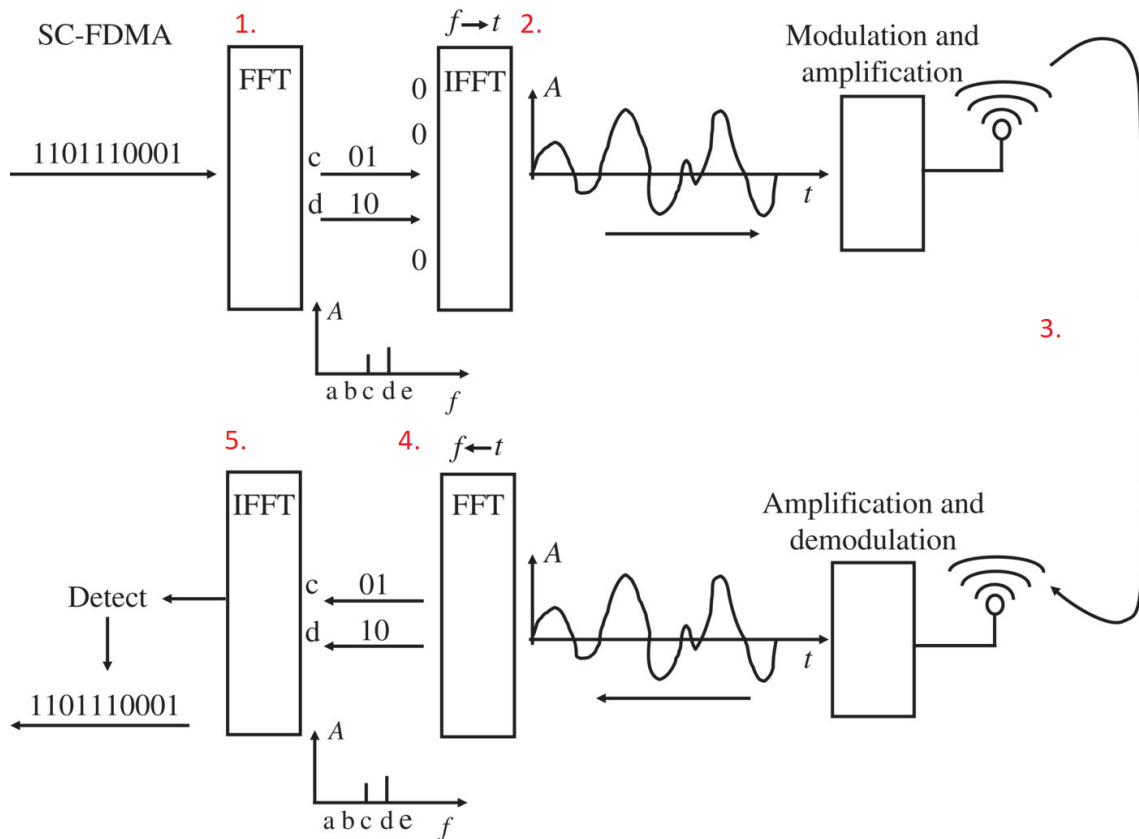
KUVA 5. OFDM:n mukainen downlinkin toimintaperiaate eli tietoliikenne tukiasemalta UE:n suuntaan (4)

Kuvassa 6 on kuvattu OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) eli OFDM:n perustuva moniliityntäteknikka. Siinä eri UE:t on jaettu käyttämään eri taajuuksisia apukantaalloja käyttäen luvussa 2.4.5 selitettyä resurssilohkojen skedulointia. (8.)



KUVA 6. OFDMA (8)

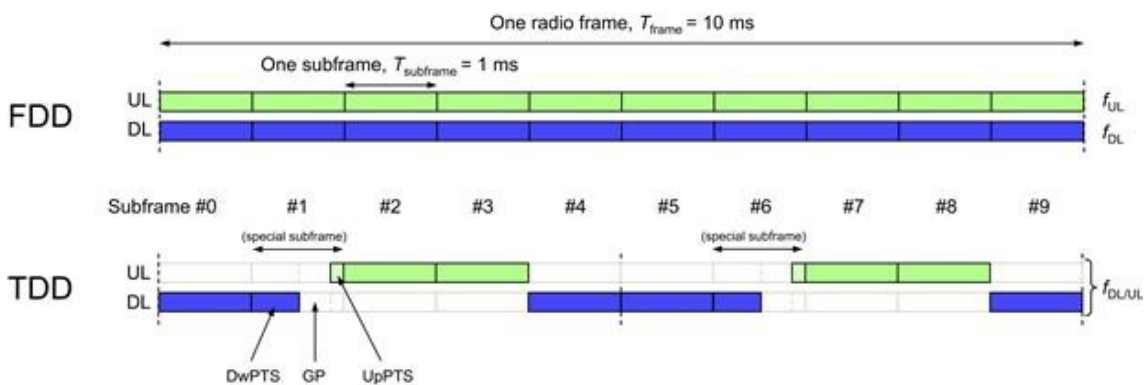
UL käyttää hieman eri tekniikkaa kuin DL. OFDM:n kanta-aallon lähetys vaatii paljon lähetystehoa aallon huippukohtissa, joten se ei ole sopiva korkean virrankulutuksen vuoksi akkukäyttöisiin päätelaitteisiin. UL:ssä käytetään SC-FDMA:ta (Single Carrier Frequency Division Multiple Access) eli yksittäisen kanta-aallon taajuusjakoista moniliityntäteknikkaa. Tiedonsiirto toteutetaan kuvassa 7 kuvatulla tavalla. Kuvan 7 kohdassa 1. poiketen DL:n lähetettävän datan jakamisesta yksittäisille apukantaalloille, aikajakoinen radiosignaali muutetaan FFT:n avulla taajuusjakoiseksi, joka jakaa lähetettävän datan jokaisen bitin kaikille apukantaalloille. Tämä vähentää apukantaaltojen voimakkuuseroja, joten se vähentää kanta-aallon huippukohtien voimakkuutta ja säästää virtaa kohdan 3. lähetyksessä ilmarajapinnan yli. Kohdassa 2. taajuusjakoiset signaalit muutetaan IFFT:lla aikajakoinen kantaalloksi ja 3. kohdassa kantaalto lähetetään ilmarajapinnan yli. 4. kohdassa aikajakoinen signaali muutetaan FFT:lla avulla taajuusjakoiseksi ja 5. kohdassa IFFT:llä taajuusjakoisen signaali alkuperäiseksi dataksi. (4.)



