

5G-verkon tuomat uudistukset ja hyödyt



Ammattikorkeakoulun opinnäytetyö

Tieto- ja viestintätekniikka, insinööri (AMK) Riihimäen kampus

Kevät 2021

Aleksander Babitzin

TIIVISTELMÄ

Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia 5G-matkapuhelinverkkoteknologian tuomia uudistuksia matkapuhelinverkkoon ja siitä saatavia hyötyjä. Työssä tarkastellaan matkapuhelinverkon toimintaa yleisellä tasolla, aikaisempia verkkosukupolvia, tietoturvaa, 5G-tekniikkaa ja siitä saatavia hyötyjä.

Tulevaisuudessa datamäärä kasvaa merkittävästi ja aikaisempien verkkojen kapasiteetti on riittämätön täyttämään datamäärän tarvetta. Digitalisaation kasvaessa myös loppukäyttäjät tarvitsevat nopeampia yhteyksiä, sekä matalaviiveisempiä palveluita. 5G-verkkoteknologia tarjoaa tehokkaan ratkaisun edellä mainituille haasteille sen tuomien teknologisten uudistusten myötä.

Työn lopputuloksena saatiin selvitettyä 5G-verkon tuomat tärkeimmät uudistukset ja myös tutkittua, minkälaisia erilaisia käyttötapoja uusi verkkoteknologia mahdollistaa.

Avainsanat 5G, matkapuhelinverkot, mobiilidata

Sivut 34

Author	Aleksander Babitzin	Year 2021
Subject	Reforms and benefits of 5G network	
Supervisors	Marko Grönfors	

ABSTRACT

The objective of this thesis was to investigate the changes brought by 5G mobile network technology. This report examines the function of mobile network on a general level, previous network generations, information security, 5G technology and the benefits that derive from it.

In the future the amount of data will increase significantly, and the capacity of the previous networks is insufficient to fill this demand. In addition, as digitalization grows the end users will require faster connections and services with shorter delays. 5G network, with its technological reform, provides an efficient solution to these challenges.

This report identifies and scrutinises the most significant changes brought by 5G network as well as the various ways it can be used.

Keywords 5G, mobile networks, mobile data

Pages 34

Sisälllys

1	Johdanto.....	1
2	Soluverkot	2
2.1	Soluverkon toiminta	2
2.2	Puhelun muodostuminen matkapuhelinverkossa	4
3	5G-verkkoa edeltävät sukupolvet	5
3.1	Sukupolvi nolla.....	5
3.2	1G ensimmäinen sukupolvi	6
3.3	2G toinen sukupolvi.....	6
3.4	3G kolmas sukupolvi.....	7
3.5	4G neljäs sukupolvi.....	7
4	5G-verkon tekniset ominaisuudet	8
4.1	Taajuuksien käyttö.....	9
4.2	Beamforming	10
4.3	Fyysinen kerros ja protokollat	12
4.3.1	Numerologia	12
4.3.2	Short Transmission Time	13
4.3.3	Kanavakoodaus.....	14
4.4	Dual Connectivity with LTE	15
4.5	Verkon viipalointi.....	16
4.6	Radio Cloud and Edge Computing	17
5	5G ja tietoturva	20
6	5G-verkon käyttökohteet.....	21
6.1	5G ja Internet of Things	22
6.2	5G ja tekoäly.....	24
6.2.1	5G-verkon optimointi	25
6.2.2	Airbusin tekoälyhankkeet	25
6.2.3	Mobiilitunnistimet ja 3D-käyttäjien vuorovaikutussovellukset	27
6.3	5G:n tuomat mahdollisuudet liikenteessä	29
6.3.1	5G ja autonomiset ajoneuvot	29
6.3.2	5G ja merenkulku.....	30
7	Pohdinta.....	32
	Lähteet	33

Kuvat, taulukot ja kaavat

Kuva 1. Soluverkon rakenne (Kilkki, 2019, s. 11).	3
Kuva 2. Käyttäjän siirtyminen eri operaattoreiden solujen välillä (Kilkki, 2019, s. 12). ...	4
Kuva 3. Eri sukupolvien suosituimmat kaupalliset matkapuhelinjärjestelmät (Penttinen, 2019, s. 103).	8
Kuva 4. 5G:n tärkeimmät uudet teknologiset uudistukset (Holma, 2020, s. 28).	9
Kuva 5. 5G-verkon mahdolliset taajuudet (Holma, 2020, s. 28).	10
Kuva 6. Beamforming parantaa tukiaseman peittoaluetta ja kattavuutta (Holma, 2020, s. 32). ..	11
Kuva 7. Tyypillinen MIMO-antenni (Holma, 2020, s. 32).	12
Kuva 8. 5G numerologia (Holma, 2020, s. 34).	13
Kuva 9. Eri verkkojen minimi lähetysajat ja niitä vastaavat edestakaiset matka-ajat (Holma, 2020, s. 35).	14
Kuva 10. Kanavakoodausratkaisujen vertailu energiatehokkuuden suhteen (Holma, 2020, s. 42).	15
Kuva 11. 5G-verkon eri pääarkkitehtuurivaihtoehdot (Holma, 2020, s. 46).	16
Kuva 12. Esimerkki verkonviipaloinnin käyttötapauksesta (Toskala & Poikselkä, 2020, s. 82). ..	17
Kuva 13. Verkkoarkkitehtuurin evoluutio (Holma, 2020, s. 46).	18
Kuva 14. Toiminnalliset jakovaihtoehdot (Holma, 2020, s. 47).	19
Kuva 15. Esimerkkejä IoT:n käyttötapauksista (Holma ym., 2020, s. 432).	23
Kuva 16. Esimerkkejä virtuaaliavustajan käytöstä (Liikenne- ja viestintävirasto Traficom, 2021.-b).	26
Kuva 17. Tekoälypohjaisen videomonitorointisovelluksen käyttötarkoitus ja esimerkki sen toimintaa mittaavista indikaattoreista (Liikenne- ja viestintävirasto Traficom, 2021.-b).	27
Kuva 18. Järjestelmän toimintaperiaate (Liikenne- ja viestintävirasto Traficom, 2021.-c).	28
Kuva 19. 5G ja autonomisen ajamisen erityispiirteet (Liikenne- ja viestintävirasto Traficom, 2021.- e).	30
Kuva 20. Qingdaon satamassa tehdyn projektin eri toteutusvaiheet (Liikenne- ja viestintävirasto Traficom, 2021.-f).	31

1 Johdanto

5G-radio tuo merkittävän edistysaskeleen mobiiliverkkojen ominaisuuksiin. Tähän mennessä matkapuhelinverkot ovat pääasiassa tarjonneet kuluttajille yhteyksiä älypuheliin, tabletteihin ja kannettaviin tietokoneisiin. 5G vie perinteisen mobiililaajakaistan äärimmäisyyksiin datanopeuksien, kapasiteetin ja saatavuuden suhteen. Lisäksi 5G mahdollistaa uusia palveluita, kuten teollisen esineiden internetin ja erilaisia kriittisen viestinnän palveluita. (Holma ym., 2020, s. 1)

5G:n tavoitteet on asetettu erittäin korkeaksi. Tavoitteena on kasvattaa tiedonsiirtonopeutta 20 Gbps ja verkon kapasiteettia jopa 1000 kertaiseksi. Lisäksi 5G-verkoilta odotetaan korkeaa luotettavuutta ja erittäin matalia viiveitä. 5G-matkapuhelinverkkojen päällä voidaan myös ajaa useita uusia käyttötapauksia ja sovelluksia. (Holma ym., 2020, s. 1)

Tässä opinnäytetyössä tutkitaan 5G:n tuomia teknisiä uudistuksia ja siitä saatavia hyötyä. Työssä käydään myös läpi pintapuolisesti soluverkon toimintaa ja aikaisempia verkkosukupolvia, sekä tietoturva. Lukijalle on tarkoitus luoda käsitys siitä, miten matkapuhelinverkko toimii yleisellä tasolla ja mitkä ovat keskeiset 5G:n tuomat teknologiset uudistukset ja hyödyt matkapuhelinverkkoteknologiassa.

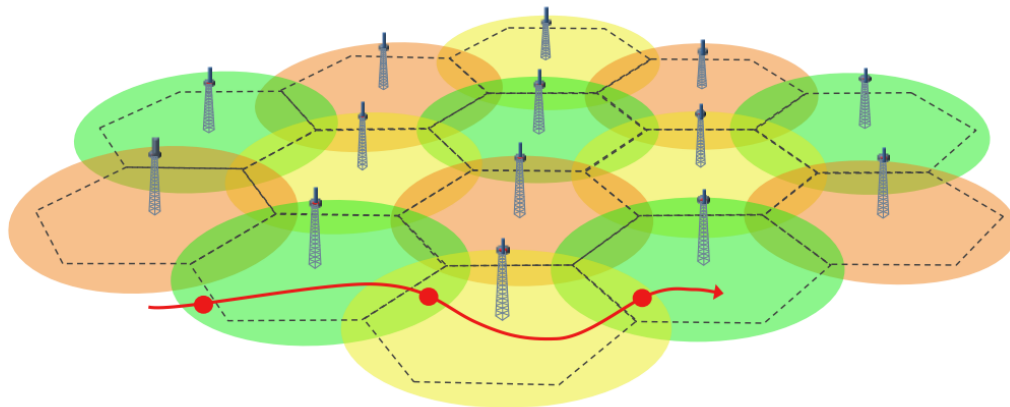
2 Soluverkot

Matkaviestimien periaatteena on päätelaitteen riippumaton yhteys yhteen fyysiseen paikkaan. Tämä toteutuu päätelaitteen yhdistyessä radioyhteyden avulla tukiasemaan. Soluverkko (cellular network) koostuu soluista, joissa tukiasemien radiotaajuuksien tiedonsiirtokapasiteetti jaetaan soluissa olevien käyttäjien kesken. Soluverkkoa kuvaavat seuraavat ominaisuudet: jatkuva mahdollisuus kaksisuuntaisiin tiedonsiirtopalveluihin päätelaitteen ja verkon välillä, laaja maantieteellinen peittoalue ja sujuva palvelun varmistaminen käyttäjän liikuessa solusta toiseen. (Kilkki, 2019, ss. 9–10)

2.1 Soluverkon toiminta

Soluverkossa yhtä tukiasemaa voi yhtäaikaaisesti käyttää useat eri päätelaitteet ja yksi päätelaite voi sijaita eri tukiasemien peittoalueen sisällä. Tukiasemien resurssien jako-ongelmien ratkaisemiseksi käytetään erilaisia tekniikoita. Kapasiteetin jakaminen mahdollisimman tehokkaasti eri päätelaitteille ratkaistaan erilaisilla pääsynhallintamenetelmillä, kuten eri taajuuksia käyttämällä. Taajuuskaistojen jako ja tiedonsiirtonopeuden maksimointi perustuu soluverkon rakenteeseen, jossa tukiasemat toimintaympäristöineen muodostavat solukkoa muistuttavan rakenteen. Solu (cell) on tiettyyn tukiasemaan kuuluvan lähetin-vastaanottimen peittoalue, joka palvelee tiettyä geologista aluetta. Tukiasemat lähettävät eri suuntiin suuntaavilla antenneilla eri taajuuskaistoja, jotta viereisten verkkojen solujen raja-alueilla käytetyt taajuuskaistat menisivät mahdollisimman vähän päällekkäin. Kuvassa 1 esitettävillä väreillä havainnollistetaan ympärisäteilevien tukiasemien kolmea eri taajuusalueita. (Kilkki, 2019, ss. 10–11)

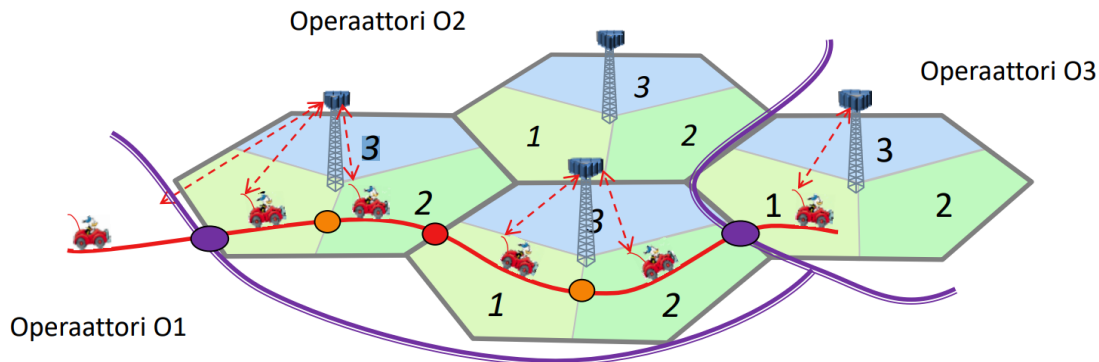
Kuva 1. Soluverkon rakenne (Kilkki, 2019, s. 11).



