

Tomi Lehtinen, Joonas Peltonen

6G MOBIILIVERKKO: RADIOSPEKTRI, TEKNOLOGIAT JA SOVELLUKSET

Kandidaatintyö
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta (ITC)
Tarkastaja: Mikko Valkama
Tammikuu 2025

TIIVISTELMÄ

Tomi Lehtinen, Joonas Peltonen: 6G-Mobiiliverkko
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Tieto- ja sähkötekniikan kandidaatinohjelma
02 2025

Tämä kandidaatintyö tarkastelee tulevaisuuden kuudennen sukupolven mobiiliverkkoja. Mobiiliverkkoja tarkasteltiin spektrin, Kansainvälisen televiestintäliiton (International Telecommunication Union, ITU), tiedonsiirtoteknologioiden, tekoälyn & koneoppimisen sekä paikannuksen & aistimisen näkökulmista. Työssä käsitellystä 6G-spektristä odotetaan korkeampia taajuuksialueita, kuten subterahertsitaajuuksia (sub-THz, 90 GHz – 300GHz), jotka mahdollistavat nopeamman tiedonsiirron ja pienemmän viiveen. Senttimetriaallot (7-15 GHz) tarjoavat tasapainon kattavuuden ja kapasiteetin välillä. Spektrinhallinta 6G-verkoissa tulee olemaan kriittistä ja tässä tekoäly tulee keskeiseen rooliin. Tekoäly (Artificial Intelligence, AI) -pohjaiset spektrinhallintamenetelmät, kuten resurssien-, keilan- ja kanavanhallinta optimoivat verkon suorituskykyä reaaliaikaisesti. Myös lisensoimattoman ja lisensoidun spektrin yhdistäminen tarjoaa uusia mahdollisuuksia energiatehokkuuden ja tiedonsiirron optimointiin.

Kansainvälinen televiestintäliitto (ITU) on keskeinen toimija 6G-kehityksessä. ITU:lla on kolme eri pääsektoria, ITU-R, ITU-T ja ITU-D, jotka huolehtivat taajuuksialueiden koordinoinnista, teknisten spesifikaatioiden laatimisesta ja digitaalisen infrastruktuurin kehittämisestä. ITU:n teemoihin kuuluu myös tietoturva ja ympäristöystävällisyys.

Tiedonsiirtoteknologioita 6G:ssä tulee olemaan paljon. Käytössä on sekä vanhoja 5G:stä tuttuja, mutta myös aivan uusia. Nämä teknologiat auttavat spektritehokkuudessa ja mahdollistavat tehokkaan sekä luotettavan tiedonsiirron. Kuudennen sukupolven verkot saadaan myös toimimaan haastavissa paikoissa kuten merellä ja ilmassa, jos kehityksessä olevan LEO-satelliittiviestinnän ongelmat saadaan ratkaistua. Kuten nykypäivän trendinä myös 6G:ssä tulee isoon rooliin tekoäly ja koneoppiminen. Ne auttavat esimerkiksi reitityksessä, resurssien hallinnassa ja ennakkoivassa analytiikassa.

Paikannus ja aistiminen tuovat mukanaan todella tarkan paikannuksen. NTN (Non-Terrestrial Network) -pohjaiset ratkaisut, kuten satelliitit ja dronet, tukevat paikkatietosovelluksia ja mahdollistavat tarkan paikannuksen myös sisätiloissa, mikä ei ole ennen ollut mahdollista. Integroidun paikannuksen ja aistimisen (Integrated Sensing and Communication, ISAC) -teknologia puolestaan yhdistää viestinnän ja ympäristön havainnoinnin ja mahdollistaa autonomisten ajoneuvojen sekä älykkäiden kaupunkiratkaisujen kehittämisen. Näiden ominaisuuksien avulla myös terveydenhuoltoon saadaan uusia mahdollisuuksia. Haptinen viestintä, holografinen viestintä ja BCI (Brain-Computer interface) mahdollistavat etäkirurgian, tarkemman diagnostiikan ja potilastietojen analyysin reaaliajassa. Näiden lisäksi VR- ja AR-teknologiat parantavat lääketieteellistä koulutusta ja potilashoittojen toteutusta.

6G:n kehitys tuo siis mukanaan paljon uusia ominaisuuksia ja mahdollisuuksia, mutta myös haasteita. Näihin perehdytään tämän työn aikana ja pyritään esittelemään niin, että jokaiselle jää hyvä käsitys siitä mitä 6G on, miten uudet mobiiliverkot saapuvat ja mitä 6G ihanteellisessa tilanteessa voi mahdollistaa.

Avainsanat: 6G, mobiiliverkot, ITU, paikannus & aistiminen, spektri

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

ABSTRACT

Tomi Lehtinen, Joonas Peltonen: 6G-Mobilenetwork
Bachelor's Thesis
Tampere University
Bachelor's Programme in Information and Electrical Engineering
02 2025

This bachelor's thesis examines sixth generation (6G) mobile networks. The study focuses on mobile networks from the perspectives of spectrum, the International Telecommunication Union (ITU), data transmission technologies, artificial intelligence & machine learning, as well as positioning & sensing. The 6G spectrum covered in this thesis is expected to include higher frequency bands, such as sub-terahertz frequencies (sub-THz, 90 GHz – 300 GHz), which enable faster data transmission and lower latency. Centimeter waves (7-15 GHz) provide a balance between coverage and capacity. Spectrum management in 6G networks will be critical, with artificial intelligence playing a key role. AI-based spectrum management methods, such as resource, beam, and channel management, optimize network performance in real time. Additionally, combining unlicensed and licensed spectrum offers new opportunities for improving energy efficiency and data transmission.

