

5G-verkkotekniikka ja latenssi

Peeta Mäkinen

OPINNÄYTETYÖ

Marraskuu 2024

Tietotekniikan tutkinto-ohjelma

Tietoliikennetekniikka ja tietoverkot

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tietotekniikan tutkinto-ohjelma
Tietoliikennetekniikka ja tietoverkot

MÄKINEN, PEETA:
5G-verkkotekniikka ja latenssi

Marraskuu 2024
Opinnäytetyö 55 sivua, joista liitteitä 7 sivua

Työn tarkoituksena oli tarkastella mobiiliverkkojen kehityshistoriaa ensimmäisen sukupolven NMT-verkoista nykyiseen 5G-verkkoteknologiaan. Työssä tutkittiin lisäksi tarkemmin 5G-verkkoteknologiaa ja selvitettiin, miten latenssi vaikuttaa mobiiliverkossa ja millä keinoin sitä on minimoitu 5G-verkossa.

Latenssi ja sen minimointi on keskeinen osa mobiiliverkon toimintaa. Latenssi tarkoittaa aikaa, jossa data kulkee kahden pisteen välillä, ja sitä mitataan millisekunteina. Latenssia aiheuttavat tekijät mobiiliverkossa ovat matkaviive, siirtoviive, käsittelyviive, reititysviive ja jonoviive. 5G-verkkotekniikan kehityksessä on pyritty saavuttamaan mahdollisimman pieni latenssi kaikilla näillä alueilla.

5G-verkossa on mahdollista saavuttaa jopa yhden millisekunnin latenssi hyödyntämällä reunapalvelinlaskentaa, jossa datan käsittely tehdään mahdollisimman lähellä päätelaitetta. Tätä ominaisuutta voidaan hyödyntää sovelluksissa, jotka vaativat lähes reaaliaikaista datan käsittelyä. Näitä ovat esimerkiksi teollisuusrobotit ja itseajavat autot.

Asiasanat: 5G, latenssi, reunapalvelinlaskenta, mobiiliverkkojen historia

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Information Technology
Telecommunications and Network Engineering

MÄKINEN, PEETA:
5G Network Technology and Latency

Bachelor's thesis 55 pages, appendices 7 pages
November 2024

The purpose of this thesis was to examine the development of mobile networks, starting from the first generation NMT network to the current 5G network technology. The thesis also examined the 5G network technology more closely and explained how latency affects mobile networks and what methods are used to minimize it in 5G.

Latency and its minimization are central to the operation of mobile networks. Latency is the time it takes for data to travel between two points, and it is measured in milliseconds. Latency in mobile networks consists of propagation delay, transmission delay, processing delay, routing delay, and queuing delay. The development of 5G network technology has aimed to achieve the lowest possible latency across all these areas.

In 5G networks, latency as low as one millisecond can be achieved through edge computing, where data processing is done as close as possible to the end device. This feature can be utilized in applications that require near real-time data processing, such as industrial robots and self-driving cars.

Keywords: 5G, latency, edge computing, history of mobile networks

SISÄLLYS

1 JOHDANTO	9
2 MOBIILIVERKKOTEKNIIKAN KEHITYS.....	10
2.1 1G (NMT, TACS, AMPS ym.).....	11
2.2 2G (GSM).....	11
2.2.1 Verkon rakenne.....	12
2.2.2 Taajuudet	13
2.2.3 Monikäyttö.....	13
2.2.4 Liikenteen salaus	14
2.2.5 HSCSD.....	15
2.2.6 GPRS	15
2.3 2.5G (EDGE).....	16
2.3.1 Nopeus.....	17
2.3.2 Modulaatio.....	17
2.3.3 Kanavakoodaus	17
2.4 3G (UMTS).....	18
2.4.1 Monikäyttö.....	18
2.4.2 Verkon ominaisuudet	18
2.4.3 Verkon rakenne.....	19
2.4.4 HSPA.....	19
2.5 4G (LTE).....	20
2.5.1 Verkon ominaisuudet	20
2.5.2 Verkon rakenne.....	22
3 5G-VERKKOTEKNIikka	24
3.1 Standardit	24
3.2 5G-verkko Suomessa	25
3.3 Taajuudet.....	25

3.4 Erot ja yhtäläisyydet LTE-verkkoon.....	26
3.5 Puhelut 5G-verkossa	27
3.6 Runkoverkko	27
3.7 Radioverkko	29
4 LATENSSI.....	30
4.1 Standardit	31
4.2 Taajuudet.....	32
4.3 MIMO	33
4.4 Virtualisointi ja dynaaminen resurssien hallinta	34
4.5 Edge computing	35
4.6 IoT.....	37
5 MITTAUKSET	39
6 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA.....	41
6.1 Mittaustulokset	42
6.2 Latenssin merkitys ja haasteet.....	42
6.2 Tulevaisuudennäkymät	43
LÄHTEET	45
LIITTEET	49
Liite 1. Mittauspöytäkirja	49

LYHENTEET

3GPP	Third-Generation Partnership Project
8-PSK	8-Phase Shift Keying
AMF	Access and Mobility management Function
AMPS	Advanced Mobile Phone System
ARP	autoradiopuhelinverkko
AuC	Authentication Center
BSC	Base Station Controller
BTS	Base Transceiver Station
CA	Carrier Aggregation
CC	Component Carrier
CDMA	Code Division Multiple Access
CS	Channel coding Scheme
CSD	Circuit-Switched Data
DS-CDMA	Direct Sequence CDMA
EAC	Edge Application Client
EAS	Edge Application Server
ECS	Edge Configuration Server
EDGE	Enhanced Data rates for GSM Evolution
EEC	Edge Enabler Client
EEL	Edge Enabler Layer
EES	Edge Enabler Server
EGPRS	Enhanced GPRS
EHSD	Enhanced High Speed Data
EIR	Equipment Identity Register
eMBB	Enhanced Mobile Broadband
EPC	Evolved Packet Core
EPS	Evolved Packet System
FDD	Frequency-Division Duplex
FDMA	Frequency Division Multiple Access
G	Generation
Gbps	Gigabits per second
GCR	Group Call Register
GGSN	Gateway GPRS Support Node

gNB	gNodeB
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile communications
HLR	Home Location Register
HRLLC	Highly Reliable Low-Latency Communications
HSCSD	High-Speed Circuit-Switched Data
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access
HSPA	High Speed Packet Access
ICMP	Internet Control Message Protocol
IMSI	International Mobile Subscriber Identity
IMT	International Mobile Telecommunications
IoT	Internet of Things
ITU-R	Radio communications sector of the International Telecommunications Union
kbps	kilobits per second
LTE	Long Term Evolution
Mbit	Megabit
Mbps	Megabits per second
MCS	Modulation Channel coding Scheme
MIMO	Multiple Input Multiple Output
mMTC	Massive Machine-Type Communication
MSC	Mobile Services switching Center
MSISDN	Mobile Station International Subscriber Directory Number
NFV	Network Function Virtualization
NMT	Nordic Mobile Telephone
NR	New Radio
NSA	Non-Standalone
OFDM	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
OSS	Operations Sub-System
PCell	Primary Cell
PCU	Packet Controller Unit
PN	Pseudo random Noise
RAN	Radio-Access Network
RNC	Radio Network Controller
SA	Standalone

SCell	Secondary Cell
SDN	Software Defined Networking
SGSN	Serving GPRS Support Node
SIM	Subscriber Identity Module
SMF	Session Management Function
SRES	Signed Response
TACS	Total Access Communications System
TDD	Time-Division Duplex
TDMA	Time Division Multiple Access
TRX	Transceiver
UMTS	Universal Mobile Communications System
URLLC	Ultra-Reliable and Low-Latency Communication
UPF	User Plane Function
VLR	Visitor Location Register
VoLTE	Voice over LTE
VoNR	Voice over NR
WCDMA	Wideband CDMA

1 JOHDANTO

Mobiiliverkoilta vaadittavat ominaisuudet ovat muuttuneet huomattavasti viime vuosien aikana. Aluksi niiden päätarkoituksena oli välittää puheluita, ja muu liikenne, kuten kuvaviestit, oli sivuosassa. 3G-tekniikka vastasi kasvavaan dataliikenteeseen, ja 4G-tekniikka kehitettiin tarjoamaan edelleen nopeampia internetyhteyksiä suuremmille määrille dataa.

5G-verkkotekniikan kehityksessä oleellisena osana on verkon mukautuminen eri tarpeisiin. Erilaisten yhteyttä käyttävien laitteiden määrä kasvaa jatkuvasti niin yksityiskäyttäjien arjessa kuin teollisuudessakin. Monet näistä laitteista vaativat luotettavaa ja reaaliaikaista dataa, joten latenssin pienentäminen on huomattavasti tärkeämpää kuin aiemmin.

Työssä tutkitaan mobiiliverkkojen kehityshistoriaa aina alkuaajoista 5G-verkkotekniikkaan asti, keskittyen erityisesti siihen, kuinka uuden sukupolven teknologia mahdollistaa pientä latenssia vaativien sovellusten käytön nyt ja tulevaisuudessa.

2 MOBIILIVERKKOTEKNIIKAN KEHITYS

Ensimmäinen askel kohti matkaviestinverkkoja oli sotakäyttöön tarkoitettu kannettava radiopuhelin. Suomessa ensimmäinen yleinen matkaviestinverkko oli 1971 käyttöön otettu Posti- ja telehallituksen autoradiopuhelinverkko (ARP).

Ensimmäinen automaattinen solukkojärjestelmä Suomessa oli ensimmäisen sukupolven (1G) Nordic Mobile Telephone (NMT), joka avattiin kuluttajakäyttöön vuonna 1982. Verkko mahdollisti handoverin eli siirtymisen solusta toiseen ilman yhteyden katkeamista. NMT oli nimensä mukaisesti käytössä ainoastaan Pohjoismaissa ja muutamassa muussa maassa.

Ensimmäinen kansainvälinen järjestelmä oli toisen sukupolven järjestelmä (2G) eli Global System for Mobile communications (GSM), joka otettiin käyttöön 1990-luvun alussa. (Penttinen 1 2006, 13–14)

1G ja 2G keskittyivät puheen siirtämiseen. 1G-tekniikka oli analoginen, eikä datan siirtäminen ollut mahdollista. 2G-tekniikka on kuitenkin digitaalinen ja mahdollistaa myös datan siirtämisen. Enhanced Data rates for GSM Evolution (EDGE), jota kutsutaan myös nimellä 2.5G, oli välimuoto siirryttäessä datan siirtämiseen keskittyviin tekniikoihin, ja se mahdollisti myös datapakettien lähettämisen.

Aiempiä tekniikoita oli kehitetty lähinnä Euroopassa. 3G oli ensimmäinen tekniikka, jota kehitettiin kansainvälisesti. Uusi standardi Wideband Code Division Multiple Access (WCDMA) mahdollisti datan siirtämisen suurilla nopeuksilla. Myöhemmin tämä korvattiin High Speed Packet Access -standardilla (HSPA), jota kutsutaan myös nimellä 3.5G. Long Term Evolution (LTE) eli 4G otettiin käyttöön vuonna 2009. (Dahlman ym. 2016, 1–3)

2.1 1G (NMT, TACS, AMPS ym.)

Ensimmäisen sukupolven matkapuhelinverkko oli analoginen järjestelmä. Suomessa käytössä oli Nordic Mobile Telephone -verkko eli NMT. Sen ensimmäinen taajuus 450 MHz otettiin käyttöön 1982 ja 900 MHz:n taajuus vuonna 1987.

NMT-verkko on automaattinen solukkopuhelinverkko, jossa solujen kokoa voidaan säädellä tarpeen mukaan. Solun kapasiteettia voidaan lisätä pienentämällä solun kokoa. NMT-verkossa on käytössä handover eli automaattinen siirtyminen toiseen tukiasemaan puhelun katkeamatta. NMT:n datasiirtonopeus on 1200/2400 bps. (Tietoverkkolaboratorio 1999)

Ensimmäisen sukupolven matkapuhelinverkossa jokaisella alueella oli oma järjestelmänsä, jotka eivät olleet yhteensopivia keskenään. Esimerkiksi Amerikassa oli käytössä Advanced Mobile Phone System (AMPS), Englannissa Total Access Communications System (TACS), Saksassa Netz-C ja Ranskassa Radiocom 2000.

NMT 900 mahdollisti verkkovierailun (roaming), mutta tämä oli mahdollista ainoastaan NMT-verkon sisällä eli Pohjoismaissa ja muutamassa muussa maassa. (Penttinen 1 2006, 14)

NMT-verkko ajettiin alas Suomessa vuoden 2002 lopussa. (Yle 2002)

2.2 2G (GSM)

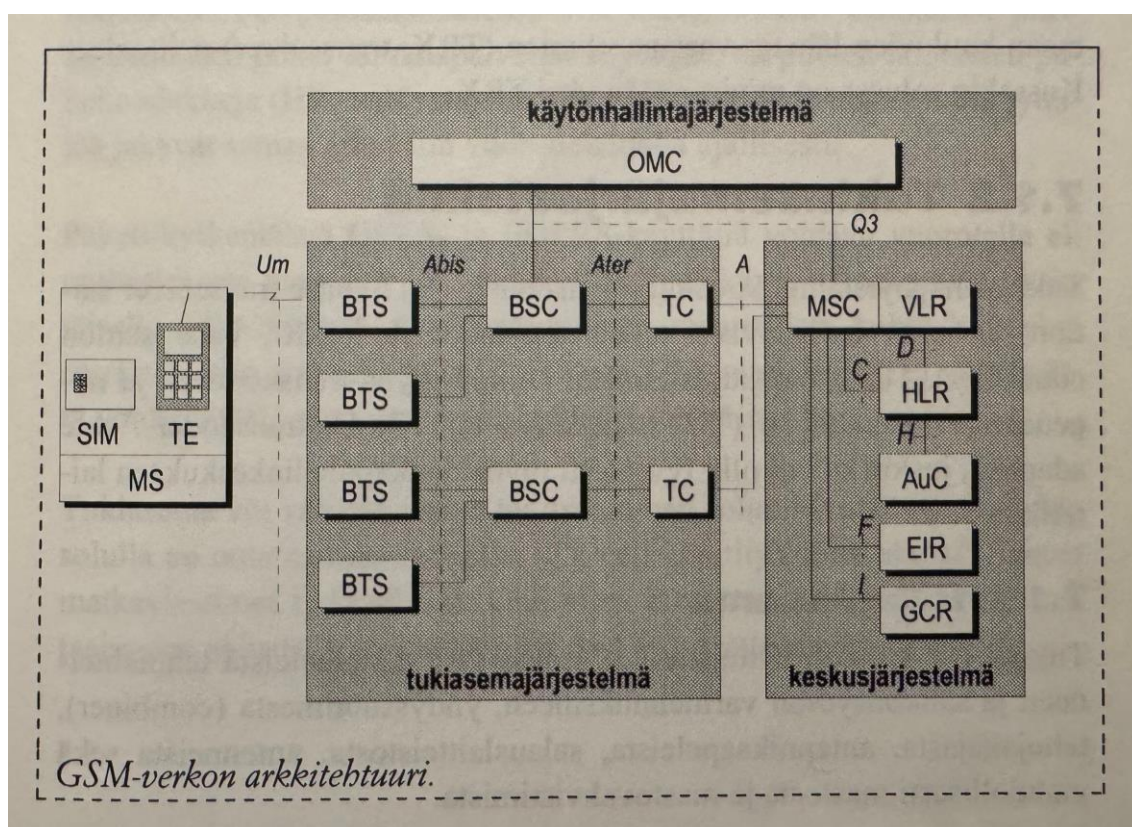
Toisen sukupolven matkapuhelinverkko eli GSM on ensimmäinen kansainvälisesti standardoitu verkko, ja myös ensimmäinen digitaalinen matkapuhelinverkko. Sen kehityksessä oli tavoitteena saavuttaa mahdollisimman nopea käyttöönotto, ja samalla varmistaa, että uusi verkko on merkittävästi analogista verkkoa kehittyneempi ominaisuuksiltaan. (Halonen, Melero & Romero 2002, 4)