Käyttäjän siirtyessä tukiaseman kuuluvuusalueen ulkopuolelle on puhelimen pystyttävä vaihtamaan toisen tukiaseman käyttämälle kanavalle, jotta päätelaitteen yhteys ei katkeaisi. Tällaista siirtymää kutsutaan solunvaihdoksi (handover). Solunvaihto tapahtuu matkapuhelinkeskusten avustuksella, jotka ovat yhteydessä tukiasemiin. Päätelaitteen ja tukiaseman välisen signaalin heiketessä matkapuhelinkeskus selvittää, onko toisella tukiasemalla parempi yhteys päätelaitteeseen. Paremman yhteyden löytyessä keskus ohjaa laitetta vaihtamaan vapaalle liikennekanavalle uuden tukiaseman avulla. Puhelu tai datayhteys jatkuu tämän jälkeen uudessa solussa. (Kilkki, 2019, ss. 11–12)

Matkapuhelinverkko pitää kirjaa puhelimen sijainnista, jotta tieto sijainnista välittyy oikealle puhelinkeskukselle ja siitä eteenpäin oikealle tukiasemalle. Sijainninseurannan avulla pystytään välittämään puhelimen omalle kotikeskukselle informaatio siitä, minkä tukiaseman alueella päätelaite sillä hetkellä on. Matkapuhelimella soitettu puhelu kulkee aina oman kotikeskuksen kautta, josta puhelu ohjautuu oikealle tukiasemalle. Kuvassa 2 on merkitty pienet värilliset ympyrät, mitkä havainnollistat käyttäjän solujen välistä siirtymistä eri operaattoreiden matkapuhelinverkossa: operaattorin vaihto (violetti), suunta-antennin vaihto (keltainen) ja tukiaseman vaihto (punainen). Kuvan 2 soluverkossa kukin tukiasema lähettää informaatiota kolmella taajuuskaistalla kolmeen eri suuntaan, siten että viereiset solut pystyvät käyttämään samoja taajuuskaistoja. Kuvan taajuuskaistat on merkitty numeroilla 1-3. (Kilkki, 2019, s. 12)

Kuva 2. Käyttäjän siirtyminen eri operaattoreiden solujen välillä (Kilkki, 2019, s. 12).



2.2 Puhelun muodostuminen matkapuhelinverkossa

Käyttäjän muodostaessa puhelun matkapuhelimella, siirtyy käyttäjän ääni matkapuhelimen mikrofoniin. Mikrofoni muuntaa äänen matkapuhelimen sisällä digitaalseksi signaaliksi MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) sensorin ja IC:n (Integrated Circuit) avulla. Puhelimen antenni vastaanottaa signaalin sisältävät nollet ja ykköset ja muuntaa ne sähkömagneettisiksi aalloiksi. Sähkömagneettiset aallot välittävät eteenpäin muuttamalla aaltojen ominaisuuksia, kuten amplitudia, taajuutta, vaihetta tai näiden yhdistelmiä. Esimerkiksi taajuuden tapauksessa nollet ja ykköset lähetetään järjestyksessä käyttämällä matalaa ja korkeaa taajuutta. (Learn Engineering, 2018)

Mikäli maa ei olisi pyöreä ja ilmatietä pitkin siirtyvät sähkömagneettiset aallot eivät ottaisi häiriötä ympäristötekijöistä, niin puhelu yhdistyisi suoraan puhelimesta toiseen. Tähän tarvitsemme soluverkkoja. Soluverkot, tässä tapauksessa matkapuhelinverkot, muodostavat geologisen alueen, jotka on jaettu kuusikulmion muotoisiksi soluiksi. Jokaisella solulla on oma tukiasema ja omat taajuusalueet. Nämä tukiasemat yhdistyvät toisiinsa valokuitukaapelilla maan alle rakennetun runkoverkon ansiosta. (Learn Engineering, 2018)

Puhelimen tuottamat sähkömagneettiset aallot välittyvät solun tukiaseman vastaanottimeen, joka muuntaa ne korkeataajuisiksi valopulsseiksi. Valopussit kulkeutuvat vastaanottimesta tukiaseman alapuolella sijaitsevaan muuntimeen signaalin eteenpäin prosessointia varten. Jotta signaali

pystytään lähettämään edelleen oikealle tukiasemalle, se täytyy saada reititettyä oikealla tavalla. (Learn Engineering, 2018)

Mobile Switching Center (MSC) vastaa signaalin reitityksestä tukiasemien välillä. Yksi MSC eli matkapuhelinkeskus palvelee rajattua määrää tukiasemia, joten tämän vuoksi matkapuhelinverkossa on useita matkapuhelinkeskuksia. Kun signaali on reititetty joko yhden tai useamman matkapuhelinkeskuksen välillä, siirtyy signaali kuituverkkoa pitkin puhelun vastaanottajan solussa sijaitsevaan tukiasemaan. Tukiasema muuntaa signaalin takaisin sähkömagneettisiksi aalloiksi, jotka se lähettää ilmateitse vastaanottajan puhelimeen. Puhelimen vastaanottaessa signaalin, vastaanottajan mobiililaite muuntaa signaalin alkuperäiseksi äänipuheluksi. (Learn Engineering, 2018)

3 5G-verkkoa edeltävät sukupolvet

Kehittyvä matkaviestintäteknologia tarjoaa meille nopeasti lisääntyviä tiedonsiirtonopeuksia, nopeampia vasteaikoja ja sujuvampia keinoja käyttää enemmän sisältöä kuin koskaan aikaisemmin telekommunikaation historiassa. Seuraavaksi käymme läpi aikaisempien sukupolvien matkaviestinnän periaatteita. (Penttinen, 2019, s. 101)

3.1 Sukupolvi nolla

Varhaiset sukupolvet tekivät tietä aivan uudelle aikakaudelle, joka vapautti käyttäjien viestinnän kiinteissä paikoissa jo 1980-luvun lopulla. Itseasiassa käytössä oli joitain paljon aikaisempia järjestelmiä. Ruotsin automaattinen MTA (Mobile Telephony System Version A) otettiin operatiiviseen käyttöön vuonna 1956 Tukholmassa ja Göteborgissa. Laitteet olivat isoja ja ne sopivat ainoastaan autoihin. Tämä oli vielä edellä aikaansa, joten se ei tuonut kaupallista menestystä. Vuonna 1971 tekniikka oli riittävän edistynyt ARP:n (Auto Radio Puhelin) kaupalliseen käynnistämiseen, joka toimi 160 MHz:n kaistalla vuoteen 2000 asti. Se palveli asiakkaita etenkin syrjäisillä alueilla kolmen vuosikymmenen ajan. Rinnakkaisia järjestelmiä hyväksyttiin myös monissa muissa paikoissa 450 MHz:n taajuudella. (Penttinen, 2019, s. 101)

3.2 1G ensimmäinen sukupolvi

Kehitys jatkui 1980-luvulla yhdessä ensimmäisen sukupolven matkaviestintäverkkojen kanssa, joissa oli automaattiset toiminnot äänipuhelujen muodostamista varten. Joitakin esimerkkejä 1G-verkoista olivat AMPS (Advanced Mobile Phone System) Pohjois-Amerikassa ja TACS (Total Access Communications System) Yhdistyneessä kuningaskunnassa. Muilla maapallon alueilla oli käytössä myös samankaltaisia verkkoja, joista kansainvälisempi muunnos oli NMT 450 (Nordic Mobile Telephony) ja sen paranneltu versio NMT 900 Pohjoismaissa. (Penttinen, 2019, s. 102)

Analogiset ja melkein kokonaan automaattiset matkapuhelinverkot oli tarkoitettu vain äänipuheluille. Lisävarusteisiin perustuvien ratkaisujen avulla oli myös mahdollista mukauttaa laite datan käyttöä varten. Alkuperäiset järjestelmät perustuivat ajoneuvoihin asennettuihin laitteisiin, joita voitiin käyttää myös kannettavina laitteina. Laitteiden paino oli tyypillisesti useita kiloja. (Penttinen, 2019, s. 102)

3.3 2G toinen sukupolvi

1G-järjestelmien kapasiteetti oli melko rajallinen. Riippumatta kansainvälisistä toiminnoista erityisesti NMT:n kautta oli verkkovierailukonsepti edelleen melko rajallinen. Nämä olivat syitä, mitkä johtivat täysin digitalisoitujen toisen sukupolven matkaviestintäjärjestelmien, kuten CDMA (Code Division Multiple Access) pohjaisen IS-95:n kehittämiseen Pohjois-Amerikassa. (Penttinen, 2019, s. 103)

Käyttäjämäärän osalta GSM (Global System for Mobile Communications) on tähän mennessä ollut suosituin 2G-muunnos. GSM esitteli myös laitteen ja tilaajatietojen (SIM, tilaajan tunnistemoduuli) erottamisen päätelaitteen laitteen helpomman vaihtamisen ja matkapuhelinnumeron ylläpitämisen helpottamiseksi. 2G-järjestelmiin sisältyi kasvava joukko uusia palveluita, joista hyvänä esimerkkinä on SMS (Short Message Service). Digitaaliset 2G-järjestelmät sisälsivät sisäänrakennettuja ominaisuuksia tiedonsiirtoon. Tänä päivänä GSM voi tarjota tiedonsiirtonopeutena 500 kbps—2 Mbps, mikä on huomattavasti nopeampi kuin alkuperäinen 9,6 kbps nopeus. (Penttinen, 2019, ss. 103—104)

3.4 3G kolmas sukupolvi

Huolimatta 2G-verkkojen tarjoamista uutuusratkaisuista, niiden rajat ymmärrettiin riittämättömiksi, mikä johti kehittyneempien 3G-järjestelmien standardointiin. Tämän seurauksena amerikkalainen CDMA2000 ja eurooppalainen UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) olivat valmiita käyttöön 2000-luvun alussa. Yksi 3G:n tärkeimmistä eduista on korkeampi tiedonsiirtonopeus. Tämän mahdollistaa CDMA2000-verkossa 1x-EV-DV (1x Evolution-Data and Voice) ja UMTS-verkossa HSPA (High-Speed Packet Access). (Penttinen, 2019, s. 104)

3G-järjestelmän vaatimusohje on peräisin ITU:lta, mikä on hyväksynyt joukon kaupallisia 3G-järjestelmiä IMT-2000 (International Mobile Communications) -sarjassa. Näihin kuuluvat mm. UMTS, CDMA2000, EDGE (Enhanced Data rate for Global Evolution), DECT (Digital Enhanced Cordless Telecommunications) ja WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access). 3G-verkkojen alkuaajoista lähtien mobiilipalvelut ovat kehittyneet noin sadoista kbps nykyisiin kymmeniin Mbps. (Penttinen, 2019, s. 104)

Vaikka vanhempien tekniikoiden, kuten CDMA:n ja GSM:n parantaminen oli teknisesti toteutettavissa, niin tekniselle, sekä taloudelliselle toteutettavuudelle on rajansa. Tämä oikeuttaa modernien tekniikoiden käyttöönoton 3G-verkossa. Tärkein syy modernien tekniikoiden käyttöönottoon oli 2G-jälkeisten järjestelmien parempi spektritehokkuus. Paremman spektritehokkuuden ansiosta pystyttiin kehittämään parempia 3G-järjestelmiä, kuten LTE (Long-Term Evolution), mikä oli ensimmäisen kerran käytettävissä noin vuosina 2010—2011. Se tarjosi parempaa spektritehokkuutta kuin mikään muu aikaisempi järjestelmä ja tämä siirsi datapalvelut uudelle aikakaudelle tarjoamalla jopa satojen Mbps tiedonsiirtonopeuksia. WiMAX on myös toinen edistyneiden 3G-verkkojen edustaja, vaikka sen laajempaa kaupallista käyttöä ei ole vielä nähtävissä. (Penttinen, 2019, ss. 104—105)

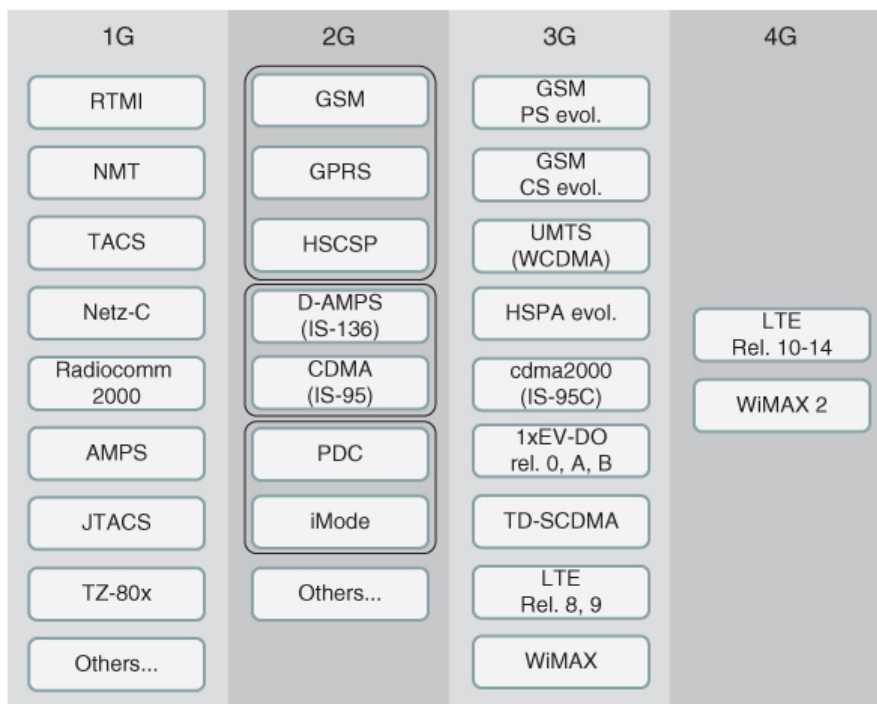
3.5 4G neljäs sukupolvi

3G aikakauteen saakka terminologia oli yhdenmukainen 2G- ja 1G-verkkojen kanssa. Termi ”4G” on kuitenkin epämääräinen. Tulkintoja on useita ja tiukin niistä tulee ITU:lta (International Telecommunication Union), joka hyväksyy vain LTE:n ja WiMAX:n kehittyneet versiot 4G-luokkaan.

