



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Petri Lamberg

5G-teknologiat ja niiden käyttötapaukset

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Tieto- ja viestintäteknikka

Insinöörityö

3.5.2021

Tekijä Otsikko	Petri Lamberg 5G-teknologiat ja niiden käyttötapaukset
Sivumäärä Aika	32 sivua 3.5.2021
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Tieto- ja viestintätekniikka
Ammatillinen pääaine	Mediatekniikka
Ohjaaja	Yliopettaja Jarkko Vuori
<p>Insinööriyössä tutkittiin mobiiliverkkojen historiaa ja 5G-verkkojen lähetysteknologioita. Työssä selvitettiin myös 5G-verkoissa käytettyjen taajuuksien ominaisuuksia eri materiaalien läpi. Insinööriyössä selvitettiin 5G:n käyttötapauksia ja niihin liittyvät vaatimuksia ja 5G-verkkojen infrastruktuurin rakentamisen haasteita. Työssä selvitettiin myös 5G-verkkoihin kohdistuvia tietoturvaan liittyviä ongelmia ja haasteita.</p> <p>Mobiiliverkot olivat aikoinaan analogisia verkkoja, joista ne ovat kehittyneet digitaalisiksi ja käyttävät paljon korkeampia aallonpituuksia saavuttaakseen nopeammat yhteydet. Korkeammilla taajuuksilla on ongelmansa, minkä takia 5G-verkot vaativat kirjon taajuuksia kaikille käyttötapauksilleen. Innovatiiviset lähetysteknologiat auttavat operaattoreita rakentamaan verkkoja ja saavuttamaan 5G:n asettamia vaatimuksia verkolle.</p> <p>5G on tulevaisuudessa arkipäivää autojen, kaupunkien, teollisuuden ja monien muiden käyttötapauksien yhteydessä. 5G tuo teollisuuden aloille ja kaupunkien keskustoihin huippunopeita yhteyksiä pienillä viiveillä, mikä parantaa ihmisten elämänlaatua kaupungeissa ja luo uusia mahdollisuuksia teollisuudessa.</p> <p>Työ tehtiin mielenkiinnosta 5G-verkkoihin ja niihin liittyviin teknologioihin. Työ toimii kattavana tietopakettina 5G-verkoista ja niiden teknologioista, käyttötapauksista ja vaatimuksista, ja sitä voidaan käyttää esimerkiksi opetusmateriaalina.</p>	
Avainsanat	5G, mobiiliverkot, käyttötapaukset

Author Title	Petri Lamberg 5G technologies and their use cases
Number of Pages Date	32 pages 3 May 2021
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Information and Communications Technology
Professional Major	Media Technology
Instructor	Jarkko Vuori, Principal Lecturer
<p>This Bachelor's Thesis studied the history of mobile communications in Finland and technologies associated with the transmission of 5G. The properties of radio waves through buildings and different materials used in 5G networks were also investigated. In this thesis the use cases of 5G were also studied with their most important requirements. This thesis also studied the challenges of building a 5G network and its infrastructure and the challenges of information security related to 5G.</p> <p>Mobile networks used to be analogue. From there they have developed into digital networks that use high frequencies to achieve higher speeds. High frequencies have their own problems and that is why 5G networks require a range of frequencies for all use cases.</p> <p>Innovative transmission technologies help operators build networks and help in achieving the set requirements for 5G.</p> <p>5G will be part of everyday in the future in cars, cities, industry, and many other use cases. 5G brings fast speeds with low latencies to city centers and different areas of industry improving the quality of life of people and bringing new opportunities to industry.</p> <p>This thesis was made because of interest towards 5G networks. This work is a broad information package of 5G networks and their technologies their use cases and requirements and it could be used as teaching material.</p>	
Keywords	5G, Mobile Networks, Use cases

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Matkapuhelinverkkoteknologioiden kehitys	2
2.1	0G-verkot	2
2.2	1G-verkot	2
2.3	2G-verkot	3
2.4	3G-verkot	3
2.5	4G-verkot	3
3	5G yleisesti	4
3.1	5G-standardi	6
3.2	5G-taajuuskaistat Suomessa	6
3.3	5G-taajuuksien ominaisuudet	7
4	5G-lähetysteknologiat	9
4.1	Ohjelmistopohjainen verkko	9
4.2	Verkkotoimintojen virtualisointi	10
4.3	Säteemuodostus ja massiivinen MIMO	12
4.4	Cloud-RAN-arkkitehtuuri	13
4.5	Verkon viipalointi	14
4.6	Dynaaminen spektrinjakaminen	15
5	5G:n käyttötapaukset ja vaatimukset	17
5.1	Huippunopea langaton laajakaista (eMBB)	18
5.1.1	eMBB-vaatimus 1: käyttäjän kokemaa tiedonsiirtonopeus	18
5.1.2	eMBB-vaatimus 2: spektritehokkuus	19
5.1.3	eMBB-vaatimus 3: liikkuvuus	19
5.1.4	eMBB-vaatimus 4: energiatehokkuus	20
5.2	Luotettava lyhyen viiveen kommunikaatio (URLLC)	20

5.2.1	URLLC-vaatimus 1: viive	20
5.2.2	URLLC-vaatimus 2: luotettavuus	21
5.3	Massiivinen koneiden välinen kommunikaatio (mMTC)	21
5.3.1	mMTC-vaatimus 1: yhteystiheys	22
5.3.2	mMTC-vaatimus 2: tiedonsiirtotiheys	22
6	5G-käyttötapaukset käytännössä	22
6.1	Älykäs kaupunki	22
6.2	Autot ja liikenne	23
6.3	Teollisuus	23
7	5G:n haasteet	24
7.1	Tietoturva	24
7.2	Infrastruktuuri	25
8	Yhteenveto	27
	Lähteet	28

Lyhenteet

0G	Nollannen sukupolven matkapuhelinverkkoteknologia.
1G	Ensimmäisen sukupolven matkapuhelinverkkoteknologia.
2G	Toisen sukupolven matkapuhelinverkkoteknologia.
3G	Kolmannen sukupolven matkapuhelinverkkoteknologia.
4G	Neljännän sukupolven matkapuhelinverkkoteknologia.
5G	Viidennen sukupolven matkapuhelinverkkoteknologia.
ARP	Autoradiopuhelin.
NMT	<i>Nordic Mobile Telephone</i> . Yhteispohjoismainen analoginen matkapuhelinverkko.
Roaming	Verkkovierailut ulkomailla.
GSM	<i>Global System for Mobile Communication</i> . Digitaalinen matkaviestinjärjestelmä.
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i> . Digitaalinen matkaviestinjärjestelmä.
LTE	<i>Long Term Evolution</i> . 4G standardi.
MIMO	<i>Multiple-Input and Multiple-Output</i> . Tietoliikennetekniikka, jossa käytetään lähetykseen ja vastaanottoon useampaa antennia.
DSS	<i>Dynamic Spectrum Sharing</i> . Tekniikka, jonka avulla operaattorit pystyvät hyödyntämään aiempaa LTE-tekniikkaa 5G:n kanssa.

mmWave	<i>Millimeter wave.</i> 24 Ghz–100 Ghz taajuusalue.
5G NR	<i>5G New Radio.</i> 5G standardin nimitys.
3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project.</i> Usean standardointijärjestön yhteistyöorganisaatio
C-RAN	<i>Cloud radio access network.</i> Pilveen perustuva verkkoarkkitehtuuri.
UE	<i>User equipment.</i> Käyttäjän laitteisto.
SDN	<i>Software defined networking.</i> Ohjelmistopohjainen verkko.
NFV	<i>Network function virtualization.</i> Verkkotoimintojen virtualisointi.
BBH	<i>Baseband hotel.</i> Tukiasema RRH:lle.
RRH	<i>Remote radio head.</i> Radiomasto.
eMBB	<i>Enhanced Mobile Broadband.</i> Huippunopea langaton laajakaista.
URLLC	<i>Ultra-reliable low-latency communication.</i> Luotettava lyhyen viiveen kommunikaatio.
mMTC	<i>Massive Machine Type Communications.</i> Massiivinen koneiden välinen kommunikaatio.
E2E	<i>End-to-End.</i> Kaikenkattava järjestelmä.
IoT	<i>Internet of things.</i> Esineiden Internet.

1 Johdanto

Viidennen sukupolven matkapuhelinverkot saapuivat Suomeen vuonna 2018, ja ne laajenevat uusiin kaupunkeihin ja niitä ympäröiviin alueisiin lähivuosina. 5G-teknologioita hyödyntäviä laitteita valmistetaan jatkuvasti enemmän, ja kuluttajia siirtyy 5G-verkkojen piiriin käyttäessään puhelimia tai 5G-päätelaitteita kotona. Uusia käyttötapauksia syntyy ja otetaan käyttöön yrityksissä ja teollisuuden eri osa-alueilla.

Tämän insinööriyön tarkoituksena on tutkia erilaisia käytössä olevia ja suunniteltuja 5G-verkkoihin liittyviä lähetysteknologioita ja käyttötapauksia ja vertailla 5G-verkkojen nopeuksia ja vasteaikoja aikaisempiin sukupolviin. Työ toimii kattavana tietopakettina, ja sitä voidaan käyttää esimerkiksi opetusmateriaalina.

Operaattorit markkinoivat 5G-verkkoja jatkuvasti uusiin käyttötapauksiin, joista esimerkeinä ovat älykkäät kaupungit ja älyliikenne. Lyhyt viive mahdollistaisi etäohjauksen myös teollisuuslaitoksissa, maataloudessa, satamissa, kaivoksissa ja logistiikassa.

Työssä käydään myös hieman läpi matkapuhelinverkkojen historiaa Suomessa.

2 Matkapuhelinverkkoteknologioiden kehitys

Maailmalla on kehitetty ja ollut käytössä monia erinimisiä, mutta lähes samoihin teknologioihin perustuneita verkkoja jo ennen kuin ne on otettu Suomessa käyttöön. Työssä on tarkoituksena käydä läpi vain Suomessa käytössä olleita aikaisempia mobiiliverkkoteknologioita ja keskittyä enemmän uusimpiin teknologioihin ja käyttötapauksiin. Ensimmäiset matkapuhelinverkkosukupolvet 0G ja 1G olivat analogisia. Ensimmäinen digitaalinen sukupolvi on 2G, jonka jälkeen kaikki sukupolvet ovat olleet digitaalisia.

2.1 0G-verkot

Autoradiopuhelin eli ARP otettiin käyttöön Suomessa vuonna 1971. ARP-verkko toimi 150 MHz:n taajuusalueella, ja sen käyttöön liittyi monia rajoitteita. Lähetysteho tukiasemilla oli 50 W ja puhelimilla noin 1 W. ARP-verkkoa käytettäessä vastaanottajan sijainti täytyi tietää tukiaseman tarkkuudella, eikä liikkuminen toisen tukiaseman piiriin kesken puhelun ollut mahdollista. Lähetys ja vastaanotto ei myöskään ollut mahdollista yhtäaikaista. ARP-verkkojen kuuluvuus ja läpäisykyky oli erinomainen todella matalan taajuusalueen takia. [1.]

2.2 1G-verkot

Nordic Mobile Telephone eli NMT otettiin käyttöön Suomessa maaliskuussa 1982. NMT-verkko toimi 450 MHz:n taajuusalueella ja myöhemmin 900 MHz:n alueella. NMT-puhelinten lähetystehot nousivat 15 W verrattuna ARP-puhelinten 1–5 W:iin, ja tukiasemien lähetystehot laskivat 20, 5 tai 1,25 W verrattuna ARP-tukiasemien 50 W:iin. [3.] NMT oli maailman ensimmäinen kansainvälinen täysautomaattinen matkapuhelinverkko, jonka avulla pystyi soittamaan toiseen maahan, ja se tarjosi käyttäjilleen roaming-ominaisuuden ilman erikoisjärjestelyjä. Täysin automaattisen verkon ansioista soittajan ei itse tarvinnut tietää vastaanottajan sijaintia. NMT-verkkojen kuuluvuus ja läpäisykyky oli edelleen huippuluokkaa matalan taajuusalueen takia. Kuten ARP myös NMT oli analoginen ja salaamaton, joten puheluita pystyttiin salakuuntelemaan erittäin helposti. [4; 5.]