The International Telecommunication Union (ITU) is a key player in 6G development. ITU has three main sectors, ITU-R, ITU-T, and ITU-D, that oversee frequency coordination, the creation of technical specifications, and the development of digital infrastructure. ITU also focuses on cybersecurity and environmental sustainability.

There will be numerous data transmission technologies in 6G, including both existing ones from 5G and entirely new ones. These technologies improve spectral efficiency and enable efficient and reliable data transmission. Sixth-generation networks will also function in challenging environments, such as at sea and in the air, if the issues with developing LEO satellite communication can be resolved. As in modern trends, artificial intelligence and machine learning will also play a major role in 6G. They assist in areas such as routing, resource management, and predictive analytics.

Positioning and sensing will bring highly accurate localization capabilities. NTN-based solutions, such as satellites and drones, will support location-based applications and enable precise indoor positioning, which was previously impossible. ISAC technology, in turn, integrates communication and environmental sensing, allowing for the development of autonomous vehicles and smart city solutions. These features will also create new opportunities in healthcare. Haptic communication, holographic communication, and brain-computer interfaces (BCI) will enable remote surgery, more precise diagnostics, and real-time patient data analysis. Additionally, VR and AR technologies will enhance medical training and patient care.

Thus, the development of 6G introduces many new features and possibilities but also challenges. This thesis aims to explore these aspects and present them in a way that provides a comprehensive understanding of what 6G is, how new mobile networks will emerge, and what an ideal 6G network can enable.

Keywords: 6G, mobile networks, ITU, positioning & sensing, spectrum

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin Originality Check service.

TEKOÄLYN KÄYTTÖ OPINNÄYTTEESSÄ

Opinnäytteessäni on käytetty tekoälysovelluksia:

- Ei
- Kyllä

Ilmoitukseni mukaan olen käyttänyt opinnäytteessäni tutkielmanprosessin aikana seuraavia tekoälysovelluksia: ChatGPT

Tekoälysovellusten nimet ja versiot: ChatGPT 4o

Käyttötarkoitus: Työssä on käytetty tekoälyä englanninkielisten tutkimusten kääntämiseen suomen kielelle sekä kielen tarkistamiseen.

Osiot, joissa tekoälyä on käytetty: Kirjoitusprosessin aikana tekoälyä on käytetty kääntämiseen ja kielen tarkistamiseen jokaisessa työn luvussa.

Olen tietoinen siitä, että olen täysin vastuussa koko opinnäytteeni sisällöstä, mukaan lukien osat, joissa on hyödynnetty tekoälyä, ja hyväksyn vastuun mahdollisista eettisten ohjeiden rikkomuksista.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. SPEKTRI	2
2.1 6G verkot ja spektri	3
2.2 Spektrin jakaminen ja hallinta 6G verkossa	4
2.2.1 Tekoälyn rooli spektrin hallinnassa	5
2.2.2 Lisensoitu ja lisensoimaton spektri	6
2.3 Spektriin liittyvät haasteet	7
3. ITU	9
3.1 ITU ja tietoturva	10
3.2 Ympäristö ja kestävä kehitys	10
3.3 Vaatimukset	11
3.3.1 5G ja 6G vaatimukset	12
4. TIEDONSIIRTOTEKNOLOGIAT	18
4.1 Modulaatio tekniikat	18
4.2 MIMO	19
4.3 LEO satelliittiviestintä	21
5. TEKOÄLY JA KONEOPPIMINEN	23
5.1 Sovellukset	23
5.2 Dynaaminen optimaalinen reititys	24
6. PAIKANNUS JA AISTIMINEN	27
6.1 10 cm:n tarkkuustason paikannus 6G verkoissa	28
6.2 NTN-pohjainen 6G-paikannus	30
6.3 JSAC ja ISAC	31
6.4 Sovellukset lääketieteessä	33
7. YHTEENVETO	36
LÄHTEET	37

LYHENTEET JA MERKINNÄT

AI	Artificial Intelligence
AlaaS	AI-as-a-Service
ASIM	AI-Enabled Spectrum Management
AR	Augmented Reality
BCI	Brain-Computer Interface
cf-mMIMO	Cell-free MIMO
DCN	Data Center Network
D-MIMO	Distributed MIMO
DNN	Deep Neural Network
eMBB	Enhanced Mobile Broadband
FDM	Frequency Division Multiplexing
FDOA	Frequency Difference of Arrival
FR1, FR2, FR3	ISAC:n eri taajuusalueet
GCA	Global Cybersecurity Agenda
IMT-2020	International Mobile Telecommunications -standardit 5G:lle
IMT-2030	International Mobile Telecommunications -standardit 6G:lle
ISAC	Integrated Sensing and Communication
ITU	The International Telecommunication Union
ITU-D	ITU Telecommunication Development Sector
ITU-R	ITU Radiocommunication Sector
ITU-T	ITU Telecommunication Standardization Sector
JSAC	Joint Sensing and Communication
LEO	Low Earth Orbit
LSTM	Long Short-Term Memory
mMIMO	Massive MIMO
ML	Machine Learning
mpNet	Mallipohjainen AI-verkko
MIMO	Multiple Input Multiple Output
NOMA	Non-Orthogonal Multiple Access
NTN	Non-Terrestrial Network
NN	Neural Network
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OTFS	Orthogonal Time Frequency Space
QoS	Quality of Service
RIS	Reconfigurable Intelligent Surface
RL	Reinforcement Learning
RTT	Round Trip Time
SCMA	Sparse Code Multiple Access
SDU	Service Data Unit
SP-LSTM	Speed Optimized LSTM
TDM	Time Division Multiplexing
TDOA	Time Difference of Arrival
TRxP	Transmission Reception Point
URLLC	Ultra-Reliable Low Latency Communications
VR	Virtual Reality
WRC	World Radiocommunication Conference
XL-MIMO	Extra-Large MIMO