Maailman ensimmäinen GSM-verkko avattiin Suomessa vuonna 1991. Samaan aikaan kilpailu vapautui, sillä NMT-verkon omisti valtion yritys Tele, kun taas

GSM-verkon avasi ensimmäisenä osakeyhtiö Radiolinja. Verkon rakentamisen aikaan yhtiöllä ei ollut vielä toimilupaa. (Yle 2016)

2.2.1 Verkon rakenne

GSM-verkko rakentuu keskusjärjestelmästä, tukiasemajärjestelmästä ja hallintajärjestelmästä. Näiden väliset rajapinnat on standardoitu, joten järjestelmissä voidaan käyttää useiden eri laitevalmistajien elementtejä. Käytönhallintajärjestelmä eli Operations Sub-System (OSS) huolehtii verkon käytöstä ja kunnossapidosta, sekä tilaajatietojen ja matkapuhelinten hallinnasta.



KUVA 1. GSM-verkon rakenne (Penttinen 1, 2006)

Tukiasemajärjestelmään kuuluu tukiasemat eli Base Transceiver Station (BTS) ja tukiasemaohjaimet eli Base Station Controller (BSC). Lisäksi transkooderi- ja nopeudensovituslaitteisto kuuluu tukiasemajärjestelmään, vaikka tämän fyysinen sijainti voi olla muualla.

Tukiaseman tärkein osa ovat Transceiver-elementit (TRX), joista kukin välittää liikennettä yhdellä taajuudella kerrallaan. GSM-taajuudet on jaettu kahdeksaan aikaväliin, joka piirikytkentäisessä järjestelmässä tarkoittaa sitä, että yhdellä taajuudella voi olla maksimissaan kahdeksan käyttäjää. Tukiasemaohjaimen tarkoituksena on huolehtia radioverkon resurssien hallinnasta tietyllä alueella.

Keskusjärjestelmän osat ovat matkapuhelinkeskus eli Mobile Services switching Center (MSC) ja rekisterit eli kotirekisteri eli Home Location Register (HLR), vierailijarekisteri eli Visitor Location Register (VLR), laitetunnistusrekisteri eli Equipment Identity Register (EIR), tunnistuskeskus Authentication Center (AuC) ja ryhmäpuhelukirjuri eli Group Call Register (GCR).

HLR-rekisterissä on tiedot tilaajasta ja laskutuksesta, sekä liittymän ominaisuuksista ja lisäpalveluista. Näistä myös vierailijarekisterissä tarvittavia tietoja ovat Mobile Station International Subscriber Directory Number (MSISDN) eli tavallisimmin puhelinnumero ja International Mobile Subscriber Identity -numero (IMSI). Kun matkapuhelin siirtyy pois kotiverkon alueelta, pyytää VLR nämä tiedot kotirekisteristä. (Penttinen 1 2006, 122–132)

2.2.2 Taajuudet

Suomen GSM-verkossa käytetyt taajuudet ovat pääasiassa 900 MHz ja 1800 MHz. Nämä molemmat taajuusalueet on myöhemmin otettu käyttöön myös LTE-tekniikkaan. (Traficom 2023)

2.2.3 Monikäyttö

GSM-verkko käyttää Time Division Multiple Access (TDMA) -tekniikkaa, joka mahdollistaa usean käyttäjän samanaikaisen viestinnän samalla taajuuskaistalla. TDMA jakaa saman siirtotien usealle käyttäjälle niin, että jokainen käyttäjä saa sen käyttöönsä tietyksi ajaksi. Tässä digitaalisessa menetelmässä lähetteet voi-

daan tiivistää ajallisesti ja purkaa sitten vastaanottopäässä alkuperäiseen muotoonsa, jolloin käyttäjä ei huomaa tiedonsiirrossa katkosta. (Penttinen 1 2006, 109)

Kanavaväli GSM-järjestelmässä on 200 kHz, ja taajuusalueiden lopussa ja alussa käytetään yhden kanavan suojaetäisyyttä. TDMA-kehysiä on kahdeksan. GSM-järjestelmässä käytetään myös eri taajuuksia, joten siinä käytetään myös taajuusjakoista tekniikkaa Frequency Division Multiple Access (FDMA). (Penttinen 1 2006, 136)

2.2.4 Liikenteen salaus

Digitaalinen verkko mahdollistaa myös liikenteen salauksen. Tunnistuskeskus varmistaa Subscriber Identity Module -kortin (SIM) avulla laitteen oikeuden käyttää verkkoa. Tämä tapahtuu niin, että tunnistuskeskus lähettää SIM-kortille satunnaisluvun. SIM-kortilla oleva A3-algoritmi laskee satunnaisluvusta ja salausavaimesta Signed Responsen (SRES), ja lähettää sen tunnistuskeskukselle, jossa on tieto SIM-kortin salausavaimesta ja myös laskettu SRES. Näiden lukujen tulee olla sama, jotta laite voi käyttää verkkoa.

Varmistuksen jälkeen suojataan itse liikenne käyttämällä uutta salausavainta. Salausavain on yhteyskohtainen, ja käytetty A8-algoritmi operaattorikohtainen. Yhteyskohtaisen salausavaimen muodostamisen jälkeen aloitetaan varsinainen liikenteen salaus.

Salausavaimen muodostamisen jälkeen kaikki matkapuhelimen ja tukiaseman välillä kulkeva liikenne on salattua. Salaus tehdään yhteyskohtaisen salausavaimen ja A5-algoritmin avulla. Lisäksi käytetään superkehysten numeroa, ja näistä saatu tulos sekä purskeesta saatava data syötetään XOR-operaattoriin. Mikäli yhteys on aktiivinen pidempään kuin superkehysten jakso eli 3,5 tuntia, alkaa sama superkehysten lukuarvo toistua. (Penttinen 1 2006, 148–150)

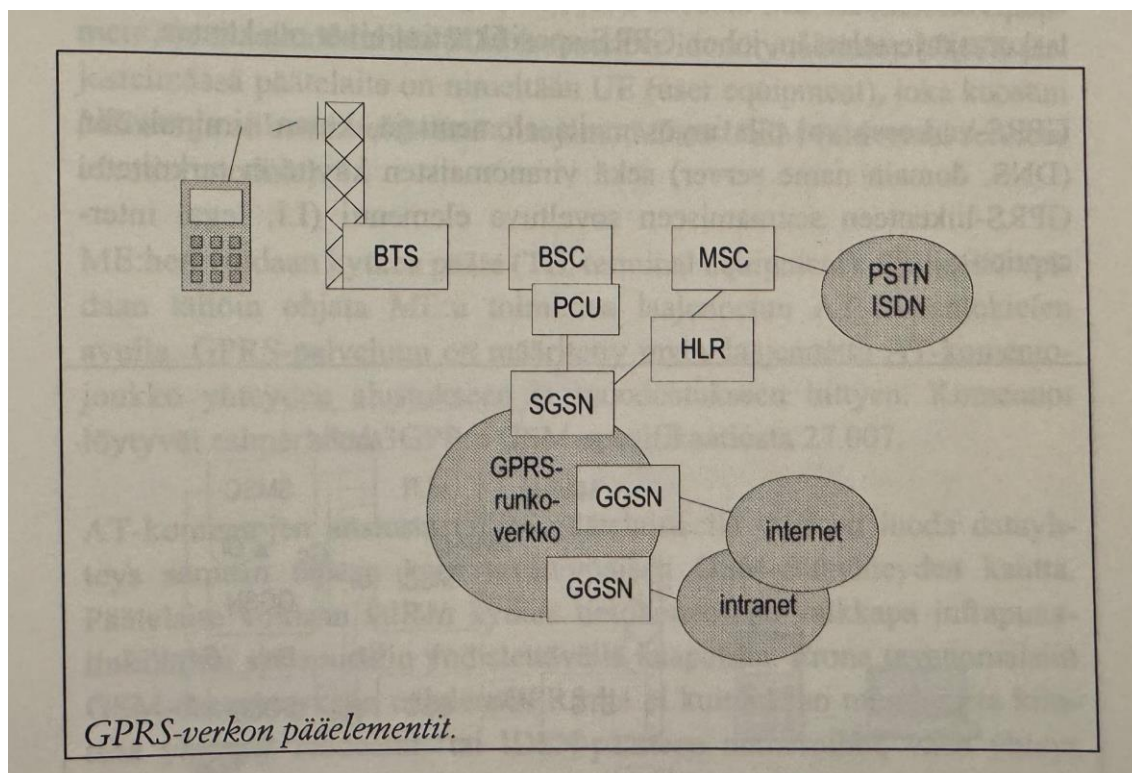
2.2.5 HSCSD

Varhainen askel kohti mobiilidatan siirtoa oli Circuit-Switched Data -tekniikka (CSD), joka on piirikytkentäinen järjestelmä ja käyttää yhtä radiokanavaa kerrallaan tiedonsiirtoon. High-Speed Circuit-Switched Data -tekniikassa (HSCSD) taas käytetään useita kanavia samanaikaisesti, mikä mahdollistaa suuremman datansiirtonopeuden. HSCSD:n muut ominaisuudet ovat kevennetty kanavakoodaus ja käyttö joko vakionopeuksisena tai virheenkorjaavana. HSCSD-tekniikalla voidaan saavuttaa 64 kilobittiä sekunnissa (kbps) datanopeus, kun GSM-tekniikassa maksimi on 9,6 kbps. (Penttinen 1 2006, 155)

2.2.6 GPRS

General Packet Radio Service (GPRS) on GSM-järjestelmän osa, joka mahdollistaa pakettikytkentäisen datan siirron. Piirikytkentäisessä järjestelmässä verkko varataan, vaikka dataa ei siirtyisikään, kun taas pakettikytkentäinen järjestelmä varaa kapasiteettia ainoastaan silloin, kun sitä tarvitaan datan siirtämiseen. GPRS ja GSM toimivat samassa järjestelmässä, kuitenkin niin, että GSM-liikenne kulkee ensisijaisesti ja GPRS väistyy tarvittaessa. GPRS käyttää GSM-liikenteeltä jääviä vapaita aikavälejä. GPRS-liikenne kulkee omassa runkoverkossaan. (Penttinen 1 2006, 158–159)

Rakenteellinen ero aikaisempaan on, että tukiasemaohjaimen lisätään paketinohjausyksikkö Packet Controller Unit (PCU), joka ohjaa liikenteen GPRS-runkoverkkoon Serving GPRS Support Nodelle (SGSN), joka ohjaa sen edelleen Gateway GPRS Support Nodelle (GGSN). GGSN on rajapinta julkisiin verkkoihin. (Penttinen 1 2006, 160–161)



KUVA 2. GPRS-verkon rakenne (Penttinen 1, 161)

2.3 2.5G (EDGE)

Enhanced Data rates for GSM Evolution -tekniikka (EDGE) on tärkeä askel siirtäessä nopeamman datansiirron maailmaan. Vaikka dataa pystytään välittämään myös edeltävillä järjestelmillä, on EDGE ensimmäinen, joka soveltuu esimerkiksi videokuvan lähettämiseen. (Penttinen 1 2006, 189)

EDGE on taaksepäin yhteensopiva GPRS:n kanssa. Sitä voidaan käyttää myös piirikytkentäisen datansiirtotekniikan kanssa. EDGE:n ja GPRS:n yhdistelmästä käytetään nimitystä Enhanced GPRS (EGPRS). Piirikytkentäisessä järjestelmässä eli HSCSD:n kanssa yhdistelmä on Enhanced High Speed Data (EHSD). (Penttinen 2006, 180)

2.3.1 Nopeus

EDGE:n suurin ero GPRS-tekniikkaan on korkeampi datansiirtonopeus. Sen teoreettinen maksiminopeus on 384 kbps. Tämä on kaksinkertainen GPRS:n teoreettiseen maksimiin verrattuna. Kuitenkin GPRS-tekniikalla käytännön datanopeudet jäävät 50 kbps tasolle, kun taas EDGEllä datansiirtonopeus on yli 200 kbps. (Penttinen 1 2006, 179)

2.3.2 Modulaatio

EDGE-tekniikassa käytetään 8-Phase Shift Keying -modulaatiota (8-PSK). Se on käytössä piiri- ja pakettikytkentäisessä tekniikassa. 8-PSK-modulaatio perustuu vaiheen muutokseen signaalissa. 8-PSK-modulaatiossa bitit ovat kolmen ryhmässä, joista jokainen muunnetaan yhdeksi vaiheen tilaksi, eli 8-PSK-modulaatio mahdollistaa kolmen bitin siirron yhdellä symbolilla, kun aiemmilla modulaatiotekniikoilla siirretään vain yksi tai kaksi bittiä symbolilla. Kolmen bitin siirtäminen on mahdollista, koska 8-PSK-modulaatiossa jokaisessa symbolissa on kahdeksan mahdollista tilaa. (Penttinen 1 2006, 183)

2.3.3 Kanavakoodaus

Kanavakoodauksen tehtävänä on virheiden havaitseminen ja niiden korjaaminen. EDGE käyttää samaa kanavakoodaustapaa kuin GPRS, eli kanavakoodausmenetelmiä on useita, ja sopiva valitaan automaattisesti datansiirtonopeuden perusteella. Tehokkaampi virheen korjaus tarkoittaa, että varsinaista käyttäjän lähettämää dataa siirtyy vähemmän, jolloin datansiirtonopeus pienenee. Kun taas nopeutta kasvatetaan muutamalla kanavakoodausluokkaa, virheiden määrä kasvaa.