LTE:n perusversio, joka on määritelty 3GPP:n (The 3rd Generation Partnership Project) Release 8-määrittelyssä, on suhteellisen lähellä 4G:tä. Tätä voidaan pitää siten 3G:n ulkopuolella olevana 4G:tä edeltävänä järjestelmänä, johon viitataan joskus 3.9G-tekniikkana. (Penttinen, 2019, s. 105)

IMT-Advanced dokumentin mukaan alkuperäinen LTE:n versio ei pysty täyttämään 4G-verkon odotettuja suoritusarvoja. Esimerkkinä voidaan mainita, että LTE ennen release 10 ei pysty tarjoamaan 1 Gbps:n tiedonsiirtonopeutta, mikä on yksi IMT-Advancedin vaatimuksista. Silti on yleistä nähdä LTE:n varhaisen version ja joskus jopa UMTS HSPA+ -verkkojen kutsumista 4G:ksi (Penttinen, 2019, ss. 105—106). LTE-verkkojen nopeuden vaihteluvälit Suomessa vuonna 2020 ovat 5—600 Mbps (Elisa, n.d.). Eri sukupolvien suosituimmat kaupalliset verkot on esitetty kuvassa 3.

Kuva 3. Eri sukupolvien suosituimmat kaupalliset matkapuhelinjärjestelmät (Penttinen, 2019, s. 103).



4 5G-verkon tekniset ominaisuudet

5G:n tavoitteet on asetettu erittäin korkeaksi. Tavoitteet on asetettu tiedonsiirtonopeudessa 20 Gbps ja verkon kapasiteetin kasvattamisessa 1000-kertaiseksi. Verkon tulee tarjota joustava alusta

myös uusille palveluille, kuten kriittiselle viestinnälle sekä IoT:lle (Internet Of Things). 5G-verkkojen korkeat tavoitteet edellyttävät useita uusia teknisiä komponentteja. Seuraavaksi käymme läpi 5G:n tärkeimpiä uusia tekniikoita verrattuna LTE tekniikkaan, jotka esitetään kuvassa 4. (Holma, 2020, s. 28)

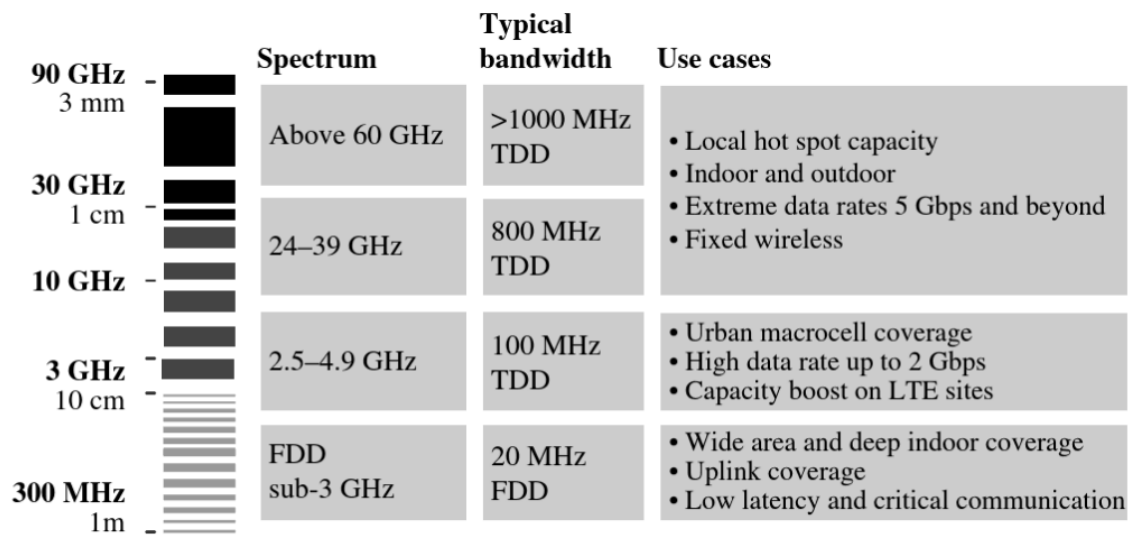
Kuva 4. 5G:n tärkeimmät uudet teknologiset uudistukset (Holma, 2020, s. 28).

Spectrum utilization	• Spectrum above 6 GHz • Bandwidth 100–400 MHz • Spectrum occupancy up to 98% • Flexible control channel locations in frequency domain
Beamforming	• User-specific demodulation reference signals • Common channel beamforming • Optimized MIMO feedback signaling
Physical layer and protocols	• Low latency: mini-slot, self-contained subframe, pipeline processing • Lean carrier with flexible reference signals • LDPC channel coding • OFDM uplink waveform
Network slicing	• Service-specific end-to-end network slices • Flow-based QoS support • Dynamic Quality of Experience
Dual connectivity	• Simultaneous radio connection to 5G and LTE radios • Usage of LTE protocols and core network • Higher data rate with 5G and LTE aggregation
Radio cloud and edge computing	• Interface between remote radio unit and centralized baseband • Edge computing support for local content and local breakout

4.1 Taajuuksien käyttö

5G-radio on suunniteltu joustavasti taajuuksien käyttöä varten. Suunnittelussa on hyödynnetty kaikkia käytettävissä olevia taajuusvaihtoehtoja 400 MHz:stä 90 GHz:iin. Yli 20 GHz:n aaltospektri voi tarjota jopa yli 1 GHz:n kaistanleveyden, mikä mahdollistaa hyvin nopean jopa 20 Gbps tiedonsiirtonopeuden, sekä äärimmäisen suuren mobiililaajakaista kapasiteetin. Millimetriaallot soveltuvat pääasiassa paikalliseen käyttöön, kuten joukkotapahtumiin, ulko- ja sisäpisteiden hotspot tukiasemiksi, sekä kiinteiden langattomien yhteyksien käyttötarkoitukseen. Kolme päätaajuusvaihtoehtoa esitetään kuvassa 5. (Holma, 2020, ss. 27–28)

Kuva 5. 5G-verkon mahdolliset taajuuudet (Holma, 2020, s. 28).

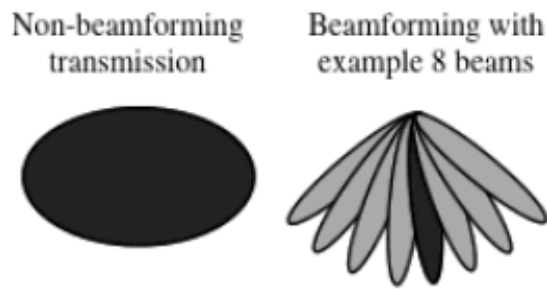


Taajuutta 2,5—5,0 GHz käytetään kaupunkialueiden 5G-verkon peitossa ja kapasiteetissa uudelleen hyödyntämällä jo olemassa olevia tukiasemapaikkoja. Noin 3,5 GHz:n taajuus on saatavilla maailmanlaajuisesti ja kaistanleveys on tyypillisesti tällä taajuudella enintään 100 MHz operaattoria kohden. 5G-verkon peitto voi olla verrattavissa LTE1800- kattavuuteen, mikäli käytetään mMIMO (Massive Multiple Input Multiple Output) säteenmuodostusta. Alhaisia FDD-kaistoja (Frequency Division Duplex) tarvitaan laaja-alueisten alueiden, kuten maaseudun verkon peittoalueen kattamiseksi. Verkon laaja kattavuus on tärkeää uusille käyttötapauksille, kuten IoT ja kriittinen viestintä. (Holma, 2020, s. 29)

4.2 Beamforming

Beamforming tarjoaa ratkaisun matkapuhelinverkon suorituskyvyn parantamiseksi. Se mahdollistaa korkeamman spektritehokkuuden, mikä lisää kapasiteettia olemassa oleville tukiasemapaikoille. Tämä tarjoaa paremman suorituskyvyn ja laajemman peittoalueen linkeille. Perinteinen tapa lähettää dataa on lähettää se kerralla koko solualueelle, kun taas Beamforming lähettää datan kapeina säteinä käyttäjille, mikä sallii sektorissa samojen resurssien uudelleen käyttämisen useiden käyttäjien kesken. Tällä tavoin saadaan häiriöt minimoitua ja solukapasiteettia lisättyä. Kuvassa 6 esitetään perinteisen datan lähettämisen ja Beamforming'in erot. (Holma, 2020, s. 31)

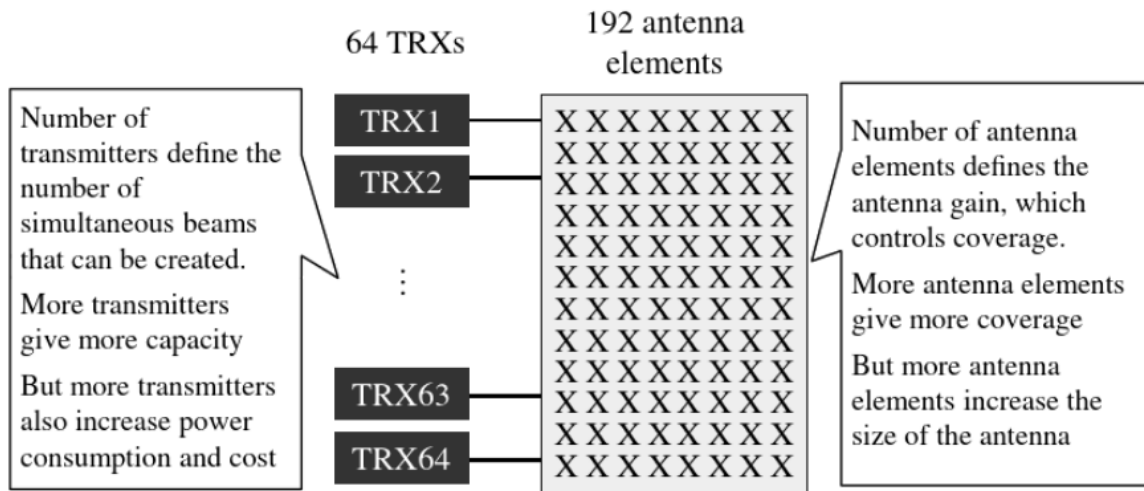
Kuva 6. Beamforming parantaa tukiaseman peittoaluetta ja kattavuutta (Holma, 2020, s. 32).



MIMO-tekniikalla tarkoitetaan tietoliikennetekniikassa sitä, että signaalin lähetyksessä ja vastaanottamisessa käytetään samanaikaisesti useampaa kuin yhtä antennia ("MIMO", 2018). Beamforming:in edut saadaan käyttöön käyttämällä massive MIMO antennoja. Massive MIMO on perinteisen MIMO tekniikan laajennus, jossa 3GPP:n määritelmän mukaan tiedonsiirtoon käytetään useampaa kuin kahdeksaa lähetintä. Säteet voidaan muodostaa eri tavoilla, joko lähettämällä säteet kiinteänä säteiden verkkona tai lähettämällä säteet tietylle käyttäjälaitteelle. Mikäli antennissa on TRX (lähetin-vastaanotin) haara, se voi lähettää kahdella virralla yhdelle käyttäjälaitteelle. Mitä suurempi määrä TRX:iä on käytetty, sitä enemmän säteitä pystytään tuottamaan, joka parantaa verkon kapasiteettia. (Holma, 2020, s. 31)

Toinen tärkeä tekijä antennisuunnittelussa on antennielementtien lukumäärä, joka voi olla suurempi kuin TRX:ien lukumäärä. Useamman antennielementin käyttö tekee antennista suuremman ja lisää antennivahvistusta. Antennielementtien etäisyys riippuu taajuudesta, minkä vuoksi antennin fyysinen koko on suurempi matalilla taajuuksilla ja päinvastaisesti antennin koko on pienempi korkeilla taajuuksilla. Tyypillisessä MIMO-antennissa voi olla 192 antennielementtiä, 64 lähetintä ja se voi tukea jopa 16 MIMO-virtaa. Kuvassa 7 on esitetty esimerkki 192 antennielementtisestä antennista, joka on jaettu pituussuunnassa 12 riviin, leveysuunnassa 8 riviin ja kahteen eri polarisaatioon. (Holma, 2020, s. 32)

Kuva 7. Tyypillinen MIMO-antenni (Holma, 2020, s. 32).



4.3 Fyysinen kerros ja protokollat

5G-radiosuunnittelu vaatii tehokkaampaa joustavuutta fyysisessä kerroksessa ja protokollissa. Tärkeimpiä uudistuksia tullaan käymään läpi tässä osiossa. (Holma, 2020, s. 33)

4.3.1 Numerologia

5G-numerologia on suunniteltu tukemaan useita eri alikantaaalto ja aika intervaleja, riippuen kaistanleveys ja viive vaatimuksista. Alikantaaallot kaistanleveysvälillä 15-240 kHz on määriteltä 3GPP:n julkaisussa 15, minkä numerologia esitetään kuvassa 8. Suuremmilla alikantaaallon väleillä voidaan sijoittaa apukehykseen enemmän symboleita, mikä johtaa lyhyempään lähetysaikaan. Kapeita välejä käytetään kapeilla 5G-kaistanleveyksillä ja ne ovat parempia äärimmäiselle peitolle. Jos otetaan huomioon tyypillinen 5G-käyttöönotto 3,5 GHz:n taajuuskaistalla, niin kaistanleveys voi olla 40—100 MHz, alikantaaallon väli on 30 kHz ja aikavälin pituus on 0,5 ms. Vastaavat numerot LTE:ssä ovat 20 MHz:n kaistanleveys, 15 kHz:n alikantaaaltoväli ja 1 ms:n aikavälin pituus. 5G-kantaaaltoväli on suunniteltu 2N:n 15kHz:n kerrannaiseksi. Jos vaaditaan hyvin matalaa viivettä, voidaan niin kutsuttua mini-slot aikaväliä käyttää, jossa lähetysaika on lyhyempi kuin yksi aikaväli. On myös mahdollista yhdistää useita aikavälejä yhteen. (Holma, 2020, ss. 33—34)

Kuva 8. 5G numerologia (Holma, 2020, s. 34).