1. JOHDANTO

Viimeisten vuosikymmenien aikana mobiiliverkot ovat kehittyneet suurin harppauksin. Tiedonsiirtonopeudet ja datan määrä verkossa ovat kasvaneet räjähdysmäisesti. Vielä 2000-luvun alussa, kun ensimmäiset internetyhteydet tulivat mobiililaitteisiin, oli riittävää, että puhelimet ja tietokoneet saatiin yhdistettyä verkkoon. Tämä ajattelutapa on kuitenkin muuttunut merkittävästi. Nykyään verkossa on kytkettynä paitsi perinteisiä laitteita, myös monenlaisia esineitä, kuten älykelloja, kodinkoneita, leluja, autoja ja teollisuuden laitteita. Tämän myötä verkossa on nykyään valtavasti laitteita, mikä täytyy ottaa huomioon mobiiliverkoissa. 5G-teknologia on vastannut moniin näistä haasteista tuomalla mukanaan suuria parannuksia tiedonsiirtonopeuksiin, latenssiin ja laitteiden hallintaan. Sen ominaisuuksiin kuuluu muun muassa mahdollisuus tukea miljoonia laitteita per neliökilometri, mikä on välttämätöntä jatkuvasti kasvavalle laiteverkostolle [1]. Teknologian kehitys ei kuitenkaan ole loppumassa, joten 5G ei riitä vastaamaan kaikkiin tarpeisiin tulevaisuudessa. Tulevaisuuden sovellukset, kuten äärimmäisen nopea tiedonsiirto, autonomiset järjestelmät ja laajamittaiset aistimissovellukset, vaativat uusia ja entistä tehokkaampia ratkaisuja.

Tässä kandidaatin työssä tarkastellaan 6G-teknologiaa sekä sen mahdollisia tulevaisuuden sovelluksia. 6G on kuudennen sukupolven mobiiliverkko, joka on vasta kehitysvaiheessa, mutta sen odotetaan olevan suuri askel eteenpäin. Työssä käydään aluksi läpi Kansainvälisen televiestintäliiton (ITU) roolia mobiiliverkkojen standardoinnissa sekä taajuusspektrin hallintaa. Tämän jälkeen työssä keskitytään 6G-verkon rakenteeseen ja ominaisuuksiin, kuten huippuluokan aistimisen ja paikantamisen teknologioihin, joiden avulla verkko voi kerätä ja hyödyntää ympäristöstään tietoa aivan uudella tavalla. Esimerkiksi autonomiset ajoneuvot, tekoälypohjaiset järjestelmät ja terveydenhuollon reaaliaikainen monitorointi ovat sovelluksia, joita 6G voi mullistaa.

Tämä kandidaatintyö on toteutettu parityönä, jossa molemmat kirjoittajat ovat vastanneet itsenäisesti tietyistä osioista ja osallistuneet yhdessä työn kokonaisuuden suunnitteluun sekä viimeistelyyn. Työnjaon mukaisesti Joonas Peltonen on laatinut kappaleet 2.2, 2.3, 3, 3.1, 3.2, 4, 4.1, 4.2, 4.3, 6.1 ja 6.2, kun taas Tomi Lehtinen on vastannut kappaleista 2, 2.1, 3.3, 5, 5.1, 5.2, 6.3 ja 6.4. Lisäksi molemmat osapuolet ovat yhdessä laatineet kappaleet 1, 6 ja 7 sekä tarkistaneet ja muokanneet työn yhtenäisyyttä, kieliasua ja lähdeviittauksia.

2. SPEKTRI

Tietoliikenteessä spektrillä viitataan radiospektriin, joka on osa sähkömagneettista spektriä. Radiospektrin taajuudet ovat 30 Hz – 300 GHz. Tämän taajuusalueen sähkömagneettisia aaltoja, eli radioaaltoja, hyödynnetään laajasti nykyteknologiassa, esimerkiksi tietoliikenteessä, paikannusjärjestelmissä ja radiokuvantamisessa. Esimerkiksi langattomat mobiiliverkot, kuten 4G- ja 5G-verkot, sekä WiFi-järjestelmät käyttävät radiotaajuuksia tiedonsiirtoon. [2]

Radiotaajuudet on jaettu taajuuskaistoihin, jotka voidaan osoittaa tiettyjen palveluiden käytettäväksi. Esimerkiksi Euroopassa, Lähi-idässä ja Afrikassa radio-ohjelmien lähetyksille on varattu FM-radioalue, joka toimii taajuusvälillä 87,5–108 MHz. Tämä kaista on edelleen jaettu kanaviin, joita yksittäiset radiolähetysasemat pystyvät käyttämään FM-taajuusalueella radiolähetyksiin. Radiotaajuudet eivät ole kaikki kuitenkaan tasavertaisia, vaan ne eroavat toisistaan siitä, miten hyvin ne tarjoavat kattavuutta ja kapasiteettiä. [3]