KUVA 7. SC-FDMA toimintaperiaate (4)

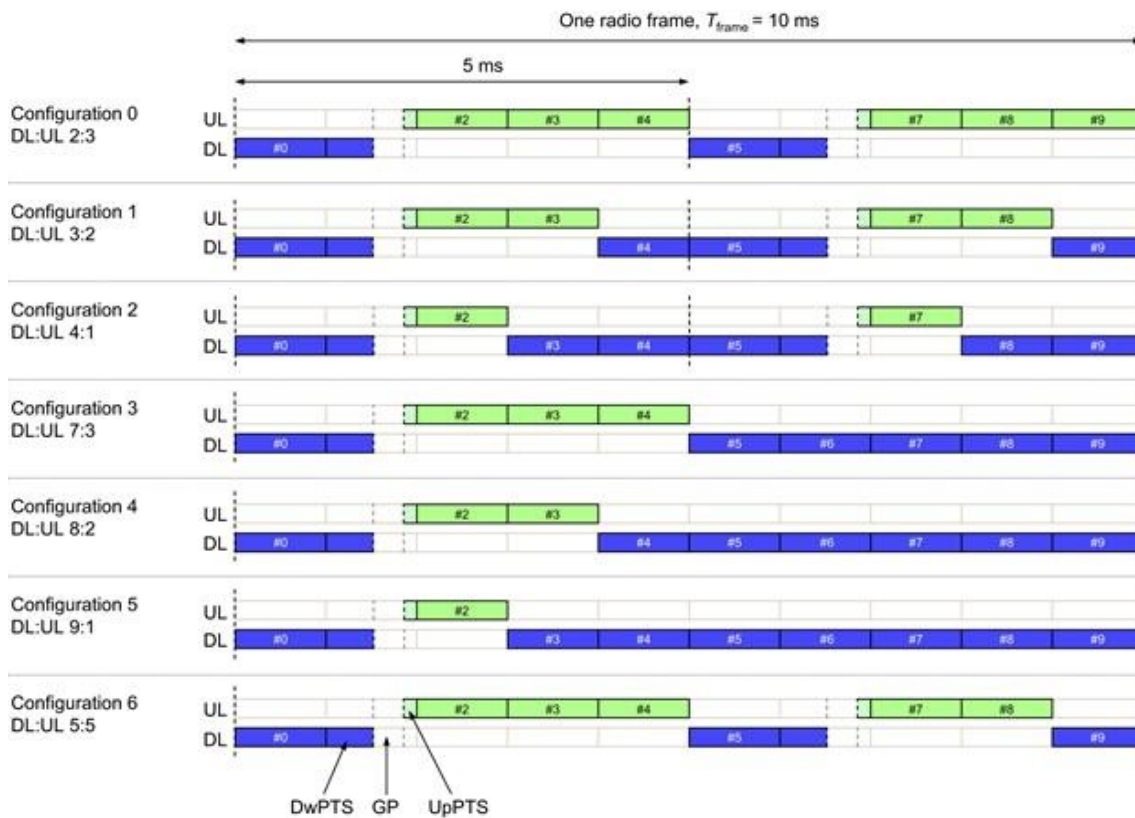
2.4.7 FDD ja TDD LTE-ilmaraajapinnassa

LTE-ilmaraajapinnassa käytetään sekä FDD:tä että TDD:tä. FDD:ssä DL käyttää eri taajuuksista kantoaaltoa kuin UL. TDD:ssä DL ja UL käyttää samaa kantoaaltoa, mutta erisuuntainen tiedonsiirto on jaettu eri subframeille. Tiedonsiirtonopeus on siten hitaampaa TDD:llä. (Kuva 7.) (4; 8.)



KUVA 8. FDD ja TDD LTE-ilmaraajapinnassa (8)

TDD:ssä on seitsemän erilaista konfiguraatiota, miten subframe on jaettu DL:lle ja UL:lle (kuva 8) (8). Koska UL:n tietoliikenne on vähäisempää kuin DL:n, konfiguraatit ovat suurimmilta osin DL-painotteisia (kuva 8).



KUVA 9. Erilaiset TDD-konfiguraatit LTE-ilmaraajapinnassa (8)

2.4.8 Tiedonsiirtonopeus LTE-ilmaraajapinnan yli, MIMO ja kantaaltojen yhdistäminen

Taulukossa 2 on käytettävissä olevat resurssilohkot eri kantaallon kaistanleveyksillä. Kuten luvussa 2.4.5 laskettiin, yhden resurssilohkon kaistanleveydellä (180 kHz) tiedonsiirtonopeus on 1,344 Mbit/s. Täten 20 MHz kantaallolla maksimi tiedonsiirtonopeus on $100 * 1,344 \text{ Mbit/s} = 134,4 \text{ Mbit/s}$. Taulukossa 2 on kaikkien eri kaistanleveyksien kantaaltojen tiedonsiirtonopeus. Tiedonsiirtonopeudet ovat kokonaistiedonsiirtonopeuksia, eli siinä ei oteta huomioon "overheadia" eli radioyhteyden ylläpitoon ja ohjaamiseen menevää tiedonsiirtokapasiteettia.

TAULUKKO 2. Resurssilohkojen määrä ja tiedonsiirtonopeus kantoaallon kaistanleveyksittäin.

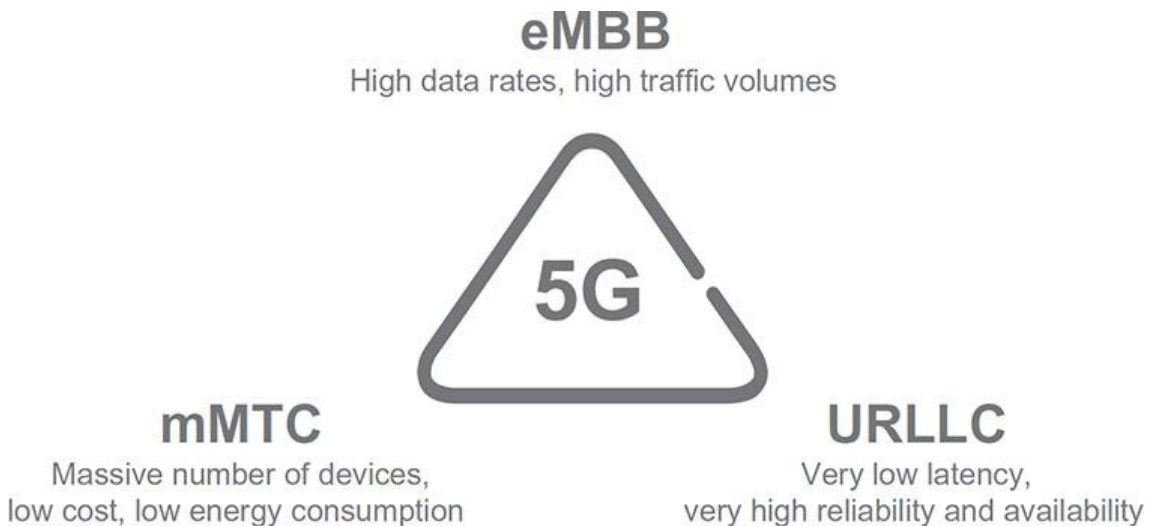
Kantoaallon kaistanleveys(MHz)	Resurssilohkoja	Tiedonsiirtonopeus Mbit/s
1,4	6	8,1
3	15	20,2
5	25	33,6
10	50	67,2
15	75	100,8
20	100	134,4

LTE-ilmarajapinnassa käytetään MIMO:a kuten UMTS-ilmarajapinnassa. Siinä datavirta jaetaan ja lähetetään saman kantoaallon taajuudella käyttäen eri antennia niin lähetyksessä kuin vastaanotossa. Käytössä on 2x2 MIMO, jossa lähetyksessä ja vastaanotossa on kummassakin kaksi antennia tai 4x4 MIMO, jossa neljä molemmissa. Tämä karkeasti kaksinkertaistaa tai nelinkertaistaa kantoaallon tiedonsiirtonopeuden, mutta aiheuttaa enemmän overheadia. (4; 8.)