2.3 2G-verkot

Global System for Mobile Communication eli GSM saapui Suomeen vuonna 1991, kun Suomen Pankin johtaja Harri Holkeri soitti maailman ensimmäisen GSM-puhelun. Digitaalinen GSM korvasi kokonaan vanhan analogisen NMT-verkon vuonna 2002 koko Suomessa. Digitaalisuus toi myös turvallisuutta puheluihin GSM-verkossa. Aikaisempiin analogisiin verkkoihin verrattuna GSM-puheluita oli paljon vaikeampi salakuunnella A5-algoritmiin pohjautuvan salauksen myötä. GSM toimi taajuusalueilla 900 ja 1800 MHz. GSM-matkapuhelinten lähetysteho oli keskimäärin 0,125–0,25 W ja GSM-tukiasemien 0,3–50 W:n välillä. Matkapuhelinten ja niiden käytön yleistyessä syntyi myös huoli tukiasemien ja puhelinten säteilemien radioaaltojen haitallisuudesta. [6; 7.]

2.4 3G-verkot

Puhelinten kehittyessä, värillisten näyttöjen ja kameroiden yleistyessä asettui verkoille uusia vaatimuksia datansiirtoon. Vuonna 2004 Suomessa otettiin käyttöön Universal Mobile Telecommunications System eli UMTS-verkot, jotka kattoivat aluksi vain pääkaupunkiseudun ja suuret kaupungit. UMTS oli alusta asti suunniteltu tiedonsiirron mahdollistamiseksi suuremmilla nopeuksilla, kuin mitä GSM-verkoilla oli mahdollista. UMTS-verkkojen suurimmaksi tiedonsiirtonopeudeksi luvattiin jopa 2 Mbps -tiedonsiirtonopeutta. Suurimman 2 Mbps -nopeuden saavuttamiseksi vaadittaisiin kuitenkin tukiasemaan suora näköyhteys ja vain muutamia käyttäjiä. UMTS-verkot toimivat kattavalla 900 MHz:n ja nopealla 2100 MHz:n taajuusalueella. Lähetystehot olivat lähes samat puhelimilla ja tukiasemilla kuin GSM-tekniikalla. [2; 8.]

2.5 4G-verkot

Ensimmäinen Long Term Evolution eli LTE-verkko avattiin Suomessa Elisan toimesta vuonna 2010. LTE-verkot toimivat Suomessa 900:n, 1800:n ja 2600:n MHz:n taajuuksilla. LTE-verkot mahdollistivat MIMO-tekniikan hyödyntämisen, missä lähetykseen ja vastaanottoon käytetään useampaa antennia. MIMO-tekniikka mahdollistaa säteenmuodostuksen ja tilallisen limityksen käytön. Tilallisen limityksen (Spatial Multiplexing) avulla saadaan aikaiseksi parempi signaali-kohinasuhde (SNR), ja säteenmuodostuksen avulla

pystytään käsittelemään suurempaa kapasiteettia. LTE-tekniikka mahdollistaa jopa 300 Mbps -tiedonsiirtonopeuden matalalla 5 ms:n viiveellä. Myöhemmällä ja kehittyneemmällä LTE Advanced -standardilla on MIMO-tekniikalla mahdollisuus saavuttaa jopa 1 Gbps -tiedonsiirtonopeus. LTE-tekniikka mahdollistaa tiedon lähetyksen ja vastaanoton myös liikkeessä, esim. juna- tai autoliikenteessä jopa nopeuteen 350 km/h asti. [9; 10; 11.]

3 5G yleisesti

Vuonna 2021 on arvioitu, että 10 miljardia laitetta on yhteydessä mobiiliverkkoihin maailmanlaajuisesti. Mobiiliverkoilta vaaditaan enemmän yhteyksiä, kaistanleveyttä, kapasiteettia ja latausnopeutta. Maailmanlaajuisen dataliikenteen määrän arvioidaan nousemaan 49 eksatavuun kuukaudessa vuoden 2021 aikana. Seuraavan sukupolven 5G mahdollistaa aikaisempiin teknologioihin verrattuna nopeammat yhteydet, pienemmän viiveen, paremman tietoturvan ja suuremman energiatehokkuuden. [19.]

Kuten edeltäjänsä 5G-verkot ovat matkapuhelinverkoja, jotka jaetaan maantieteellisiin alueisiin, joita kutsutaan soluiksi. Uusien 5G-verkkojen tuomat suurimmat hyödyt ovat suurempi kaistanleveys, joka mahdollistaa tiedonsiirtonopeudet aina 10 Gbps asti. Äärimmäisen suurien nopeuksien ansiosta 5G:tä ei tulla käyttämään pelkästään älypuhelinien kanssa, vaan on oletettavaa, että se korvaa myös laajakaistayhteyksiä alueilla, joissa valokuituyhteyksien rakentaminen on liian kallista. Suuret tiedonsiirtonopeudet johtuvat aikaisempia mobiiliverkkoteknologioita korkeataajuisemmasta säteilystä. Läpäisykyky erilaisten esteiden, kuten ihmisten, rakennusten jopa puiden läpi on kuitenkin erittäin huono, mikä johtaa pienempien solujen käyttöön hyvän kuuluvuuden varmistamiseksi. 5G-verkkojen solujen kanssa joudutaan aina tekemään jonkinlainen kompromissi latausnopeuden, matkan ja kuuluvuuden välillä (kuva 1). [25; 33; 34.]

	4G	5G		
		Matalat taajuudet (700 MHz)	Keski-taajuudet (3,5 GHz)	Korkeat taajuudet (26 GHz)
Tiedonsiirto (download)	5-300 Mbit/s	"kymmeniä Mbit/s"	-1 Gbit/s	-10 Gbit/s
Tiedonsiirto (upload)	5-30 Mbit/s	-	-1 Gbit/s	-10 Gbit/s
Latenssi (ms) (pääte-laite - tukiasema)	> 10 ms	> 1 ms	> 1 ms	> 1 ms
Tukiaseman kantama "esteettömässä metsäisessä väyläympäristössä"	2 -15 km	2 - 15 km	500m - 2 km	30 - 300 m
Tuki verkon viipaloinnille	-	✓	✓	✓

Kuva 1. 5G:n eri taajuuksien ominaisuudet verrattuna 4G:hen [22].

Aikaisemmat mobiiliverkkosukupolvet olivat kiinteitä, vakiotehoisia ja -taajuisia, mutta 5G tuo uusia tapoja ottaa verkkoja käyttöön, kirjon taajuuksia ja edistyneitä aaltomuotoja yhdistettynä moduloiviin algoritmeihin.

Älykkäiden laitteiden leviäminen ja dataliikenteen eksponentiaalinen kasvu aiheuttavat suuren kuorman nykyisille mobiiliverkoille. Nykyisten verkkojen kapasiteetin lähestyessä niiden fyysisiä rajoja ovat operaattorit yrittäneet vastata kysyntään rakentamalla perinteisiä tukiasemia antenneineen. Samalla ne ovat luoneet monimutkaisen rakennelman heterogeenisiä verkkoja. Perinteisten verkkojen korvaaminen uusilla arkkitehtuureilla, esim. C-RAN (sivu 9), ratkaisee operaattorien ongelmia, joita ovat ylläpidon ja virrankulutuksen kustannukset ja verkkojen laajentaminen kustannustehokkaasti. [19.]

5G-verkot mahdollistavat ennenkuulumattomia nopeuksia mobiiliverkoille, joustavuutta ja uusia käyttötapoja, jotka tuovat uusia palveluita ja liiketoimintamahdollisuuksia yrityksille eri toimialoilla. Kuluttajat pystyvät myös hyödyntämään 5G-verkkoja monella tapaa, esimerkiksi laajakaista (eMBB), viihde ja suoratoisto ja paremmat yhteydet.

Nykyiset mobiiliverkot eivät pysty käsittelemään laajaa käyttötapausten kirjoa omine tarpeineen. Verkon viipalointi mahdollistaa 5G-verkkojen viipaloinnin moneen eri virtuaaliseen verkkoon, mikä mahdollistaa tietyn verkon toimintojen muokkaamisen helposti vastaamaan käyttötapausten tiettyä tarvetta. [21.]

Suomen kannalta tärkeimpiä käyttötapauksia 5G-teknologioille ovat älyliikenne, älykäs teollisuus ja terveydenhuolto, älykkäät kaupungit sekä media ja viihdeteollisuus. [12.]

3.1 5G-standardi

5G tai 5G NR (5G New Radio) on 3rd Generation Partnership Projectin (3GPP) kehittämä ilmarajapintastandardi viidennen sukupolven mobiiliverkkoteknologialle, ja se mahdollistaa huippunopeat yhteydet korkeilla taajuuksilla. 3GPP on ollut mukana luomassa standardeja vuodesta 1998, aina 2G-GSM-verkoista asti. 3GPP:n tarkoitus on luoda tekniset määritelmät verkolle ja sen osa-alueille. Verkot ovat jatkuvasti kehittyviä, ja uusia ominaisuuksia tulee koko ajan. Uudet ominaisuudet verkoille tuodaan 3GPP:n julkaisujen muodossa. Julkaisu 15 toi mukanaan 5G NR -standardin ja tietyt siihen liittyvät ominaisuudet. 3GPP:n standardisointiprosessi on avoin ja yhdistää maailmanlaajuisesti mobiiliverkko-operaattoreita. Operaattorit pystyvät antamaan oman työpanoksensa standardia kehitettäessä. Standardin kehitys on erittäin laaja ja monimutkainen prosessi. [46; 47.]

3.2 5G-taajuuskaistat Suomessa

Euroopan komission osoittamat 5G-pioneeritaajuuskaistat ovat seuraavat:

1. 700 MHz

5G tällä taajuuskaistalla mahdollistaa maankattavan 5G-peiton toteuttamisen nopeuden ja lähetystehon kuitenkin pysyessä samana, kuin 4G:llä on mahdollista eli noin 100 Mbps. Samassa tukiasemaradiossa on mahdollista ajaa 4G- ja 5G-tekniikoita yhtä aikaa DSS-tekniikkaa käyttäen. [13.] Taajuuskaista huutokaupattiin vuonna 2016, ja kaistalla toimivat Suomessa DNA, Elisa ja Telia Finland [14].

2. 3,5 GHz

5G tällä taajuuskaistalla mahdollistaa jo huomattavasti 4G:tä suuremmat nopeudet, jopa 1 Gbps. Taajuuskaista huutokaupattiin vuonna 2018, ja kaistalla toimivat Suomessa Telia Finland, Elisa ja DNA. [14.]

3. 26 GHz

Kun 5G toimii mmWave-alueella, ovat jopa 10 Gbps -nopeudet mahdollisia [13]. 26 GHz:n alueen taajuuskaistojen huutokauppa päättyi 8.6.2020, ja voittajiksi päätyivät Elisa, Telia Finland ja DNA, kukin 7 miljoonan euron tarjouksella [15].