Alemmat taajuuskaistat tarjoavat leveämpää kattavuutta, koska ne pystyvät kulkemaan esineiden läpi tehokkaasti ja siten kulkemaan pidemmälle. Lisäksi niiden free-space pathloss on pienempi, mikä tarkoittaa, että signaali säilyy voimakkaampana pidemmillä etäisyyksillä. Alemmilla taajuuskaistoilla on kuitenkin huono kapasiteetti, koska alempia kaistoja on paljon käytössä, jolloin ainoastaan kapeita kaistoja on vapaana. Korkeammat taajuuskaistat taas eivät tarjoa niin hyvää kattavuutta, koska signaalit ovat heikkoja eivätkä pysty läpäisemään esineitä. Niillä on kuitenkin todella hyvä kapasiteetti, koska korkeita taajuuksia on enemmän saatavilla, joten on helpompaa luoda laajoja kaistoja.[3]

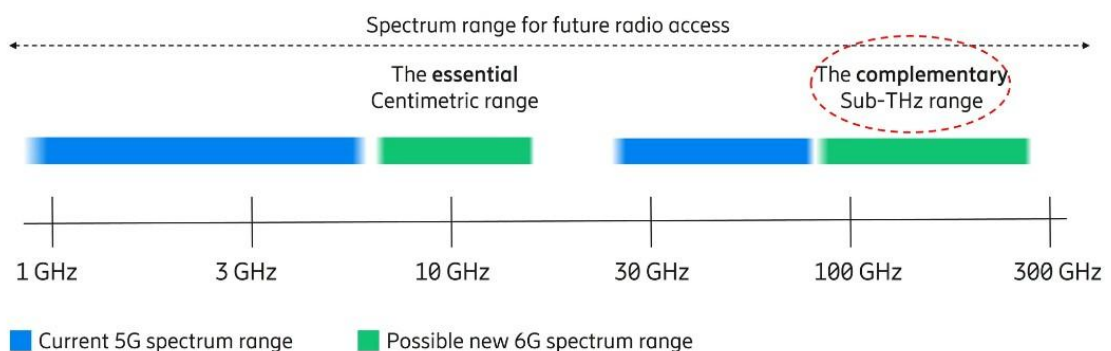
On myös olemassa niin sanottuja lisensoimattomia radiotaajuuksia, joita voi käyttää langattomaan viestintään ilman erillistä lupaa sääntelyviranomaiselta. Näillä taajuusalueilla eri käyttäjät tai laitteet voivat toimia ilman yksinoikeuksia taajuuksiin. Lisensoimaton taajuus on käytössä kaikille, kunhan kyseisen taajuusalueen sääntelymääräyksiä ja teknisiä vaatimuksia noudatetaan. Wi-Fi ja Bluetooth ovat tunnetuimmat teknologiat, jotka käyttävät lisensoimattomia taajuuksia. Tämä on mahdollistanut niiden laajan käyttöönoton ja esineiden internetin (IoT) kasvun. Lisensoimaton spektri kannustaa innovaatioon ja kokeiluihin, koska kehittäjät ja yritykset voivat luoda ja ottaa käyttöön langattomia laitteita ja palveluja ilman lisenssin hankkimista. [4]

Lisensioimattomilla taajuuksilla on myös omat heikkoudet, kuten sen avoin luonne, joka voi aiheuttaa ruuhkaa, koska monet laitteet käyttävät samoja taajuuksia yhdenaikaisesti. Lisensioimaton spektri ei tarjoa samaa häiriösuojausta kuin lisensioitu spektri, eli lisensioimattomilla taajuuksilla toimivien laitteiden on käytettävä tekniikoita, jotka estävät häiriöiden aiheuttamista muille tai häiriöiden kohteeksi joutumista. Vaikka lisensioimattomat taajuudet eivät vaadi erillistä lupaa, liittyy sen käyttämiseen sääntelymääräyksiä ja teknisiä standardeja, joita tulee noudattaa reilun ja vastuullisen käytön takaamiseksi. [4]

ITU (The International Telecommunication Union) on maailmanlaajuinen viranomainen, joka vastaa satelliittikiertorataravarojen ja radiotaajuuksien hallinnasta. Toisin sanoen aina, kun käynnistät radion tai television, soitat kotiin matkapuhelimella, käytät internetiä tai etsit sijaintiasi jollain laitteella, aina kun nousee lentokoneeseen, katsot säätiedotusta tai satelliittikuvia Maasta, käytät yhtä ITU:n maailmanlaajuisesti koordinoimista tärkeitä palveluista. [5]

2.1 6G verkot ja spektri

6G spektrillä viitataan uusiin ja ei käytettyihin taajuuskaistoihin, joita harkitaan tulevaan kuudennen sukupolven langattomaan viestintään. 6G:n oletetaan tutkivan korkeampia taajuusalueita, kuten potentiaalisia subterahertsi (sub-THz) kaistoja, toisinkuin aikaisemmat langattoman viestinnän sukupolvet. Nämä subterahertsi taajuudet on keskeinen tekijä saavuttamaan korkean nopeuden ja pienen viiveen, joita odotetaan 6G-verkolta. 6G-verkon oletetaan käyttävän ainakin senttimetriaaltoja (cmWaves), jotka sijoittuvat spektrissä välille 7 GHz – 15 GHz ja subterahertsitaajuuksia (sub-THz), jotka sijoittuvat spektrissä välille 90 GHz – 300 GHz. [6]



Kuva 1: 6G-spektrialue [7]