Kantoaaltojen yhdistäminen (Carrier Aggregation) tarkoittaa, että tiedonsiirtoon ilmarajapinnan yli käytetään useita eri taajuisia kantoaaltoja. LTE-ilmarajapinnassa voidaan yhdistää jopa viisi 20 MHz:n kantoaaltoa, jolloin käytössä on 100 MHz:n kaistanleveys. Tällöin kantoaaltojen yhdistelmästä käytetään nimitystä kantoaalto ja yksittäisestä yhdistetystä kantoaallostani nimitystä komponenttikantoaalto (component carrier). (4; 8.) Kantoaaltojen yhdistämisellä ja 4x4 MIMO:n käytöllä päästään jopa 1,2 Gbit/s tiedonsiirtonopeuteen ilmarajapinnan yli (4).

3 5G-VERKOT

Viidennen sukupolven 5G langattomat verkot kehitettiin tukemaan kolmea eri pääkäyttötapausta (kuva 10) (5; 12). 5G tarkoittaa 5G-verkon kokonaisuutta, kun taas 5G NR uudistettua radioliityntä verkkoa, joka pitää sisällään LTE:tä pidemmälle kehitetyn ilmarajapinnan (12).



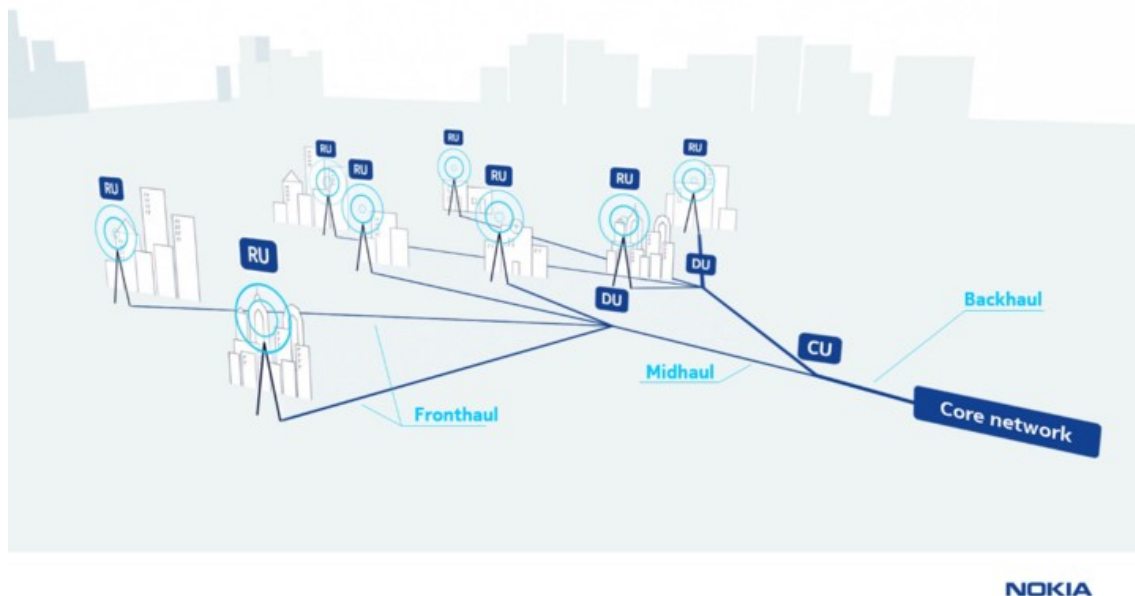
KUVA 10. 5G-verkkojen pääkäyttötapaukset (12)

Kolme pääkäyttötapausta ovat eMBB (enhanced mobile broadband), mMTC (massive machine-type communications) ja URLLC (*ultra-reliable low-latency communication*). eMBB tarkoittaa parannettua mobiililaajakaistaa. Se pitää sisällään aikaisempia mobiiliverkkoja korkeammat tiedonsiirtonopeudet sekä suuremman tiedonsiirtokapasiteetin. mMTC tarkoittaa mahdollisuutta kytkeä verkkoon langattomasti etäohjattavasti tai itsenäisesti toimivia vähävirtaisia laitteita. Laitteet tunnetaan paremmin nimellä IoT. (5; 12.) Tästä on esimerkkinä Kittilän kaivoksessa toimiva 5G-verkko kaivoksen tuotantokäytössä (13). URLLC tarkoittaa äärimmäisen luotettavaa, saavutettavaa ja vähäviiveistä verkkoa (5; 12).

3.1 5G core-verkko ja RAN

5G:ssä UE:n ja pakettipohjaisen kiinteän verkon (julkinen internet) välinen yhteys ja fyysiset komponentit on kuvassa 11. Kuvan 11 oikeassa reunassa on core-verkko, joka yhdistää RAN:in eli radioliityntäverkon kiinteään verkkoon. (14.) Core-verkko vastaa palveluiden tarjoamisesta UE:n ja kiinteän verkon välillä. Sen kaksi tärkeintä toiminnallisuutta ovat käyttäjätason toiminnallisuus (User

Plane Function, UPF) ja kontrollitason toiminnallisuus. UPF tarkoittaa reittiä UE:n ja ja ulkoisen verkon(julkinen internet) välillä. Sen vastuulla on datapakettien reititys, uudelleenohjaus, suodatus ja tutkinta, QoS(Quality of Service) eli tietoliikenteen priorisointi (15) sekä tietoliikenteen mittaus. Kontrollitason toiminnallisuus pitää sisällään mm. IP-osoitteen jakamisen UE:ille sekä UPF:n kontrolloinnin. (5; 12.)



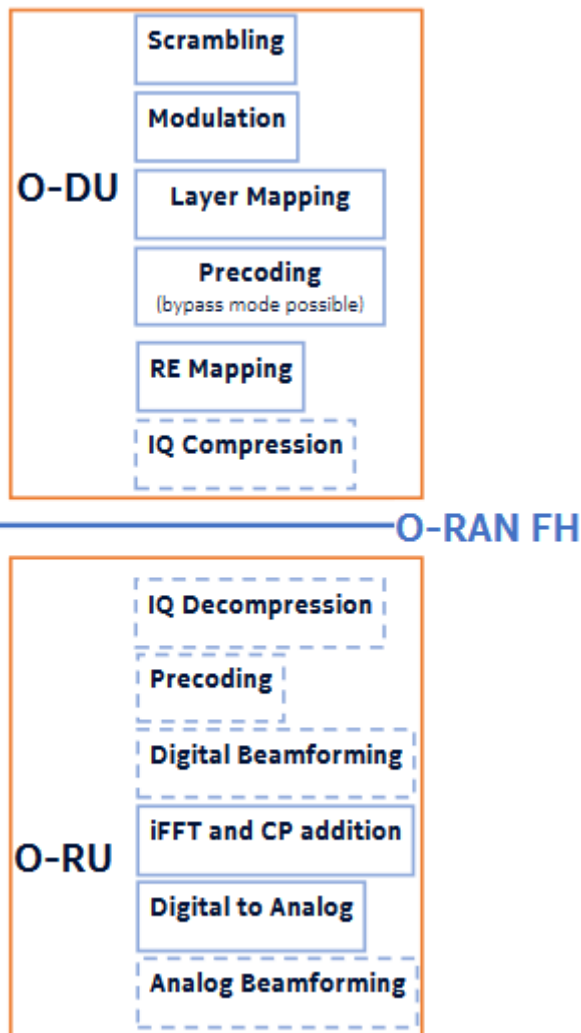
KUVA 11. RAN ja core-verkko (16)

5G-RAN tunnetaan myös nimellä next generation node B (gnB) eli seuraavan sukupolven tukiasema. Se koostuu radioyksiköstä (RU), kantataajuusyksiköstä (DU) sekä keskusyksiköstä (CU). RAN ja core-verkon välistä yhteyttä kutsutaan backhauliksi (kuva 11). (15; 16.) CU:n ja DU:n välistä yhteyttä midhauliksi, ja DU:n ja RU:n välistä fronthauliksi (kuva 11). CU:lla voi olla useita DU:ita ja DU:lla useita RU:ita (5; 15).