GPRS käyttää neljää kanavakoodausluokkaa (Channel coding Scheme, CS) CS1-CS4, joita EDGE-tekniikassa vastaavat Modulation Channel coding Scheme (MCS) 1–4. Lisäksi EDGE-tekniikassa on käytössä viisi uutta kanavakoodausluokkaa MCS5-MCS9. (Penttinen 1 2006, 167 & 185)

2.4 3G (UMTS)

Universal Mobile Communications System (UMTS) on 3G-toteutus, joka perustuu laajakaistaiseen koodijakotekniikkaan (Wideband Code Division Multiple Access, WCDMA). (Penttinen 2 2006, 51)

Suomessa kaikki operaattorit luopuvat 3G-verkosta vuoden 2024 loppuun mennessä. Vapautuvat taajuudet otetaan uudempien tekniikoiden käyttöön. (Traficom 2023)

2.4.1 Monikäyttö

WCDMA on hajaspektritekniikka, eli kaikki käyttävät samaa taajuutta, ja eri käyttäjät tunnistetaan hajotuskoodien avulla. Muu liikenne on kohinaa, ja hajotuskoodilla matkaviestin pystyy tunnistamaan itselleen kuuluvan liikenteen kohinan seasta. Käytetyt hajotuskoodit ovat ortogonaalisia, eli kahden koodin välillä ei ole ristikorrelaatiota tai häiriötä. Koodien on myös oltava hyvin tunnistettavissa.

UMTS käyttää suoraajotusjärjestelmää (Direct Sequence CDMA, DS-CDMA), jossa data kerrotaan valesatunnaiskohinalla (Pseudo random Noise, PN). PN on datakoodi, jota kutsutaan nimellä chip. Lähetä muodostetaan eli levitetään, ja vastaanottaja purkaa sen PN-koodin avulla, jolloin muut lähetteet taajuusalueella pysyvät kohinana. Tämä vähentää häiriöitä. (Penttinen 2 2006, 51–55)

2.4.2 Verkon ominaisuudet

Tehonsäätö on oleellinen UMTS-tekniikassa, jotta sekä lähellä että kaukana olevat matkaviestimet saavat yhteyden tukiasemalle. Kun matkaviestin yhdistyy verkkoon, se lähettää ensin aloitusmerkin tietyllä tehotasolla. Mikäli se ei saa vastausta, se nostaa tehotasoa portaittain, kunnes verkko vastaa eli matkaviestimen teho on sopivalla tasolla.

Tehonsäätöä jatketaan koko sen ajan, kun matkaviestin on yhteydessä verkkoon. Tässä käytetään eri tekniikkaa, eli open loop -tehonsäätöä downlink-suunnassa ja closed loop -tehonsäätöä uplink-suunnassa. UMTS-tekniikassa uplink ja downlink ovat eri taajuuksilla.

UMTS-järjestelmässä käytetään sekä pääsynhallintaa että kuormanhallintaa varmistamaan riittävä solun peittoalue ja signaalin laatu. Pääsynhallinta saattaa hylätä uuden puhelun, ja kuormanhallinta voi esimerkiksi siirtää käyttäjän toiselle taajuudelle tai GSM-järjestelmään.

GSM-järjestelmässä kanavanvaihto on aina hard handover, kun taas UMTS-järjestelmässä voidaan käyttää myös pehmeää kanavanvaihtoa. Siinä matkaviestin on yhteydessä samanaikaisesti useaan eri kanavaan, jolloin yhteys ei katkea missään vaiheessa. (Penttinen 2 2006, 58–61)

2.4.3 Verkon rakenne

UMTS-järjestelmässä on osittain samat ominaisuudet kuin GSM-järjestelmässä, eli myös sitä ohjataan käytönhallintajärjestelmän avulla. Tukiasemaohjaimen on UMTS-järjestelmässä korvannut radioverkko-ohjain eli Radio Network Controller (RNC). Toisin kuin tukiasemaohjaimet voidaan radioverkko-ohjaimet yhdistää suoraan toisiinsa helpompaa kanavanvaihtoa varten. Runkoverkon ja RNC:n välillä on lu-rajapinta, radioverkko-ohjainten välissä lur-rajapinta ja RNC:n ja tukiasemien välissä lub-rajapinta. UMTS voi kytkeytyä samaan runkoverkkoon GSM:n kanssa resurssien jakamista varten. (Penttinen 2 2006, 64–66)

2.4.4 HSDPA

High Speed Downlink Packet Access (HSDPA) on UMTS-järjestelmän toiminto, joka mahdollistaa entistä suuremman datansiirtonopeuden. UMTS-tekniikan teoreettinen maksimi on 2 megabittiä sekunnissa (Megabits per second, Mbps), ja HSDPA:n avulla on mahdollista saavuttaa 10 Mbps:n nopeus. Viisinkertainen nopeus tarkoittaa, että verkon kapasiteettia joudutaan lisäämään huomattavasti.

HSDPA käyttää kokonaan uutta kanavaa, johon usean käyttäjän data multipleksataan yhdeksi samalle kanavalle. Tämä vapauttaa resursseja muille verkon käyttäjille. (Penttinen 2 2006, 95–96)

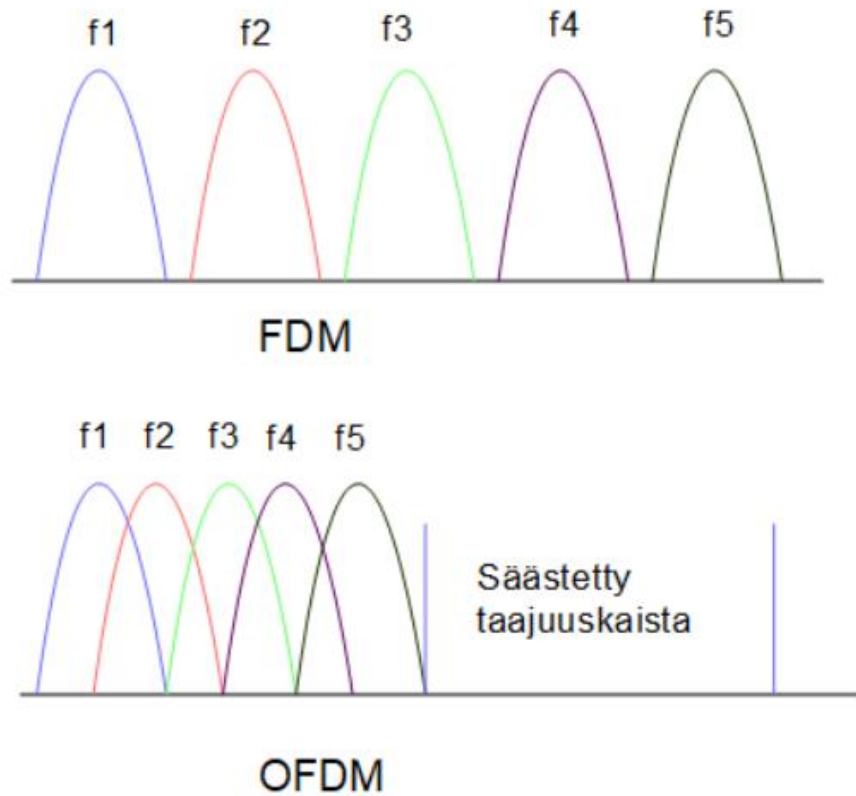
2.5 4G (LTE)

HSDPA oli ensimmäinen askel kohti älypuhelinaikaa, ja 4G on kehitetty erityisesti tätä käyttöä varten. Kaikki liikenne LTE-verkossa kulkee pakettikytkentäisenä. 4G-verkossa on mahdollista päästä jopa useiden satojen megabittien datansiirtonopeuksiin, joten ero 3G-tekniikkaan on huomattava. LTE on myös ensimmäinen aidosti maailmanlaajuinen järjestelmä. Sen kaupallinen käyttö aloitettiin vuonna 2009. (Dahlman ym. 2016, 3–4)

Suomessa LTE:n käytössä olevat taajuudet ovat 450 MHz, 800 MHz, ja 1800 MHz. 4G-verkossa käytetään myös 2,1 ja 2,6 GHz:n taajuuksia, mutta nämä ovat myös muiden tekniikoiden käytössä. (Traficom 2023)

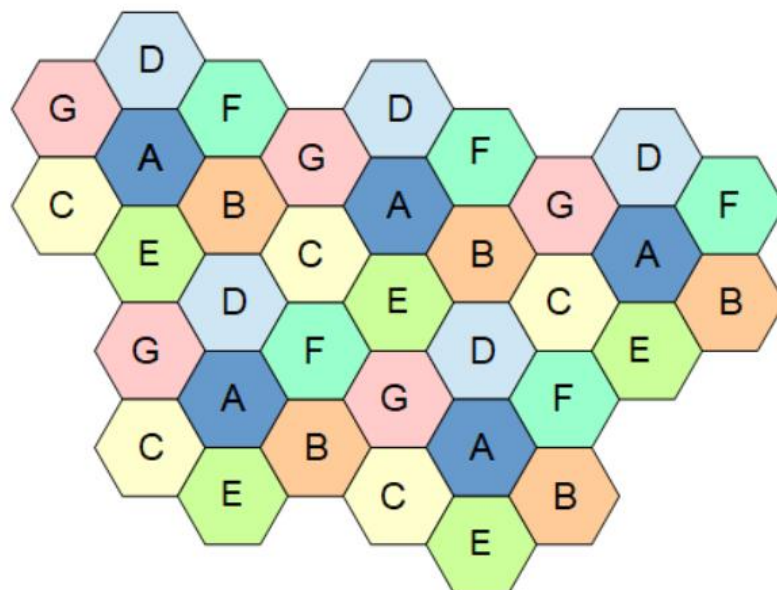
2.5.1 Verkon ominaisuudet

4G-verkossa käytetään ortogonaalista taajuusjakoista multipleksausta (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing, OFDM). OFDM jakaa datan useisiin matalanopeuksiin alikantoaaltoihin. Tämä hyödyntää spektrin tehokkaasti. Ortogonaaliset signaalit ovat toisistaan riippumattomia, mikä tekee 4G-verkosta joustavan ja vikasietoisien. 4G-verkossa käytetään dynaamisesti TDMA- ja FDMA-tekniikkaa resurssien jakamiseen. Koska OFDM:n alikantoaallot voivat olla osittain päällekkäin, se säästää taajuuskaistaa.



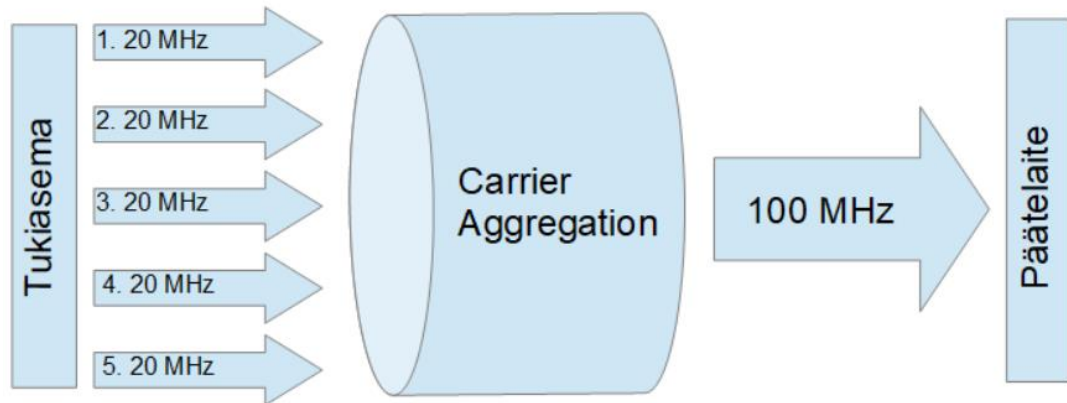
KUVA 3. FDM ja OFDM (Peeta Mäkinen)

LTE-tekniikka tukee aiempien järjestelmien tavoin taajuuksien uudelleenkäyttöä, eli samaa taajuutta voidaan käyttää naapurisoluisissa, eivätkä ne häiritse toisiaan. LTE tukee useiden antennien yhtäaikaista käyttöä sekä downlink- että uplink-suuntaan (Multiple Input Multiple Output, MIMO).



KUVA 4. Taajuuksien uudelleenkäyttö radioverkossa (Peeta Mäkinen)

Carrier Aggregation (CA) tarkoittaa, että datan lähettämiseen voidaan käyttää useaa taajuuskaistaa samanaikaisesti. Tämä 4G-verkon ominaisuus lisää joustavuutta ja mahdollistaa hyvin suuret datansiirtonopeudet. 4G-verkon maksimi-kaistanleveys on 20 MHz, ja CA:n avulla voidaan yhdistää jopa viisi eri kaistaa, jolloin saavutetaan 100 MHz:n kaistanleveys. Verkon joustavuutta lisää sekin, että 4G-verkossa on mahdollista käyttää joko laajaa tai kapeaa taajuuskaistaa riippuen siitä, mikä on kulloinkin saatavilla. (Dahlman ym. 2016, 31–42)



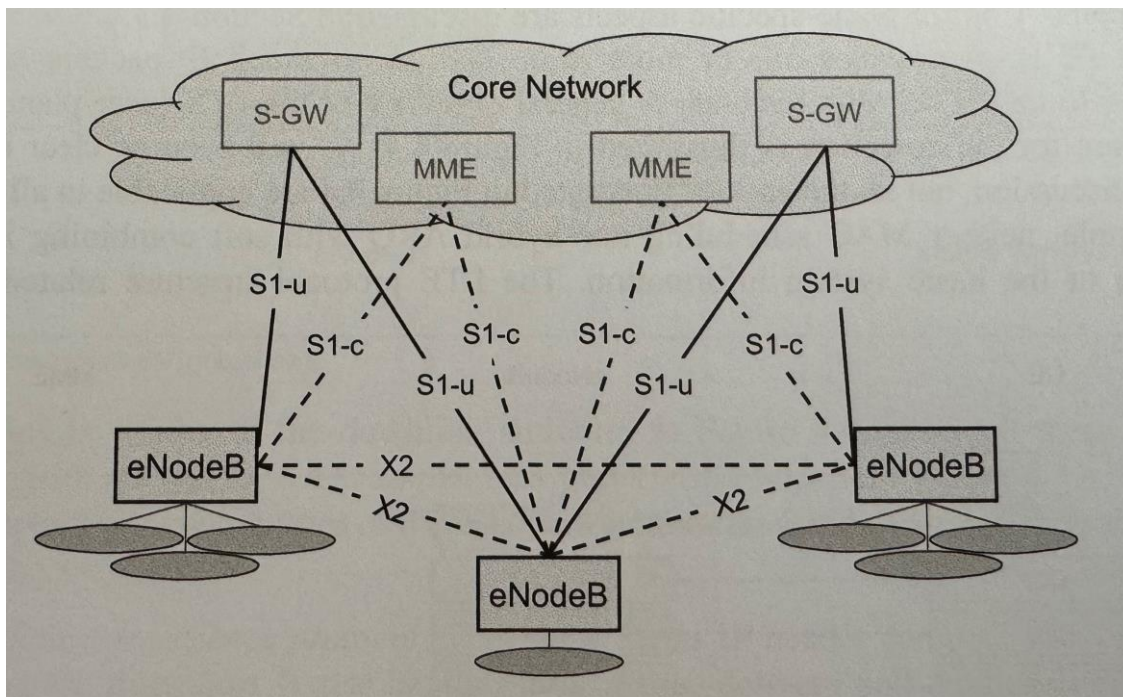
KUVA 5. Carrier aggregation (Peeta Mäkinen)

2.5.2 Verkon rakenne

4G-verkossa rakenne on uudistettu täysin. Radio-Access Network (RAN) huolehtii kaikesta radioliikenteeseen liittyvästä toiminnallisuudesta, ja Evolved Packet Core (EPC) muista toiminnoista, kuten autentikoinnista ja end-to-end-yhteyksien muodostamisesta. Näiden erillisyys mahdollistaa useiden eri radioverkkotekniikoiden yhdistämisen samaan runkoverkkoon. Yhdessä RAN ja EPC muodostavat kokonaisuuden nimeltä Evolved Packet System (EPS).