Senttimetriaaltojen spektrialueen odotetaan olevan suuri mahdollistaja 6G-verkoissa, joka tarjoaa laajan alan sekä suuren kapasiteetin tuleville 6G:n käyttökohteille. Se tulee

olemaan keskeisessä roolissa ratkaisemassa laaja-alaisen spektrikapasiteetin kriittistä puutetta, mikä mahdollistaa mobiilidata liikenteen jatkuvan kasvun, jopa vuoden 2030 jälkeen. Senttimetriaallot yhdistävät hyvän kattavuuden ja kohtuullisen suuret kaistanleveydet. Se myös tukee laajaa peittoaluetta massiivisen MIMO-tekniikan avulla ja mahdollistaa melko suuren spektrimäärän vapauttamisen matkapuhelinkäyttöön. Senttimetriaal-alueen alempien taajuuksien käyttöönotto, joka on vierekkäin nykyisten 'klassisten' keskipitkien taajuusalueiden kanssa, sallii olemassa olevan verkon suuremman uudelleenkäytön ja vähentää tukiasemien kustannusten ja energiakulutuksen tarvetta. Senttimetriaallot mahdollistavat suuremman kapasiteetin massiivisen tilallisen uudelleenkäytön ansiosta sekä mahdollistaa mobiililaajakaistan ja AR/VR-sovellusten, kuten holografisen viestinnän, jatkuvan kehityksen ja kasvun. [8]

Toisen suuren mahdollistajan 6G-verkoissa odotetaan olevan viestintä subterahertsialueella (sub-THz). Subterahertsi-viestinnän ainutlaatuisen kyvyn, tarjota erittäin korkeita tiedonsiirtonopeuksia, ansiosta se voi mahdollistaa äärimmäiset nopeudet ja alhaiset viiveet. Näitä ominaisuuksia tarvitaan 6G-käyttötapauksissa, kuten korkearesoluutioisessa holografisessa viestinnässä ja koneiden välisessä vuorovaikutuksessa. Subterahertsi-taajuudet voivat vapauttaa suuria määriä uutta spektriä ja siten tarjota valtavia tiedonsiirtonopeuksia. Näillä taajuuskaistoilla käyttö rajoittuu hyvin erityisiin tilanteisiin, joissa tarvitaan erittäin korkeita tiedonsiirtonopeuksia tai alhaista viivettä, koska sub-THz-lähetysten kantama on rajallinen. Subterahertsi-taajuuksien käyttöönoton odotetaan alkavan sub-THz-alueen alemmasta reunasta. Tämä johtuu alempien sub-THz-taajuuksien etenemisnopeuksista sekä siitä, että korkeammilla kaistoilla laite-ekosysteemin kypsyys saavuttaminen vie aikaa. Näiden tekijöiden yhdistelmänä sub-THz-alueella on kiinnostuksen kohteena W- ja D-kaistat. W-taajuuskaista kattaa noin 75 GHz – 110 GHz alueen ja D-taajuuskaista sijaitsee alempana sub-THz-alueella, tyypillisesti 110 GHz – 170 GHz välillä. Subterahertsi-alueen suurimpina haasteina käyttöönoton kannalta ovat haastavat etenemisolosuhteet, äärimmäiset tiedonsiirtonopeudet, kaupallisten radiotaajuuskomponenttien rajallinen saatavuus ja pieni kattavuusalue. [7]

2.2 Spektrin jakaminen ja hallinta 6G verkossa

World Radiocommunication Conference (WRC) tulee määrittämään vuonna 2027, mitä spektriä 6G mobiiliverkot saavat alkaa käyttämään. Siitä ei ole vielä tehty päätöksiä, mitä se saa käyttöönsä, mutta sitä pystytään jo ennustamaan. On hyvin todennäköistä, että 6G saa käyttöönsä osan 5G verkon spektristä, mutta myös uusia käyttämättömiä taajuusalueita. 5G verkoilta otetaan todennäköisesti noin 50 taajuuskaistaa 617 MHz – 6GHz ja 24-48,2 GHz:n väliltä. Uusia taajuuskaistoja tullaan näillä näkymin ottamaan 6-

24 GHz erityisesti 6-15 GHz ja 100GHz:n yläpuolelta. Näitä kaistoja ei ole aiemmin käytetty paljoa, mutta ne ovat houkuttelevia, sillä ne tarjoavat paljon suurempia kaistanleveyksiä. Suurempi kaistanleveys puolestaan auttaa parantamaan tiedonsiirtonopeuksia ja alentamaan viivettä. Lisää spektriä kyetään myös saamaan, kun vanhoja verkkoja otetaan pois käytöstä. Näistä vapautunut spektri voitaisiin ohjata kuudennen sukupolven mobiiliverkoille, jossa laajuutta tarvitaan. [9]

Pelkkä laaja spektri ei kuitenkaan riitä kaikkien 6G verkon vaatimuksien ja tavoitteiden saavuttamiseen. Spektrin käyttöä täytyy parantaa ja sen käytöstä täytyy saada tehokkaampaa. Yksi apu spektrin tehokkaampaan käyttöön on tietenkin uudet tiedonsiirtoteknologiat, joita esitellään kappaleessa 4. Spektrin tehokkaampaan käyttöön pyritään myös sillä, että aktiiviset ja passiiviset järjestelmät käyttäisivät yhdessä samaa kaistaa. Passiivisia järjestelmiä käytetään radioastronomiassa ja ympäristön seurannassa. Näille on siis varattu kaistoja yli 100 GHz:n taajuusalueelta, jolla kaikki muut lähetykset ovat kiellettyjä ITU RR 5.40 standardissa. On kuitenkin tutkittu, voisiko passiivisille kastoille ajoittain päästää myös kaupallista liikennöintiä, niin ettei se häiritsisi tutkimusjärjestelmiä.