Radioyksikkö vastaa radiosignaalin lähetyksestä, vastaanotosta sekä digitoimisesta. RU voi olla lähellä antenniyksikköä tai antenniyksikkö voi olla integroitu RU:hun, niin kuin tuotteessa, johon tämä opinnäytetyö on tehty. (18.) RU:n ja DU:n välinen yhteys on toteutettu eCPRI:llä (enhanced Common Public Radio Interface), joka on valokuidulla toteutettu pakettipohjainen (ethernet) tiedon siirtoväylä (16).

DU ja CU ovat tukiaseman laskentayksiköitä. DU on fyysisesti lähempänä RU:ta, kun CU on lähempänä core-verkkoa. (15.) DU eli kantataajuusyksikkö laskee IQ-datan eli määrittelee lähetettävän kantaallon taajuusjakoisesti ja välittää nämä viestit digitaalisessa muodossa RU:lle User

Plane -viesteillä eli käyttäjätason viesteillä (kuva 12) (16). Se lähettää myös kontrollitason (C-plane) viestejä, jotka ohjaavat ilmarajapinnan toimintaa (16).



KUVA 12. DU:n ja RU:n toiminnallisuudet (16)

3.2 5G NR -ilmarajapinta

5G NR-ilmarajapinta on hyvin samankaltainen kuin LTE:ssä. Se perustuu myös OFDM-tekniikkaan. LTE-ilmarajapinnasta poiketen 5G NR:n UL perustuu myös OFDM-tekniikkaan. 5G NR -ilmarajapinnassa apukantaaallolla on useita kaistanleveyksiä poiketen LTE:stä ja kantaaallolla eri kaistanleveyksiä 5 MHz:stä aina 400 MHz:in (taulukko 3; taulukko 4) (5; 12). Taulukon 3 kombinaatiot ovat käytössä FR1 taajuusalueella(0,45 GHz–6 GHz) ja taulukon 4 kombinaation FR2 taajuusalueella(24,25 GHz–52,6 GHz) (5; 12). Suomessa 5G NR-verkot toimivat 700 MHz:n, 2 GHz:n, 2,6 GHz:n, 3,5 GHz:n sekä 26 GHz:n taajuuskaistoilla (6). 5G NR:ssä on käytössä FDD ja TDD (5; 12).

TAULUKKO 3. Kantoaaltojen ja apukantoaaltojen kaistanleveydet sekä resurssilohkojen määrät(N_{RB}) eri kombinaatioilla FR1 taajuusalueella (17).

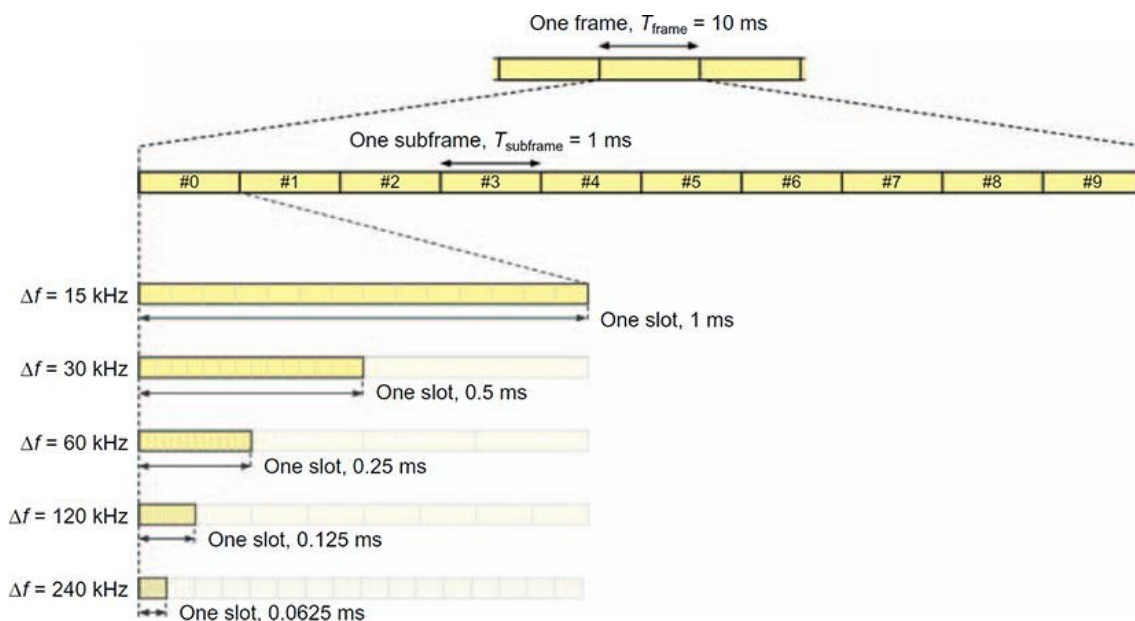
SCS [kHz]	5MHz	10MHz	15MHz	30 MHz	20 MHz	25 MHz	40 MHz	50MHz	60 MHz	70 MHz	80 MHz	90 MHz	100 MHz
	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}
15	25	52	79	[160]	106	133	216	270	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
30	11	24	38	[78]	51	65	106	133	162	[189]	217	[245]	273
60	N.A	11	18	[38]	24	31	51	65	79	[93]	107	[121]	135

TAULUKKO 4. Kantoaaltojen ja apukantoaaltojen kaistanleveydet(SCS) sekä resurssilohkojen määrät(N_{RB}) eri kombinaatioilla FR2 taajuusalueella (17).

SCS [kHz]	50MHz	100MHz	200MHz	400 MHz
	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}
60	66	132	264	N.A
120	32	66	132	264

3.3 5G NR -radio frame ja resurssilohko

Apukantoaallon eri kaistanleveyksistä johtuen 5G NR -radio frame on aikajakoisesti erilainen kuin LTE-radio frame. Radio frame on 10 ms:n kestoinen ja subframe 1 ms:n kestoinen kuten LTE-radio framessa. (Kuva 14.) (5; 12.) Slotissa on aina 14 symbolia, joten 15 kHz:n taajuudella se on yhden subframen kestoinen (12). Suuremmilla apukantoaallon kaistanleveyksillä slottien määrä kasvaa (taulukko 5) (5; 12).