Runkoverkkoa (EPC) hallinnoi mobility management entity (MME). Serving gateway (S-GW) yhdistää radioverkon ja runkoverkon toisiinsa. Packet data gateway (P-GW) yhdistää runkoverkon internetiin. Runkoverkossa on lisäksi useita muita nodeja, jotka huolehtivat esimerkiksi käyttäjätiedoista.

Radioverkossa on vain yhden tyyppinen node eli eNodeB. Se vastaa kaikista radioverkon toiminnoista yhteen tai useampaan soluun. Jokainen eNodeB on yhdistetty runkoverkkoon S-GW:n kautta, ja ne kommunikoivat keskenään X2-raja-pinnan kautta. (Dahlman ym. 2016, 54–58)



KUVA 6. 4G-verkon rakenne (Dahlman ym. 2016, 57)

3 5G-VERKKOTEKNIikka

5G-verkon ominaisuuksia ovat 4G-verkkoon verrattuna nopeampi tiedonsiirto, suurempi kapasiteetti, pienempi latenssi ja vakaampi toiminta. Lisäksi 5G mahdollistaa verkon viipaloinnin, jolloin voidaan varata osa verkosta tietyille käyttäjäryhmälle, tai priorisoida esimerkiksi luotettavuus tai nopeus käyttötarkoituksen mukaan. (Traficom 2023)

Nämä ominaisuudet mahdollistavat uusia käyttötarkoituksia mobiiliverkoille. 5G:n käyttötarkoitus voidaan jakaa karkeasti kolmeen eri luokkaan, jotka ovat Enhanced Mobile Broadband (eMBB), Massive Machine-Type Communication (mMTC) ja Ultra-Reliable and Low-Latency Communication (URLLC). Näistä eMBB tarjoaa entistäkin nopeampia laajakaistayhteyksiä. mMTC viittaa esimerkiksi erilaisiin sensoreihin ja monitorointilaitteisiin, joiden siirtämä datamäärä on hyvin pieni, mutta laitteita on valtava määrä. URLLC tarkoittaa palveluita, joissa vaaditaan erittäin pientä latenssia ja mahdollisimman suurta luotettavuutta, kuten automaatio ja liikenteenohjaus. (Dahlman ym. 2021, 3–4)

3.1 Standardit

Ennen 3G-verkon kehittämistä standardisointijärjestöjä oli useita. 3G-tekniikkaa lähdettiin kuitenkin kehittämään kansainvälisesti, ja sitä varten perustettiin standardisointijärjestö Third-Generation Partnership Project (3GPP). Nimestään huolimatta 3GPP on ollut mukana myös LTE-tekniikan ja 5G-tekniikan eli New Ration (NR) kehityksessä. 3GPP onkin nykyisin ainoa merkittävä standardointijärjestö. (Dahlman ym. 2021, 3)

3GPP on perustettu vuonna 1998. Sen nykyisenä tehtävänä on mobiililaajakais-tastandardien luominen ja kasvavana painotuksena Internet of Things (IoT). 3GPP:n alaisuudessa toimii useita ryhmiä, joiden tarkoituksena on valmistella, hyväksyä ja ylläpitää teknisiä määrittelyjä ja raportteja. Ryhmät ovat vastuussa tekniikan eri versioista eli releaseista. 3GPP:n ryhmät ovat Core Network & Terminals, Radio Access Networks ja Services & System Aspects, joiden alaisuudessa toimii edelleen useita eri ryhmiä. (3GPP 2024)

Radioyhteyksien sektori International Telecommunications Unionissa (ITU-R) on vastuussa radiotaajuuksien tehokkaasta ja taloudellisesta käytöstä. ITU-R määrittelee minimivaatimukset uudelle tekniikalle. Tämä standardi on nimeltään International Mobile Telecommunications (IMT), ja 5G-tekniikan standardi on IMT-2020. Vaatimuksissa huomioidaan 5G-tekniikan eri käyttötarkoitukset eMBB, mMTC ja URLLC, ja niissä määritellään mm. datansiirtonopeus, kapasiteetti, käyttökokemus, latenssi ja luotettavuus. (Dahlman ym. 2021, 9–20)

3.2 5G-verkko Suomessa

Aiemmista verkkotekniikoista kertova uutisointi keskittyi tulevaisuudennäkymiin ja Suomen asemaan mobiiliverkkotekniikan kärkimaana. 5G-tekniikkaa koskeva uutisointi taas keskittyy mahdollisiin uhkakuviin ja niitä kumoaviin asiantuntija-haastatteluihin. Säteilyturvallisuus huolestutti 5G-verkon alkuaikoina, koska siitä tehdyt tutkimukset perustuivat ainoastaan 4G-verkkoon. Näitä voidaan kuitenkin soveltaa 5G-verkkoon, sillä 3,5 GHz:n taajuus ei eroa merkittävästi aiempien tekniikoiden käyttämisestä taajuuksista. (Yle 2021)

Vastustuksesta huolimatta Suomi otti ensimmäisenä maailmassa käyttöön kaupallisen 5G-verkon vuonna 2019. Aluksi 5G-verkko toimi ainoastaan 4G-runkoverkon päällä, eli se tarvitsi toimiakseen 4G-ankkurisolun. Tällaista verkkoa kutsutaan nimellä Non-Standalone (NSA). Helmikuussa 2024 Elisa on avannut kaupalliseen käyttöön myös Standalone-verkon (SA), joka ei vaadi toimiakseen 4G-verkkoa. SA-verkossa yhteyden laatu on parempi ja viive pienempi. (Elisa 2024)

3.3 Taajuudet

ITU-R määrittelee, mitkä taajuudet ovat 5G-verkon käytössä eri maissa. Uudet IMT:lle määritellyt taajudet ovat Euroopan alueella 700 MHz ja 3400–3600 MHz. IMT-2020:n käyttöön on varattu myös korkeampia taajuuksia eli 24,25–27,5 GHz, 37–43,5 GHz, 47,2–48,2 GHz ja 66–71 GHz. (Dahlman ym. 2021, 29)

Kun 700 MHz:n ja 3,5 GHz:n verkko parantaa perinteiseen mobiiliverkon laatua, yli 24 GHz:n korkeammat millimetritaajuudet tuovat esiin 5G-verkon merkittävät erot aiempiin tekniikoihin verrattuna. Millimetritaajuudet mahdollistavat erittäin suuren tiedonsiirtonopeuden ja pienen viiveen. Käytännön testeissä on päästy yli 4 Gbit/s tiedonsiirtonopeuteen alle 10 ms viiveellä. (Uusiteknologia.fi 2021)

3.4 Erot ja yhtäläisyydet LTE-verkkoon

Myös 5G-verkkotekniikassa käytetään OFDM-tekniikkaa signaalin modulointiin. (Dahlman ym. 2021, 173)

Lisäksi käytössä on Carrier Aggregation (CA) samaan tapaan kuin LTE-verkossa. 5G-verkossa toimiva laite pystyy laitemallista, palvelutarjoajasta ja laitteen asetuksista riippuen käyttämään joko kokonaan itsenäistä 5G-verkkoa, jolloin CA toimii 5G-taajuuksien sisällä, tai ottamaan lisäksi 4G-taajuudet käyttöön paikoissa, joissa 5G-kuuluvuus on heikko tai sitä ei ole. (Elisa 2024)

4G-verkossa CA mahdollistaa 640 MHz kaistanleveyden ja teoreettinen latausnopeuden maksimi on 25 Gbit/s, kun yhdistetään kaikki 32 komponenttikaistaa (Component Carrier, CC). 5G-verkossa voidaan käyttää 16 eri taajuuksilla ja dupleksointimenetelmillä toimivia komponenttikaistoja samanaikaisesti. Tämä mahdollistaa teoriassa 6,4 GHz kaistanleveyden. CA:n yhteydessä puhutaan soluista. Laite on ensimmäiseksi yhteydessä pääsoluun (Primary Cell, PCell), jonka jälkeen se yhdistää toissijaisiin soluihin (Secondary Cell, SCell). Toissijaisiin soluihin voidaan yhdistää ja katkaista yhteys nopeasti tarpeen mukaan. Usein käytössä on enemmän soluja downlink- kuin uplink-suuntaan. (Dahlman ym. 2021, 45–46, 128–129)

Dupleksointi mahdollistaa kaksisuuntaisen liikenteen samanaikaisesti, eli data liikkuu yhtä aikaa downlink- ja uplink-suuntaan. Tämä on keskeinen ominaisuus matkapuhelinverkossa. Esimerkiksi radiopuhelimessa käytössä on vain yhden-suuntainen liikenne. Dupleksointi voi olla joko aika- tai taajuusjakoista, ja sekä 4G- että 5G-verkkotekniikassa on käytössä molemmat.

Aikajakoisessa duplexoinnissa (Time-Division Duplex, TDD) lähetys molempiin suuntiin tapahtuu samalla taajuudella, mutta eri aikaan. Taajuusjakoisessa duplexoinnissa (Frequency-Division Duplex, FDD) dataa lähetetään samanaikaisesti, mutta uplink- ja downlink-suuntien liikenne kulkee eri taajuuksilla. FDD on full duplex -tekniikka ja TDD half duplex -tekniikka.

4G-tekniikassa käytössä on pääasiassa FDD, kun taas 5G käyttää dynaamisesti molempia. 4G käyttää datasiirtoon kahta erilaista kehystä, joista toinen on käytössä downlink- ja toinen uplink-suuntaan. 5G-verkossa on käytössä ainoastaan yksi kehysrakenne molempiin suuntiin, ja tämä mahdollistaa dynaamisen resursien jakamisen tarpeen mukaan. (Dahlman ym. 2021, 133–135)

3.5 Puhelut 5G-verkossa

4G-verkossa on käytössä puheluiden välittämiseen tarkoitettu tekniikka Voice over LTE (VoLTE). Aiempiin tekniikoihin verrattuna puheluiden laatu on parempi ja yhdistäminen nopeampaa. VoLTE-puhelut kulkevat 4G-runkoverkon kautta ja esimerkiksi kuuluvuuden heiketessä puhelu voidaan pudottaa pakettikytkentäiseen tekniikkaan 2G- tai 3G-verkkoon.

5G-verkossa puheluiden välittämiseen käytetty tekniikka on Voice over NR (VoNR). 5G-verkon pienemmän latenssin takia puhelut ovat vielä VoLTEa nopeampia, ja VoNR:n uudet äänenkoodausmenetelmät mahdollistavat entistä paremman äänenlaadun. Kuuluvuuden heiketessä VoNR-puhelu voidaan pudottaa VoLTE-puheluksi, ja siitä tarvittaessa edelleen kulkemaan 2G- tai 3G-verkossa. (RF Wireless World 2021–2024)

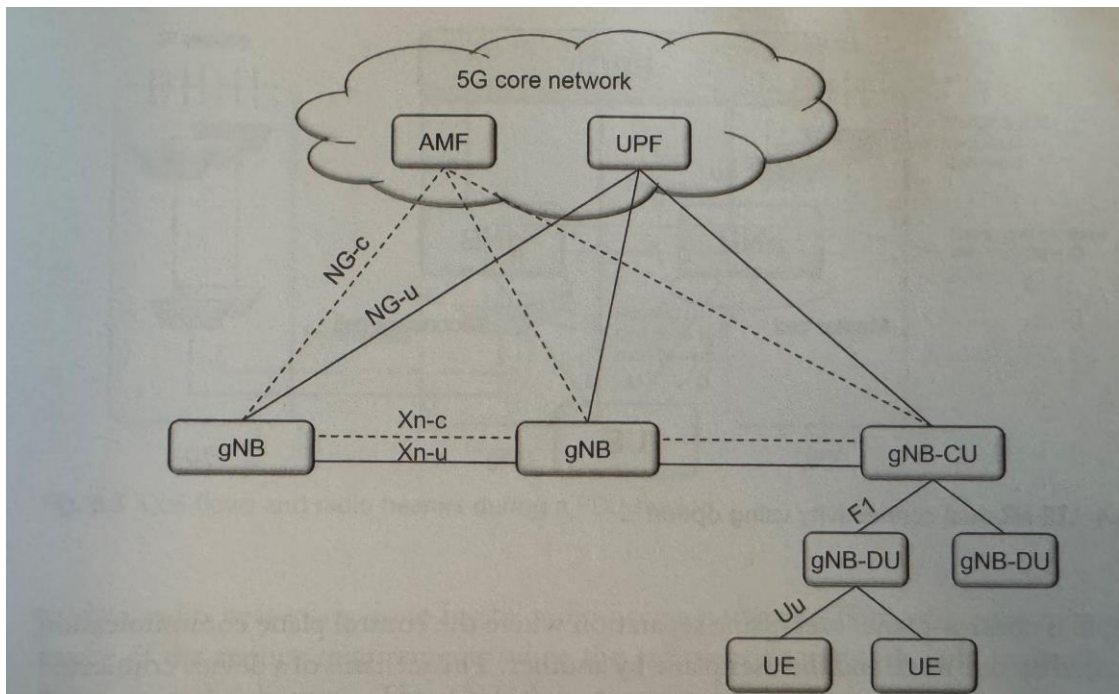
3.6 Runkoverkko

5G-runkoverkko ei perustu nodeihin, kuten LTE-verkko, vaan eri palveluihin, joita NR tarjoaa. Runkoverkko onkin enimmäkseen virtuaalinen. Lisäksi uutena ominaisuutena on verkon viipalointi sekä verkon hallinnan ja verkon käyttäjien erottaminen toisistaan. Tämä tarkoittaa sitä, että esimerkiksi hallintatasolle voidaan

määritellä lisää kapasiteettia, eikä se vaikuta käyttäjätasolle varattuun kapasiteettiin.