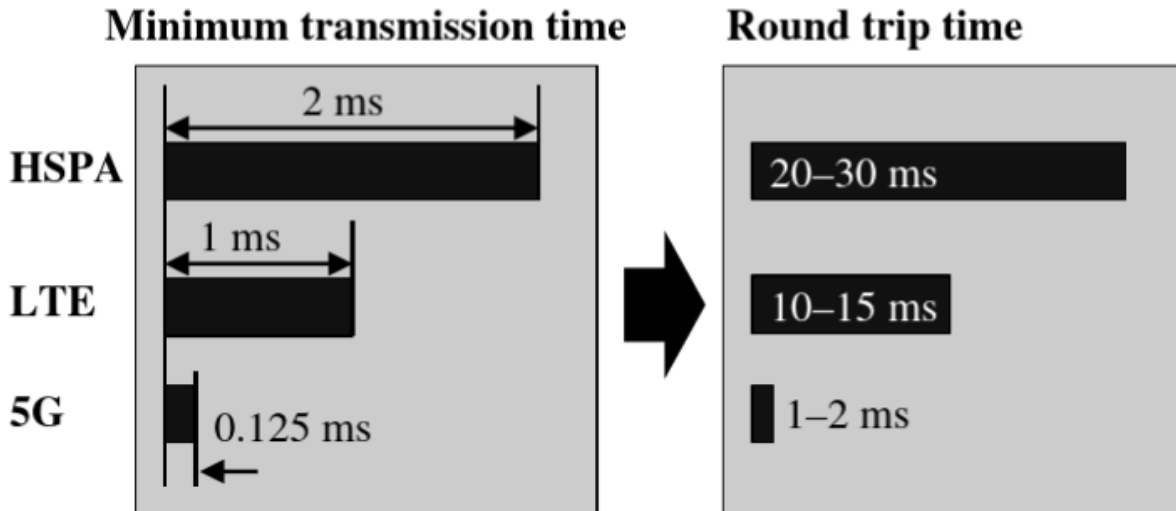
Subcarrier spacing	15 kHz	30 kHz	60 kHz	120 kHz	240 kHz
Symbol duration	66.7 μ s	33.3 μ s	16.7 μ s	8.33 μ s	4.17 μ s
Nominal cyclic prefix	4.7 μ s	2.3 μ s	1.2 μ s	0.59 μ s	0.29 μ s
Maximum bandwidth	50 MHz	100 MHz	100 MHz	400 MHz	400 MHz
Slot length	1.0 ms	0.5 ms	0.25 ms	0.125 ms	0.125 ms

Suurin osa taajuuksien varauksista maailmanlaajuisesti 2,5 GHz:n taajuuskaistalla on rajoitettu 20—40 Mhz:n taajuuteen operaattoria ja kaistaa kohden. Siksi LTE:n maksimikaistanleveydeksi määritetään 20MHz. Laajempia taajuuksia on yleensä saatavilla 2,5 GHz, 3,5 GHz tai korkeammilla taajuuksilla. 5G-radio on suunniteltu tukemaan suurempia taajuuksia, kuten 100 MHz tai jopa 400 MHz taajuutta. (Holma, 2020, s. 34)

4.3.2 Short Transmission Time

3GPP:n LTE julkaisussa 8:n lähetysaika on määritelty vähintään 1 ms:n nopeuteen, mikä johtaa käytännössä vähintään 10—15 ms:n RTT (Round Trip Time) - aikaan. Lähetysaika on 1ms molempiin suuntiin, puskurointi aika on 0,5 ms ja dekodausaika on 1 ms:n kerrannaisena. Jos haluamme lyhentää RTT-aikaa on meidän määriteltävä lyhyempi lähetysaika. Pienin lähetysaika HSPA (High Speed Packet Access) - verkossa on 2 ms, LTE:ssä 1 ms ja 5G:ssä 0,125 ms, mikä mahdollistaa 1—2 ms:n RTT - ajan 5G:ssä. Lyhyempi kehyskoko vaatii myös erilaisia rakenteita ohjauskanaville ja nopeammat prosessointiajat käyttäjälaiteissa, sekä tukiasemissa. Kuvassa 9 esitetään eri verkkojen minimi lähetysajat ja niitä vastaavat edestakaiset matka-ajat. (Holma, 2020, s. 35)

Kuva 9. Eri verkkojen minimi lähetysajat ja niitä vastaavat edestakaiset matka-ajat (Holma, 2020, s. 35).



4.3.3 Kanavakoodaus

Kanavakoodausta tarvitaan matkaviestintäjärjestelmissä luotettavampien datayhteyksien muodostamista ja häiriöiden hallitsemista varten. Kanavakoodaus 3G:ssä ja LTE:ssä oli Turbo-koodattua datakanaville, kun taas 5G käyttää erilaista ratkaisua: Low Density Parity Check (LDPC) datakanaville ja Polar koodausta ohjauskanaville. LDPC:llä, Turbolla ja Polarilla on samanlainen linkin suorituskyky dataa vaativille sovelluksille, kun taas LDPC:llä on selkeä etu Turboon ja Polariin verrattuna. Nämä toteutusnäkökohdat ovat tärkeitä, kun huippudatanopeus nousee 5G:ssä jopa yli 10 Gbps. LDPC:llä on korkein hyötysuhde Gbps:a pii-aluetta kohden ja sillä on myös paras energiatehokkuus bitteinä nanojoulea kohden. LDPC:llä on eniten tehokkaita toteutuksia rinnakkaisarkkitehtuurin ja joustavan koodisuunnittelun vuoksi se pystyy myös täyttämään uudet radioyhteyksivaatimukset. LDPC:n vertailu muihin toteutuksiin esitetään kuvassa 10. (Holma, 2020, s. 41)

Kuva 10. Kanavakoodausratkaisujen vertailu energiatehokkuuden suhteen (Holma, 2020, s. 42).

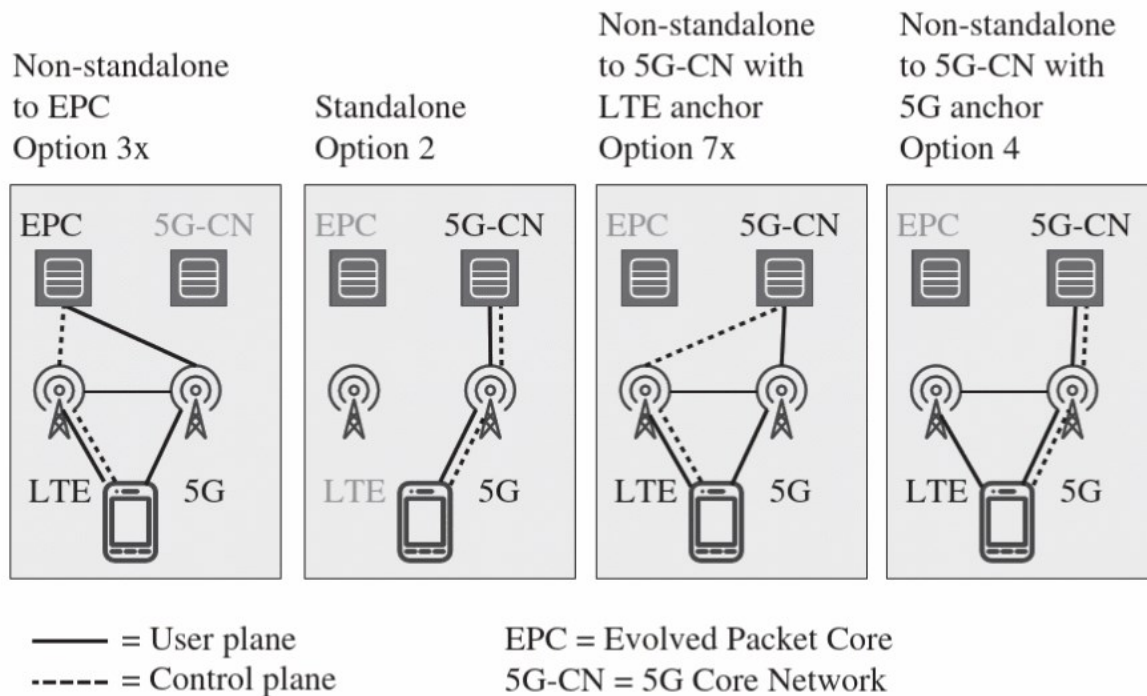
	LDPC	Turbo	Polar
Silicon area efficiency	>10 Gbps/mm ²	<5 Gbps/mm ²	<5 Gbps/mm ²
Energy efficiency	>100 bit/nJ	<1 bit/nJ	<100 bit/nJ

4.4 Dual Connectivity with LTE

5G on ensimmäinen radioratkaisu, joka on kiinteästi integroitu vanhaan radioverkkoon sujuvan käyttöönoton ja saumattoman kokemuksen saamiseksi. Ratkaisua kutsutaan nimellä Dual Connectivity, jossa 5G-verkon käyttäjälaiteella voi olla samanaikaisesti yhteys 5G-radioverkkoon sekä LTE-radioverkkoon. 3GPPN: määrittämässä ensimmäisessä versiossa 5G tukee NSA:ta (non-standalone) arkkitehtuuria dual connectivity:llä. Sekä 5G-tukiasemat (gNodeB) että LTE-tukiasemat (eNodeB) on kytketty EPC (Evolved Packet Core) – järjestelmään. (Holma, 2020, s. 44)

5G:n ohjaustasoa, mikä kulkee LTE:n kautta kutsutaan 5G:n arkkitehtuurissa vaihtoehdoksi 3x. Nykyisten EPC- ja LTE-liikkuvuusmenetelmien käyttö tekee 5G:n käyttöönotosta nopeaa vaihtoehdolla 3x. 5G voidaan myös ottaa käyttöön SA (standalone) ratkaisuna ilman LTE-verkkoa käyttämällä arkkitehtuurivaihtoehtoa 2 sekä 5G-CN:ää (5G core network). SA-ratkaisu on yksinkertaisempi kuin NSA, koska 5G:llä ja LTE:llä ei ole tarvetta olla vuorovaikutuksessa keskenään. SA:n hyöty on se, että se voi tarjota pienemmän viiveen kuin NSA, koska mukana ei ole LTE-protokollia, jotka voivat aiheuttaa ylimääräistä viivettä. On myös suunniteltu NSA-arkkitehtuuria, jossa sekä 5G- että LTE-solmut on kytketty uuteen 5G ydinverkkoon. Vaihtoehdoissa 7x ja 4 ohjaustaso kulkee LTE:n tai 5G:n kautta. 5G:n pääarkkitehtuurivaihtoehdot esitellään kuvassa 11. (Holma, 2020, ss. 45—46)

Kuva 11. 5G-verkon eri pääarkkitehtuurivaihtoehdot (Holma, 2020, s. 46).



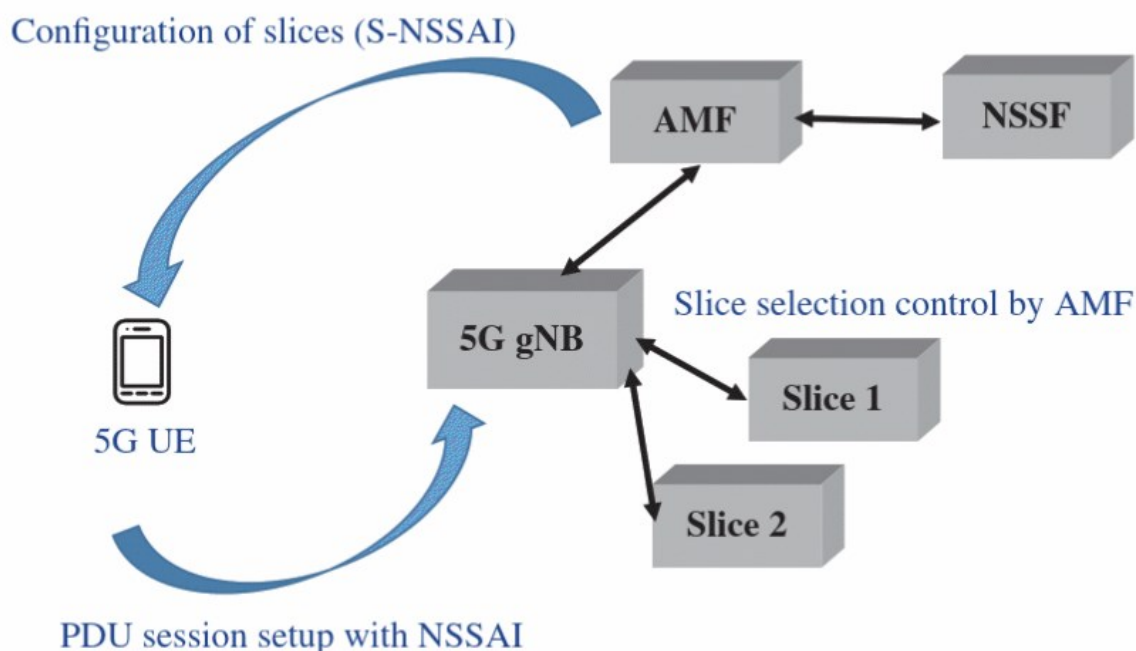
4.5 Verkon viipalointi

5G:n fyysiset- ja protokollakerrokset tarvitsevat joustavaa suunnittelua tukeakseen erilaisia käyttötapauksia, erilaisia taajuusalueita ja maksimoidakseen energia- ja spektritehokkuuden. Verkon viipalointi (Network Slicing) luo eri palveluille virtuaaliset verkkosegmentit samaan 5G-verkkoon (Holma ym., 2020, s. 4). 5G:n verkkoviipaloinnin periaatteisiin kuuluu antaa käyttäjälaitteen kuulua useampaan kuin yhteen verkonviipaleeseen ja samalla käyttäjälaite pystyy silti ylläpitämään vain yhtä signaloituyhteyttä verkkoon. Esimerkki verkonviipaloinnin käyttötapauksesta esitetään kuvassa 12. (Toskala & Poikselkä, 2020, s. 81)