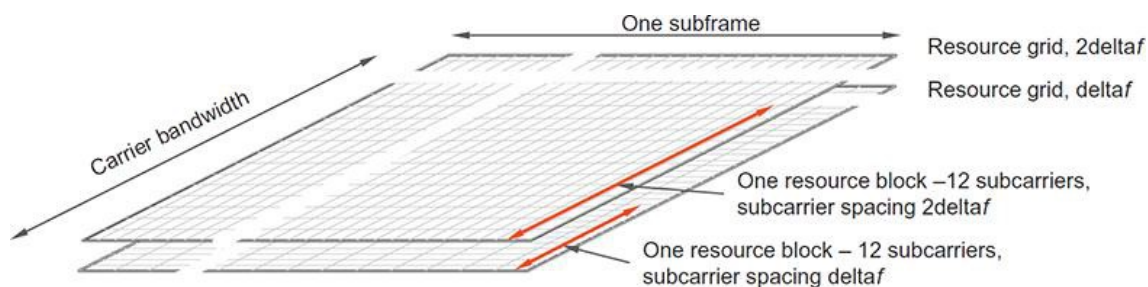


KUVA 14. 5G NR -radioframe, subframe, slot (12)

TAULUKKO 5. Slottien määrä eri kaistanleveyksillä/radioframe

Apukantaosaallon kaistanleveys kHz	Slottien määrä/radio frame
15	10
30	20
60	40
120	80
240	160

5G NR:n resurssilohkon määritelmä eroaa LTE:stä. Resurssielementin määritelmä on sama (kuva 15). LTE:ssä resurssilohko on määritelty 12 apukantaosaallon yhden slotin resurssielementit, eli aika- ja taajuustasossa. 5G NR -resurssilohko on määritelty pelkästään taajuustasossa ja se tarkoittaa 12 apukantaosaaltoa (kuva 15). Taulukoissa 3 ja 4 on kerrottu käytettävissä olevien resurssilohkojen määrä kun guard bandit on huomioitu. Suurin resurssilohkojen määrä on 100 MHz:n kantaosaallolla ja 30 kHz:n apukantaosaallolla 273, jolloin käytössä on 3276 apukantaosaaltoa. (5; 12.)



KUVA 15. 5G NR -resurssitaulukko (12)

3.4 Beamforming

5G NR -ilmarajapinta kehitettiin tukemaan beamformingia eli radioaaltojen keilanmuodostusta (kuva 16) (12). Beamforming suoritetaan käyttämällä mMIMO:a eli antennipaneelia, jossa saattaa olla jopa 64 antennielementtiä (12; 18). Beamformingissa lähetettävän radioaallon vaihetta ja voimakkuutta muuttamalla jokaisella antennielementillä, radioaallostaa luodaan vastaanottavan UE:n suuntaan mahdollisimman kapea ja hyvin kohdistettu keila hyväksi käyttäen interferenssiä eli radioaaltojen yhdistymistä (kuva 16) (5; 12). Hyödyllisessä interferenssissä eri antennista lähetetyt radioaallot yhdistyvät ja vahvistuvat (5). Täten lähetysteho kohdistuu vastaanottajaan ja se estää eri haitallista interferenssiä suhteessa muihin lähetettäviin radioaaltoihin. Tämä mahdollistaa nopeamman tietoliikenteen ja etenkin korkeammilla (FR2) taajuuksilla pidemmän kantomatkan. Matalammilla taajuuksilla (FR1) mMIMO:lla voidaan tukea kahdeksaa eri datavirtaa saman kantoaallon taajuudella DL:ssä ja neljää UL:ssä UE:ta kohden. (12.)



KUVA 16. Beamforming eli radioaaltojen keilanmuodostus (12)

4 L1LOW-OHJELMISTOKOMPONENTTI

L1low on RU:ssa toimiva ei-reaaliaikainen ja reaaliaikainen ohjelmistokomponentti, joka ohjaa radion fyysistä toimintaa. Sen ei-reaaliaikaisiin toimintoihin kuuluu kantoaaltojen konfigurointi ja uudelleenkonfigurointi, kiinteä beamforming. Reaaliaikaisiin toimintoihin kuuluu kontrollitason viestien käsittely. Nokiassa kontrollitason viesteistä käytetään nimitystä FCP-viesti (Fast Control Plane -viesti). FCP-viestien perusteella toteutetaan reaaliaikainen beamforming ja TDD-kuvion asettaminen eli resurssielementtien varaaminen DL:n ja UL:n suuntaan. (16.)

4.1 FCP-viesti

FCP-viestit saapuvat L1Low'hun eCPRI-viestinä. eCPRI-viestin tyyppi (ecpriMessage) kertoo viestin tyyppin (kuva 17). Kontrollitason viestit (FCP-viestit) ovat eCPRI-viestityyppejä 2 (16). Sektiotyypit 1 ja 3 ovat käytössä tällä hetkellä (taulukko 6). Tässä opinnäytetyössä keskitytään sektiotyyppin 1 käsittelyyn. Kuvassa 18 on sektiotyyppin 1 rakenne ja taulukossa 7 selitykset. FCP-viesti pitää yleensä tiedot yhden slotin eli 14 symbolin pituisen lähetyksen beamformingiin.

Section Type : any									
0 (msb)	1	2	3	4	5	6	7 (lsb)	# of bytes	
ecpriVersion				ecpriReserved			EcpriConcatenation	1	Octet 1
ecpriMessage								1	Octet 2
ecpriPayload								2	Octet 3
ecpriRtcid / ecpriPcid								2	Octet 5
ecpriSeqid								2	Octet 7

KUVA 17. eCPRI-viestin header (19)

TAULUKKO 6. kontrollitason viestien sektiotyypit (19)

Section Type	Target Scenario	Remarks
0	Unused Resource Blocks	Not supported
1	Most DL/UL radio	Supported
2	reserved for future use	N/A
3	PRACH and	Only PRACH is supported.
4	Reserved for future use	Not supported
5	UE scheduling	Not supported
6	Channel information	Not supported
7	LAA	Not supported
8-255	Reserved for future use	N/A

Section Type 1 : DL/UL control msgs									
0 (msb)	1	2	3	4	5	6	7 (lsb)	# of bytes	
transport header, see section 3.1.3								8	Octet 1
dataDirection	payloadVersion			filterIndex				1	Octet 9
frameId								1	Octet 10
subframeId				slotId				1	Octet 11
slotId	startSymbolId							1	Octet 12
numberOfSections								1	Octet 13
sectionType = 1								1	Octet 14
udCompHdr								1	Octet 15
reserved								1	Octet 16
sectionId								1	Octet 17
sectionId			rb	symInc	startPrbc			1	Octet 18
startPrbc								1	Octet 19
numPrbc								1	Octet 20
reMask[11:4]								1	Octet 21
reMask[3:0]				numSymbol				1	Octet 22
ef = 1	beamId[14:8]							1	Octet 23
beamId[7:0]								1	Octet 24
section extensions as indicated by "ef"								var	Octet 25

KUVA 18. Sektioyypin 1 rakenne (19)

TAULUKKO 7. Tärkeimmät kontrollitason viestin sektiotyyppin 1 kentät selityksineen (19).

Kenttä	Selitys
dataDirection	Minkä suuntaista liikennettä viesti koskee UL/DL.
frameId	Mitä radio framea viesti koskee.
subFrameId	Mitä subframea viesti koskee.
slotId	Mitä slottia viesti koskee.
startSymbolId	Mistä symbolista käsittely alkaa.
numberOfSections	Viestin sektioiden määrä, voi olla maksimissaan 273 = suurin määritelty resurssilohkojen määrä.
startPrbc	Käsittelyn kohteena oleva ensimmäinen fyysinen resurssilohko.
numPrbc	Kuinka montaa vierekkäistä fyysistä resurssilohkoa alkaen startPrbc:stä käsitellään.
reMask	Mitä resurssielementtejä käsitellään.
numSymbol	Montako symbolia reMask pitää sisällään.
beamId	Mitä beamia eli beamforming-kuviota käytetään resurssielementtien beamformaukseen.