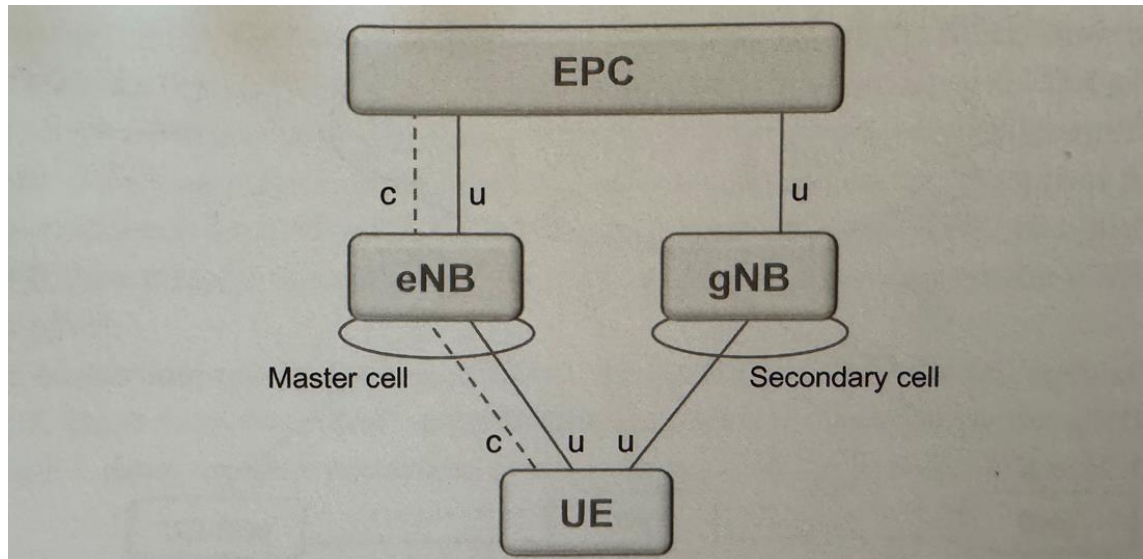
Virtualisoitu runkoverkko tarkoittaa, että liikennettä käsitellään ohjelmistotasolla, eikä se ole riippuvainen runkoverkon fyysisistä komponenteista. 5G-verkon arkkitehtuuri varmistaa, ettei liikenteelle muodostu pullonkaulaa. Näin voi käydä LTE-verkossa, koska kaikki liikenne kulkee P-GW:n kautta. Rakenteeltaan 5G-verkko on 4G-verkkoa huomattavasti skaalautuvampi ja siihen on helppo liittää uusia osia ja ominaisuuksia.

RANin ja internetin välissä on käyttäjätaso eli User Plane Function (UPF). Se vastaa pakettien käsittelystä ja reitityksestä, sekä toimii linkkinä eri verkkotekniikoiden välillä liikuttaessa. Hallintataso koostuu useasta eri osasta. Session Management Function (SMF) vastaa kaikesta verkkoistunnon hallinnointiin liittyvästä ja Access and Mobility management Function (AMF) vastaa datan turvallisuudesta, autentikoinnista ja kommunikoinnista runkoverkon ja päätelaitteen välillä.



KUVA 7. 5G-runkoverkon rakenne (Dahlman ym. 2021)

5G-tekniikassa runkoverkko voidaan toteuttaa useilla erilaisilla tavoilla, ja voidaan käyttää myös EPC-runkoverkkoa. Runkoverkko voi olla esimerkiksi yksi fyysinen node, useita nodeja tai toteutettu kokonaan pilvialustalla. (Dahlman 2021, 79–82)



KUVA 8. NSA-verkon toiminta (Dahlman ym. 2021)

3.7 Radioverkko

5G-verkko koostuu tukiaseman gNodeB-elementeistä (gNB), jotka toiminnallisuudeltaan vastaavat tukiasemaa muissa verkkotekniikoissa. GNB vastaa siis päätelaitteen ja runkoverkon välisestä yhteydestä omassa solussaan tai useassa solussa. GNB on looginen, ei fyysinen elementti. Se voi olla perinteinen fyysinen tukiasema tai koostua useista eri lähettimistä. Myös hyvin kaukana toisistaan olevat tukiaseman solut voivat olla saman gNB:n osia.

Lisäksi radioverkossa voi olla eNB-elementtejä, jotka mahdollistavat päätelaitteiden käyttämisen myös LTE-verkossa. Päätelaite voi olla yhteydessä samanaikaisesti eNB- ja gNB-elementtiin, jolloin hallintatason liikenne kulkee eNB:n kautta ja käyttäjätason liikenne kulkee gNB:n kautta. Tämä on NSA-verkon toimintaperiaate, eli 4G toimii ankkurisoluna ja liikenne kulkee 5G-taajuuksilla. (Dahlman ym. 2021, 82–84)

4 LATENSSI

Latenssi tarkoittaa datasiirron viivettä kahden pisteen välillä, ja se mitataan millisekunteina. Tavalliseen verkkoselailuun latenssi ei välttämättä juuri vaikuta, ellei se kohoa hyvin suureksi, mutta esimerkiksi verkkopelaamisessa latenssilla on suuri merkitys. Sovellukset, joiden tulee reagoida mahdollisimman nopeasti saatuun käskyyn, esimerkiksi itseajavat autot, vaativat pientä latenssia.

Latenssiin vaikuttaa useita eri tekijöitä. Signaalin kulkema matka aiheuttaa latenssia eli latenssi kasvaa matkan pidentyessä. Käytetty siirtotie aiheuttaa latenssia, esimerkiksi kupariverkossa data kulkee hitaammin kuin valokuituverkossa. Valokuidussa signaali kulkee 200 000 km/s nopeudella. Jos signaalin täytyy kulkea 1000 kilometrin matka, lasketaan latenssi kaavalla

$$\text{Matkaviive} = \frac{\text{Etäisyys } (d)}{\text{Kulkunopeus } (v)} = \frac{1000 \text{ km}}{200\,000 \text{ km/s}} = 0,005 \text{ s} = 5 \text{ ms}$$

Siirtoaikaviive (transmission delay) riippuu lähetetyn paketin koosta ja käytetystä siirtonopeudesta. Esimerkiksi viive 10 megabitin (10 Mbit) kokoisen paketin lähettämiseen 1 megabittiä sekunnissa (1 Mbps) siirtonopeudella lasketaan

$$\text{Siirtoviive} = \frac{\text{Datamäärä } (M)}{\text{Siirtonopeus } (R)} = \frac{10 \text{ Mbit}}{1 \text{ Mbps}} = 10 \text{ s} = 10\,000 \text{ ms}$$

Datan prosessointiin ja reititykseen kuluu myös aikaa. Tämän kesto riippuu käytettävistä laitteista, reitittimisestä, kytkimisestä ja palvelimisesta, ja niiden aiheuttamaa latenssia voidaan mitata erilaisilla suorituskykymittareilla. Lisäksi latenssia aiheuttaa pakettien jonotusaika, esimerkiksi ruuhka verkossa tai pullonkaulat reitin varrella. (Netmaker 2024)

Kokonaislatenssi lasketaan lisäämällä yhteen kaikki latenssia aiheuttavat tekijät

$$\text{Latenssi} = \text{Matkaviive} + \text{Siirtoviive} + \text{Käsittelyviive} + \text{Reititysviive} \\ + \text{Jonoviive}$$

Yksinkertainen tapa mitata latenssia päätelaitteelta tiettyyn pisteeseen on ping-komento. Se mittaa ajan, joka ICMP-viestillä (Internet Control Message Protocol) kestää kulkea palvelimelle ja takaisin.

```
C:\>ping 8.8.8.8

Pinging 8.8.8.8 with 32 bytes of data:
Reply from 8.8.8.8: bytes=32 time=6ms TTL=59
Reply from 8.8.8.8: bytes=32 time=6ms TTL=59
Reply from 8.8.8.8: bytes=32 time=8ms TTL=59
Reply from 8.8.8.8: bytes=32 time=6ms TTL=59

Ping statistics for 8.8.8.8:
    Packets: Sent = 4, Received = 4, Lost = 0 (0% loss),
    Approximate round trip times in milli-seconds:
        Minimum = 6ms, Maximum = 8ms, Average = 6ms
```

KUVA 9. Ping-komento (Peeta Mäkinen)

Koska latenssi tarkoittaa viivettä kahden pisteen välillä, lasketaan esimerkissä latenssi

$$\text{Latenssi} = \frac{\text{Paluu-aika}}{2} = \frac{6 \text{ ms}}{2} = 3 \text{ ms}$$

Ping-komento ei ole tarkka väline latenssin mittaamiseen, mutta sen avulla voidaan nopeasti rajata latenssin aiheuttajaa pingaamalla eri verkkolaitteita tai palvelimia. (Jones ym. 2020)

4.1 Standardit

URLLC-standardia vastaava standardi 4G-verkossa on Highly Reliable Low-Latency Communication (HRLLC). 5G-verkko tarjoaa siis ultraluotettavaa matalan latenssin kommunikaatiota verrattuna 4G-verkon hyvin luotettavaan matalan latenssin kommunikaatioon.

4G-verkkotekniikkaa edeltävissä standardeissa luotettavuutta ja latenssia on käsitelty erikseen, ja useimmiten luotettavuus on lisännyt latenssia ja latenssi vähentänyt luotettavuutta. Luotettavuutta vaativissa sovelluksissa latenssilla ei ole

ollut suurta merkitystä, ja pientä latenssia vaativissa sovelluksissa luotettavuus ei ole ollut tarpeellista. Esimerkiksi suurempaa luotettavuutta vaativassa nettiselailussa paketit voidaan lähettää uudelleen, eikä latenssilla ole suurta merkitystä käyttäjäkokemuksen kannalta. Pientä latenssia vaativissa sovelluksissa kuten videopuheluissa taas luotettavuus ei ole ollut yhtä tarpeellista, koska pienistä virheistä kommunikaatiossa ei ole juuri haittaa.

5G-verkkotekniikan kehityksessä on määritelty käyttötarkoitukset, joissa vaaditaan sekä suurta luotettavuutta että pientä latenssia. Näitä ovat esimerkiksi teollisuudessa käytetty robotiikka ja automaattiset tuotantolinjat, itseajavat autot ja laitteiden etähallinta. (Sultan 2023)

4.2 Taajuudet

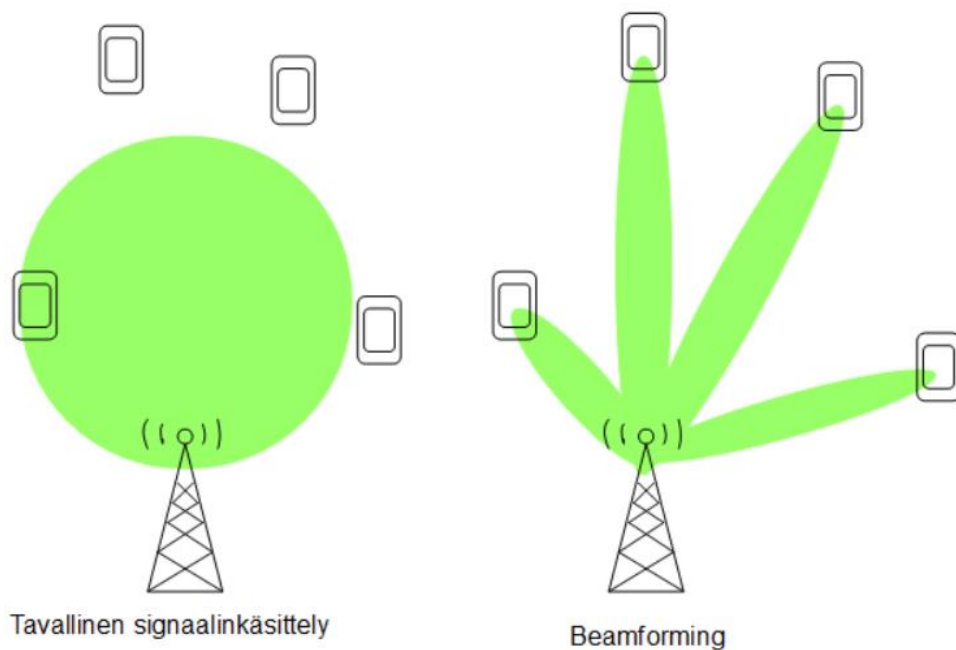
5G-verkossa voidaan käyttää matalaa, keskitasoista tai korkeaa taajuusalueita. Matalan tason taajuusalue on alle 1GHz. Sillä saavutetaan suuri peittoalue, mutta kapasiteetti on pienempi ja latenssi suurempi kuin korkeammilla taajuusalueilla. Kuitenkin myös matalien taajuuksien latenssi on 5G-verkossa erittäin pieni. Matalat taajuusalueet soveltuvat esimerkiksi harvaan asutuille alueille takaamaan peruskäyttöön soveltuvan nettiyhteyden ja puheluiden toimivuuden. Keskitajuudet välillä 1GHz-6GHz soveltuvat tiheään asutuille alueille. Niiden kattavuus ei ole yhtä suuri, mutta ne tarjoavat matalia taajuuksia paremman kapasiteetin ja pienemmän latenssin. Päätelaitte voi vaihtaa käytettyä taajuuskaistaa näiden välillä sen mukaan, kumpi on saatavilla, tai käyttää näitä molempia yhtä aikaa CA:n avulla.