Käyttäjälaitteelle tarjotaan informaatiota käytettävissä olevista verkonviipaleista, kun se rekisteröityy verkkoon NAS (Non-Access Stratum) -signaaloinnin kautta. Yksi käyttäjälaite voidaan konfiguroida enintään kahdeksalle viipaleelle. Kun PDU (Protocol Data Unit) sessio on muodostettu, käyttäjälaitteelle lähetetään signaali NSSAI:n (Network Slice Selection Assistance Information) avulla olettaen, että tämä tieto on välitetty aiemmin käyttäjälaitteelle. Näiden tietojen perusteella verkko valitsee sopivan verkon osion ja siihen liittyvät resurssit, AMF:n (Access

and Mobility Management Function) koordinoitessa toimia 5G-ytimen puolella. AMF saa tiedon siitä, mitkä verkon viipaleet sallitaan tietyille liittymälle, AMF:n olemalla yhteydessä NSSF:ään (Network Slice Selection Function). 5G-verkon viipalointi sallii yhden käyttäjälaitteen pääsyn molempiin palveluihin samanaikaisesti. Käyttäjälaitte voi kuulua tiettyyn verkonviipaleeseen ja samanaikaisesti käyttää palveluita, joita kutsutaan ”normaaliksi” liikenteeksi. Aikaisemmat sukupolvet käyttivät käyttäjäkohtaisia prioriteetteja, mikä merkitsi samaa käsittelyä kaikille palveluille, joita käyttäjälaitteelle tarjottiin. (Toskala & Poikselkä, 2020, ss. 81–82)

Kuva 12. Esimerkki verkonviipaloinnin käyttötapaudesta (Toskala & Poikselkä, 2020, s. 82).

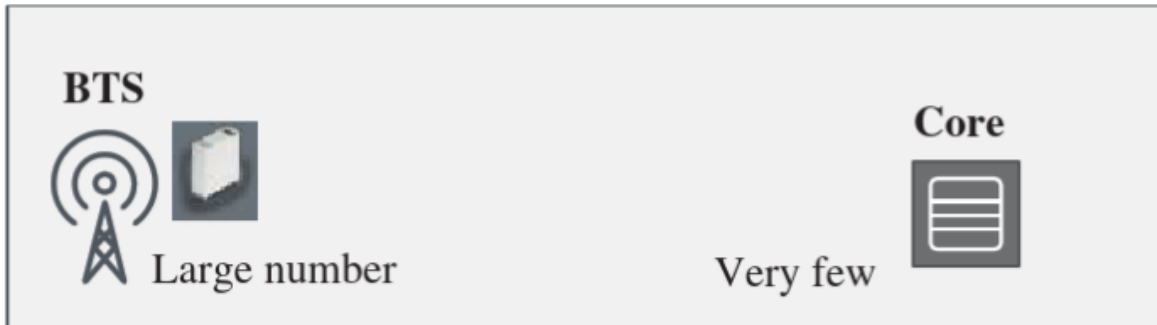


4.6 Radio Cloud and Edge Computing

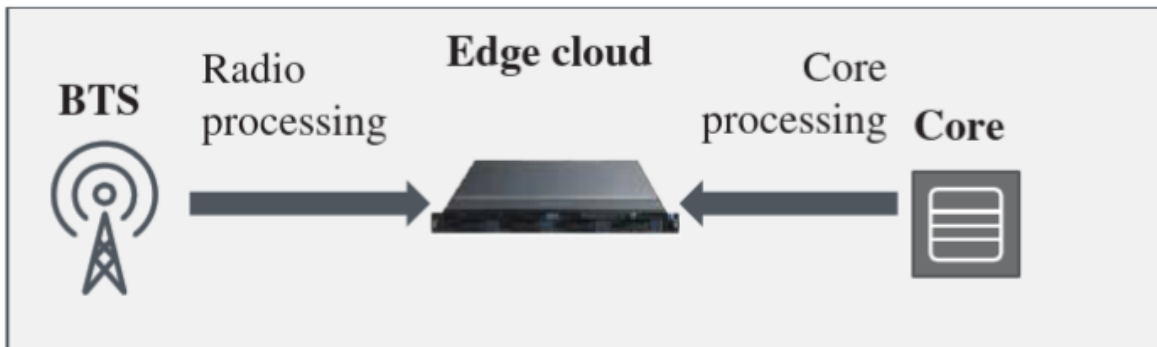
Radioverkkoarkkitehtuuri jaetaan tyypillisesti niin, että kaikki radion prosessointi tapahtuu lähellä tukiaseman antennia. Runkoverkkoarkkitehtuuri on taas keskitetty voimakkaasti vain pienelle määrälle runkoverkkoarkkitehtuurin ytimen sivustoja. Tulevaisuuden arkkitehtuurissa radioprosessointi keskittyy paremmin skaalautuvuuden parantamiseen ja ytimen prosessoinnista tulee enemmän hajautettua, jotta pienempien viiveiden saavuttaminen on mahdollista. Näiden palvelinten sijainnit voivat jatkossa isännöidä sekä radio- että runkoverkkotoimintoja. Arkkitehtuurin kehitys esitetään kuvassa 13. (Holma, 2020, s. 46)

Kuva 13. Verkkoarkkitehtuurin evoluutio (Holma, 2020, s. 46).

Typical network architecture

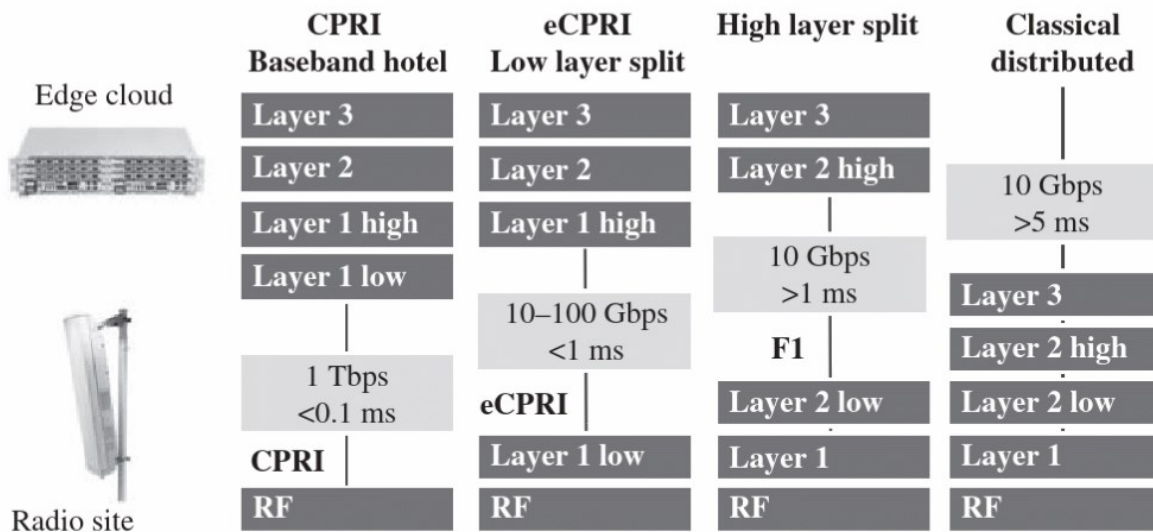


Future architecture



5G-spesifikaatiot on suunniteltu tukemaan radiopilveä määrittelemällä uuden rajapinnan radioverkkoon jakamalla eri toiminnot jaetun radiotaajuusalueen ja keskitetyn Edge Cloud alueen välillä. Edge Cloud on rakennettu kerrostettuun verkkoarkkitehtuuriin, jossa yhdistyvät keskitetyt- ja reunatietokeskukset, jakamalla verkon kapasiteetin työmäärää vaatimusten mukaisesti (Nokia, 2018). Radiopilven toteutus mahdollistaa verkon skaalautuvuuden esim. lisäämällä suuren määrän IoT (Internet of Things) -laitteita verkkoon. Kuvassa 14 esitetään radioverkon tärkeimmät toiminnallisuuteen liittyvät jakovaihtoehdot 5G radioverkossa ja likimääräiset siirtovaatimukset 3-sektoriselle tukiasemalle 100 MHz:n taajuudella sekä massiivisella MIMO antennilla. (Holma, 2020, s. 46)

Kuva 14. Toiminnalliset jakovaihtoehdot (Holma, 2020, s. 47).



Oikealla kuvassa (Classical distributed) näkyy hajautettu vaihtoehto, jossa kaikki radiotoiminnot ovat lähellä antennia. Tätä vaihtoehtoa käytetään useimmissa LTE-verkoissa ja se on myös tyypillinen 5G-verkoissa. Vasemmalla kuvassa näkyy toinen vaihtoehto, jota on käytetty LTE-verkoissa. Tätä kutsutaan nimellä Baseband hotel, jossa kaikki kantataajuus prosessointi suoritetaan keskitetyssä paikassa. Common Public Radio Interface (CPRI) – voidaan käyttää kantataajuuden ja radiotaajuuden välillä. CPRI vaatii hyvin matalaa viivettä ja sen datanopeusvaatimus kasvaa kaistanleveyden ja antennien lukumäärän funktiona. Jos meillä on 100 MHz:n 5G-kantaaalto ja massiivinen MIMO antenni 64 lähettimellä sekä 16 MIMO virtaa, niin CPRI datanopeusvaatimus on lähellä 1 Tbps ilman CPRI pakkausta, mikä tekee CPRI-käyttörajapinnan käytöstä vaikeaa 5G:ssä. Tämän vuoksi harkitaan kahta muuta hajautetun vaihtoehdon toiminnallisuutta, joissa on kevyemmät siirtovaatimukset. Alemman kerroksen (Low layer) ja ylemmän kerroksen (higher-layer) hajautetuissa vaihtoehdoissa viivekriittiset toiminnot sijaitsevat lähellä radiotaajuutta ja vähemmän viivekriittiset toiminnot sijaitsevat Edge Cloud alueella. Tämä mahdollistaa siirtovaatimusten minimoinnin. Jos siirtoverkko pystyy tarjoamaan matalan viiveen (<1ms), niin vain osa Layer 1:sen (Fast Fourier Transform [FFT] ja kanavakoodaus) sijaitsee lähellä radiotaajuutta, kun taas Layer 1:sen toinen osa ja muut kerrokset sijaitsevat Edge Cloudissa. Rajapintaa kutsutaan tällöin nimellä enhanced Common Public Radio Interface (eCPRI). Mikäli siirtoviive on korkeampi, niin enemmän toiminnallisuuksia on sijoitettu antennipaikalle ja

ainoastaan osa Layer 2:sta ja Layer 3:sta ovat Edge Cloud alueella. Tässä tapauksessa rajapintaa kutsutaan F1:ksi. (Holma, 2020, ss. 46—47)

5 5G ja tietoturva

5G:n tietoturva on saanut enemmän näkyvyyttä, kuin mikään aikaisempi verkkosukupolvi. 5G-standardi spesifioi joukon parannuksia viestinnän turvallisuuden ja käyttäjän tietosuojan parantamiseksi. Käyttäjän kannalta tilanne parantuu, mutta kuitenkin parannuksista huolimatta on vaikeaa arvioida, kuinka paljon aiempaa paremmin 5G:n viestintäalusta kykenee suojaamaan tiedon luottamuksellisuutta, eheyttä ja saatavuutta. Tämä johtuu seuraavista asioista:

- Operaattorien 5G-verkkoytimet perustuvat uudistettuun arkkitehtuuriin ja protokolliin, joissa palveluntarjoajalla on pääsy lähemmäs ydinverkkojen toimintoja. Tämä on tarpeellista, jotta 5G-palvelulupaukset esimerkiksi matalista viiveistä voidaan lunastaa. Tämän vuoksi verkon ytimen ja reunan välinen ero hämärtyy ja tarpeelliset integraatorajapinnat ovat tietoturvan kannalta äärimmäisen tärkeitä, koska ne ulottuvat lähelle verkon ydintä.
- Ydinverkkojen arkkitehtuuri virtualisoidaan ja turvallisuusnäkökulmasta katsottuna tämä tarkoittaa, että viestintärakenteen pinta-ala kasvaa. Palveluntarjoajan tietoturvatoimintojen, kuten ydinverkon haavoittuvuudenhallinnan, muutoksenhallinnan ja turvallisuusvalvonnan on oltava korkeatasoista tietoturvaongelmien ehkäisemiseksi.
- 5G-palvelumallit pohjautuvat verkon loogiseen viipalointiin ja virtualisointiin erilaisia käyttötapauksia varten. Verkon viipaleet sisältävät erilaisia palveluominaisuuksia. Aikaisemmista teknologioista verkon virtualisoinnin ja laskennan osa-alueilta tiedetään, että turvallisuuden ylläpitäminen jaetuissa resursseissa on haastavampaa fyysisesti eriytetyissä ympäristöissä. Palveluviipaleet IoT-laitteille voivat koostua valtavasta määrästä matalan suojaustason laitteita. Tämä mahdollistaa sen, että hyökkääjä voi käyttää hyväksi IoT-laitteiden heikkoa tietoturvaa kohdistessaan hyökkäyksiä kriittisempiin palveluviipaleisiin.