5 FCP-VIESTIEN KÄSITTELYN OPTIMOINTI L1LOW-OHJELMISTOKOMPONENTISSA

Seuraavaksi esiteltyjen optimointien toiminta testattiin olemassa yksikkötesteillä, jotka testaavat työympäristössä ja SCT-testeillä (System Component Test) eli oikealla RU:lla toimivassa testiympäristössä. Testit testaavat onko muistien sisällöt oikeita FCP-viestin käsittelyn jälkeen. Käsittelyn kestoja mittaavat testit suoritettiin myös olemassa olevilla SCT:illä. Nopeutta mittaavat SCT:t mittaavat 1000 kertaa FCP-viestin käsittelyyn kuluvaan ajan ja antavat tuloksena käsittelyn keskimääräisen sekä jokaisen FCP-viestin käsittelyn suurimman ja pienimmän keston.

Alkuperäinen ajatus optimoinnin lähtökohta oli hyväksikäyttää kirjoitettavsan RAM-muistin kirjoitettavia tietueita leveämpää muistikaistaa yhdistämällä tietueita kirjoitettavaksi yhdellä kertaa. Tämä ei tuonut parannusta käsittelyn kestossa vaan saattoi pidentää sitä, koska käsittelevän ohjelmiston kompleksisuus lisääntyi tarvittavien ehtorakenteiden myötä.

FCP-viestien käsittelyä optimoitiin vähentämällä erillisiä RAM-muistiin kirjoituksen määriä. Tämä toteutettiin keräämällä kirjoitettavia tietueita listaksi ja kirjoittamalla ne yhdellä kertaa RAM-muistiin. Sen lisäksi poistettiin FCP-viestin sisällön lukeminen ohjelman sisäiseen muuttujaan ja käytettiin suoraan RAM-muistiin tallennettavaa formaattia, jolloin säästyttiin ylimääräiseltä konvertoinnilta. Lisäksi optimoitiin ylimääräisiä ehtojen tarkistuksia esimerkiksi tarkistaessa, pitääkö RAM-muistiin kirjoitettua FCP-viestin sisältöä lokittaa.

Optimoinneissa suoritettiin kaksi erillistä kokonaisuutta. Ensimmäinen optimointi toi keskimäärin 7,6 % parannuksen FCP-viestien käsittelyaikojen kestossa. Suurin parannus tietyn yksittäisen FCP-viestin käsittelyssä oli 20 % (liite 1). Toinen optimointi toi keskimäärin 28 % nopeutuksen, suurimman yksittäisen FCP-viestin käsittelyn keston parannuksen ollessa 52 % (liite 2). Optimoinnit toimivat oikealla tavalla niin yksikkö- kuin SCT-testeissä.

6 YHTEENVETO

Opinnäytetyön aiheena oli 5G NR -ilmarajapinnan toimintaa ohjaavien kontrollitason viestien käsittelyn optimointi 5G-radioliityntäverkon radioyksikössä. Langattomien verkkojen kehityksen edessä toiminnallisuutta siirretään lähemmäksi ilmarajapintaa parantamaan tiedonsiirtonopeuksia ja viivettä, joten ilmarajapinnan toiminnan ohjaus radioyksikössä täytyy saada mahdollisimman nopeaksi.

Viimeisissä langattomien verkkojen sukupolvissa 4 ja 5 eli LTE- ja 5G-verkkojen ilmarajapinnassa käytetään edellisten sukupolvien ilmarajapinnasta poikkeavaa OFDM-tekniikka, jolla mahdollistetaan leveämmät kanta-aallon kaistanleveydet ja täten suuremmat tiedonsiirtonopeudet. Lisäksi beamforming eli radioaallon keilanmuodostus mahdollistaa suurempien taajuusalueiden käytön ja estää eri radioaaltojen toisiinsa aiheuttamaa häiriötä.

Optimoinnit eivät suurimmilta osin olleet alkuperäisen spesifikaation mukaisia, jossa lähtökohtana oli hyödyntää RAM-muistin kirjoituksessa suurempaa muistiväylää kuin yksittäiset kirjoitettavat tietueet. Tämä ratkaisu ei tuonut parannuksia käsittelyajoissa, vaan pikemminkin hidasti käsittelyä, joten työn edetessä täytyi L1Low-ohjelmistokoodista etsiä optimointimahdollisuuksia, joita sitten löytyi useampi.

Kontrollitason viestien käsittelyn optimoinnit onnistuessaan saavuttivat niille asetetut vaatimukset käsittelyjen kestojen lyhentämisessä. L1Low-ohjelmistoon tehdään koko ajan muutoksia, jotka vaikuttavat käsittelyaikoihin. Optimoinnit kompensoivat edellisten L1Low-ohjelmiston FCP-viestien käsittelyä hidastavien muutoksien vaikutuksia ja antoivat puskuria tulevia muutoksia varten.

Kokonaisuutena opinnäytetyö oli sukellus radioverkkojen ilmarajapinnan syvään päähän. Haasteista huolimatta optimoinnit onnistuivat ja muutokset tulivat suoraan käyttöön kentällä olevien langattomien radioverkkojen radioyksiköihin.

LÄHTEET

1. Mutabazi, Patrick 2019. The Mobile Wireless Communication Technology Journey - 0G, 1G, 2G, 3G, 4G, 5G. LinkedIn. Hakupäivä 19.4.2023. <https://www.linkedin.com/pulse/mobile-wireless-communication-technology-journey-0g-mutabazi/>.
2. Prasad, M & Manoharan, R 2015. Mobile Radio Evolution. Advances in Networks 3 (3), 1-6. Hakupäivä 19.4.2023. <https://article.sciencepublishinggroup.com/html/10.11648.j.net.s.2015030301.11.html>.
3. 6G Flagship 2023. 6G in general. Hakupäivä 21.4.2023 <https://www.6gflagship.com/faq/>.
4. Sauter, Martin 2021. From GSM to LTE-Advanced Pro And 5G: an introduction to mobile networks and mobile broadband 4. painos. John Wiley & Sons, Ltd. Hakupäivä 26.4.2023. O'Reilly Online Learning. Vaatii käyttöoikeuden.
5. Cox, Christopher 2021. An Introduction to 5G: The New Radio, 5G Network and Beyond. 1. painos. John Wiley & Sons Ltd.
6. Traficom 2022. Matkaviestinverkkojen taajuudet ja luvanhaltijat. Hakupäivä 21.4.2023. <https://www.traficom.fi/fi/viestinta/viestintaverkot/matkaviestinverkkojen-taajuudet-ja-luvanhaltijat>.
7. Holma, Harri & Toskala, Antti & Ranta-aho, Karri & Pirskanen Juho 2008. High-Speed Packet Access Evolution in 3GPP Release 7. IEEE Communications Magazine 45 (12). Hakupäivä 15.5.2023. https://www.researchgate.net/publication/3200001_High-Speed_Packet_Access_Evolution_in_3GPP_Release_7_Topics_in_Radio_Communications.
8. Dahlman, Erik & Parkvall, Stefan, Sköld, Johan 2014. 4G: LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband. 2. painos. Academic Press. Hakupäivä 17.5.2023. O'Reilly Online Learning. Vaatii käyttöoikeuden.