3.3 5G-taajuuksien ominaisuudet

Mobiiliverkkojen tiedonsiirtonopeudet kasvavat jatkuvasti, ja nopeampia yhteyksiä varten käytetään entistä korkeampia taajuuksia. Taajuuksien nostaminen tuo kuitenkin ongelmia kuuluvuudessa etenkin rakennuksien sisällä, mutta myös ulkona. 1–6 GHz:n taajuuksilla rakennukset rupeavat vaikuttamaan merkittävästi kuuluvuuteen. Nykyaikaisessa rakennussuunnittelussa nämä taajuudet otetaankin huomioon ja niitä varten rakennetaan esimerkiksi seiniin niin sanottuja RF-aukkoja, jotta taajuudet pääsisivät rakennuksiin sisälle mahdollisimman pienellä etenemisvaimennuksella. 1–6 GHz:n taajuuksia on tutkittu melko paljon, ja rakennuksien vaikutukset niihin ovat hyvin selvillä. Suurilla, yli 24 GHz:n taajuuksilla puut, ihmiset ja jopa sade saattavat vaikuttaa merkittävästi radioaallon etenemiseen, millä on suora vaikutus yhteyden luotettavuuteen ja käyttäjän kokemaan tiedonsiirtonopeuteen. Radioaaltojen etenemisvaimennusta mitataan desibeleinä [31; 32]. Etenemisvaimennuksen mallintamiseen eri materiaalien tai esineiden läpi on lukuisia eri matemaattisia malleja, joiden avulla verkon kattavuutta pystytään simuloimaan:

1. Alle 1 GHz

Alle 1GHz:n taajuuksien läpäisykyky on erinomainen, ja ne kuuluvat myös rakennuksien sisälle todella hyvin etenemisvaimeneman ollessa hyväksyttävällä tasolla. Alle gigahertsin taajuuksien päätavoitteina onkin suuri kantama ja luotettavuus esimerkiksi IoT-käyttötapauksia varten. [33; 34.]

2. 1–6 GHz

Taajuusalueella 1–6 GHz eri rakenteiden vaikutus alkaa vaikuttaa merkittävästi kuuluvuuteen rakennuksissa (kuva 2). 3,5 GHz:n taajuus tulee olemaan suosituin 5G-taajuus laajaa ja kattavaa eMBB-käyttötapausta varten. Materiaalista riippuen 1–6 GHz:n välillä olevien taajuuksien kuuluvuus sisätiloihin heikkenee jo merkittävästi. [33; 34.]

3. Yli 24 GHz (mmWave)

Yli 24 GHz:n taajuuksien haasteena on erittäin lyhyt aallonpituus, joka luonnostaan läpäisee rakennuksia (kuva 2), sisäseiniä, ihmisiä ja puita erittäin huonosti, ja jopa ilmankosteudella on merkittävä vaikutus millimetriaaltojen etenemisvaimenemaan. Mitä lyhempi aallon pituus, sitä huonommin se läpäisee mitään materiaalia. Materiaalien ominaisuuksilla on kuitenkin vaikutusta siihen, kuinka hyvin ne vaimentavat millimetriaaltojen läpäisyä: puu läpäisee paremmin kuin esimerkiksi lasi. Erittäin nopeisiin rakennuksien sisällä kuuluviin eMBB-yhteyksiin on erilaisia ratkaisuja, joita ovat esimerkiksi lähetystä vahvistavat antennit tai säteenmuodostuksella tiettyyn huoneeseen kohdistetut verkot. Käyttötapauksia tällaisille kohdistetuille verkoille on esimerkiksi konferenssihuone toimistorakennuksessa. [33; 34; 36.]

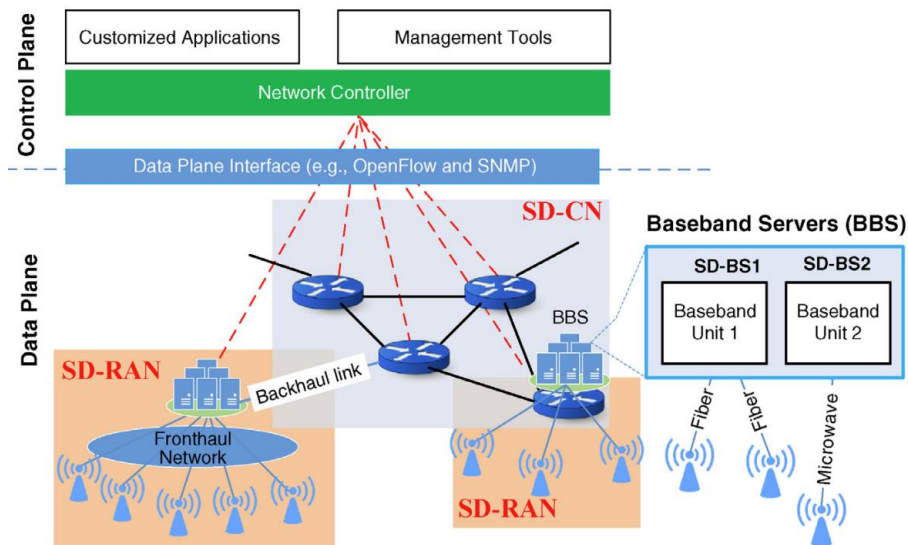
Frequency [GHz]	Minimum [dB]	Mean [dB]	Maximum [dB]	Standard Deviation [dB]
5	1	8.5	27	6.5
12	.5	9.5	23.5	5.5
25.5	3.5	14	32	6
32	2.5	17	40	7.5

Kuva 2. Eri taajuuksien etenemisvaimenema rakennukseen [34].

4 5G-lähetysteknologiat

4.1 Ohjelmistopohjainen verkko

Ohjelmistopohjainen verkko (SDN) on alun perin palvelinkeskuksiin kehitetty arkkitehtuuri ratkaisuna verkon mallin määrittämiseen ohjelmallisesti. Ohjelmistopohjaisissa verkoissa tavoitteena on hallinnan siirtäminen kytkimistä ohjelmistoon. Ohjelmistopohjaisessa verkossa on yleensä kolme tasoa, jotka ovat verkon käyttäjärjestelmä, virtualisointitaso ja ohjausohjelma. Ohjausohjelmalla on yksi tehtävä: muuntaa operaattorin käskyt pakettien virtasta verkossa toteen. Kun operaattorit haluavat muuttaa pakettien virtaa verkossa, vain ohjausohjelmaan tarvitsee tehdä muutoksia. Virtualisointitason tehtävä on luoda näkymä ohjausohjelmasta ja muuntaa se yksityiskohtaisemmaksi verkonlaajuiseksi näkymäksi verkon toiminnallisuuksista. [48.] Käyttäjärjestelmä ottaa ohjausohjelman pakettien virtaa kontrolloivat komennot ja virtualisointitason luoman verkonlaajuisen näkymän ja kartoittaa ne fyysisille kytkimille (kuva 3).



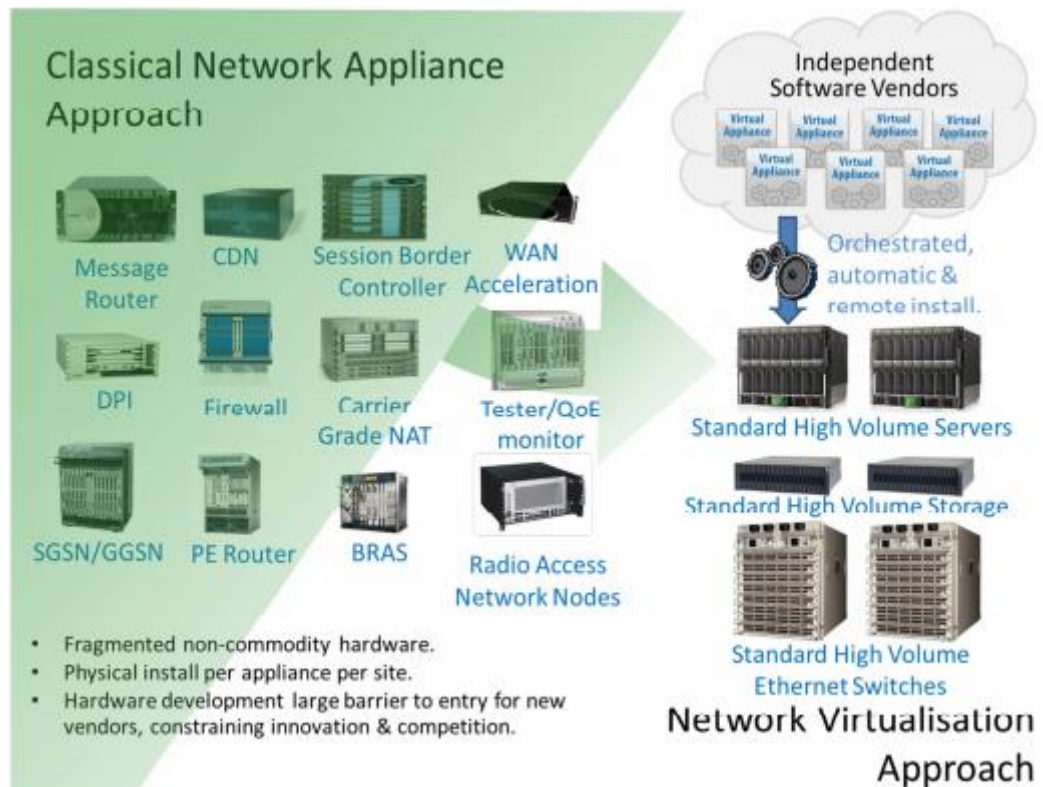
Kuva 3. Esimerkki ohjelmistopohjaisesta verkkoarkkitehtuurista 5G-verkossa. Ohjelmistopohjainen – Software Defined (SD). Ydinverkko – Core Network (CN). Radioverkko – Radio Access Network (RAN). [16.]

Ohjelmistopohjaisen verkon avulla operaattorit pystyvät helpommin ottamaan käyttöön uusia ominaisuuksia ja palveluja ja vastaamaan markkinoiden, käyttäjien tai yritysten kysyntään vaihtamatta laitteistoa. Ohjelmistopohjainen verkko mahdollistaa operaattoreille verkon muokattavuuden nopeasti tarpepohjaisesti. Ohjelmistopohjaisen verkon energiatehokkaiden protokollien käyttöönoton tulisi merkittävästi vähentää verkon käyttökustannuksia operaattoreiden näkökulmasta. Säästöjen lisäksi ohjelmistopohjaiset verkot mahdollistavat operaattoreille pilvipalveluihin pohjautuvat sovellukset, verkon toiminnan monitoroinnin, yhteysmuokattavuuden ja tunneloinnin. Ohjelmistopohjainen verkkoon pohjautuva mobiiliverkkoarkkitehtuuri antaa operaattoreille enemmän vapautta tasapainottaa eri verkon osa-alueita, kuten joustavuutta, suorituskykyä, luokittelua ja priorisointia. Ohjelmistopohjaisen verkon suurimmat hyödyt 5G:tä ajatellen ovat verkon muokattavuuden mahdollistaminen, automaatio ja uusien palveluiden luominen pilvessä. [16; 17; 48.]

4.2 Verkkotoimintojen virtualisointi

Verkkotoimintojen virtualisoinnin (NFV) konsepti perustuu perinteiseen tietotekniikassa ja palvelimissa käytettävään virtualisointiin, jossa yhdelle palvelimelle tai tietokoneelle virtualisoidaan käyttöjärjestelmä, sovellus tai prosessi. Verkkotoimintojen virtualisointi

pyrkii vähentämään tietyille toiminnoille erikoistunutta verkkolaitteistoa ja siirtämään mahdollisimman paljon niiden toiminnoista standardisoiduille palvelimille, kytkimille ja verkkolevyille (kuva 4). [37; 38.]



Kuva 4. Klassinen mobiiliverkkolaitteisto verrattuna standardisoitua laitteistoa hyödyntävään verkkotoimintojen virtualisointia käyttävään arkkitehtuuriin [38].