- Standardi mahdollistaa hyvien salaus- ja tunnistusratkaisujen käyttämisen arkkitehtuurin eri osissa operaattorin ydinverkon, operaattorien välisen tietoliikenteen, sekä päätelaitteiden viestinnän suojaamiseksi. Päätelaitteiden yhteissopivuusvaatimukset mahdollistavat myös toimivuuden aikaisempien verkkosukupolvien kanssa. Myös suojaaminen operaattorien väliselle viestinnälle vaatii avainhallintainfrastruktuureja, jotka ovat myös potentiaalisia ongelmanlähteitä infrastruktuurien turvalliselle toiminnalle.
- 5G-standardista puuttuu määrittely kokonaistietoturvallisuusarkkitehtuurista 5G-verkoille. Verkkoihin vaikuttavat myös toteutuskohtaiset ratkaisut, laitteiden fyysinen suojaus ja reunalaskentaympäristön turvaratkaisut, joita ei ole käsitelty 5G-standardissa. (Liikenne- ja viestintävirasto Traficom Kyberturvallisuuskeskus, 2019, s.9)

5G-teknologiaan siirtyminen tuo mukanaan suurimman tietoteoreettisen muutoksen kuin mikään aikaisemmista sukupolvista. 5G-verkot tulevat olemaan digitaalisen yhteiskuntamme perusrakenteita. Riskienhallinnan kannalta ajateltuna se tarkoittaa siirtymistä ympäristöön, jossa haavoittuvuuksien ja tietoturvan hallinnalle on asetettu suurempia vaatimuksia ja verkkoympäristön monimutkaisuuden lisääntymisen takia toimivien hallintamallien toteuttaminen on merkittävästi haasteellisempaa. 5G-toteutukset tulevat vaatimaan informaation aktiivista jakamista, viranomaisohjauksen rajojen uudelleentarkastelua ja laajempaa vuorovaikutusta eri toimijoiden välillä sekä lopulta uudenlaisia viranomaismääräyksiä. (Liikenne- ja viestintävirasto Traficom Kyberturvallisuuskeskus, 2019, s.11)

6 5G-verkon käyttökohteet

5G-verkot mahdollistavat useita uusia käyttötapauksia kuluttajille, yrityksille, kodeille ja julkisille domaineille. Videokokemusta voidaan parantaa 5G:n suuremmalla tiedonsiirtonopeudella tukemaan 360 asteen katselua, etenkin massatapahtumissa, joissa 5G tarjoaa huomattavasti suuremman kapasiteetin edellisiin verkkoihin verrattuna. Virtuaalitodellisuus ja lisätyn todellisuuden pelaaminen ja muut käyttötapaukset voivat parantaa käyttökokemusta. Pilvipelaamista ja esports-kokemusta voidaan parantaa pienemmällä viiveellä ja suuremmilla tiedonsiirtonopeuksilla. Yksi käyttötapana voi olla ajoneuvossa tapahtuva käyttö, jolloin käyttäjä voi

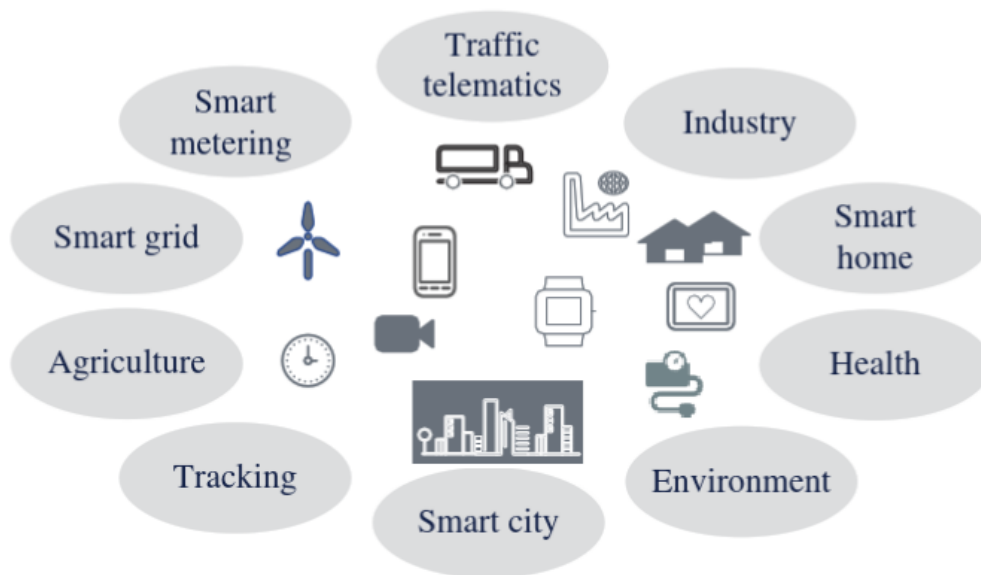
nauttia suurista tiedonsiirtonopeuksista ja laadukkaasta videosta liikkumisen aikana. (Holma ym., 2020, s. 9)

5G-verkon käyttötapaukset ulottuvat myös kuluttajasovellusten ulkopuolelle. Suuri tiedonsiirtonopeus, matala viive ja äärimmäinen luotettavuus mahdollistavat monet teolliset sovellukset. Sitä voidaan käyttää esimerkiksi teollisuuden automaatioon pienellä viiveellä toimivien robottien ohjaukseen, koneiden kauko-ohjaukseen ja liikenteen ohjaukseen. 5G tuo uusia ominaisuuksia myös yleisiin turvallisuusverkkoihin, maatalouden automaatioon, sekä terveydenhuollon seurantaan. (Holma ym., 2020, s. 9)

6.1 5G ja Internet of Things

Esineiden internet (IoT) viittaa datan itsenäiseen tiedonsiirtoon laitteiden tai laitteiden osien välillä. IoT:tä voidaan kuvata myös internettiin kytkettyjen fyysisten esineiden verkostona. Tulevaisuudessa oletetaan olevan kymmeniä miljardeja IoT-laitteita. IoT mahdollistaa valtavan määrän käyttötapauksia kotien, kuluttajien, teollisuuden, yleishyödyllisten palveluiden, auto- ja logistiikan alalla. Esimerkkejä IoT:n käyttötapauksista on esitetty kuvassa 15. (Holma ym., 2020, ss. 432)

Kuva 15. Esimerkkejä IoT:n käyttötapauksista (Holma ym., 2020, s. 432).



IoT-optimoinnin tavoitteena on luoda IoT-moduuleja, jotka voidaan integroida miljardeihin esineisiin ja tarjota näille langaton yhteys Internetiin. IoT: n optimointitavoitteet voidaan tiivistää seuraavasti:

- Virtalähteen pitkäikäisyys: Älypuhelimet tarvitsevat päivittäistä akun latausta, mutta monien IoT-laitteiden täytyy toimia jopa vuosia ilman latausta. Tästä hyvänä esimerkkinä on palohälytin, minkä sensori lähettää dataa suoraan paloasemalle. Tällaisen laitteen akunvaihtoväli on erittäin tärkeä tekijä. Akun käyttöikä tulisi olla yhtä pitkä kuin laitteen käyttöikä, koska pariston vaihtaminen voi olla usein hankalaa hankalasti sijoitettujen laitteiden osalta.
- Alhaiset käyttöönotto kustannukset: IoT:n verkkokustannukset, mukaan lukien alkuperäiset investoinnit ja vuotuiset toimintakulut on myös pidettävä minimissä. IoT-yhteyksien käyttöönotto olevassa oleviin matkapuhelinverkkoihin voidaan toteuttaa yksinkertaisesti keskitetyllä ohjelmistopäivityksellä, jolloin vältetään kaikki uudet laitteistot ja sivustokäynnit. Tällä saadaan pidettyä kustannukset minimissä.

- Yksinkertainen liittymän hallinta: eSIM:ä (mEmbedded Subscriber Identity Module) voidaan käyttää minkä tahansa mobiililaitteen etähallintaan. Etähallinnan ja eSIM:n odotetaan olevan tulevaisuudessa tärkeitä pienille IoT-laitteille.
- Täysi kattavuus: Paranneltu kattavuus on tärkeää monille IoT sovelluksille. Yksinkertaisia esimerkkejä ovat älykkäät mittarit, mitkä usein sijaitsevat kellarissa betoniseinien takana. Myös teolliset koneet kuten hissit ja kuljetinhihnat ovat usein sijoitettu syvälle sisätiloihin. Tämä vaatimus on johtanut siihen, että IoT-yhteisö on joutunut etsimään menetelmiä millä laajentaa kattavuutta käyttämällä matalampia signaalivahvuuksia ja pidempiä latensseja kuin mitä muille laitteille vaaditaan. IoT-linkkibudjetin tavoite on 15—20 dB:n parannus verrattuna GSM:ään.
- Tuki valtavalle määrälle laitteita: IoT-yhteydet kasvavat huomattavasti nopeammin kuin tavalliset mobiililaajakaista yhteydet ja tulevaisuudessa tulee olemaan miljardeja laitteita yhdistettynä IoT-verkkojen kautta. Verkkoon liitettyjen laitteiden tiheys ei välttämättä ole tasainen, mikä johtaa siihen, että joihinkin verkon soluihin on kytketty erittäin suuri määrä laitteita. Siksi IoT-liitettävyyden on kyettävä käsittelemään samanaikaisesti suuria määriä laitteita. (Holma ym., 2020, ss. 432—433)

6.2 5G ja tekoäly

Datan määrä kasvaa voimakkaasti ja eri ennusteiden mukaan se tulee kasvamaan 4—5 kertaiseksi vuoteen 2025 mennessä. Erilaisten arvioiden mukaan noin kolmannes tästä tullaan käsittelemään reaaliaikaisesti, mikä vaatii reaaliaikaista prosessointia. Tämä tuo haasteita viestintäyhteyksille, johon 5G-verkot tarjoavat kattavan ja tehokkaan alustan. Ericssonin Mobility Reportin mukaan noin 54 prosenttia mobiililiikenteestä kulkisi 5G-verkossa vuonna 2026. Data, mikä liikkuu 5G-verkoissa, toimii syötteenä erilaisille koneoppimisen ja tekoälyn algoritmeille. Näiden avulla pystytään tuottamaan uusia erilaisia palveluita. (Liikenne- ja viestintävirasto Traficom, 2021-a).

6.2.1 5G-verkon optimointi

Tekoälyä ja koneoppimista voidaan hyödyntää 5G-verkkojen optimoinnissa. Sitä pystytään hyödyntämään esim. käyttäjien liikkuvuuden hallinnassa. Sillä on myös mahdollista ennakoida miten käyttäjät liikkuvat verkossa ja miten he käyttävät verkon resursseja. Tästä johtuen voidaan optimoida verkon resursseja näiden ennusteiden mukaisesti. (Liikenne- ja viestintävirasto Traficom, 2021-a).

Tekoäly tarjoaa myös parempaa tehokkuutta, jotta eri palveluntarjoajat voivat optimoida radioresursseja tehokkaammin. Sitä voidaan käyttää verkkojen ja tukiasemien tukkeutumisen ja ruuhkaisuuden ennalta ehkäisyyn. Myös verkon tasolla pystytään tekemään reititystä entistä tehokkaammin. (Liikenne- ja viestintävirasto Traficom, 2021-a).

Verkkojen ja tukiasemien käyttöönottoa varten on kehitetty Self-Organizing Networks -konsepti, jonka avulla tukiasemat kykenevät älykkäästi tunnustelemaan millaiseen ympäristöön ne tuodaan ja minkälainen osa verkkoa tukiasemat tulevat olemaan. Tämän konseptin avulla tukiasema pystyy konfiguroida ja optimoida omaa toimintaansa erilaisten algoritmien ohjaamana. Tästä johtuen ihmisen suunnittelutyö vähenee, koska verkko optimoi itse itseään. (Liikenne- ja viestintävirasto Traficom, 2021-a).

Tekoäly tuo myös kustannustehokkuutta verkkoihin ja auttaa myös ekologisessa kestävyudessa. Alueilla missä verkkoa ei käytetä kyseisellä hetkellä, pystytään hyödyntämään erilaisia energiasäästötoimintoja ja sitä kautta tuoda energiatehokkuutta ylöspäin ja energiankäyttöä alaspäin. (Liikenne- ja viestintävirasto Traficom, 2021-a).

6.2.2 Airbusin tekoälyhankkeet

Airbus on iso maailmanlaajuinen pörssi-yhtiö, joka on ollut Suomessa mukana kehittämässä erilaisia 5G-ekosysteemihankkeita. Airbusin Suomessa parhaiten tunnettu hanke on viranomaisverkko Virve, minkä tarkoituksena on tarjota viranomaisviestintäpalveluita eri viranomaisyksiköille. (Liikenne- ja viestintävirasto Traficom, 2021-b).

Jos mietitään tekoälyn käyttöä viranomaisviestinnässä, on luotettavuus tekoälyn toimintavarmuuteen ensiluokkaisen tärkeää. Tekoälyn käytössä ihmisissä koskevilla kysymyksillä täytyy olla varma siitä, että johtopäätökset sekä päätelmät ovat oikeita ja myös loppukäyttäjän on ymmärrettävä, minkä vuoksi kyseisiin johtopäätöksiin on päädytty. (Liikenne- ja viestintävirasto Traficom, 2021-b).