9. Keysight Technologies. LTE Physical Layer Overview. Hakupäivä 23.5.2023. https://rfmw.em.keysight.com/wireless/helpfiles/89600b/webhelp/subsystems/lte/content/lte_overview.htm.
10. ShareTechnote. 4G/LTE-PHY Channel. Hakupäivä 23.5.2023. https://www.sharetechnote.com/html/Handbook_LTE_PhyParameter_DL_FDD.html.
11. Lyons, Richard G. 2010. Understanding Digital Signal Processing. 3. painos. Pearson. Hakupäivä 23.5.2023. O'Reilly Online Learning. Vaatii käyttöoikeuden.
12. Dahlman, Erik & Parkvall, Stefan & Sköld, Johan 2018. 5G NR—The Next Generation Wireless Access Technology. Academic Press. Hakupäivä 23.3.2023. O'Reilly Online Learning. Vaatii käyttöoikeuden.
13. Agnico Eagle Finland 2022. Kittilän kaivoksen ensimmäinen 5G-puhelu maan alta. Hakupäivä 26.5.2023. <https://agnicoeagle.fi/fi/kittilan-kaivoksen-ensimmainen-5g-puhelu-maan-alta/>.
14. Paloalto Networks. What is Quality of Service? Hakupäivä 26.5.2023. <https://www.paloaltonetworks.com/cyberpedia/what-is-quality-of-service-qos>.
15. Nokia. Open RAN explained. Hakupäivä 27.5.2023. <https://www.nokia.com/about-us/newsroom/articles/open-ran-explained/>.
16. ORAN ALLIANCE 2023. O-RAN.WG4.CUS.0-R003-v11.00 Technical Specification. Hakupäivä 2.6.2023. <https://orandownloadsweb.azurewebsites.net/download?id=399>.
17. 3GPP 2019. Specification # 38.104, NR; *User equipment (UE) radio transmission and reception; Part 3: Range 1 and range 2 interworking operation with other radios (Release 15)*. Hakupäivä 27.5.2023. https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38_series/38.104.
18. Nokia. AirScale Massive MIMO radios. Hakupäivä 27.5.2023. <https://www.nokia.com/networks/mobile-networks/airscale-radio-access/massive-mimo/>.

19. ORAN Alliance. Transport Layer and O-RAN Fronthaul Protocol Implementation. Hakupäivä 28.5.2023. https://docs.o-ran-sc.org/projects/o-ran-sc-o-du-phy/en/latest/Transport-Layer-and-ORAN-Fronthaul-Protocol-Implementation_fh.html.

OPTIMOINTIEN TULOKSET 1

LIITE 1

			AVG time difference vs unoptimized µs	MIN diff vs MIN unoptimized µs	AVG improve- ment in %
	AVG	MIN			
DL_case_1	25.4	23.6	-2.6	-2.9	-9.3
DL_case_2	10.3	9.3	-0.5	-0.5	-4.6
DL_case_3	7.5	6.5	0	-0.1	0.0
DL_case_4	6	5.1	0	0	0.0
DL_case_5	7.5	6.4	-0.4	-0.2	-5.1
DL_case_6	6	5.1	0	0	0.0
DL_case_7	9	8.1	-0.3	-0.3	-3.2
DL_case_8	7.6	6.7	-0.3	-0.3	-3.8
DL_case_9	7.1	6.1	0.2	0.1	2.9
DL_case_10	5.6	4.7	0.1	0.2	1.8
DL_case_11	7.1	6	0.1	-0.1	1.4
DL_case_12	5.6	4.7	0.1	0.1	1.8
DL_case_13	6.9	6	0	0.1	0.0
DL_case_14	5.6	4.6	0.2	0.1	3.7
DL_case_15	57.8	55.5	-6.3	-6.4	-9.8
DL_case_16	29.2	27.8	-3.5	-3.5	-10.7
DL_case_17	80.7	77.7	-11.9	-12	-12.9
DL_case_18	22.9	21.6	-0.8	-0.7	-3.4
DL_case_19	64.2	61.6	-7.2	-7.4	-10.1
DL_case_20	33.6	31.9	-4.2	-4.4	-11.1
DL_case_21	90.8	87.4	-13.4	-13.8	-12.9
DL_case_22	26.6	25.2	-1	-1	-3.6
UL_case_1	62.9	59.7	-14.1	-13.5	-18.3
UL_case_2	63.4	60.7	-14.1	-13.5	-18.2
UL_case_3	58.9	55.8	-13.6	-13.8	-18.8
UL_case_4	54.4	51.6	-13.6	-13.8	-20.0
UL_case_5	41	37.7	-9	-10.3	-18.0
UL_case_6	41.2	37.7	-8.9	-10.6	-17.8
UL_case_7	24.9	23.4	-1	-0.9	-3.9
UL_case_8	25.8	24.1	-1	-1.1	-3.7
UL_case_9	61	58.3	-13.9	-13.5	-18.6
UL_case_10	62.2	59.4	-13.4	-13.4	-17.7
UL_case_11	7.1	6	0.1	0.1	1.4
UL_case_12	7	5.9	0.1	0.1	1.4
DL_case_23	25.4	23.6	-2.6	-2.9	-9.3
DL_case_24	10.3	9.3	-0.5	-0.5	-4.6
DL_case_25	7.5	6.5	0	-0.1	0.0
DL_case_26	6	5.1	0	0	0.0
DL_case_27	7.5	6.4	-0.4	-0.2	-5.1
DL_case_28	6	5.1	0	0	0.0
DL_case_29	9	8.1	-0.3	-0.3	-3.2
DL_case_30	7.6	6.7	-0.3	-0.3	-3.8
DL_case_31	7.1	6.1	0.2	0.1	2.9
DL_case_32	5.6	4.7	0.1	0.2	1.8
DL_case_33	7.1	6	0.1	-0.1	1.4
DL_case_34	5.6	4.7	0.1	0.1	1.8
DL_case_35	6.9	6	0	0.1	0.0
DL_case_36	5.6	4.6	0.2	0.1	3.7
DL_case_37	57.8	55.5	-6.3	-6.4	-9.8
DL_case_38	29.2	27.8	-3.5	-3.5	-10.7
DL_case_39	80.7	77.7	-11.9	-12	-12.9
DL_case_40	22.9	21.6	-0.8	-0.7	-3.4
DL_case_41	64.2	61.6	-7.2	-7.4	-10.1
DL_case_42	33.6	31.9	-4.2	-4.4	-11.1
DL_case_43	90.8	87.4	-13.4	-13.8	-12.9
DL_case_44	26.6	25.2	-1	-1	-3.6
DL_case_45	30.2	28.7	-1.8	-1.7	-5.6
DL_case_46	14.4	13.4	-0.3	-0.3	-2.0
DL_case_47	21.1	19.9	-2.6	-2.6	-11.0
DL_case_48	31.9	30.3	-5.9	-5.9	-15.6
DL_case_49	54	51	-11.1	-12.5	-17.1
DL_case_50	14.5	13.4	-1	-0.7	-6.5
DL_case_51	21.4	20.1	-1.3	-1.5	-5.7
DL_case_52	35.2	33.6	-2.8	-2.8	-7.4
DL_case_53	21.1	19.9	-2.6	-2.6	-11.0
DL_case_54	31.9	30.3	-6	-5.9	-15.8
DL_case_55	54	51.2	-11.1	-12.3	-17.1
DL_case_56	14.4	13.5	-1	-0.7	-6.5
DL_case_57	21.4	20.1	-1.3	-1.5	-5.7
DL_case_58	35.2	33.6	-3.7	-3	-9.5
UL_case_13	62.9	59.7	-14.1	-13.5	-18.3
UL_case_14	63.4	60.7	-14.1	-13.5	-18.2
UL_case_15	58.9	55.8	-13.6	-13.8	-18.8
UL_case_16	54.4	51.6	-13.6	-13.8	-20.0
UL_case_17	41	37.7	-9	-10.3	-18.0
UL_case_18	41.2	37.7	-8.9	-10.6	-17.8
UL_case_19	24.9	23.4	-1	-0.9	-3.9
UL_case_20	25.8	24.1	-1	-1.1	-3.7
UL_case_21	61	58.3	-13.9	-13.5	-18.6
UL_case_22	62.2	59.4	-13.4	-13.4	-17.7
UL_case_23	7.1	6	0.1	0.1	1.4
UL_case_24	7	5.9	0.1	0.1	1.4
UL_case_25	16.5	15.2	-2.4	-2	-12.7
UL_case_26	16.5	15.3	-2.1	-2	-11.3