2.2.1 Tekoälyn rooli spektrin hallinnassa

6G tuo myös mukanaan tekoälyn ja tekoälyä tullaan käyttämään spektrin hallintaan. ASIM-lähestymistavat (AI-Enabled Spectrum Management) tarkoittavat tekoälypohjaisia lähestymistapoja, joilla hallittaisiin spektriä paremmin ja saataisiin hyödynnettyä sitä tehokkaammin. ASIM-lähestymistavat jaetaan kolmeen pääryhmään Resurssien-, keilanja kanavanhallintaan. [10]

Resurssien hallinta tarkoittaa menetelmiä, joilla spektriä jaetaan eri käyttäjien kesken. Tähän kategoriaan kuuluu muutamia eri tapoja. Dynaamisen spektrin allokoinnissa (DSA) AI-pohjaiset menetelmät optimoivat verkon suorituskykyä. Tämä tapahtuu esimerkiksi AI-pohjaisella menetelmällä, joka mukautuu solujen tarpeisiin reaaliajassa ja tehostaa spektrin käyttöä. Liikenne ennuste on toinen tapa. Tässä tekoäly pyrkii ennustamaan verkon tarpeita etukäteen ja tämän ennusteen avulla optimoi spektrin käyttöä. JRO (Joint Resource Optimization) on myös yksi resurssien hallintaan kuuluvista tavoista. Se on verkon resurssien hallinnan menetelmä, jossa optimoidaan useita resursseja samanaikaisesti. Kaistanleveys, laskentakapasiteetti ja energian kulutus ovat esimerkkejä resursseista, joita optimoimalla verkon suorituskyky paranisi. [10]

Keilanhallinta on puolestaan luokka mihin liittyy antennikeilojen suunnan ja muodon hallinta, joka on hyödyllistä etenkin M-MIMO:ssa. Keilanhallinta jaetaan myös osa-alueisiin,

jotka ovat keilanvalinta, optimointi, kohdistus sekä seuranta. Keilanvalinta tarkoittaa sitä, että järjestelmä valitsee parhaan keilan eli antennisäteen useiden joukosta, joka auttaa esimerkiksi M-MIMO järjestelmissä vähentämään kuormaa. Keilan suuntaus puolestaan nimensä mukaisesti tarkoittaa suuntausta esimerkiksi laitteen liikkuaessa järjestelmä suuntaa valitun keilan parhaan yhteyden mahdollistamiseksi. Optimoinnissa järjestelmä keilaa niin, että signaalin laatu paranisi ja energiankulutus vähenisi. Järjestelmän on myös hyödyllistä seurata keilaa, jolloin verkko voi mukautua nopeasti muuttuviin olosuhteisiin kuten esteisiin. [10]

Kanavanhallinta on tärkeä osa spektrin tehokasta käyttöä ja tekoälypohjainen kanavanhallinta tarjoaa merkittävää etua perinteiseen kanavanhallintaan. Tekoälypohjainen kanavanhallinta jaetaan kahteen pääryhmään, jotka ovat kanavaestimaatio ja spektrin tunnistus. Kanavaestimoinnilla tarkoitetaan tässä yhteydessä sitä, että tekoäly arvioi langattoman viestintäkanavan ominaisuuksia ja signaali saadaan lähetettyä ja vastaanotettua mahdollisimman tehokkaasti. Spektrin tunnistuksessa puolestaan hyödynnetään tekoälyn syväoppimista signaalien tunnistuksen ja mukautumiskyvyn parantamiseksi. [10]

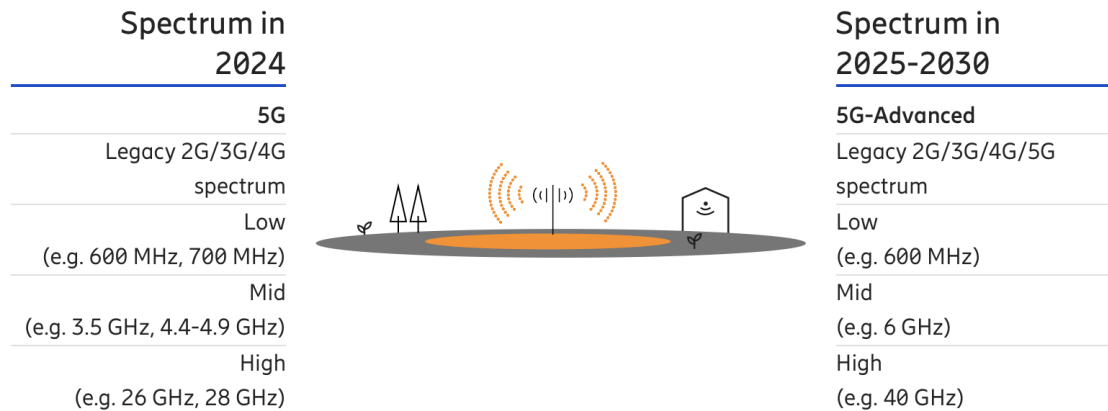
2.2.2 Lisensoitu ja lisensoimaton spektri