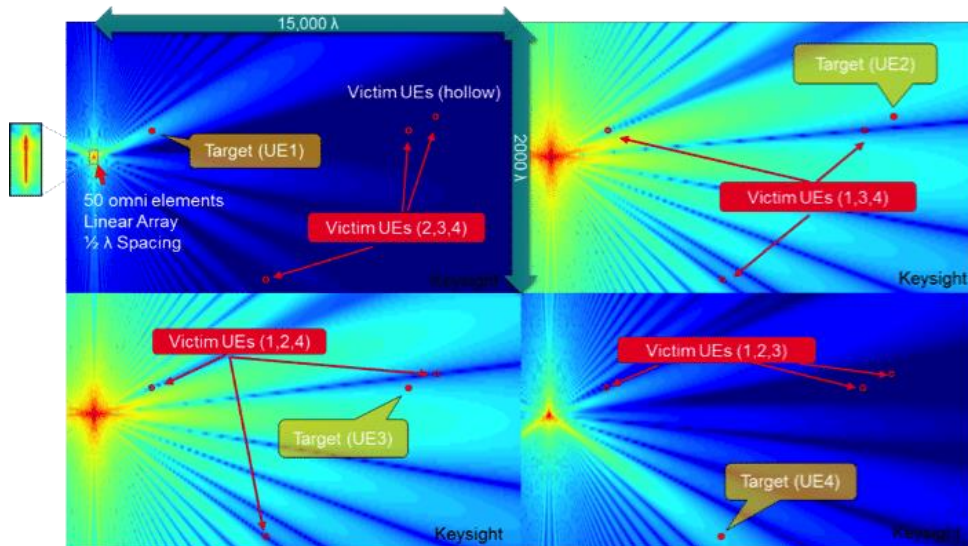
Ohjelmistopohjaiset verkot ovat verkkotoimintojen virtualisoinnin kanssa toisiaan erittäin hyvin täydentäviä teknologioita, mutta toisistaan täysin riippumattomia. Verkkotoimintojen virtualisointi mahdollistaa verkkojen laajentamisen maanpäällisestä sijainnista riippumatta, mikä on 5G-verkkoja ajatellen yksi sen merkittävimmistä hyödyistä. Verkkotoimintojen virtualisoinnin tavoitteena on muuntaa mahdollisimman moni verkon toiminto ohjelmalliseksi ja siirtää toimintoja pois laitteistolta. Ohjelmistopaketeiksi muunnetut verkko-toiminnot antavat operaattoreille joustavuutta mobiiliverkkojen toiminnassa ja hallinnassa. Virtualisointi mahdollistaa esimerkiksi virtuaalisten operaattoreiden toiminnan saman infrastruktuurin ja resurssien alla. Verkkotoimintojen virtualisointia hyödyntää esi-

merkiksi C-RAN-arkkitehtuuri (sivu 17). Ilman ohjelmistopohjaisia verkkoja ja verkkotoimintojen virtualisointia ei uusien 5G-verkkojen ominaisuuksien toteuttaminen olisi kannattavaa. [37; 38.]

4.3 Säteenmuodostus ja massiivinen MIMO

Jotta 5G-verkon vaatimukseen verkon tiheyden ja kapasiteetin kasvusta pystyttäisiin vastaamaan, on antennien määrän ja tiheyden myös kasvettava. Teknologian nimi tähän on MIMO. Massiivinen MIMO eroaa tavallisesta MIMO-tekniologiasta vain massiivisella määrällä antennia. 5G-tekniologia mahdollistaa suuremman määrän antennia MIMO-tekniologialla lyhyemmän aaltopituuden ansiosta, mikä mahdollistaa pienemmät antennit, mikä puolestaan johtaa antennien tiheyden kasvattamiseen. Säteenmuodostus ja massiivinen MIMO mainitaan yleensä yhdessä ja usein puhuttaessa 5G:stä. Termit ovat sidottuja toisiinsa, koska säteenmuodostus tarvitsee useampaa antennia toimiakseen ja useamman antennin asennukset hyödyntävät nykyään lähes aina MIMO-tekniologiaa. Nämä tekniologiat yhdessä mahdollistavat useiden käyttäjien huippunopean yhteyden yhtä aikaa luotettavalla yhteydellä. [43.]

Jotta voidaan saavuttaa todella nopea yhteys 5G-verkkojen avulla, joudutaan käyttämään korkeampia taajuuksia, kuten esimerkiksi 26 GHz. Näin korkeilla taajuuksilla ihmisen, puun tai minkä tahansa esteen vaikutus yhteyteen on erittäin merkittävä, mikä aiheuttaa tarvetta suunnata lähetystä jollakin tavalla kohti käyttäjää. Ratkaisuna tähän on säteenmuodostus ja massiivi-MIMO, joka käyttää yleensä suurta parillista määrää antennia ohjatakseen säteitä oikeaan suuntaan käyttäjää kohti. Säteenmuodostus tarkoittaa antenniparien ja aaltofysiikan avulla muodostettuja huippuja, joissa signaalin voimakkuus on käyttäjien kohdalla mahdollisimman suuri. Samalla kuitenkin luodaan laaksoja, joihin jotkut käyttäjät saattavat joutua (kuva 5). Laaksojen haitan minimoimiseksi käytetään esimerkiksi tekoälyä. Säteenmuodostus on todella energiatehokas tapa luoda käyttäjään nopea ja pieniviiveinen yhteys. [18; 43.]



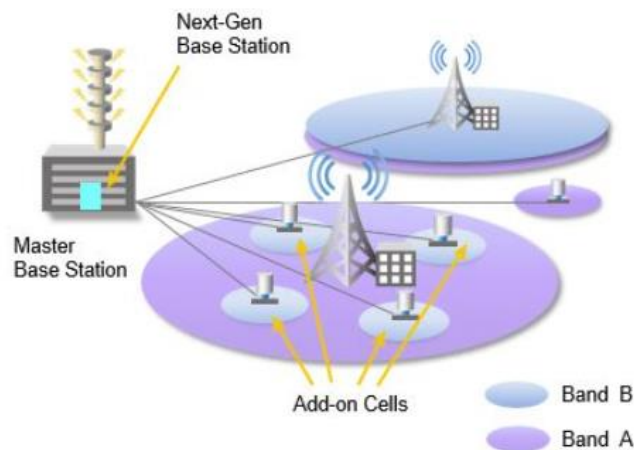
Kuva 5. Radiosignaalin kuvio simuloidussa massiivi-MIMO-lähetysessä neljälle käyttäjälle (UE) [18].

4.4 Cloud-RAN-arkkitehtuuri

Cloud-RAN tai C-RAN on edistysellinen mobiiliverkkoarkkitehtuuri, jonka avulla pystytään käyttämään uusia ominaisuuksia, joita ovat esimerkiksi verkkojen viipalointi ja multiplekointi suuria kapasiteetteja käsiteltäessä, niin että energiatehokkuus kuitenkin säilyy. C-RAN-arkkitehtuurin mahdollistavat ohjelmistopohjaiset verkot (SDN) ja verkkotoimintojen virtualisointi (NFV).

C-RAN siirtää perinteisen matkapuhelinverkon tukiasemat ja antennin toistensa välittömästä läheisyydestä keskitettyyn kantataajuusyksikköön (BBU) ja radioyksikköön (RRH). Fronthaul-kerros yhdistää BBU:n ja RRH:n toisiinsa esimerkiksi valokuitukaapeleita tai mmWave-radioyksiköitä käyttäen. Aktiivisilla antenneilla pystytään käyttämään valokuitukaapelia kantataajuusyksiköstä suoraan antenniin, kun taas passiivisella antenniratkaisulla radioyksikön tulee olla antennin välittömässä läheisyydessä suuren kaapelivaimennuksen takia korkeilla taajuuksilla. Radioyksikkö pitää sisällään vahvistimen, sekoittimen, suodattimen ja A/D-muuntimen, jonka avulla valokuidulla tuleva tieto muunnetaan antennille sopivaksi.

5G-verkon rakentaminen perinteiseen tapaan tukiaseman ja antennin yhdistelmällä tulisi erittäin kalliiksi ja kustannukset lisääntyisivät moninkertaisesti jokaisella lisätyllä tukiasemalla. C-RAN mahdollistaa operaattoreille laajojen 5G-verkkojen rakentamisen pienemmillä kustannuksilla tukiasemaa kohti. Käyttökustannukset laskevat myös, kun jokaisella antennilla ei ole omaa tukiasemaa BBU:n jakaessa monille antennille käskyjä jakamalla käyttökuorman mahdollisimman energiatehokkaasti ja sammuttamalla antennit, joihin ei kohdistu kuormaa. Kantataajuusyksikön (BBU) laajentaminen mahdollistaa radioyksiköiden lisäämisen ilman lisäinfrastruktuurin rakentamista kentälle (kuva 6). C-RAN mahdollistaa operaattoreille myös tehokkaan tarvepohjaisen resurssinhallinnan ja suuren mittakaavan antennijärjestelmän (LSAS) rakentamisen, mikä on välttämätöntä tulevaisuuden suuren mittakaavan 5G-verkkojen onnistumiselle. C-RAN auttaa myös radiotaajuuksien hallinnassa ja vähentää häiriöitä. [17;18.]

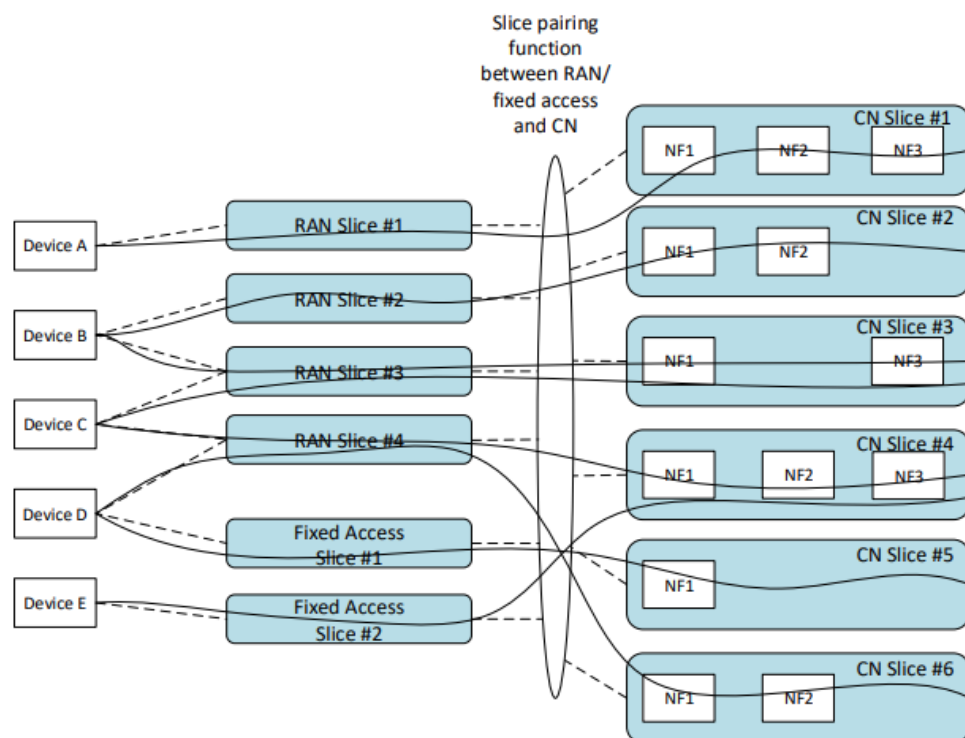


Kuva 6. C-RAN-arkkitehtuuriin perustuva mobiiliverkko, jossa monia (RRH) soluja on lisätty yhteen (BBU) yksikköön [20].