OPTIMOINTIEN TULOKSET 2

LIITE 2

			AVG time difference vs unoptimized µs	MIN diff vs MIN unoptimized µs	AVG improve- ment in %
	AVG	MIN			
					-28
DL_case_1	22.7	21.5	-7.2	-6.6	-24.1
DL_case_2	9.4	8.3	-6.6	-6	-41.3
DL_case_3	6.6	5.5	-5.9	-5.3	-47.2
DL_case_4	5.4	4.5	-5.4	-4.7	-50.0
DL_case_5	6.7	5.6	-5.5	-5.4	-45.1
DL_case_6	5.4	4.4	-5.1	-4.7	-48.6
DL_case_7	8.5	7.1	-5.5	-5.3	-39.3
DL_case_8	6.9	6.1	-5.2	-4.8	-43.0
DL_case_9	6.1	5.2	-5.6	-5.3	-47.9
DL_case_10	5	4	-5	-4.9	-50.0
DL_case_11	6.1	5.2	-5.7	-5.2	-48.3
DL_case_12	5	4	-5.1	-4.9	-50.5
DL_case_13	6.2	5	-5.5	-5.4	-47.0
DL_case_14	4.8	4	-5.2	-4.8	-52.0
DL_case_15	50.9	48.5	-7.1	-7.1	-12.2
DL_case_16	26	24.5	-6.3	-6.1	-19.5
DL_case_17	72.5	68.9	-6.5	-7.1	-8.2
DL_case_18	19.2	17.9	-6.2	-5.7	-24.4
DL_case_19	56.5	53.9	-7.1	-7.1	-11.2
DL_case_20	29.8	28.1	-6.6	-6.1	-18.1
DL_case_21	80.7	77.7	-7.2	-6.8	-8.2
DL_case_22	23.2	20.9	-5.2	-5.7	-18.3
UL_case_1	63.2	59.5	-8.1	-6.6	-11.4
UL_case_2	63.8	60	-6.4	-6.7	-9.1
UL_case_3	60.3	56.5	-6.7	-7.1	-10.0
UL_case_4	57.3	53.4	-5.8	-6.5	-9.2
UL_case_5	41.9	40	-6.5	-6.5	-13.4
UL_case_6	42	40.3	-6.7	-6.3	-13.8
UL_case_7	21.3	19.8	-6.9	-6.3	-24.5
UL_case_8	22	20.2	-6.4	-6.4	-22.5
UL_case_9	62.8	58.7	-6	-6.4	-8.7
UL_case_10	62.1	59	-7.2	-6.8	-10.4
UL_case_11	6.5	5.2	-6.1	-5.8	-48.4
UL_case_12	6.4	5.2	-6.1	-5.8	-48.8
DL_case_23	22.7	21.5	-7.2	-6.6	-24.1
DL_case_24	9.4	8.3	-6.6	-6	-41.3
DL_case_25	6.6	5.5	-5.9	-5.3	-47.2
DL_case_26	5.4	4.5	-5.4	-4.7	-50.0
DL_case_27	6.7	5.6	-5.5	-5.4	-45.1
DL_case_28	5.4	4.4	-5.1	-4.7	-48.6
DL_case_29	8.5	7.1	-5.5	-5.3	-39.3
DL_case_30	6.9	6.1	-5.2	-4.8	-43.0
DL_case_31	6.1	5.2	-5.6	-5.3	-47.9
DL_case_32	5	4	-5	-4.9	-50.0
DL_case_33	6.1	5.2	-5.7	-5.2	-48.3
DL_case_34	5	4	-5.1	-4.9	-50.5
DL_case_35	6.2	5	-5.5	-5.4	-47.0
DL_case_36	4.8	4	-5.2	-4.8	-52.0
DL_case_37	50.9	48.5	-7.1	-7.1	-12.2
DL_case_38	26	24.5	-6.3	-6.1	-19.5
DL_case_39	72.5	68.9	-6.5	-7.1	-8.2
DL_case_40	19.2	17.9	-6.2	-5.7	-24.4
DL_case_41	56.5	53.9	-7.1	-7.1	-11.2
DL_case_42	29.8	28.1	-6.6	-6.1	-18.1
DL_case_43	80.7	77.7	-7.2	-6.8	-8.2
DL_case_44	23.2	20.9	-5.2	-5.7	-18.3
DL_case_45	25.6	24.2	-6.6	-6.4	-20.5
DL_case_46	12.3	11.3	-2.1	-1.8	-14.6
DL_case_47	19.3	18.2	-7	-6.8	-26.6
DL_case_48	30.4	28.9	-6.8	-6.9	-18.3
DL_case_49	52.1	50.4	-7.1	-7	-12.0
DL_case_50	12.8	11.9	-6.6	-5.8	-34.0
DL_case_51	19.1	18	-6.7	-5.8	-26.0
DL_case_52	31.8	30.4	-6.1	-5.9	-16.1
DL_case_53	19.3	18.2	-7	-6.7	-26.6
DL_case_54	30.2	29	-7.8	-7	-20.5
DL_case_55	52.1	50.5	-7.2	-6.8	-12.1
DL_case_56	12.9	11.9	-6	-5.7	-31.7
DL_case_57	19.1	18	-6	-5.9	-23.9
DL_case_58	31.8	30.4	-6.2	-6	-16.3
UL_case_13	63.2	59.5	-8.1	-6.6	-11.4
UL_case_14	63.8	60	-6.4	-6.7	-9.1
UL_case_15	60.3	56.5	-6.7	-7.1	-10.0
UL_case_16	57.3	53.4	-5.8	-6.5	-9.2
UL_case_17	41.9	40	-6.5	-6.5	-13.4
UL_case_18	42	40.3	-6.7	-6.3	-13.8
UL_case_19	21.3	19.8	-6.9	-6.3	-24.5
UL_case_20	22	20.2	-6.4	-6.4	-22.5
UL_case_21	62.8	58.7	-6	-6.4	-8.7
UL_case_22	62.1	59	-7.2	-6.8	-10.4
UL_case_23	6.5	5.2	-6.1	-5.8	-48.4
UL_case_24	6.4	5.2	-6.1	-5.8	-48.8
UL_case_25	15.9	14.4	-7.7	-6.6	-32.6
UL_case_26	15.9	14.5	-6.9	-6.6	-30.3