Korkea taajuusalue on 24GHz-52GHz. Näiden millimetrialtojen kantavuus on hyvin rajallinen, eivätkä ne pysty läpäisemään esteitä. Niiden etuna on erittäin suuri kapasiteetti, ja teoriassa jopa 10 Gbps:n datasiirtonopeus on mahdollinen. Millimetrialtojen latenssi on erittäin pieni. Korkeaa taajuusalueita voidaan käyttää paikallisesti takaamaan toimivuus alueella, jossa verkon vaatimukset ovat korkeat. Näitä ovat esimerkiksi erilaiset tapahtumat kuten konsertit, tai teollisuus-

ympäristö, jossa useat eri laitteet käyttävät yhteyttä. Millimetriaallot vaativat pienen kantavuuden takia suurta tukiasematiheyttä. Tämä vähentää signaalin kulkemaa matkaa ja siitä aiheutuvaa latenssia. (Simmons 2023)

4.3 MIMO

MIMO-tekniikka, jossa käytetään useita antennia, on käytössä myös 4G-verkossa. 5G-verkossa se on erityisen tärkeä korkeiden taajuuksien takia. MIMO-tekniikassa yhdessä paneelissa voi olla useita kymmeniä lähettäviä antennielementtejä. Nämä voidaan suunnata tarkasti tiettyyn vastaanottajaan (beamforming), jolloin signaalin laatu ja häiriönsieto paranee ja latenssi pienenee. Myös vastaanottavalla puolella voidaan käyttää useita antennia, ja suunnata antenni tarkasti lähettäjään päin. (Dahlman ym. 243–245)



KUVA 10. Beamforming (Peeta Mäkinen)

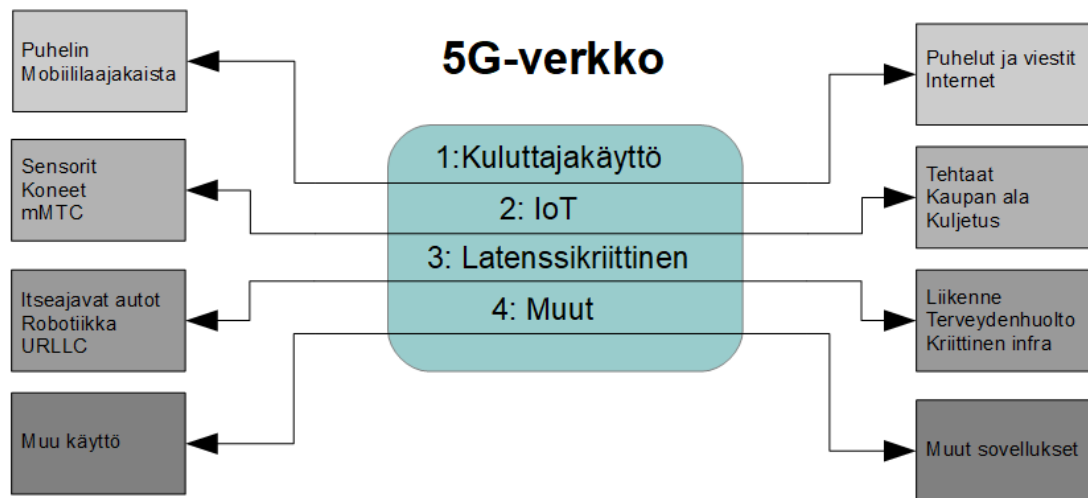
4.4 Virtualisointi ja dynaaminen resurssien hallinta

Virtualisointi on tärkein ero aiempien verkkotekniikoiden ja 5G:n välillä. Virtualisointi tarkoittaa verkon toimintojen erottamista sen fyysisistä komponenteista, jolloin verkko toimii ohjelmistopohjaisesti fyysisillä servereillä. Tämä Network Function Virtualization (NFV) -teknologia mahdollistaa uusien ominaisuuksien käyttöönoton ilman laitehankintoja ja tekee verkosta joustavan ja skaalautuvan, kun resursseja voidaan jakaa dynaamisesti tarpeen mukaan. Dynaamisen resurssien jakamisen avulla latenssia saadaan pienennettyä esimerkiksi siirtämällä resursseja niille alueille, missä verkko on ruuhkautunut.

Toinen käytössä oleva virtualisointitekniologia Software Defined Networking (SDN) mahdollistaa verkon hallinnan (control plane) ja tiedonsiirron (forwarding plane) erottamisen toisistaan. Kun pakettien reititys ja niiden siirto on erotettu toisistaan, ei mahdollinen viive reitityksessä vaikuta pakettien siirtoon, ja tällä saadaan joissain tapauksissa latenssia pienennettyä. (Xie ym. 2021)

5G-verkossa aikajakso, jossa data lähetetään, on mahdollista jakaa edelleen, jolloin data lähetetään käyttäen murto-osaa aikajaksosta, eikä se varaa koko aikajaksoa, kuten aiemmissa teknologioissa. Tämä mahdollistaa joustavan ja tehokkaan resurssien hallinnan. Esimerkiksi laitteet, jotka eivät tarvitse jatkuvaa data-siirtoa tai siirtävät dataa vain vähän, käyttävät ainoastaan tarvitsemansa osan verkon resursseista. Kun data lähetetään pienissä osissa ja dynaamisesti tarpeen mukaan, pienenee myös latenssi. (Sultan 2023)

Virtualisointi mahdollistaa myös viipaloinnin, jossa verkkoon luodaan useita aliverkkoja, jotka voidaan konfiguroida eri tarpeisiin. Pientä latenssia vaativille sovelluksille voidaan luoda oma erillinen tähän tarkoitukseen optimoitu aliverkko, jossa voidaan esimerkiksi hyödyntää edge computing -teknologiaa latenssin minimoimiseksi. Liikenteelle voidaan määrittää eri prioriteetteja ja viipalointia voidaan hallita dynaamisesti, jolloin priorisointia voidaan muuttaa reaaliajassa tarpeen mukaan. Viipaloinnin avulla tietty liikenne voidaan eristää kokonaan muusta verkkoliikenteestä, jolloin mahdolliset ruuhkat eivät vaikuta siihen. (Soveri ym. 2023)



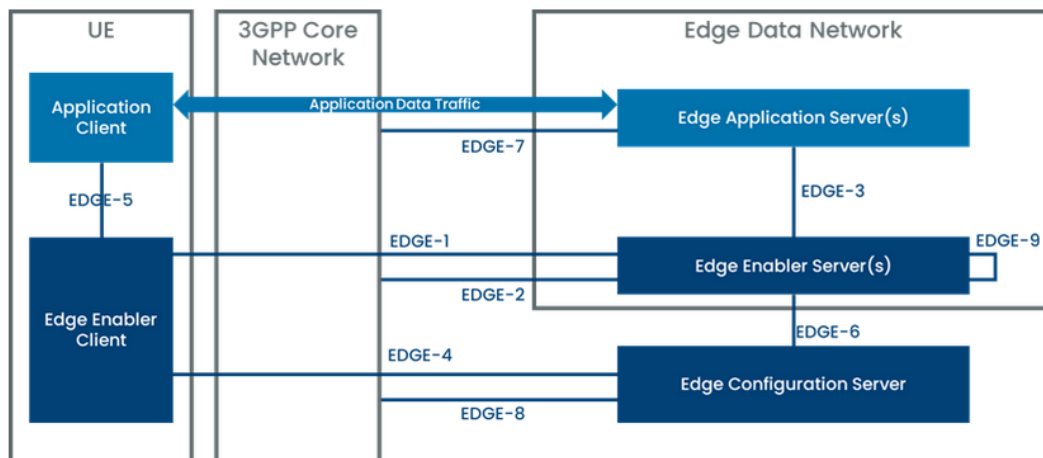
KUVA 11. Verkon viipalointi (Peeta Mäkinen)

4.5 Edge computing

Edge computing (reunapalvelinlaskenta) on IT-arkkitehtuuri, jossa erilaiset laskentatehtävät suoritetaan niin lähellä käyttäjän päätelaitetta kuin mahdollista. Perinteisessä verkkoarkkitehtuurissa kaikki data kulkee keskitetyn palvelimen kautta, mikä aiheuttaa tarpeetonta verkon kuormitusta ja pullonkauloja, eikä tällainen järjestelmä sovellu enää tämän päivän tarpeisiin siirretyn datamäärän jatkuvasti kasvaessa. Edge computing tekee datan käsittelystä ja päätöksenteosta joustavaa ja optimoitua. Operaattori tai muu kolmas osapuoli voi käsitellä osan datasta paikallisesti ilman runkoverkkoa ja osan keskitetysti tarpeen mukaan. Tämä pienentää latenssia lyhentämällä datasiirtomatkaa ja vähentämällä verkon ruuhkautumista. (Bigelow 2021)

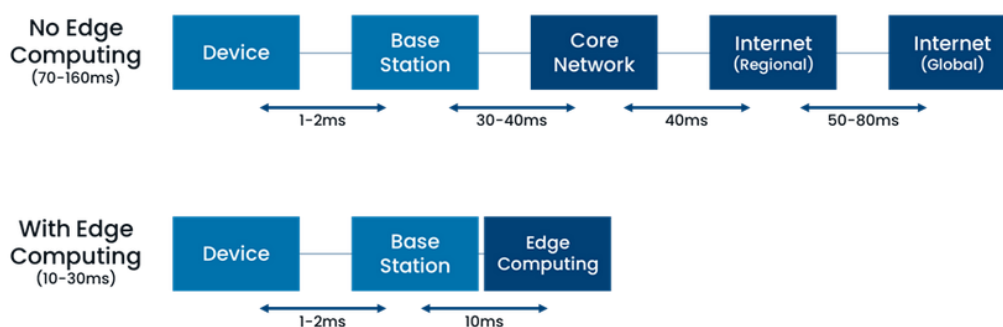
Reunapalvelinlaskennan mahdollistava osa verkkoarkkitehtuurissa on Edge Enabler Layer (EEL). Se tarjoaa alustan eri palveluiden ajamiseksi verkon reunalla, ja yhdistää paikalliset sovellukset ja runkoverkon toisiinsa. Sen osia ovat Edge Application Client (EAC), Edge Application Server (EAS), Edge Enabler Client (EEC), Edge Enabler Server (EES) ja Edge Configuration Server (ECS). EAC on palvelun käyttäjä, ja se voi olla joko päätelaite, järjestelmä tai sovellus. EEC tarjoaa erilaisia tukitoimintoja, ja vastaa siitä, että EAC löytää palvelimen

(EAS), ja taas EES vastaa siitä, että palvelin on löydettävissä. ECS vastaa konfiguraatioista. EAS toimii palvelimena, ja dataliikenne kulkee EAC:n ja EAS:n välillä. (Kim 2023)



KUVA 12. Edge computing 5G-verkon arkkitehtuurissa. (3GPP 2024)

Latenssin vähentäminen on reunapalvelinlaskennan merkittävin hyöty, ja se vähentää kaikkia viittä latenssin osatekijää. Sillä saavutetaan lyhyempi matka ja samalla pienempi siirtoviive, vähemmän käsittely- ja reititysviivettä, sekä minimoidaan jonoviive, kun pakettien ei ruuhkatilanteessa tarvitse jonottaa palvelimelle.



KUVA 13. Latenssin minimointi reunapalvelinlaskennan avulla (3GPP)

5G-verkkotekniikassa runkoverkkoon on kehitetty uusia tapoja edge computing -tekniikan käyttöön. Edge relocation eli reunalaskentayksiköiden siirto tarkoittaa, että EAS voidaan siirtää dynaamisesti eri paikkoihin verkossa. Tämä voidaan tehdä automatisoidusti, eli esimerkiksi verkon ruuhkautuessa yhdessä paikassa voidaan resurssit siirtää lähemmäs tätä paikkaa helpottamaan verkon kuormitusta. Tämä lisää joustavuutta, kun koko verkkoarkkitehtuuria ei tarvitse muuttaa.

Jos palvelulle on määritelty minimilatenssi, voidaan edge relocationia hyödyntää sen saavuttamiseksi. (3GPP)

4.6 IoT

Internet of Things (IoT) tarkoittaa erilaisia laitteita, jotka tarvitsevat internetyhteyttä toimiakseen. Esimerkiksi kodissa voi olla käytössä valvontakamerajärjestelmä, ilmalämpöpumppu, älykäs valojärjestelmä, robotti-imuri, pesukone ja muita kodinkoneita, joissa käytetään etähallintaa. Teollisuudessa voidaan käyttää erilaisia sensoreita optimoimaan tuotanto-olosuhteet. IoT:n avulla voidaan hallita varastotilannetta ja tuotantolinjoja, sekä seurata valmiin tuotteen laatua. Terveystieteissä voidaan käyttää sensoreita potilaan tilan tarkkailuun. Maa- ja metsätaloudessa IoT mahdollistaa tuotanto-olosuhteiden tarkkailun etähallinnan kautta. Sillä on tärkeitä sovelluksia myös kauppa- ja kuljetusalalla. (IBM)

5G-verkkotekniikan kehityksessä IoT-käyttö on ollut tärkeässä osassa alusta asti, ja uudemmissa releaseissa siihen on tuotu edelleen parannuksia. IoT vaatii sekä suurta luotettavuutta että pientä latenssia. Latenssin minimointi on huomioitu useilla tavoilla, esimerkiksi jakamalla lähetyksen aikajakso pienempiin osiin ja mahdollisuutena priorisoida liikennettä.

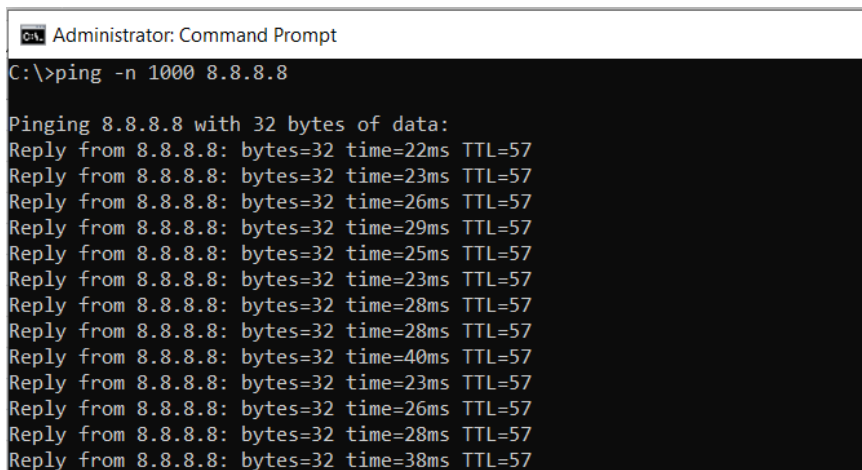
Downlink-suuntaan pientä latenssia vaativa liikenne voidaan helposti priorisoida muun, vähemmän aikakriittisen liikenteen edelle. Virheenkorjaus ja pakettien uudelleenlähetykset huolehtii siitä, että myös alemman prioriteetin data saadaan perille. Uplink-suuntaan voidaan käyttää eri tekniikoita riippuen siitä, tuleeko data samalta vai eri laitteelta. Vähemmän tärkeän prioriteetin laite voi tarvittaessa peruuttaa lähetyksen kokonaan, mutta ongelmana on, että tässä vaaditaan jatkuvaa dataliikenteen tarkkailua, eikä lähetyksen keskeyttäminen ole kaikissa tilanteissa mahdollista. Tämä hankaloittaa myös uusien laitteiden tuomista ympäristöön. Toinen vaihtoehto on joko supistaa vähemmän kriittisen datan lähetystä tai lisätä aikakriittisen datan lähetystehoa. Lähetystehon lisääminen on paras vaihtoehto, koska silloin uusia laitteita lisätessä täytyy konfiguroida ainoastaan ne laitteet, joiden lähettämä data vaatii pientä latenssia.