4.5 Verkon viipalointi

Verkon viipaloinnin mahdollistavat ohjelmallisesti määritetyt verkot (SDN) ja verkkotoimintojen virtualisointi (NFV). Verkon viipaloinnissa luodaan tietyille laitteille tai palveluille oma viipale verkosta vain sille tarvittavilla toiminnoilla (kuva 7). Verkon viipale on virtuaalinen toiminnan turvaava tietyn kapasiteetin verkosta varaava tunneli käyttötapauksen

toiminnoille eikä esimerkiksi tietty taajuus verkosta. Esimerkkejä viipaleista voi olla sensorit, matkapuhelimet ja autot. Sensoreiden viipale ei tarvitse nopeaa yhteyttä tai muihin kategorioihin liittyviä ominaisuuksia. Matkapuhelinten viipale tarvitsee enemmän nopeutta ja ominaisuuksia, joten se liitetään viipaleisiin, jotka käsittelevät esimerkiksi videon suoratoistoa, suuria latausnopeuksia ja puheluita. Verkon viipalointi varmistaa suoratoiston, suuren latausnopeuden ja puhelun toimivan saumattomasti yhtä aikaa laitteella niiden häiritsemättä toista. Verkon viipaloinnilla mahdollistetaan laitteiden, ominaisuuksien ja käyttäjien tiettyjen tarpeiden jatkuva toimivuus käyttötapauksen vaatimusten mukaisesti turvallisesti ja luotettavasti. [21.]



Kuva 7. Laitteiden paritus viipaloidussa verkossa. Verkkotoiminto – Network Function (NF). [21.]

4.6 Dynaaminen spektrinjakaminen

Dynaaminen spektrinjakaminen mahdollistaa saumattoman siirtymän 4G (LTE):n ja 5G (NR):n välillä. Koska uudet tulevat 5G-taajuudet ovat paljon korkeampia, 6 GHz tai yli 24 GHz, kuin nykyään käytössä olevat 4G-taajuudet, jotka ovat alle 3 GHz, aiheuttavat ne

ominaisuuksiltaan kuuluu ja etenemisvaimenemisen kanssa ongelmia, vaikka niiden avulla saavutetaan pienempiä viiveitä ja nopeampia tiedonsiirtonopeuksia. Matalampi taajuuskaista tarvitaan laajan 5G-verkon toteuttamiseksi, mutta ne ovat 4G-verkkojen käytössä. Ennen DSS:n kaltaisia teknologioita kaistoja varattiin uusille taajuuksille tietty määrä jo rajallisesta määrästä, mikä vei verkkokapasiteettia pois vanhojen taajuuksien käyttäjiltä. Tämä tarkoittaisi nykytilanteessa sitä, että 5G-verkkoa tarvitseva vähennys veisi kaistaa 4G-verkoilta, jotka ovat vielä tänä päivänä suuri enemmistö. [34; 42.]

Ratkaisuna aiemmin mainittuihin ongelmiin on Dynamic Spectrum Sharing (DSS) eli dynaaminen spektrinjakaminen. DSS on antenniteknologia, joka mahdollistaa LTE- ja 5G NR-taajuuksien yhtäaikaisen käytön samalla taajuuskaistalla. Jakamisen dynaamisuus mahdollistaa LTE- ja NR-taajuuksien jakamisen saman antennin alla verkkoliikenteen tarpeiden mukaisesti. DSS mahdollistaa 5G-verkon käyttöönoton saumattomasti häiritsemättä 4G-taajuuksien asiakkaita ja käyttäjiä, kuitenkin niin, että se palvelee 5G-verkkoa tarvitsevia tarpeen mukaan. Kun NR-taajuuksien käyttö kasvaa 5G-puhelinten yleistyessä, siirtyy kaistaa NR-taajuuksille enemmän dynaamisesti, kunnes LTE-taajuuksille ei tarvitse ehkä varata resursseja ollenkaan (kuva 8). Dynaaminen spektrinjakaminen hyödyttää myös 4G-verkon käyttäjiä paremmalla käyttökokemuksella optimoidun taajuuksien jakamisen ja paremman spektritehokkuuden avulla. [42.]

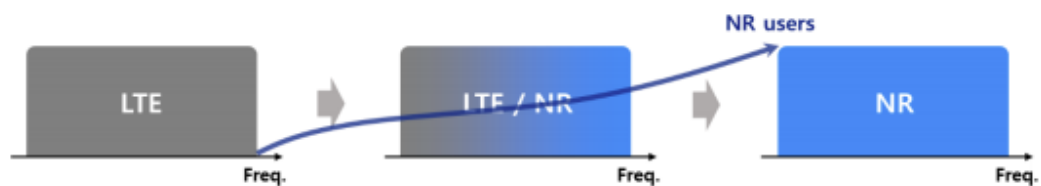


Figure 2. LTE-NR spectrum sharing

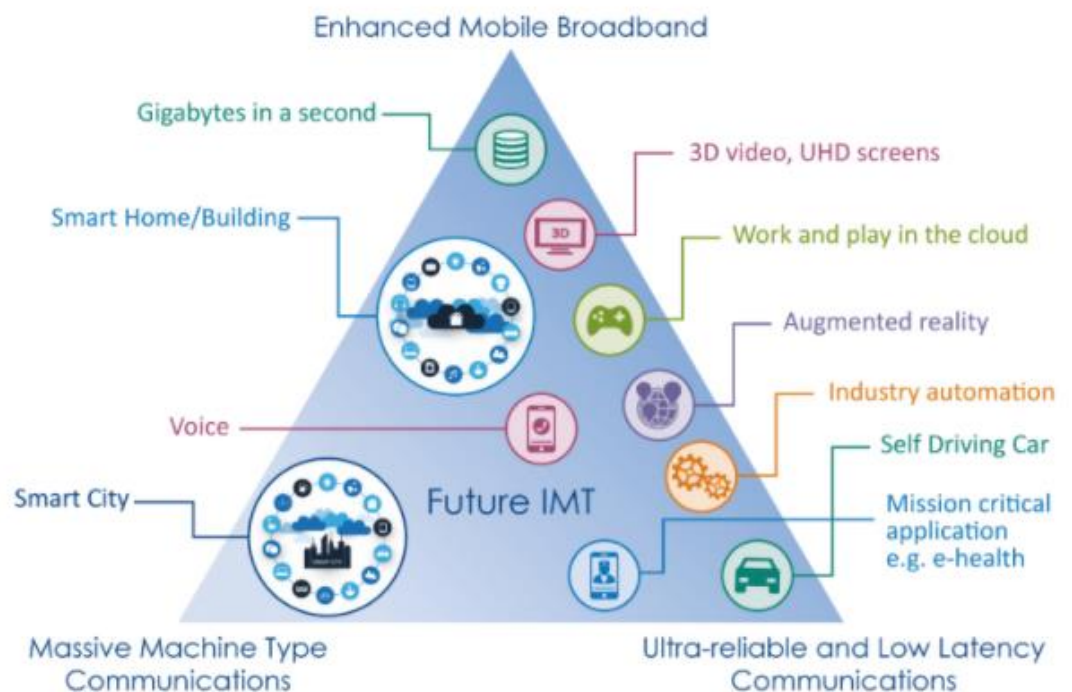
Kuva 8. Dynaaminen spektrin jakaminen LTE- ja NR-käyttäjien välillä [42].

5 5G:n käyttötapaukset ja vaatimukset

5G-verkkojen käyttötapaukset asettavat verkoille erilaisia vaatimuksia, joita ovat tiedonsiirtonopeus, kaistatehokkuus, liikkuvuus, viive, yhteyksien tiheys, käyttäjän kokemaa tiedonsiirtonopeus ja energiatehokkuus [26].

5G-verkot välittävät useampien taajuusalueiden käytöllä ja entistä suuremmilla kaistanleveyksillä entisiä sukupolvia enemmän tietoa. ITU-R (International Telecommunication Union) on määritellyt 5G-verkoille kolme käyttötapausta (kuva 9):

- huippunopea langaton laajakaista (eMBB, Enhanced Mobile Broadband)
- luotettava lyhyen viiveen kommunikaatio (uRLLC, Ultra-reliable low-latency communication)
- massiivinen koneiden välinen kommunikaatio (mMTC, Massive Machine Type Communications).



Kuva 9. 5G:n käyttötapaukset kategorioittain [24].

5.1 Huippunopea langaton laajakaista (eMBB)

5G-verkkojen yhteysnopeudet mahdollistavat yrityksille, kuluttajille ja talouksille nopeudeltaan jopa kymmenien Gbit/s langattomat laajakaistayhteydet. 5G-tekniikan mobiiliverkot haastavat ensimmäistä kertaa valokuituyhteyksien nopeuksia ilman, että taloyhtiöiden tai omakotitaloasukkaiden tarvitsisi maksaa kalliista valokuituinfrastruktuurista. Langattomat yhteydet mahdollistavat myös kerrostaloasukkaille siirtymisen suurempiin nopeuksiin nopeammalla aikataululla, kuin mitä kupariyhteyksien päivitykseen kuluisi. eMBB vaatii 5G-verkolta paljon. Käyttötapausena huippunopea langaton laajakaista on erittäin vaativa, koska se vaatii verkolta kaikkia osa-alueita erittäin paljon ja yhteystiheys ja viive jäävät hieman taka-alalle mutta eivät kuitenkaan täysin unohdu. [12; 22; 23; 26.]

5.1.1 eMBB-vaatimus 1: käyttäjän kokema tiedonsiirtonopeus

NGMN (Next Generation Mobile Networks Alliance) määrittelee käyttäjän kokeman tiedonsiirtonopeuden mittaamalla ne bitteinä sekunnissa verkon sovelluserroksessa. Vaaditun käyttäjän kokeman tiedonsiirtonopeuden tulisi kattaa 95 % verkon alueesta ja toimia 95 % ajasta. Vaadittu tiedonsiirtonopeus riippuu käyttötapauksesta ja sovelluksesta. Vaatimuksen tarkoituksena on olla vähimmäistaso, joka mahdollistaa käyttäjälle tarpeeksi laadukkaan kokemuksen tiettyyn käyttötapaukseen tai sovellukseen. 1 Gbit/s -nopeuden yhteyden tulisi olla saatavilla tiettyihin käyttötapauksiin, kuten sisätiloissa olevaan langattomaan laajakaistayhteyteen, ja 50 Mbit/s -nopeuden yhteyden tulisi olla saatavilla kaikkiin käyttötapauksiin kaikkialla kustannustehokkaasti (kuva 10). [25; 26.]

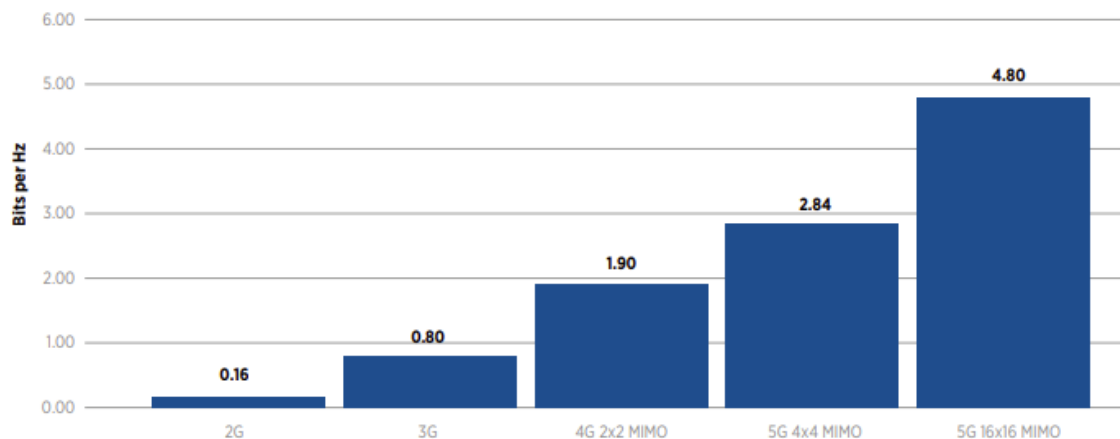
Use case category	User Experienced Data Rate	E2E Latency	Mobility
Broadband access in dense areas	DL: 300 Mbps UL: 50 Mbps	10 ms	On demand, 0-100 km/h
Indoor ultra-high broadband access	DL: 1 Gbps, UL: 500 Mbps	10 ms	Pedestrian
Broadband access in a crowd	DL: 25 Mbps UL: 50 Mbps	10 ms	Pedestrian
50+ Mbps everywhere	DL: 50 Mbps UL: 25 Mbps	10 ms	0-120 km/h

Kuva 10. NGMN-vaatimukset käyttäjän kokemalle tiedonsiirtonopeudelle, viiveelle ja liikkuvuudelle eMBB-yhteyksissä [25].