Airbus kehittää tällä hetkellä tekoälypohjaista virtuaalista avustajaa viranomaisille erilaisiin kenttätehtäviin. Virtuaaliavustajalta saa lisätietoa puheohjauksen avulla. Sitä voidaan käyttää esimerkiksi autojen rekisteritietojen, henkilötietojen, sekä vaarallisten aineiden sekä materiaalien lisäinformaation selvitykseen. Tekoäly pystyy auttamaan käyttäjää puhetunnistuksen avulla erilaisissa toimintatilanteissa. Markkinoilla olevat puheentunnistusratkaisut eivät sovellu kyseiseen käyttötarkoitukseen, koska ne ottavat häiriötä taustahälystä ja kohinasta. Tämän vuoksi Airbus kehittää myös omaa ratkaisuaan ongelmaan. Virtuaaliavustajan esimerkkitoimintoja esitetään kuvassa 16. (Liikenne- ja viestintävirasto Traficom, 2021-b).

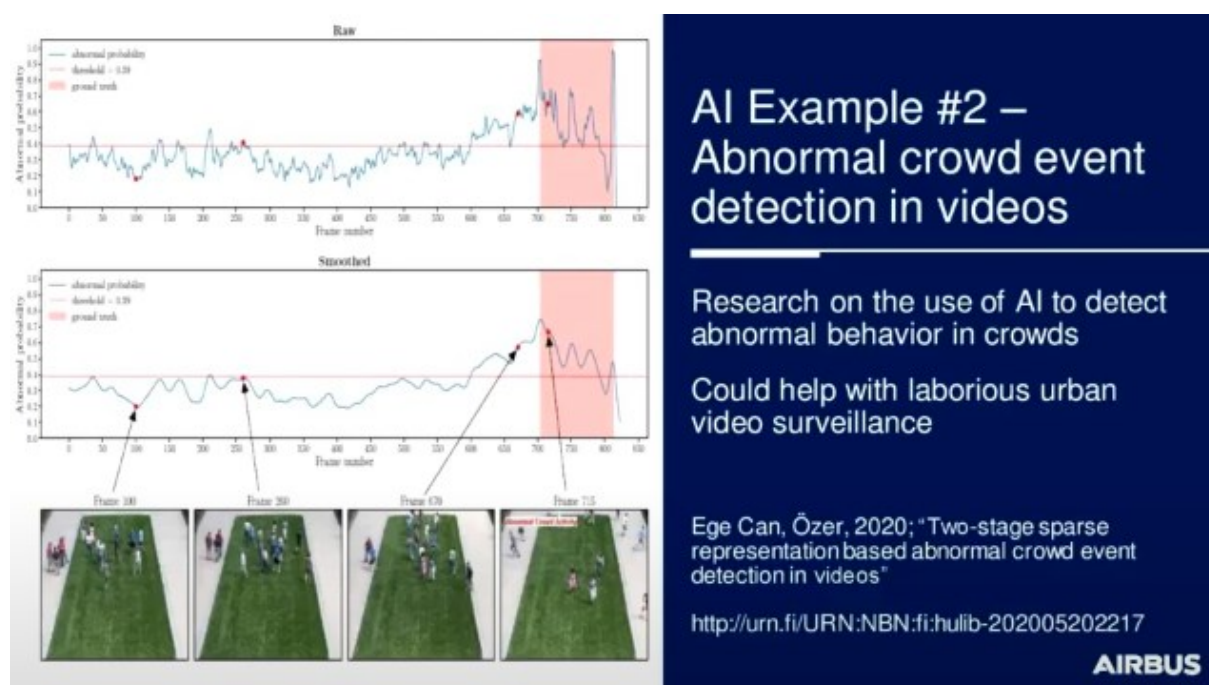
Kuva 16. Esimerkkejä virtuaaliavustajan käytöstä (Liikenne- ja viestintävirasto Traficom, 2021-b).



Airbus kehittää myös tekoälypohjaista videovalvontaan tarkoitettua monitorointisovellusta, joka on tarkoitettu kaupunkiympäristöön. Kaupunkiympäristössä on valtava määrä kameroita ja tämän vuoksi isossa valvomossa työskentelevän ihmisen on vaikea havaita, tapahtuuko yksittäisessä

kamerassa jotain poikkeavaa. Tekoälyn tehtävänä on tunnistaa reaaliajassa ihmisjoukosta erilaisia tilanteita, joissa tapahtuu poikkeamia. Sille opetetaan valtava määrä eri opetustapauksia, missä ihmisjoukon käyttäytyminen on ns. normaalia toimintaa. Tämän avulla tekoäly pystyy tulkitsemaan epänormaalit tilanteet ja tekemään tilanteista hälytyksen. Tämän jälkeen ihminen päättää onko hälytys aiheellinen vai ei. Videon tulkinnessa käytetään erilaisia indikaattoreita, joista esimerkki esitetään kuvassa 17. (Liikenne- ja viestintävirasto Traficom, 2021-b).

Kuva 17. Tekoälypohjaisen videomonitorointisovelluksen käyttötarkoitus ja esimerkki sen toimintaa mittaavista indikaattoreista (Liikenne- ja viestintävirasto Traficom, 2021-b).



6.2.3 Mobiilitunnistimet ja 3D-käyttäjien vuorovaikutussovellukset

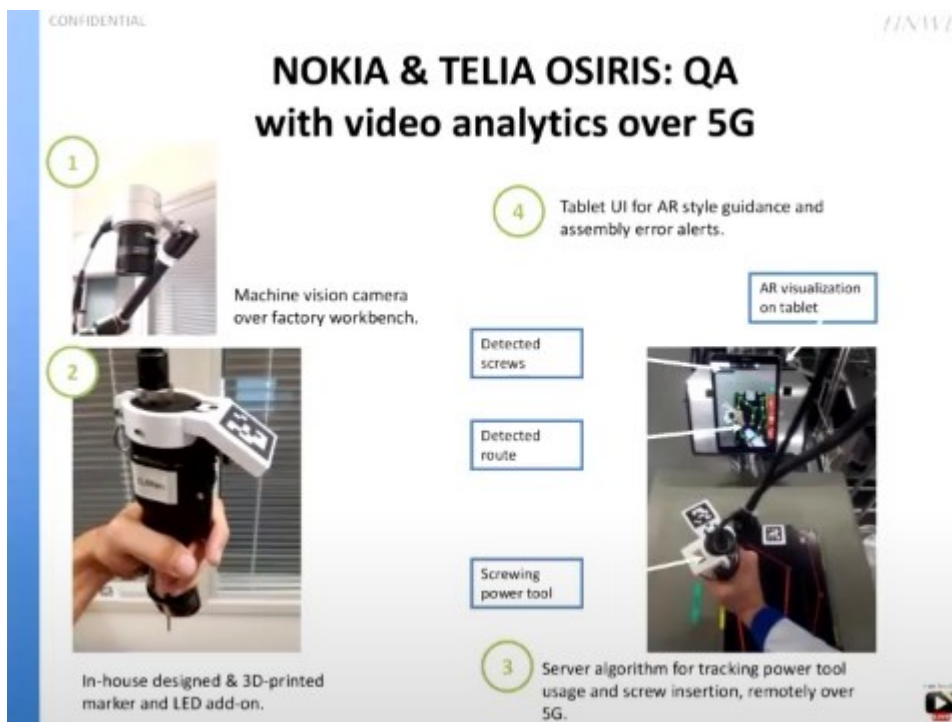
Finwe Oy ja FinCloud Oy on yrityksiä, jotka ovat keskittyneet 360-videoiden ja niiden päälle liitettävän älyteknologian kehittämiseen. Yrityksen ovat rakentaneet oman videomoottorin nimeltään Orion360, jonka päälle pystytään liittämään tekoälyominaisuuksia, erilaisia kameroita ja kamerasisältöä. (Liikenne- ja viestintävirasto Traficom, 2021-c).

Yritykset toteuttivat videoanalytiikkaratkaisun 5G-verkkoja hyödyntäen Nokian tukiasematehtaalle Ouluun yhteistyössä Nokian, Telian ja Intelin kanssa. Tukiasematehtaalla osa työvaiheista tehdään

käsin. Projektissa kehitettiin videoanalytiikan avulla työvaiheiden mittaamiseen tarvittavat työkalut ja laatumittarit. (Liikenne- ja viestintävirasto Traficom, 2021-c).

Projekti toteutettiin asentamalla kamera työpisteen yläpuolelle, joka kuvaa työntekijän eri työvaiheita. Työvälineisiin asennettiin markkerit, joiden avulla järjestelmä pystyy tekoälyn avulla seuraamaan eri työvaiheiden etenemistä ja antamaan työntekijälle ohjeistusta. AR (Augmented Reality) visualisointi toteutettiin tabletissa näkyvän kuvan avulla ja tabletin kautta opastetaan työntekijää eri työnvaiheissa. Järjestelmän toimintaperiaate esitetään kuvassa 18. (Liikenne- ja viestintävirasto Traficom, 2021-c).

Kuva 18. Järjestelmän toimintaperiaate (Liikenne- ja viestintävirasto Traficom, 2021-c).



Yritykset kehittivät myös etäläsnaoloratkaisun, jota voidaan hyödyntää esimerkiksi tehtaan turvallisuuskierroksissa tai vartioliikkeen valvontakierroksissa. 360-asteisen kameran ohjelmistoon on ohjelmoitu tekoäly, jota käytetään esimerkiksi ihmisen kasvontunnistuksessa. Tekoälyn avulla pystytään suorittamaan erilaisia toimintoja kameralla kerättävän datan avulla. Koska laskenta tapahtuu suoraan kamerassa, niin laskenta voidaan tehdä suoraan edgessä tai siirtää

pilvipalveluun. Tekoälyä sisältävän kameran ympärille rakennettiin myös valvontaohjelma, jolla pystytään seurata kameran toimintaa ja sijaintia. (Liikenne- ja viestintävirasto Traficom, 2021-c).

6.3 5G:n tuomat mahdollisuudet liikenteessä

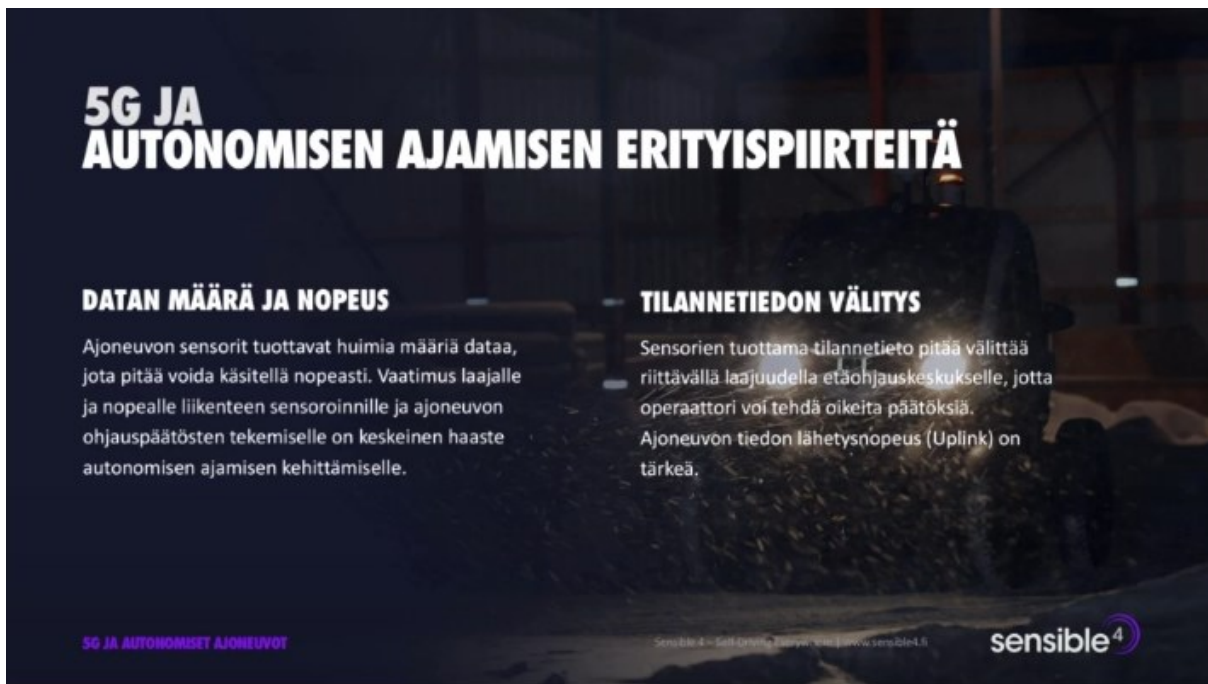
Tulevaisuuden toimiva liikenne -verkostossa Traficom (Liikenne- ja viestintävirasto) vastaa Suomessa siitä, että liikennejärjestelmästä tulee pitkällä tähtäimellä turvallisempaa, toimivampaa ja kestävämpää. Traficomin asiantuntijavastuulla on edistää mm. liikkumisen palveluita, automaatiota, markkinoiden toimivuutta ja tiedon hyödyntämistä. Liikennejärjestelmä koostuu tiedosta, palveluista ja verkoista. Traficom kehittää liikennejärjestelmää yhteistyössä eri sidosryhmien kanssa ja 5G-tekniikan rooli tämän järjestelmän kehityksessä on merkittävä. (Liikenne- ja viestintävirasto Traficom, 2021-d).

6.3.1 5G ja autonomiset ajoneuvot

Sensible 4 on ohjelmistoyritys, joka kehittää autonomisen ajamisen ratkaisuja, jotka toimivat kaikissa sääolosuhteissa. Autonominen ajaminen määritellään viiteen eri tasoon, joissa ensimmäisellä tasolla ihminen ohjaa ajoneuvoa täysin ilman automaatiota ja viidennellä tasolla ajoneuvo ohjaa itseänsä ilman ihmisen avustusta. Sensible 4 kehittää palveluita, missä ajoneuvo on lähes täysin automatisoitu. Nelostason autonomiassa auto pystyy ajamaan itsenäisesti ja sen kohdatessa erikoistilanteen, ohjataan autoa etäohjauksenkeskuksen avulla. (Liikenne- ja viestintävirasto Traficom, 2021-e).