Joissain tapauksissa sama laite lähettää sekä korkeamman että alemman prioriteetin dataa. Laite voidaan konfiguroida peruuttamaan matalamman prioriteetin lähetys korkeamman prioriteetin lähetyksen käynnistyessä, ja osa resursseista voidaan etukäteen varata kriittiselle liikenteelle. (Dahlman ym. 419–429)

5 MITTAUKSET

Mittauksen tarkoituksena oli tutkia, onko kuluttajakäyttöön tarkoitettussa liittymässä eroa latenssin osalta NSA- ja SA-verkkojen välillä. Mittaus tehtiin kahdella eri mobiililaajakaista liittymällä, joista toinen tukee SA-käyttöä ja toinen ainoastaan NSA-käyttöä. Mittalaitteena käytettiin Huawei CPE H155 -reititintä ja Windows-tietokoneen ping-komentoa. Reititin asetettiin käyttämään ensimmäisessä mittauksessa 4G-verkkoa ja 5G NSA-verkkoa. Toiseen mittaukseen valittiin asetuksista pelkästään 5G SA-verkko. Tietokone yhdistettiin ethernet-johdolla, jotta wifin mahdollinen vaikutus viiveeseen voidaan minimoida.

Mittaus suoritettiin tekemällä 1000 ping-kyselyä Googlen palvelimeen 8.8.8.8. Suurinta ja pienintä lukua ei poistettu, koska tarkoituksena oli myös nähdä, pysyykö viive tasaisempuna toisessa liittymässä. Odotuksena oli, että viive olisi suunnilleen sama molemmilla liittymillä, mutta SA-liittymässä se vaihtelisi vähemmän. Mittauksessa tutkittiin edestakaista matkaa, koska nämä ovat keskenään vertailukelpoisia.



```
Administrator: Command Prompt
C:\>ping -n 1000 8.8.8.8

Pinging 8.8.8.8 with 32 bytes of data:
Reply from 8.8.8.8: bytes=32 time=22ms TTL=57
Reply from 8.8.8.8: bytes=32 time=23ms TTL=57
Reply from 8.8.8.8: bytes=32 time=26ms TTL=57
Reply from 8.8.8.8: bytes=32 time=29ms TTL=57
Reply from 8.8.8.8: bytes=32 time=25ms TTL=57
Reply from 8.8.8.8: bytes=32 time=23ms TTL=57
Reply from 8.8.8.8: bytes=32 time=28ms TTL=57
Reply from 8.8.8.8: bytes=32 time=28ms TTL=57
Reply from 8.8.8.8: bytes=32 time=40ms TTL=57
Reply from 8.8.8.8: bytes=32 time=23ms TTL=57
Reply from 8.8.8.8: bytes=32 time=26ms TTL=57
Reply from 8.8.8.8: bytes=32 time=28ms TTL=57
Reply from 8.8.8.8: bytes=32 time=38ms TTL=57
```

KUVA 14. Mittauksen suorittaminen (Peeta Mäkinen)

Tulosten perusteella lyhyellä otannalla huomattavaa eroa ei näkynyt kahden eri liittymän välillä.

	5G NSA	5G SA
Pienin arvo	9 ms	11 ms
Suurin arvo	62 ms	91 ms
Keskiarvo	27 ms	32 ms

TAULUKKO 1. Mittaustulokset

6 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

Työni tarkoituksena oli tarkastella mobiiliverkkojen kehityshistoriaa alkuaajoista aina tähän päivään saakka, sekä tutkia, mikä tekee 5G-verkosta erilaisen verrattuna aiempiin teknologioihin, ja kuinka se vastaa kasvaviin vaatimuksiin latenssin osalta.

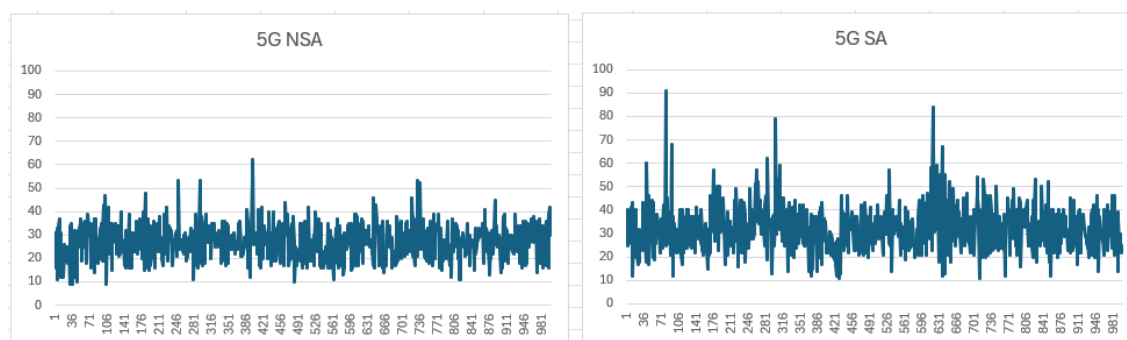
Mobiiliverkon 40-vuotinen historia antaa hyvän kuvan siitä, kuinka maailma on muuttunut näiden vuosien varrella. Ensimmäiset verkot toimivat vain paikallisesti, ja niiden pääpaino oli puheluiden välittämisessä. 3G-verkon kehittämistä varten perustettiin kansainvälinen standardisointijärjestö 3GPP, joka jatkaa edelleen toimintaansa ja vastasi 4G-verkon ja edelleen 5G-verkon kehityksestä. 3G-verkon tarkoituksena oli mahdollistaa kansainvälinen verkkoliikenne ja internetin käyttö mobiililaitteilla.

Mobiiliverkon peruseriaate ei ole muuttunut missään vaiheessa. Lähetettävä data moduloidaan kantaaltoon sopivaksi, jotta se voi kulkea ilmateitse tukiaseman ja päätelaitteen välillä. Runkoverkossa on kuitenkin tapahtunut huomattavia muutoksia ensin 4G:n osalta, ja merkittävin muutos on 5G-verkon virtualisointi. Tämän takia 5G-verkon pitäisi olla aiempia tekniikoita huomattavasti pitkäikäisempi, koska uudet ominaisuudet voidaan konfiguroida verkkoon muuttamatta sen fyysisiä komponentteja. Virtualisoitu verkko on joustava ja skaalautuva, ja se voi reagoida dynaamisesti muuttuneisiin olosuhteisiin.

4G-verkon kehityksessä keskityttiin erityisesti nopeamman internetyhteyden taakamiseen käyttäjälle. Tavallisen kuluttajan näkökulmasta 5G-verkko ei välttämättä tuo merkittäviä parannuksia arkeen, vaikka sen avulla saadaankin suurempia datanopeuksia ja ruuhkat vähenevät. 5G-verkkotekniikan suurin etu on mahdollisuus muokkautua tulevaisuuden tarpeisiin ja sen erilaiset käyttömahdollisuudet teollisuuden alalla.

6.1 Mittaustulokset

Työssä tehdyn mittauksen perusteella ei havaittu merkittävää eroa kuluttajakäyttöön tarkoitettujen NSA- ja SA-liittymien välillä. NSA-liittymällä viive oli jopa hiukan pienempi ja siinä oli vähemmän vaihtelua. Tuloksista piirrettiin kuvaajat tämän havainnollistamiseksi.



KUVA 15. Ping-mittaus kahdella eri liittymällä (Peeta Mäkinen)

Jatkotutkimuksena voisi dataa kerätä pidemmältä ajalta, esimerkiksi kuukaudelta, ja vertailla, näkyykö siinä enemmän eroa liittymätyyppien välillä. Tilannetta voisi tarkastella eri laitteilla ja erilaisissa paikoissa, ja selvittää, miten verkon ruuhka, etäisyys tukiasemaan ja eri taajuuksien käyttö vaikuttaa latenssiin näiden liittymätyyppien osalta.

6.2 Latenssin merkitys ja haasteet

URLLC-standardilla tavoitellaan jopa alle 1 ms latenssia. Tämä mahdollistaa reaaliaikaisen datan siirron ja käsittelyn, ja uudistaa perinteisen radioverkon rakenteen, kun edge computing -teknologia tuo datan käsittelyn lähelle päätelaitetta. Latenssin minimointi on huomioitu jokaisessa datasiirron osassa, mukaan lukien verkon fyysiset elementit ja pakettien käsittely.

IoT-laitteiden määrä lisääntyy jatkuvasti niin kodeissa kuin kaupallisessa ja julkisessa käytössäkin. 5G-verkko mahdollistaa tämän kehityksen tukemalla paitsi erittäin suuria laitemääriä, myös lähes reaaliaikaista reagointia vaativia käyttötarkeitä, kuten itseajavia autoja. Käytännön toteutus on kuitenkin ollut hidasta, ja varsinaisia itsenäisiä kuluttajille suunnattuja 5G-verkkoja, jotka eivät vaadi 4G-

verkkoa toimiakseen, on otettu käyttöön vasta hiljattain. Useat palveluntarjoajat, kuten Nokia ja IBM, myyvät 5G-järjestelmiä teollisuuskäyttöön. Olisi kiinnostavaa tietää, kuinka paljon näitä todellisuudessa on käytössä, vai onko siirtyminen 5G-teknologiaan yhtä hidasta kuin kuluttajapuolella.

Teollisuuden käyttöön räätälöidyssä verkossa latenssin minimointi vaikuttaa realistiselta. Siihen sijoittaminen voi olla kannattavaa hyvin suurissa tuotantolaitoksissa, kuten esimerkiksi auto- tai kaivosteollisuudessa. Ericsson kertoo URLLC-verkon mahdollistavan robottien täysin reaaliaikaisen reagoinnin, joka ei ole mahdollinen wifi-verkossa. Esimerkiksi työntekijän tullessa koneen lähelle se pysähtyy automaattisesti, jolloin onnettomuudet voidaan välttää. 5G-verkossa olevia laitteita voidaan siirrellä tarpeen mukaan ja tuotantolinjan rakennetta muuttaa tarvittaessa. Runkoverkon latenssi on Ericssonin mukaan alle 1 ms ja luotettavuus 99,9999 %. (Zaidi ym.)

URLLC luokin ensisijaisesti joustavuutta, tehokkuutta ja luotettavuutta teollisuuteen, ja on kehitetty näihin tarpeisiin. Kuluttajapuolella latenssi ei ole yhtä merkittävä tekijä verkon toimivuuden kannalta. Matkaviive riippuu käyttäjän etäisyydestä tukiasemaan nähden, ja etäisyyden kasvaessa latenssi lisääntyy. Vaikka 5G-verkko vähentääkin ruuhkia, on siinä edelleen mahdollisuus jonoviiveeseen alueilla, joilla käyttäjiä on paljon. Erittäin korkeiden taajuuksien käyttöönotto tuo tähän helpotusta tulevaisuudessa. Latenssin merkitys teollisuudessa on selkeä ja siellä latenssin minimointi luultavasti saavutetaankin.

6.2 Tulevaisuudennäkymät

5G:n tarjoamat mahdollisuudet ovat vielä suurelta osin hyödyntämättä. Teknologian ennustetaan mullistavan kaupan alan kokonaan, kun jatkossa erilaisilla sensoreilla voidaan seurata tarkasti kuluttajien käyttäytymistä. Virtuaalitodellisuus tarjoaa uusia mahdollisuuksia verkkokauppojen toimintaan. Myös terveydenhoitoala voisi hyödyntää laajasti 5G:n tarjoamia mahdollisuuksia esimerkiksi potilaan terveydentilan ja sairaalan resurssien käytön seurannassa. URLLC mahdollistaa

potilaan leikkaamisen etänä, jolloin potilaiden ei tarvitsisi matkustaa pitkiä matkoja leikkaukseen eikä jokaisella keskussairaalalla tarvitsisi olla erikoistuneita kirurgeja. (Kerner ym. 2024)

Vaikka 5G:n käyttöönotto on vasta alussa, on seuraavan sukupolven teknologia eli 6G jo kehitteillä. Sen suunnittelussa on huomioitu entistä paremmin ympäristö ja kestävä kehitys. NGMN:n mukaan 6G:n kehitystyössä suuri paino on virtuaalitodellisuudella, ja sillä pyritään mahdollistamaan paitsi audiovisuaalinen kommunikointi, myös haptinen eli kosketukseen ja kineettinen eli liikkeeseen perustuva virtuaalitodellisuus. Tekoäly ja ihmisaivoihin yhdistettävät komponentit mahdollistavat saumattoman yhteistyön ihmisen ja koneen välillä, eikä fyysisillä välimatkoilla ole enää merkitystä. 6G suunnitellaan mahdollistamaan entistä suuremmat määrät robotiikkaa esimerkiksi liikenteessä ja kaupunkiympäristössä. Kolmiulotteinen, hypertarkka paikannus mahdollistaa täysin automatisoidut ympäristöt, joissa ei tarvita ihmistyöntekijöitä. (NGMN Alliance 2022)

LÄHTEET

Dahlman, E., Parkvall, S. & Sköld, J. 2016. *4G LTE-Advanced and The Road to 5G*. Third edition. Elsevier Ltd.

Halonen, T., Melero, J. & Romero, J. 2002. *GSM, GPRS and EDGE Performance*. John Wiley & Sons, Ltd.

Penttinen, J. 2006. *Tietoliikennetekniikka – Perusverkot ja GSM*. WSOY.

→ Tekstissä tekstiviitteenä (Penttinen 1 2006)

Penttinen, J. 2006. *Tietoliikennetekniikka – 3G ja erityisverkot*. WSOY.

→ Tekstissä tekstiviitteenä (Penttinen 2 2006)

Tietoverkkolaboratorio. 1999. *Matkapuhelinten sukupolvet*. Luettu 2.4.2024. <https://www.netlab.tkk.fi/opetus/s38118/s99/htyo/47/1sp.shtml>

Traficom. 2023. *3G-verkot väistyvät uudempien teknologioiden myötä*. Luettu 12.4.2024. <https://www.traficom.fi/fi/ajankohtaista/3g-verkot-vaistyvat-uudempien-teknologioiden-myota>

Traficom. 2023. *Matkaviestinverkkojen taajuudet ja luvanhaltijat*. Luettu 3.4.2024. <https://www.traficom.fi/fi/viestinta/radioluvat-ja-taajuudet/matkaviestinverkkojen-taajuudet-ja-luvanhaltijat>

Yle. 2002. *NMT:n aika ohi Suomessa*. Luettu 2.4.2024. <https://yle.fi/a/3-5125226>

Yle. 2016. *25 vuotta GSM-puheluita – “Holkerin puhelin” Nokia 6050 toimii edelleen*. Luettu 2.4.2024. <https://yle.fi/a/3-9045772>

Dahlman, E., Parkvall, S. & Sköld, J. 2021. *5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology*. Second edition. Elsevier Ltd.