5.1.2 eMBB-vaatimus 2: spektritehokkuus

Huippunopea langaton laajakaista vaatii koko taajuusalueella kaikkien käytössä olevien taajuuksien kaistatehokkuuden eli spektritehokkuuden kasvattamista huomattavasti verrattuna 4G-verkkoihin, jotta operaattorit pystyisivät vastaamaan liikenteen vaatimuksiin omien taajuusalueidensa sisällä samalla pitäen solujen sijaintien määrän kohtuullisena (kuva 11). Kaistatehokkuuden parantamisen tulisi kohdentua koko 5G-taajuuspektriin, pieniin ja suuriin soluihin ja pientä ja suurta liikkuvuutta vaativiin käyttötapauksiin. Kaistatehokkuutta mitataan bitteinä sekunnissa jaettuna käytetty kaistan leveys hertseinä (bitti/s/Hz). Kaistatehokkuutta voidaan parantaa vähentämällä solujen välistä häiriötä. Kohdennetuilla säteenmuodostusteknologioilla, kuten MIMO, pystytään mitätöimään matkalla tapahtuva häviö, mikä myös parantaa tehokkuutta. Spektritehokkuuden parantaminen on operaattoreille erittäin hyödyllistä, sillä samoilla kiinteillä kuluilla pystytään laskuttamaan enemmän dataa ja palvelemaan useampaa käyttäjää. [25; 26; 27.]

EXHIBIT 2: AVERAGE SPECTRAL EFFICIENCIES



Kuva 11. Keskimääräinen toteutunut spektritehokkuus eri mobiiliverkkosukupolvien teknologioiden välillä [28].

5.1.3 eMBB-vaatimus 3: liikkuvuus

Huippunopean langattoman laajakaistan tulisi toimia myös käyttäjillä, jotka ovat liikkeessä. Käyttäjän kävellessä tai liikkeessä autolla tai junalla tulisi käyttäjäkokemuksen olla saumaton. 5G-verkkojen käyttötapaukset näyttävät, että 5G-verkkojen tulee tukea liikkuvia ja paikallaan olevia käyttäjiä tai laitteita. 5G-verkkojen ratkaisujen ei tulisi olettaa

käyttäjän liikkuvuutta vaan tukea sitä tarpeen vaatiessa sitä tarvitseville käyttäjille ja laitteille. Liikkuvuuden vaatimukset esitetään verkon reunan ja käyttäjän välisenä suhteellisenä nopeutena (kuva 10, s. 18). [25; 26.]

5.1.4 eMBB-vaatimus 4: energiatehokkuus

Energiatehokkuus on tärkeä asia, joka tulee ottaa huomioon suunniteltaessa ja kehitettäessä 5G-verkkoja. 5G-verkkojen energiatehokkaan suunnittelun hyödyt ovat moninaiset. Verkkojen energiatehokkaan suunnittelun rooli voi olla suuri kestävässä kehityksessä ja hiilijalanjäljen pienentämisessä. 5G-verkot voivat vaikuttaa käyttötapauksillaan hiilijalanjälkeen myös muilla osa-alueilla tuomalla ja hyödyntämällä uusia teknologioita. Verkkojen energiatehokkuus kasvattaa myös suoraan operaattorien tuloja pienentämällä käyttökustannuksia. Käyttökustannuksien pieneminen saattaa vaikuttaa myös kuluttajien maksamaan hintaan liittymistä, kun samalla energiamäärällä pystytään tuottamaan kuluttajalle jopa entistä nopeampi liittymä. [26; 29.]

5.2 Luotettava lyhyen viiveen kommunikaatio (URLLC)

5G mahdollistaa erittäin matalan viiveen langattomat yhteydet korkealla luotettavuudella sellaisella tasolla, joka kilpailee valokuidun kanssa. Erittäin matala viive mahdollistaa vaativat käyttötapaukset kuten etäohjaus ja automaatio. Teknologiat, kuten reunalasenta, tuovat 5G-verkon fyysisesti lähemmäksi käyttäjää vähentäen viivettä. URLLC on käyttötapauksista kaikista haastavin, koska se vaatii erittäin luotettavan yhteyden. Tyyppillisen prosentuaalisen arvon luotettavan lyhyen viiveen kommunikaation saatavuudelle odotetaan olevan 99,999 %. Jotta näin luotettavalle tasolle verkon saatavuudessa päästäisiin, on ehdotettu, että URLLC-yhteyksiin käytettäisiin redundanttia laitteistoa ja verkkoimintoja mahdollisten ongelmien varalta. [22; 23; 26.]

5.2.1 URLLC-vaatimus 1: viive

Luotettavan lyhyen viiveen kommunikaation vaatimukseen kuuluu tietenkin viive. Viiveen mittaamiseen on eri mittareita, joita ovat

- E2E (End to end)-viive, joka mittaa pienen datapaketin edestakaisen matkan ajan lähettäjän sovelluskerroksesta vastaanottajan sovelluskerrokseen millisekunteina
- käyttäjätason viive, joka mittaa käyttäjätason pienen datapaketin edestakaisen matkan ajan käyttäjän ja 5G-verkon tasojen 2 ja 3 välillä.

Myös eMBB:n vaatimuksiin kuuluu viive, mutta URLLC asettaa sille paljon vaativammat vaatimukset. eMBB:n vaatimus käyttäjätason viiveelle on 4 ms, kun taas URLLC:llä se on vain 1 ms. eMBB:n E2E-viiveen vaatimus on 10 ms (kuva 10, s. 18), kun taas URLLC:llä se on vain 1 ms. [25; 26.]

5.2.2 URLLC-vaatimus 2: luotettavuus

Luotettavan lyhyen verkon vaatimuksiin kuuluu myös luotettavuus. Luotettavuus määritellään viiveen ja lähetyksen onnistumisen avulla. Jotta verkko olisi luotettava, on sen toimitettava haluttu määrä dataa tietyssä aikamääreessä korkealla todennäköisyydellä. Verkon luotettavuus riippuu palvelusta ja käyttötapauksesta. URLLC:tä vaativille käyttötapauksille verkon tulisi tarjota 99,999 %:n tai korkeampaa luotettavuutta. Käyttötapauksissa, joissa verkon luotettavuus ei ole niin merkittävä, kuten mMTC tai muut käyttötapaukset, joissa viive ei ole niin kriittinen, saattaa verkon luotettavuuslukema olla 99 % tai huonompi. [25; 26.]

5.3 Massiivinen koneiden välinen kommunikaatio (mMTC)

5G-verkkoja voivat hyödyntää muutkin kuin ihmiset. Massiivinen koneiden välinen kommunikaatio mahdollistaa koneiden välisen kommunikaation 5G-verkossa. mMTC asettaa verkolle kaksi vaikeaa haastetta. Se mahdollistaa massiivisen määrän laitteita solussa esimerkiksi esineiden internetin (IoT) toteuttamiseksi. Toisena haasteena on tulevaisuus ja koko ajan lisääntyvä tarve reaaliaikaisille ja etäohjattaville käyttötapauksille ja näin ollen mMTC vaatisi paljon pienempää, lähes URLLC:n vaatimuksen viivettä ja suurempaa, lähes täydellistä luotettavuuslukemaa. [22; 23; 29.]

5.3.1 mMTC-vaatimus 1: yhteystiheys

Massiivinen koneiden välinen kommunikaatio vaatii 5G-verkolta suurta yhteystiheyttä. Yhteystiheydellä tarkoitetaan 1 neliökilometrin säteellä olevien 5G-laitteiden määrää, joille pystytään tarjoamaan vaatimuksien mukainen palvelu. mMTC:n vaatimus yhteystiheydelle on eri vaatimuksien mukaan jotain 200 000:n ja 1 000 000 laitteen välillä neliökilometriä kohti. [25; 26.]

5.3.2 mMTC-vaatimus 2: tiedonsiirtotiheys

5G-verkon tulisi pystyä palvelemaan massiivista määrää laitteita ja äärimmäisissä tapauksissa tarjoamaan monien kymmenien megatavujen yhteysnopeuksia kymmenille tuhansille käyttäjille esimerkiksi festivaaleilla, yleisötapahtumissa tai stadioneilla. Verkon tulisi tarjota myös gigabittiyhteyksiä kaupunkiyhteyksissä kymmenille käyttäjille. Tiedonsiirtotiheyttä mitataan biteissä sekunnissa neliometriä kohti, bitti/s/m². [25; 26.]

6 5G-käyttötapaukset käytännössä

6.1 Älykäs kaupunki

Euroopan komissio määrittelee älykkään kaupungin paikaksi, jossa tavalliset verkot ja palvelut ovat tehokkaampia uusien tietoliikenneteknologioiden avulla siten auttaen asukkaita ja yrityksiä. Näiden teknologioiden saatavuus ja leviäminen muuttaa tavallisen kaupungin älykkääksi ja tuo parannuksia ihmisten elämänlaatuun. [45.]

Älykäs kaupunki käyttää sensoriteknologiaa muun muassa lämmityksen ja ilmanvaihdon ohjaamiseen rakennuksissa, veden- ja sähkönkulutuksen mittaamiseen, valaistuksen ohjaamiseen, hiilidioksidipäästöjen mittaamiseen tai minkä tahansa tiedon keräämiseen tai asian ohjaamiseen, mistä koetaan olevan hyötyä. Älykäs kaupunki käyttää digitaalisia ratkaisuja, teknologiaa ja tietoa parantaakseen kaupungin elämänlaatua, vähentääkseen päästöjä ja saadakseen aikaan kaikilla tavoin paremman kaupungin. Parannuksien tavoitteena on vähentää liikenneuhkia, parantaa julkisen liikenteen kulkua, vähentää vedenkulutusta, parantaa kierrätystä, vähentää päästöjä ja näin ollen tuoda kaupungille

säästöjä. Älykkäät kaupungit pystyvät analysoimaan ja keräämään tietoa kaikista kaupungin osa-alueista, mikä auttaa projekteissa ja päätöksenteossa. Tiedon määrä tuo myös kaupungeille uusia liiketoimintamahdollisuuksia monimutkaisten IoT-järjestelmien hallintaan ja niistä kerätyn tiedon esittämiseen.

Esineiden internet (engl. IoT) -laitteiden määrän oletetaan kasvavan vuoteen 2025 mennessä 75 miljardiin. Laitteiden määrän kasvun vuoksi 5G tulee olemaan välttämättömyys kehityksessä kohti älykkäitä kaupunkeja. [49.]

6.2 Autot ja liikenne

Autojen ohjaus siirtyy koko ajan kauemmas ihmisen käsistä. Verkon viipalointi ja 5G:n mahdollistamat viiveet mahdollistavat itseohjautuvat autot mobiiliverkkojen välityksellä turvallisesti. Nykyään autojen itseohjautuvuus perustuu omaan sensori- tai kamerateknologiaan ilman mobiiliverkon apua. Tulevaisuudessa autojen itseohjautuvuus voisi toimia verkon välityksellä.