Spektri voidaan jakaa lisensoituun ja lisensoimattomaan sen perusteella, miten niitä hallinnoidaan. Lisensoitu spektri tarkoittaa spektriä, joka on myönnetty jonkun tietyn tahon käyttöön. Esimerkiksi suomessa teleoperaattoreilla, kuten Elisalla, Teliällä ja DNA:lla on oma lisensoitu taajuusalueensa eli spektrinsä. Operaattorit maksavat suuria summia omasta taajuusalueesta, mutta sen ansiosta pystyvät tarjoamaan parempia yhteyksiä. Lisensoidun spektrin etu on se, että hallitseva taho pystyy itse määrittelemään ketkä sitä saavat käyttää ja täten se ei ruuhkaudu. Lisensoimaton spektri puolestaan tarkoittaa taajuusaluetta, jota ei ole myönnetty millekään taholle. Kodin wifi verkko toimii esimerkiksi lisensoimattomalla spektrillä ja sen käytöstä ei joudu maksamaan. Huonona puolena tässä on se, että koska siinä ei ole mitään rajoitteita se voi ajoittain ruuhkautua tietyillä alueilla. [11]

6G mobiiliverkoissa odotetaan hyödynnettävän näiden yhdistelmiä. Tästä olisi paljon hyötyä, kun tavoitellaan nopeampaa ja laadukkaampaa tiedonsiirtoa. Yhdistelmä auttaisi energiatehokkuudessa, kun esimerkiksi tärkeää liikennettä keskitettäisiin lisensoidulle alueelle ja vähemmän tärkeä lisensoimattomalle. Lisensoimatonta kanavaa myös voitaisiin hyödyntää silloin kun siellä ei ole niin paljon ruuhkaa, mikä tekisi tilaa lisensoidulle kanavalle. [12]

2.3 Spektriin liittyvät haasteet

Edellisissä kappaleissa esiteltiin paljon hienoja tapoja, miten spektriä saadaan hallittua ja hyödynnettyä tehokkaasti. Olisi kuitenkin väärin ajatella, että 6G:hen siirtyminen on pelkkää ruusuilla tanssimista spektrin osalta. Vaikka tapoja spektrin hyödyntämiseen ja jakamiseen on jo monia silti väistämättä, tullaan törmäämään ongelmiin spektrin riittöisyyden suhteen.



Kuva 2: Spektrin saatavuus tällä hetkellä ja vuoteen 2030 mennessä [12]

6G visiot ja suunnitelmat tulevat vaatimaan paljon spektriä. Kuvassa 1 on optimistinen näkemys siitä miltä spektri tulee näyttämään 2030. Sitä siis saadaan kasvatettua esimerkiksi tällä hetkellä mid-band alue vaihtelee 700 MHz – 1GHz välillä riippuen markkinoista, mutta 2030 sen arvioidaan vaihtelevan 800 MHz – 1,5 GHz välillä. Tämä on jo selvä parannus, mutta 6G verkoissa osa käyttötapauksista vaatii jopa 3 GHz laajuista spektriä, joten edelleen jäädään 2,2-1,5 GHz vajaaksi. Tämä siis tarkoittaa, että spektriä olisi jotenkin saatava lisää. [12]

Toinen haaste liittyy korkeisiin taajuusalueisiin. Sub-terahertsialue tarjoaa valtavasti kapasiteettiä, mutta sen käyttö ei ole ongelmaton. Siihen liittyy haasteita kuten suuri etenemisvaimennus, kaasujen aiheuttama vaimennus, sääolosuhteet sekä esteet. Etenemisvaimennus tarkoittaa häviötä, joka johtuu aaltojen korkeasta taajuudesta. Lyhyelläkin etäisyydellä korkean taajuuden aalloille tapahtuu merkittävää häviötä verrattuna matalataajuuksiin aaltoihin. [13]

Edellä mainittu häviäminen johtuu aiemmin mainituista kaasujen aiheuttamasta vaimennuksesta, sääolosuhteista ja esteistä. Kaasujen aiheuttamaa vaimennusta tapahtuu esimerkiksi hapen ja vesihöyryn seurauksena. Ne absorboivat aallon energiaa, jonka seu-

rauksena se vaimenee, joka lyhentää kantamaa ja heikentää luotettavuutta. Sääolosuhteilla on myös merkitystä. Sade, sumu ja lumi voivat vaimentaa signaaleja, jonka takia korkeataajuuksiset aallot eivät ole niin luotettavia huonolla säällä. Korkeataajuuksiset signaalit ovat myös paljon herkempiä fyysisille esteille. Aallonpituuden ollessa pieni signaali ei onnistu kiertämään estettä, kuten matalataajuuksiset suuren aallonpituuden omaavat. Tämä aiheuttaa ongelmia esimerkiksi tiheissä kaupunkiolosuhteissa. [13]

3. ITU

ITU eli International Telecommunication Unit on järjestö, joka toimii yhdistyneiden kansakuntien alla ja keskittyy tietoliikenteen sekä viestintäteknologian standardointiin. Se on perustettu vuonna 1865. Alun perin se perustettiin telegrafien sääntelyyn, mutta nykyään se kattaa koko tietoliikenteen ja viestintäteknologian. Järjestöön kuuluu Yhdistyneiden kansakuntien jäsenmaiden lisäksi yli tuhat yritystä, yliopistoa sekä kansainvälisiä ja alueellisia organisaatioita. [14]

ITU:lla on kolme eri pääaluetta, joilla on omat vastuualueet. ITU-R eli ITU Radiocommunication Sector vastaa taajuuksien käytön sääntelystä ja standardoinnista. Se luo sääntöjä taajuusalueiden käyttöön, jotta ne voidaan jakaa tehokkaasti eri viestintäpalveluille, kuten mobiiliverkoille ja satelliittiviestinnälle. Tähän esimerkiksi kuuluu 6G mobiiliverkon kehitykselle asetettujen vaatimusten määrittely. [14]