3GPP 2024. *3GPP*. Luettu 24.4.2024. <https://www.3gpp.org/>

Traficom. 2023. *Tietoa 5G:stä*. Luettu 24.4.2024. <https://www.traficom.fi/fi/viestinta/viestintaverkot/tietoa-5gsta>

Yle. 2021. *5G-verkko puhuttaa enemmän kuin aiemmat – Säteilyturvakeskuksen mukaan säteilyn raja-arvojen ja terveyshaittojen välille jää reilu turvaväli*. Luettu 24.4.2024. <https://yle.fi/a/3-11757881>

Elisa. 2024. *Elisa tuo Suomen ensimmäiset itsenäistä 5G-verkkoa hyödyntävät puhelinliittymät myyntiin*. Luettu 24.4.2024. <https://elisa.fi/yhtiotieto/uutishuone/tiedotteet/elisa-tuo-suomen-ensimm%C3%A4iset-it-sen%C3%A4ist%C3%A4-5g-verkkoa-hy%C3%B6dynt%C3%A4v%C3%A4t-puhelinliittym%C3%A4t-myyntiin-/22072566060689/>

Uusiteknologia.fi. 2021. *Telia saavutti 26 gigahertsillä neljän gigabitin nopeuden*. Luettu 1.5.2024. <https://www.uusiteknologia.fi/2021/04/14/telia-saavutti-26-gigahertsilla-neljan-gigabitin-nopeuden/>

Elisa. 2024. *5G+ - Elisan paras 5G-yhteys*. Luettu 8.11.2024. <https://elisa.fi/5g/itsenainen-5g/>

RF Wireless World. 2021-2024. *VoLTE vs Vo5G Difference Between VoLTE and VoNR*. Luettu 8.11.2024. <https://www.rfwireless-world.com/Terminology/Difference-between-VoLTE-and-VoNR.html>

Netmaker 2024. *What is Latency in Networking?* Luettu 11.11.2024. <https://www.netmaker.io/resources/latency>

Jones, R. & Panekham, D. 2020. *What a trip! Measuring network latency in the cloud*. Luettu 11.11.2024. <https://cloud.google.com/blog/products/networking/using-netperf-and-ping-to-measure-network-latency>

Simmons, A. 2023. *5G Frequency Bands and Spectrum Explained: Low, Mid, High*. Luettu 12.11.2024. <https://dgtlinfra.com/5g-spectrum-explained/>

Xie, Y., Wang, S., Wang, B., Xu, S., Wang, X., Ren, J. 2021. *Online algorithm for migration aware Virtualized Network Function placing and routing in dynamic 5G networks*. Luettu 13.11.2024. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1389128621001924>

Sultan, A. 2023. *Ultra Reliable and Low Latency Communications*. Luettu 11.11.2024. <https://www.3gpp.org/technologies/urllc-2022>

Soveri, M., Gautam, D., Guttman, E., Alkanani, H., Groenendijk, J., Cornily, J., Srinivasaraju, S., Tovinger, T., Yizhi, Y., Yu, X., Kai, Z. & Lan, Z. 2023. *5G Network slice management*. Luettu 12.11.2024. <https://www.3gpp.org/technologies/slice-management>

Bigelow, S. 2021. *What is edge computing? Everything you need to know*. Luettu 11.11.2024. <https://www.techtarget.com/searchdatacenter/definition/edge-computing>

Kim, D. 2023. *Edge computing*. Luettu 12.11.2024. <https://www.3gpp.org/technologies/edge-computing>

3GPP. *Edge relocation*. Luettu 12.11.2024. <https://itecspec.com/spec/3gpp-23-548-6-3-edge-relocation/>

IBM. *What is the Internet of Things (IoT)?* Luettu 13.11.2024. <https://www.ibm.com/topics/internet-of-things>

Zaidi, A., Bränneby, A., Nazari, A., Hogan, M. & Kuhlins, C. *Cellular IoT in the 5G era*. Luettu 14.11.2024. <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/white-papers/cellular-iot-in-the-5g-era>

Kerner, S. & Ferguson, K. 2024. *5G predictions about 5G adoption in 2024 and beyond*. Luettu 14.11.2024. <https://www.techtarget.com/whatis/feature/5-Predictions-about-5G-Adoption-in-2021-and-Beyond>

NGMN Alliance. 2022. *6G User Cases and Analysis*. Luettu 14.11.2024.

<https://www.ngmn.org/wp-content/uploads/NGMN-6G-Use-Cases-and-Analysis.pdf>

LIITTEET

Liite 1. Mittauspöytäkirja

5G NSA	5G SA	10	46	29	22
25	26	24	17	21	21
31	36	25	27	33	68
22	25	32	35	28	37
16	40	29	28	30	37
33	37	31	36	35	12
16	26	33	40	20	33
11	38	35	37	19	34
21	33	37	44	33	33
34	27	35	20	43	32
37	41	26	43	19	30
14	35	19	37	34	25
31	42	33	19	41	22
12	43	30	33	47	32
22	12	25	26	26	31
14	30	32	27	9	23
12	36	36	29	31	30
12	21	30	36	33	26
12	21	35	38	42	40
21	39	34	35	22	40
26	40	18	32	33	22
23	20	32	31	35	24
19	22	39	30	27	21
20	22	34	22	22	17
25	17	32	27	35	40
21	31	30	22	18	22
23	25	31	36	15	31
24	18	32	25	35	25
18	32	35	24	28	27
19	30	16	33	31	28
25	24	20	42	31	37
9	25	26	39	32	24
34	26	26	33	35	40
15	23	29	41	30	24
25	26	30	26	27	40
35	43	14	91	28	40
9	34	37	25	22	34
22	29	31	36	34	36
17	33	37	45	26	31
17	28	31	29	34	31
32	18	22	30	29	37
12	24	22	26	21	25
12	60	21	37	22	24
20	36	18	39	24	24
22	35	23	21	40	25

23	37	33	33	28	22
28	27	37	23	32	23
26	34	35	23	17	24
27	34	16	50	17	43
23	22	37	37	26	38
26	37	15	38	28	31
17	37	29	31	24	18
17	41	34	33	26	34
30	31	26	34	28	29
32	33	17	42	31	24
16	37	22	37	31	27
30	37	30	45	32	24
31	28	21	32	21	33
27	31	22	32	24	25
24	32	20	17	30	32
39	26	21	35	53	49
16	28	36	35	24	29
18	40	16	31	27	29
16	32	22	26	28	38
16	23	32	39	28	28
16	23	33	21	25	40
31	21	35	35	25	37
26	23	31	35	28	28
31	27	32	35	23	30
29	30	33	35	25	30
23	34	23	25	27	51
27	28	37	29	30	37
23	23	38	33	22	40
23	24	26	31	31	57
24	15	23	31	24	35
25	32	24	25	25	36
36	21	23	29	19	52
22	21	20	22	21	39
32	24	17	39	27	37
26	22	29	44	25	34
28	46	28	40	27	44
30	45	22	27	29	39
37	37	39	49	23	30
30	37	38	40	25	40
31	38	24	37	33	35
24	36	22	39	30	33
26	57	22	16	25	30
20	31	42	30	32	31
20	32	19	32	23	32
20	27	23	33	23	25
40	29	34	35	11	42
15	40	28	44	25	46
30	37	33	44	19	44
48	50	32	41	17	36
18	35	28	22	32	19

39	62	31	36	26	15
30	37	26	38	27	30
33	33	18	41	26	34
35	34	34	20	41	25
17	36	36	23	36	39
16	34	33	44	16	20
31	35	24	34	30	40
34	34	19	37	24	41
53	13	34	32	23	35
40	14	36	24	12	17
19	33	17	36	28	43
18	37	32	38	30	32
38	36	34	26	33	34
17	38	35	27	53	36
35	25	18	35	29	33
27	36	34	42	62	36
26	79	28	29	26	27
31	30	24	41	27	35
18	40	25	40	29	28
34	53	27	33	30	22
39	36	29	31	31	22
27	36	30	26	27	23
30	40	24	42	29	27
31	45	25	31	31	26
33	59	27	27	22	27
27	38	30	25	22	22
34	32	24	39	41	31
30	35	31	25	20	21
32	45	22	30	17	23
34	28	23	29	21	30
20	27	24	40	35	28
30	27	25	27	16	27
33	31	27	31	42	26
35	45	27	14	21	20
35	27	24	29	20	22
32	25	32	33	27	25
35	25	28	18	33	19
28	36	35	25	30	26
31	37	28	12	34	17
25	38	36	38	30	12
25	40	26	15	26	27
26	14	21	18	29	14
28	36	23	33	29	28
27	43	25	37	31	27
29	40	21	26	27	14
25	22	22	29	20	11
26	33	23	34	28	24
32	37	25	33	40	13
29	21	29	37	26	46
30	25	29	14	27	34

23	29	21	32	17	14
20	39	25	37	35	34
17	27	18	33	34	40
31	23	17	20	16	35
24	24	22	23	19	33
19	25	20	34	23	30
40	38	20	26	20	34
32	28	22	41	16	33
33	30	24	35	20	35
29	33	21	30	23	37
29	28	35	26	22	32
30	33	19	29	22	36
19	46	35	23	25	32
25	22	22	25	21	29
28	33	16	33	18	31
32	34	29	34	33	44
34	34	31	30	35	33
36	33	33	37	16	35
34	32	34	26	19	21
23	36	36	31	16	34
18	39	18	31	32	26
20	39	32	32	16	31
32	35	34	42	29	33
33	30	16	28	24	31
35	23	21	31	27	24
27	26	20	32	22	31
23	28	21	34	20	28
17	23	42	35	11	29
34	37	19	37	28	19
34	32	20	31	21	41
44	37	26	32	20	36
33	32	28	34	23	34
34	33	27	28	33	39
34	25	23	21	28	37
30	29	19	30	19	23
39	21	24	36	18	32
22	22	26	39	37	35
17	28	30	35	16	25
20	40	17	37	19	24
32	37	24	30	34	25
29	42	35	46	30	25
31	41	40	35	22	27
33	23	34	30	17	31
35	30	33	39	30	36
20	21	30	26	18	26
35	35	23	26	20	26
38	43	29	57	26	24
37	42	37	25	13	20
27	35	28	36	16	21
10	22	35	35	20	24

31	24	25	52	23	38
24	32	28	40	17	47
26	27	28	67	17	39
27	32	28	12	17	38
24	37	28	36	18	37
26	44	22	40	38	27
34	21	24	31	35	26
34	25	17	13	19	27
35	35	46	55	32	22
34	43	16	31	26	36
30	21	19	31	27	36
32	25	36	43	21	37
33	46	33	44	21	29
35	44	43	27	36	25
15	28	37	37	20	25
16	33	31	21	21	21
22	29	32	43	31	40
32	35	34	52	23	22
33	26	23	41	24	36
26	43	24	18	25	34
29	21	17	40	31	37
39	28	21	41	21	37
39	47	31	36	25	47
17	31	34	40	23	54
38	31	20	49	35	45
20	29	36	34	36	40
17	28	16	27	22	33
27	31	34	35	26	11
22	34	20	25	26	36
23	40	14	28	32	22
25	58	20	29	26	23
35	23	17	42	30	25
29	51	20	34	23	40
30	84	17	44	25	20
37	42	22	32	33	29
32	66	36	33	46	53
18	38	31	39	33	47
36	31	28	32	21	36
27	44	30	29	38	38
29	55	30	22	23	20
27	32	34	36	21	27
31	53	25	29	17	21
32	59	26	32	34	46
32	42	28	31	37	21
26	41	22	26	29	22
27	18	16	35	25	30
27	38	29	45	21	29
28	55	18	32	53	43
34	21	20	25	46	22
30	21	21	38	37	46

33	40	28	34	24	27
39	36	23	25	30	36
52	39	23	40	17	50
24	23	26	21	28	37
26	23	20	24	27	39
28	24	24	31	25	33
31	38	36	40	28	27
32	29	23	37	28	28
37	37	25	45	27	30
31	24	26	43	26	25
24	39	22	16	25	38
21	50	17	33	15	42
20	35	19	36	21	39
20	36	20	34	33	35
32	31	21	36	22	22
19	28	12	36	25	52
25	23	35	40	26	40
33	35	37	36	29	18
31	37	23	37	28	33
33	24	32	33	30	28
18	34	34	40	29	28
21	24	34	41	33	12
36	28	25	41	31	40
19	27	34	44	30	25
32	30	35	35	31	38
19	30	28	25	30	40
30	23	34	34	31	40
17	38	28	25	33	22
39	12	32	31	35	24
31	34	20	25	18	31
32	27	22	28	31	23
20	35	11	29	31	35
33	35	11	37	41	37
33	37	21	25	30	38
33	45	25	24	27	21
35	34	27	20	33	20
32	40	29	44	31	24
33	40	27	40	23	40
32	21	31	41	23	22
39	28	28	53	31	23
16	28	25	37	23	26
21	32	25	32	16	26
33	34	25	18	13	27
19	31	21	27	28	37
32	44	22	31	20	38
15	35	22	34	32	34
19	49	35	35	25	35
19	28	29	34	26	40
24	36	25	29	27	35
24	28	22	25	22	29

32	37	27	23	31	38
33	32	24	23	32	36
45	30	28	23	29	25
34	30	18	38	31	38
26	32	31	40	32	23
34	23	34	21	36	39
32	27	34	22	17	14
25	23	16	42	31	36
26	28	18	39	32	27
30	22	20	40	34	29
28	41	36	20	16	30
27	45	29	37	39	26
29	34	31	23	42	25
23	35	36	46	30	22
14	31	36	39	31	22
20	23	17	20	34	24
16	25	18	40		
17	44	32	14		
17	34	35	35		
38	37	33	37		
21	36	34	32		
39	36	25	32		
19	37	31	28		
33	30	32	28		
30	17	27	31		
30	24	28	27		
32	36	37	28		
28	39	31	21		
18	40	34	24		
25	22	34	40		
20	37	38	29		
30	22	27	26		
26	36	29	34		
26	32	32	26		
28	34	32	27		
24	36	31	42		
26	38	36	23		
30	38	14	37		
28	32	34	38		
23	33	21	37		
22	29	18	39		
29	29	21	31		
26	28	30	29		
32	26	37	37		
39	29	20	24		
24	24	18	46		
25	28	34	38		
23	20	34	41		
24	33	34	21		
34	31	16	46		