5G tuo paljon mahdollisuuksia itseohjautuvien autojen tai tavallisten autojen väliseen kommunikaatioon (engl. V2V), jossa autot pystyvät keskustelemaan toistensa kanssa ja jakamaan tietoa sijainnista, reitistä ja nopeudesta. 5G mahdollistaa myös autojen ja kaiken muun välisen kommunikaation (engl. V2X), jossa katuvalot voisivat syttyä auton kääntyessä tielle, pysäköintimaksut hoituisivat itsekseen ja tiemaksuja varten ei tarvitsisi pysähtyä porteille. V2X voisi myös varoittaa edessä olevista vaaratilanteista, lähestyvistä hätäajoneuvoista tai liikenneuhkista. [50.]

6.3 Teollisuus

5G:n tuomat edut eri teollisuudenaloille ovat moninaiset. 5G:n kapasiteetti, luotettavuus ja viive mahdollistavat tehtaiden ja teollisuuden laitteiston, koneiden ja kulkuneuvojen seurannan ja ohjauksen verkon välityksellä. Esimerkiksi valmistuslinjan siirtäminen verkkoon mahdollistaa joustavuuden ja skaalautuvuuden verkon avulla. 5G mahdollistaa eri prosessien automatisoinnin ja seurannan verkon välityksellä. 5G mahdollistaa myös etä-

ohjauksen eri käyttötapauksiin lähes reaaliaikaisilla yhteyksillä. Digitalisaatio ja automatisaatio tuovat tehtäisiin ja valmistukseen tehokkuutta ja helpottavat ongelmien kartoittamista. [50.]

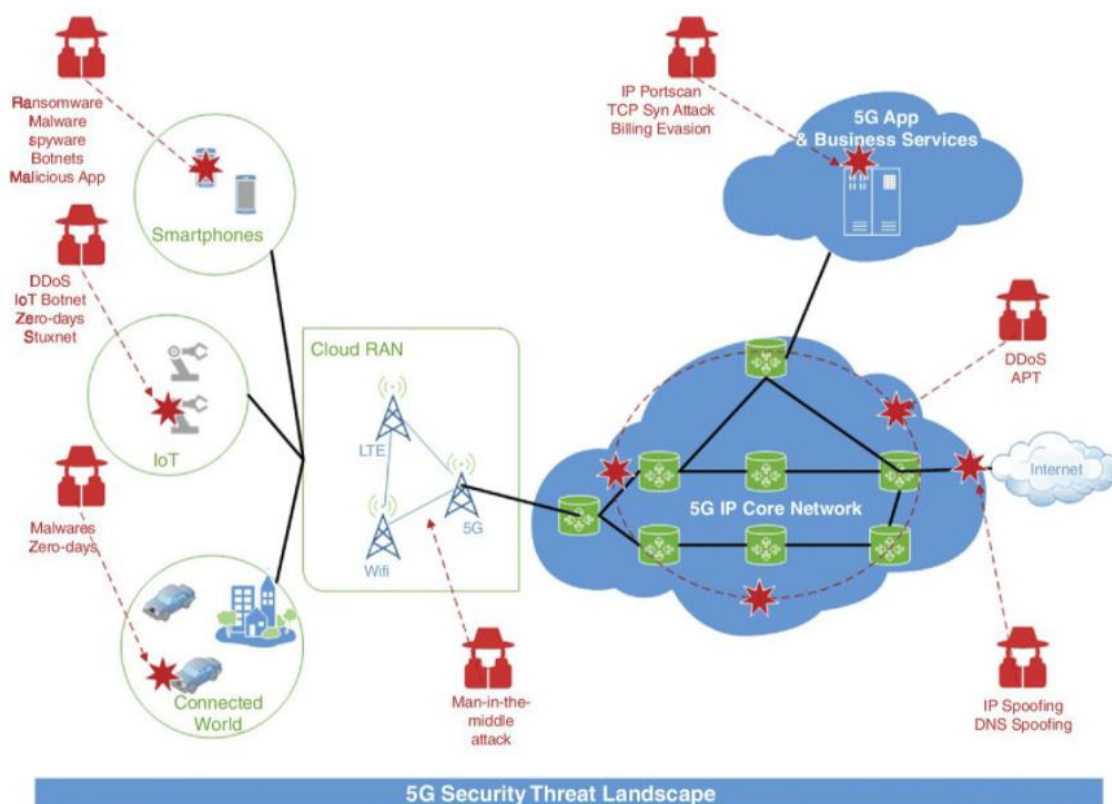
7 5G:n haasteet

7.1 Tietoturva

Tietoturva on kasvava huolenaihe 5G-verkkojen kehityksen yleistyessä. Laitteiden määrän ja tiedonsiirtonopeuksien kasvu tuo haasteita 5G-verkkojen turvallisuuden varmistamiseksi. Matalampia viiveitä tavoiteltaessa operaattorit päästetään lähemmäs verkon ydintä, minkä seurauksena käyttäjien ja mahdollisten hyökkääjien etäisyys tietoturvakriittisiin verkkotoimintoihin lyhenee. Motivaatio hyökkäyksiin on suurempi ja uhat ovat laajempia ja monimutkaisempia kuin aiemmillä 4G-verkoilla. 5G-verkkojen turvallisuuden varmistaminen vaatii kaikilta verkon tasoilta turvallisuutta kuten pääsytaaso, infrastruktuuritaso ja palvelutaso. Infrastruktuuritason turvallisuutta parantavat sellaiset teknologiat kuin SDN, NFV ja verkon viipalointi. Infrastruktuuritason ohjelmoitavuus ja aiempaa suurempi avoimuus aiheuttavat kuitenkin riskejä esimerkiksi verkkotoimintojen virtualisoinnin turvalliselle toteutukselle. Palvelutasolla käyttötapaukset voivat olla erittäin kriittisiä, kuten turvallisuus- ja terveystalvet, minkä takia tietyille palvelutasoille tulee tehdä lisätoimia turvallisuuden varmistamiseksi. 5G-standardi määrittelee mahdollisuuden käyttää salaus- ja tunnistusratkaisuja eri verkon osa-alueilla, mutta käytännön toteutuksesta vastaavat yritykset ja operaattorit.

Mobiiliverkot ovat olleet aina riski tietoturvalle, ja IP-pohjaiset verkot, kuten 4G-verkot, mahdollistivat uusien turvallisuusuhkien ja haittaohjelmien saapumisen mobiiliverkkojen ja niitä käyttävien laitteiden piiriin. Kehitys kohti IP-pohjaisia verkkoja toi mahdollisuuden monimutkaisempien ja kehittyneempien uhkien toiminnalle (kuva 12). Tämä kehitys jatkuu, ja 5G-verkkojen kohtaamat tietoturvahaasteet, haittaohjelmat ja uhat ihmisten yksityisyyttä kohtaan nousevat uudelle tasolle. 5G-verkkojen käyttötapaukset saattavat esimerkiksi yhdistää kriittistä infrastruktuuria verkon piiriin ja altistaa pahimmassa tapauksessa esimerkiksi maan tai kaupungin sähköverkon hyökkäyksen kohteeksi. Kriittiset käyttötapaukset asettavat 5G-verkkojen tietoturvalle kovat tavoitteet, jotka on täytettävä

turvallisuuden nimissä. Haittaohjelmat älypuhelimissa edistyvät tiedonsiirtonopeuksien ja tallennustilan kasvaessa. Väliintulohyökkäykset saattavat myös lisääntyä yhteyspisteiden määrän kasvaessa. [23; 43.]



Kuva 12. Uhat 5G-verkoissa eri käyttötapauksia ja verkon osa-alueita kohtaan [43].

7.2 Infrastruktuuri

Kun verkon päivitys LTE- tai LTE-Advanced-teknologioilla ei enää riitä, joutuvat operaattorit päivittämään infrastruktuuria kohti 5G:tä. Ennen täyttä siirtymistä operaattoreilla on kuitenkin monia keinoja minimoida pääomainvestointeja, kun 5G-verkkojen tulomahdollisuudet ovat vielä epäselviä. Yksi keino on päivittää olemassa olevia 4G-verkkoja hyödyntämään MIMO-teknologiaa ja sillä tavoin käsittelemään enemmän liikennettä ja mahdollistamaan suuremmat tiedonsiirtonopeudet. Toinen keino on hyödyntää DSS-teknologiaa (sivu 15).

Operaattorit ostavat 5G-taajuuskaistat, joilla ne pystyvät operoimaan tietyssä maassa tai alueella. Taajuuskaistahuutokaupan jälkeen operaattoreilla on lupa käyttää tiettyä taajuutta verkossaan. Suurien huutokaupsummien jälkeen operaattorit ovat kuitenkin vielä todella kaukana toimivasta verkosta. Uudet yli 24 GHz:n taajuudet eivät toimi vanhalla olemassa olevalla teknologialla, joten niitä on päivitettävä. Operaattorien tulee päivittää verkon infrastruktuuria ja käyttää siihen pääomaa. Päivitettäviin verkon osiin kuuluvat muun muassa

- tukiaseman infrastruktuurin laitteisto, jotta pystytään toimimaan korkeilla 5G-taajuuksilla ja syöttämään radiomastoille riittävällä kaistalla tietoa
- verkon ydin ja siihen liittyvät SDN- ja NFV-ratkaisut ja niiden lisäksi verkon viipalointiin tai analytiikkaan liittyvät ratkaisut
- kuljetusverkon päivitys valokuituun lisääntyneen verkkoliikenteen ja yhdistettyjen laitteiden määrän kasvun takia
- uudet radiomastot, joiden lukumäärä voi olla tuhansia pienien solujen ja korkeiden taajuuksien takia.

Operaattorien pääomamenojen oletetaan kasvavan 5G-verkkoja rakennettaessa moninkertaisesti. Operaattorien pääomamenojen tuotosta ja oletettujen käyttötarkoitusten ja uusien liiketoimintamallien menestyksestä ei ole kuitenkaan takeita. Yritysten ja teollisuuden tulee olla kiinnostuneita 5G:n tuomista mahdollisuuksista ja valmiita ottamaan niitä käyttöön. On myös mahdollista, että operaattorien panostus infrastruktuuriin menee jossain määrin hukkaan yritysten mahdollisesti rakentaessa omia yksityisiä verkkoja. [43.]

8 Yhteenveto

Insinööriyössä tutkittiin 5G:tä ja sen käyttötapauksia ja siihen liittyviä teknologioita. Verkoja kehitetään kohti 5G:tä jatkuvasti käyttäen eri teknologioita, kuten DSS.

5G-laitteiden määrä tulee kasvamaan seuraavien vuosien aikana merkittävästi. Laitteiden määrän kasvu vaatii nykyisten verkkojen päivitystä, jotta verkkojen kapasiteetti ei ylittyisi. Älypuhelimet vaativat myös entistä nopeampia yhteyksiä, minkä takia verkkojen taajuuksien on kasvettava nopeuksien saavuttamiseksi. Taajuuksien kasvattaminen aiheuttaa ongelmia kuuluvuudessa rakennuksissa ja myös ulkona.

5G-verkoissa on monia lähetykseen liittyviä teknologioita, jotka helpottavat operaattorien toimintaa ja samalla varmistavat 5G-verkon toiminnan vaatimusten mukaisesti.

5G:n vaatimukset ovat tiukat, ja operaattoreiden verkkojen tulee täyttää asetetut vaatimukset, jotta 5G-verkko toimii suunnitellulla tavalla. 5G:n vaatimukset koskettavat verkon jokaista osa-aluetta, joita ovat esimerkiksi käyttäjän kokema tiedonsiirtonopeus, viive ja luotettavuus.

5G-verkkojen tietoturva kohtaa enemmän uhkia kuin aikaisemmin. Uhat saattavat kohdistua myös erittäin kriittisiin yhteiskunnan osa-alueisiin, minkä takia 5G:n tietoturva pitää ottaa vakavammin huomioon.

Mobiiliverkkojen kehitys jatkuu, ja 5G-verkoistakin tulee historiaa 6G:n myötä.