Autonominen ajaminen vaatii mobiiliverkolta suurta datan käsittelykykyä ja laskentanopeutta. Autoissa on suuri määrä erilaisia sensoreita, jotka tuottavat paljon dataa. Näiden tietojen avulla tietokoneet ja ohjelmistot muodostavat kuvan, jonka pohjalta auto tekee reaaliaikaisesti ajopäätöksiä. Jotta ajoneuvo pystytään ottamaan haltuun myös etänä, niin tieto pitää saada siirrettyä etävalvontaan. Tämän vuoksi uplink (tiedonsiirto internetin suuntaan) nopeuden tarvitsee olla erittäin nopea. Autonomisen ajamisen erityispiirteet esitetään kuvassa 19. (Liikenne- ja viestintävirasto Traficom, 2021-e).

Kuva 19. 5G ja autonomisen ajamisen erityispiirteet (Liikenne- ja viestintävirasto Traficom, 2021-e).



5G-verkot ovat viiveeltään lyhyempiä, mikä mahdollistaa sen, että reaaliaikaisuus toteutuu merkittävästi paremmin verrattuna aikaisempiin sukupolviin. 5G:n tähtäimenä on myös pienentää katvealueita, jolloin saadaan luotettavampi yhteys ajoneuvosta internetin suuntaan. Uuden verkkoteknologian avulla saadaan myös monipuolisempaa tilannekuvaa ajoneuvon ympäriltä etähallintakeskukseen, koska se tarjoaa verkon käyttäjälle huomattavasti nopeamman kaistan. (Liikenne- ja viestintävirasto Traficom, 2021-e).

On myös mietitty muita mahdollisuuksia 5G:n hyödyntämisessä osana autonomista ajamista. Reunalaskennan (Edge Computing) avulla voitaisiin laskea sensoreiden keräämää dataa ajoneuvon ulkopuolella, esimerkiksi matkapuhelinverkkoon sijoitetulla kiinteällä laskentavoimalla. Tämä mahdollistaisi sen, että data olisi jo valmiiksi verkossa ja tietoa olisi mahdollista jakaa myös liikenteen muille osapuolille. (Liikenne- ja viestintävirasto Traficom, 2021-e).

6.3.2 5G ja merenkulku

Projektin tavoitteena oli automatisoida Kiinan Qingdaon satamassa erilaisia asioita ja lisätä myös etäohjausta sinne. Valokuitu olisi tarpeeksi nopea ratkaisu tähän käyttötarkoitukseen, mutta se ei

tarjoa liikkuville päätelaitteille sopivaa alustaa. Myöskään WiFi- ja 4G -verkot eivät tarjonneet tarpeeksi hyvää alustaa tähän käyttötarkoitukseen. STS (Ship to Shore) -nosturit nostavat kontteja aluksilta ja näiden etäohjaukseen tarvittiin ratkaisu. (Liikenne- ja viestintävirasto Traficom, 2021-f).

Nosturiin asennettiin useampi HD-kamera, jotka lähettävät kuvaa etähallintapisteelle. Kuvan avulla pystytään selvittämään, missä asennossa alus ja kontit ovat. Etäohjauksessa nosturista välittyvän viiveen vaatimus tuli olla alle 18ms, koska käyttötarkoitusta varten on reagointiajan oltava mahdollisimman pieni. Useamman HD-tasoisien kameran videon lähetys samanaikaisesti vaatii mobiiliverkkoyhteydeltä paljon kaistanopeutta. 5G-teknologia tarjosi ratkaisun näihin molempiin ongelmiin. Projektin tuloksena palkkakulut laskivat 70 prosenttia ja tällä hetkellä nostureiden ohjaus tapahtuu etäohjauksella. Projektin toteutusvaiheet esitetään kuvassa 20. Satamassa on myös suunniteltu myös muiden toimintojen automatisointia 5G-verkon avulla. (Liikenne- ja viestintävirasto Traficom, 2021-f).

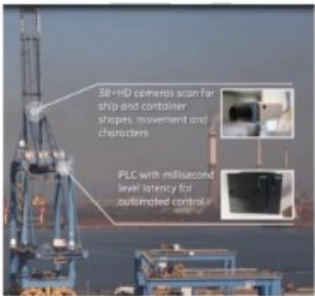
Kuva 20. Qingdaon satamassa tehdyn projektin eri toteutusvaiheet (Liikenne- ja viestintävirasto Traficom, 2021-f).

5G Automated Port

The challenge
Automatic & remote operations are key to efficiency. Fiber is expensive and not flexible for moving cranes. Today WIFI and 4G cannot provide the needed bandwidth and latency features

Technology used
5G provides the needed low latency for PLC control and high bandwidth for video transmission from 30+ cameras on each crane. Fiber ruled out due to mobility restrictions.

Results
STS crane successfully connected by Ericsson 5G and container lifting performed over 5G from remote operation room in production port. 70% savings in labor costs. World's first case. The vision is one 5G network to support all automatic port scenarios: STS crane, RTG crane, AGV, PTT, massive IoT, etc.

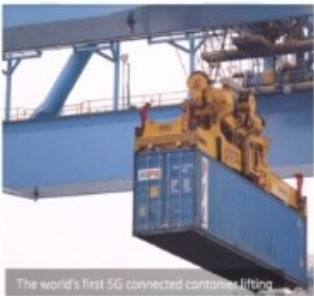


30+ HD cameras scan for ship and container shapes, movement and characters

PLC with millisecond level latency for automated control

Hybrid transmission over 5G

- 30+ HD cameras in uplink
- PLC control traffic with <18ms low latency



The world's first 5G connected container lifting

The world's first container lifting supported by 5G in production port

Partners:



ERICSSON China UNICOM 中国联通 ZPMC 青島港 PORT OF QINGDAO

Tutkimuspuolella 5G:n ja merenkulun alalla on käynnissä Sea for Value – fairway -projekti.

Projektissa tutkitaan älyväylää, sekä etäluotsausta ja siinä tehdään myös käytännön kokeita näihin liittyen. Projektissa on tarkoitus tarjota ratkaisua liittyen merenkulun digitalisaatioon,

palveluinnovaation ja ylipäättänsä tiedonkeruuseen. Kaikki nämä ratkaisut, mitä projektissa tullaan kehittämään, ovat oleellisia merenkulun autonomisointia ajatellen. Tässä 5G näyttelee isoa roolia sen ominaisuuksien vuoksi. (Liikenne- ja viestintävirasto Traficom, 2021-f).

7 Pohdinta

Työn tavoite oli tutkia 5G:n tuomia uudistuksia verkkoteknologiaan ja siitä saatavia hyötyjä. Tavoitteena oli myös selvittää lukijalle matkapuhelinverkon toimintaa perustasolla ja osoittaa millaisia uudistuksia 5G-teknologia tuo matkapuhelinverkkoon.

Opinnäytetyötä aloittaessani olin epäileväinen 5G-verkon käyttökohteiden suhteen. Mietin mihin kaikkiin käyttötarkoituksiin 5G-teknologiaa voidaan hyödyntää. Ajattelin asiaa kuluttajan kannalta ja vertasin käyttötarkoituksia aikaisempiin verkkosukupolviin. Aikaisemmissa verkon sukupolvissa on käytetty mobiililaajakaistaa lähinnä älypuhelimissa, tableteissa ja mobiilireitittimissä.

Opinnäytetyön aikana selvisi, että 5G-teknologialle on todellinen tarve jo pelkästään datamäärän kasvun vuoksi. Lisäksi pieniviiveisyys ja nopeammat datayhteydet mahdollistavat eri käyttötapauksia esimerkiksi videotekniikan ja tekoälyn osa-alueilla. 5G-verkko mahdollistaa myös lukemattomia käyttötarkoituksia etenkin IoT-laitteiden kohdalla.

IoT-laitteissa nousee esiin kysymys laitteiden tietoturvasta. Kaikki laitteiden valmistajat eivät pysty suojaamaan laitteita asianmukaisella tavalla. Näitä on mahdollista käyttää erilaisten arkaluontoisten tietojen keräämiseen ja kyberhyökkäyksiin. Myöskään kuluttaja ei välttämättä ymmärrä vaihtaa oletussalasanaa IoT-laitteeseen. Tähän tarvitaan erilaisia säännöksiä myös viranomaistaholta. IoT-laitteisiin olisi mahdollista kehittää esim. viranomaistahon myöntämä tietoturva sertifikaatti, jonka aitouden pystyisi varmistamaan logistiikassa hyödynnettävän blockchain-teknologian avulla.

Lopputuloksena tutkimus onnistui ja työssä päästiin tutkimaan kattavasti matkapuhelinverkkoteknologian eri alueita. Tulevaisuudessa tulemme näkemään kykeneekö 5G-teknologia tarjoamaan riittävän alustan esimerkiksi täysin autonomisille ajoneuvoille.

Lähteet

- Elisa. (n.d.). *Elisan mobiiliverkon nopeudet*. Haettu 30.11.2020 osoitteesta
<https://elisa.fi/asiakaspalvelu/aihe/matkapuhelinliittymat/ohje/verkon-nopeudet/>
- Holma, H. (2020). *5G Technology: 3GPP New Radio*. John Wiley & Sons, Incorporated.
<https://ebookcentral-proquest-com.ezproxy.hamk.fi/lib/hamk-ebooks/reader.action?docID=5988980>
- Holma, H., Ratasuk, R., & Lauridsen, M. (2020). *5G Technology: 3GPP New Radio*. John Wiley & Sons, Incorporated.
<https://ebookcentral-proquest-com.ezproxy.hamk.fi/lib/hamk-ebooks/reader.action?docID=5988980>
- Holma, H., Toskala, A., & Nakamura, H. (2020). *5G Technology: 3GPP New Radio*. John Wiley & Sons, Incorporated.
<https://ebookcentral-proquest-com.ezproxy.hamk.fi/lib/hamk-ebooks/reader.action?docID=5988980>
- Holma, H., Toskala, A., Nakamura, H., & Uitto, T. (2020). *5G Technology: 3GPP New Radio*. John Wiley & Sons, Incorporated.
<https://ebookcentral-proquest-com.ezproxy.hamk.fi/lib/hamk-ebooks/reader.action?docID=5988980>
- Kilkki, K. (2019). *Mobiiliverkot ja langaton tiedonsiirto. Informaatioteknologian perusteet*. Haettu 10.12.2020 osoitteesta
https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/889530/mod_resource/content/1/Luku%205%20Mobiiliverkot%20ja%20langaton%20tiedonsiirto.pdf
- Learn Engineering. (12.19.2018). How does your mobile phone work? [video]. YouTube.
https://www.youtube.com/watch?v=1JZG9x_VOWA
- Liikenne- ja viestintävirasto Traficom. (23.4.2021-a). Traficom erityisasiantuntija Markus Mettälä: *5G ja tekoäly*. [webinaari]. YouTube.
https://www.youtube.com/watch?v=g_eMFSWNhxxw&t=1m11s
- Liikenne- ja viestintävirasto Traficom. (23.4.2021-b). Airbus strategisen markkinoinnin johtaja Tapio Savunen: *5G ja tekoäly*. [webinaari]. YouTube.
https://www.youtube.com/watch?v=g_eMFSWNhxxw&t=36m32s

Liikenne- ja viestintävirasto Traficom. (23.4.2021-c). Finwe toimitusjohtaja Juha Kela: *5G ja tekoäly*. [webinaari]. YouTube.

https://www.youtube.com/watch?v=g_eMFSWNhxx&t=55m47s

Liikenne- ja viestintävirasto Traficom. (22.4.2021-d). Traficom verkostojohtaja Asta Tuominen: *5G:n mahdollisuudet liikenteessä*. [webinaari]. YouTube.

<https://www.youtube.com/watch?v=ZhMI2QvDfHU&t=2m46s>

Liikenne- ja viestintävirasto Traficom. (22.4.2021-e). Sensible 4 Technical marketing manager Tuomas Sauliala: *5G:n mahdollisuudet liikenteessä*. [webinaari]. YouTube.

<https://www.youtube.com/watch?v=ZhMI2QvDfHU&t=41m10s>

Liikenne- ja viestintävirasto Traficom. (22.4.2021-f). Ericsson NomadicLab master researcher Patrik Salmela: *5G:n mahdollisuudet liikenteessä*. [webinaari]. YouTube.

<https://www.youtube.com/watch?v=ZhMI2QvDfHU&t=49m55s>

Liikenne- ja viestintävirasto Traficom Kyberturvallisuuskeskus. (18.6.2019). *Selvitys 5G:n kyberturvallisuudesta*.

<https://www.traficom.fi/sites/default/files/media/file/Selvitys%205Gn%20kyberturvallisuudesta%20yhteenveto.pdf>

MIMO. (7.3.2018). Wikipedia-artikkeli.

<https://fi.wikipedia.org/wiki/MIMO>

Penttinen, J. (2019). *5G Explained Security and Deployment of Advanced Mobile Communications*. John Wiley & Sons, Incorporated.

<https://ebookcentral-proquest-com.ezproxy.hamk.fi/lib/hamk-ebooks/reader.action?docID=5721174#>

Toskala, T. & Poikselkä, M. (2020). *5G Technology: 3GPP New Radio*. John Wiley & Sons, Incorporated.

<https://ebookcentral-proquest-com.ezproxy.hamk.fi/lib/hamk-ebooks/reader.action?docID=5988980>