Lähteet

- 1 Heikkilä, Jussi; Korhonen, Pasi & Paavola, Matti. 1999. Matkapuhelinten sukupolvet. Verkkoaineisto. <<https://www.netlab.tkk.fi/opetus/s38118/s99/htyo/47/1sp.shtml>>. Luettu 11.1.2021.
- 2 Langattomat sukupolvet 1G, 2G, 3G, 4G, 5G... 2018. Verkkoaineisto. FiCOM ry. <www.ficom.fi/ajankohtaista/uutiset/langattomat-sukupolvet-1g-2g-3g-4g-5g/>. Luettu 11.1.2021
- 3 Gunnarsson, Elin. 2019. NMT – first generation of mobile telephony. Verkkoaineisto. Soluno <<https://www.soluno.se/en/nmt-mobile-telephony/>> Luettu 11.1.2021.
- 4 Langaton tiedonsiirto. 2005. Verkkoaineisto. Oulun ammattikorkeakoulu. <http://www.tekniikka.oamk.fi/tl-lab/tietoliikennejarjestelmat/osa4_rr_s05.pdf> Luettu 11.1.2021.
- 5 Tiainen, Seppo. 2001. The Nordic Mobile Telephone. <<https://gkos.com/viestin/nmt.html>>. Luettu 11.1.2021.
- 6 Landström, Rita & Lindfors, Jukka. 2008. Maailman ensimmäinen GSM-puhelu. Verkkoaineisto. <<https://yle.fi/aihe/artikkeli/2008/02/22/maailman-ensimmainen-gsm-puhelu>> Luettu 12.1.2021.
- 7 Matkapuhelimet ja tukiasemat. 2003. Verkkoaineisto. Säteilyturvakeskus. <<https://www.julkari.fi/bitstream/handle/10024/125192/katsaus-matkapuhelimet-ja-tukiasemat-3-2003.pdf?sequence=1>> Luettu 12.1.2021.
- 8 Kokko, Juha; Kyöstiä, Ville-Matti; Ylijoki, Mikael. 2000. UMTS. Verkkoaineisto. <<https://www.netlab.tkk.fi/opetus/s38118/s00/tyot/1/juha.shtml>> Luettu 12.1.2021.
- 9 Historia. Verkkoaineisto. Elisa Oyj. <<https://elisa.fi/yhtiotieto/tietoa-elisasta/historia/>> Luettu 12.1.2021.
- 10 LTE. Verkkoaineisto. 3GPP. <<https://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/98-lte>> Luettu 12.1.2021.
- 11 LTE. Verkkoaineisto. ETSI. <<https://www.etsi.org/technologies/mobile/4G>> Luettu 12.1.2021.
- 12 Suomi tietoliikenneverkkojen kärkimaaksi – Digitaalisen infrastruktuurin strategia 2025. Verkkoaineisto. Liikenne- ja viestintäministeriö. <<https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/161066>>. Luettu 25.1.2021.

- 13 Heikkilä, Tomi. 2020. Mobiiliverkkojen tilannekatsaus. Verkkoaineisto. Telia. https://www.digita.fi/wp-content/uploads/2020/02/Mobiiliverkot_DigitaPRO_13022020_Tomi-Heikkila_Telia.pdf> Luettu 25.1.2021.
- 14 Matkaviestinverkkojen taajuudet ja luvanhaltijat. Verkkoaineisto. Liikenne- ja viestintävirasto. <<https://www.traficom.fi/fi/viestinta/viestintaverkot/matkaviestinverkkojen-taajuudet-ja-luvanhaltijat>> Luettu 25.1.2021.
- 15 5G-taajuuksien huutokauppa päätynyt. Verkkoaineisto. Liikenne- ja viestintävirasto. <<https://www.traficom.fi/fi/ajankohtaista/5g-taajuuksien-huutokauppa-paattyntynyt>> Luettu 25.1.2021.
- 16 Zolanvari, Maede. 2015. SDN for 5G. Verkkoaineisto. <<https://www.cse.wustl.edu/~jain/cse570-15/ftp/sdnfor5g.pdf>> Luettu 25.2.2021.
- 17 Berthou, Pascal & Hakiri, Akram. Leveraging SDN for The 5G Networks: Trends, Prospects and Challenges. Verkkoaineisto. <<https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1506/1506.02876.pdf>> Luettu 25.2.2021.
- 18 Passoja, Matti. 2018. 5G NR: Massive MIMO and Beamforming – What does it mean and how can I measure it in the field? Verkkoaineisto. <<https://www.rcrwi-reless.com/20180912/5g/5g-nr-massive-mimo-and-beamforming-what-does-it-mean-and-how-can-i-measure-it-in-the-field>> Luettu 2.2.2021.
- 19 Pliatsios, Dimitrios; Sarigiannidis, Panagiotis; Goudos, Sotirios & Karagiannidis, George K. 2018. Realizing 5G vision through Cloud RAN: technologies, challenges, and trends. Verkkoaineisto. <<https://jwcn-eurasiptournals.springeropen.com/articles/10.1186/s13638-018-1142-1>> Luettu 10.2.2021.
- 20 Cloud/Centralized Radio Access Network (C-RAN). Verkkoaineisto. Artiza Networks. <<https://www.artizanetworks.com/resources/tutorials/cran.html>> Luettu 10.2.2021.
- 21 Network Slicing for 5G Networks & Services. 2016. Verkkoaineisto. 5G Americas. <https://www.5gamericas.org/wp-content/uploads/2019/07/5G_Americas_Network_Slicing_11.21_Final.pdf> Luettu 2.3.2021.
- 22 5G väyläviraston toiminnassa. 2019. Verkkoaineisto. Väylävirasto. <https://julkaisut.vayla.fi/pdf12/vj_2019-52_5g_vaylaviraston_toiminnassa_web.pdf> Luettu 9.3.2021.
- 23 Selvitys 5G:n kyberturvallisuudesta. 2019. Verkkoaineisto. Liikenne- ja viestintävirasto ja Kyberturvallisuuskeskus <<https://www.kyberturvallisuuskeskus.fi/sites/default/files/media/file/Selvitys%205Gn%20kyberturvallisuudesta%20yhteen-veto.pdf>> Luettu 9.3.2021.

- 24 5G Usage Scenarios in Non-Standalone (NSA) and Standalone (SA) Operation. 2018. Verkkoaineisto. Test and Verification Solutions. <<https://www.testandverification.com/5g-usage-scenarios-nsa-sa>> Luettu 9.3.2021.
- 25 5G White Paper. 2015. Verkkoaineisto. NGMN. <https://www.ngmn.org/wp-content/uploads/NGMN_5G_White_Paper_V1_0.pdf> Luettu 22.3.2021.
- 26 Penttinen, Jyrki T. J. 2019. 5G Explained. E-kirja. Wiley.
- 27 Badic, Biljana; Drewes, Christian; Karls, Ingolf & Mueck, Markus. 2016. Rolling Out 5G: Use Cases, Applications, and Technology Solutions. E-kirja. Apress
- 28 The Benefits of Technology Neutral Spectrum Licences. 2019. Verkkoaineisto. GSMA. <<https://www.gsma.com/spectrum/wp-content/uploads/2019/06/Benefits-of-Technology-Neutral-Spectrum-Licences.pdf>> Luettu 22.3.2021.
- 29 Rodriguez, Jonathan. 2015. Fundamentals of 5G Mobile Networks. E-kirja. Wiley.
- 30 Clari, Fabrice; Fadil, Eva & Pourcher, Lisa. 2020. 5G and Energy Efficiency. Verkkoaineisto. <https://global5g.org/sites/default/files/BookletA4_EnergyEfficiency.pdf> Luettu 23.3.2021.
- 31 The 5G Guide. 2019. Verkkoaineisto. GSMA. <https://www.gsma.com/wp-content/uploads/2019/04/The-5G-Guide_GSMA_2019_04_29_compressed.pdf> Luettu 25.3.2021.
- 32 IMAI, Tetsuro; Kitao, Koshiro; Tran; Ngochao & Omaki, Nobutaka. 2016. Radio Propagation for 5G. Verkkoaineisto. NTT DOCOMO Technical Journal Vol. 17 No. 4. <https://www.nttdocomo.co.jp/english/binary/pdf/corporate/technology/rd/technical_journal/bn/vol17_4/vol17_4_005en.pdf> Luettu 25.3.2021.
- 33 Wang, Qi; Zhao, Xiongwen; Li, Shu; Wang, Mengjun; Sun, Shaohui & Hong, Wei. 2017. Attenuation by a Human Body and Trees as well as Material Penetration Loss in 26 and 39 GHz Millimeter Wave Bands. Verkkoaineisto. <<https://www.hindawi.com/journals/ijap/2017/2961090/>> Luettu 29.3.2021.
- 34 Compilation of measurement data relating to building entry loss. 2016. Verkkoaineisto. ITU-R. <https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-P.2346-1-2016-PDF-E.pdf> Luettu 25.3.2021.
- 35 Ahmadi, Sassan. 2019. 5G NR. E-kirja. Academic Press.

- 36 Bringing 5G networks indoors. 2019. Verkkoaineisto. Ericsson. <<https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/white-papers/bringing-5g-networks-indoors>> Luettu 29.3.2021.
- 37 Hakiri, Akram & Berthou, Pascal. Leveraging SDN for The 5G Networks: Trends, Prospects and Challenges. Verkkoaineisto. <<https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1506/1506.02876.pdf>> Luettu 6.4.2021.
- 38 Network Functions Virtualisation. 2021. Verkkoaineisto. ETSI. <https://portal.etsi.org/NFV/NFV_White_Paper.pdf> Luettu 6.4.2021.
- 39 Carr, Joseph. 1997. Microwave and Wireless Communications Technology. E-kirja. Newnes.
- 40 Safak, Mehmet. 2017. Digital Communications. E-kirja. Wiley.
- 41 Sklar, Bernard & Harris, Fredric J. 2020. Digital Communications: Fundamentals and Applications. 3rd Edition. E-kirja. Pearson.
- 42 Dynamic Spectrum Sharing. 2021. Verkkoaineisto. Samsung. <https://images.samsung.com/is/content/samsung/p5/global/business/networks/insights/white-papers/0122_dynamic-spectrum-sharing/Dynamic-Spectrum-Sharing-Technical-White-Paper-Public.pdf> Luettu 15.4.2021.
- 43 Lyanage, Madhusanka; Ahmad, Ijaz; Bux Abro, Ahmed; Gurtov, Andrei & Ylianttila, Mika. 2018. A Comprehensive Guide to 5G Security. E-kirja. Wiley.
- 44 Chandramouli, Devaki; Liebhart, Rainer & Pirksanen, Juho. 2019. 5G for the Connected World. E-kirja. Wiley.
- 45 Smart cities. Verkkoaineisto. European Commission. <https://ec.europa.eu/info/eu-regional-and-urban-development/topics/cities-and-urban-development/city-initiatives/smart-cities_en> Luettu 21.4.2021.
- 46 3GPP. Verkkoaineisto. 3GPP <<https://www.3gpp.org/about-3gpp>> Luettu 6.4.2021.
- 47 Parkvall, Stefan. 2018. How does 5G NR standardization work? Verkkoaineisto. Ericsson. <<https://www.ericsson.com/en/blog/2018/5/how-does-5g-nr-standardization-work>> Luettu 6.4.2021.
- 48 A. Morreale, Patricia & M. Anderson, James. Software Defined Networking. 2014. E-kirja. CRC Press.

- 49 5G and Smart Cities: Smarter Solutions for A Hyperconnected Future. Verkkoai-
neisto. Reply. <<https://www.reply.com/en/industries/telco-and-media/5g-smart-cities>> Luettu 6.4.2021.
- 50 Vannithamby, Rath & Soong, Anthony. 2020. 5G Verticals. E-kirja. Wiley.