ITU-T eli ITU Telecommunication Standardization Sector vastaa tietoliikenneteknologioiden standardoinnista. Se luo ja ylläpitää teknisiä standardeja, jotka mahdollistavat laitteiden ja järjestelmien yhteensopivuuden globaalisti. Se säätelee esimerkiksi internetin ja puhelintekniikan standardeja. Standardeissa otetaan aina huomioon myös kustannustehokkuus. [14]

ITU-D eli ITU Telecommunication Development Sector edistää tietoliikenne teknologian saatavuutta. Sen etusijalla on eniten tarvitsevat alueet kuten kehittyvät maat. Sen työ painottuu taloudellisten mahdollisuuksien luomiseen, digitaalisten taitojen osaamiseen ja kehittämiseen, sukupuolten tasa-arvon tukemiseen ja kestäväen kehityksen sekä kiertotalouden edistämiseen. [14]

Konkreettisesti mitä ITU säätelee mobiiliverkkoihin liittyen, selviää esimerkiksi ITU:n WRC-19 kokouksesta. Siellä säädeltiin esimerkiksi 5G taajuusalueita. 5G:lle tunnistettiin taajuudet 24,25-27,5 GHz, 37-43,5 GHz, 45,5-47 GHz, 47,2-48,2 GHz ja 66-71 GHz. Taajuusalueita 45,5-47 GHz ja 47,2-48,2 GHz ei kuitenkaan otettu välittömästi käyttöön maailmanlaajuisesti, sillä Kiinalla ja Turkilla on muita järjestelmiä näillä taajuusalueilla. Taajuusalue 24,25-27,5 GHz oli pitkään ollut kiistanalainen, sillä se oli hyvin lähellä satelliittien käyttämää passiivista taajuusaluetta 23,6-24 GHz. 5G tukiasemien pelättiin aiheuttavan häiriötä sääsatelliittien tarkkuuksissa. Päädettiin kuitenkin kompromissiin, jossa tukiasemien lähetysteholle asetettiin rajat, jotta lähetysteho ei vuotaisi läheiselle satelliittitaajuudelle. Konferenssissa myös sovittiin, että tähän aiheeseen palataan

vuonna 2027, jolloin rajoitusta tiukennetaan entisestään. Tässä nähdään siis ITU:n toimintaa kuinka se ei mielivaltaisesti pääätä kaikkea vaan ottaa kaikki osapuolet huomioon ja tekee myös tarvittaessa kompromisseja. [15]

3.1 ITU ja tietoturva

Yksi tärkeistä teemoista ITU:lle on tietoturva. ITU perustikin vuonna 2007 Global Cybersecurity Agendan eli GCA:n. Sen tavoitteina on parantaa globaalia kyberturvallisuutta ja se keskittyy erityisesti kyberturvallisuuden teknologisen kehityksen ja tulevien verkkojen osalta. Se on siis suuressa roolissa määrittelemässä tulevan 6G:n tietoturva vaatimuksia. [16]

GCA:lla on viisi pääaluetta, jotka ovat lainsäädännölliset toimet, tekniset ja menettelylliset toimet, organisatoriset tavoitteet, kapasiteetin kehittäminen ja kansainvälinen yhteistyö. [16]

ITU ei ole vielä julkaissut 6G standardejaan, joten se ei ole myöskään tietenkään määritellyt mitään 6G tietoturvaan liittyvää vielä. Voidaan kuitenkin aiemmin selvinneiden 6G odotusten perusteella todeta muutamia seikkoja. Ensinnäkin tekoäly tulee olemaan suuressa roolissa kuudennen sukupolven verkoissa. Tämä tulee vaatimaan isoja uudistuksia tietoturvaan, sillä aiemmissa mobiiliverkoissa tekoäly ei ole ollut niin vahvasti läsnä. 6G tuo mukanaan myös uusia tiedonsiirtotekniikoita, minkä vuoksi tietoturvaa on kehitettävä niin, ettei näistä uusista tavoista löydy heikkouksia. Monia uusia laitteita tulee myös varmasti tulevaisuuden myötä liittymään verkkoon, jonka takia tietoturva vaatii parannuksia.

3.2 Ympäristö ja kestävä kehitys

Kuten kaikissa muissakin nykypäivän asioissa ja kehityksessä, niin myös digitalisaation kehityksessä otetaan ympäristö huomioon. ITU:n tavoitteena on vähentää tieto- ja viestintätekniikan kasvihuonekaasupäästöjä sekä energiankulutusta. Tästä esimerkkinä laitteista koitetaan tehdä pitkäikäisempiä ja uudelleenkäytettäviä, jolloin e-jäte vähenisi. ITU työskentelee päästöjen raportoinnin parantamiseksi ja yrittää saada teknologia yrityksiä sitoutumaan omalta osaltaan ilmastotavoitteisiin, niin että ilmaston lämpeneminen saataisiin pidettyä 1,5 asteessa. [17] [18]

Näiden tavoitteiden pohjalta voidaan tehdä oletuksia, miten ITU tulee ohjailemaan 6G kehitystä ympäristöystävälliseen suuntaan. ITU haluaa siis vähentää päästöjä tieto- ja

viestintätekniiikan sektorilla. Tämä voisi näkyä esimerkiksi niin, että vaadittaisiin energia-
tehokkaampia verkkoja. Verkkokomponenteista ja datakeskuksista voitaisiin myös pyrkiä
tekemään vähäenergisiä. Suunniteltaessa uusia 6G-teknologiaa hyödyntäviä lait-
teita tai esimerkiksi 6G antennia ITU voisi myös painottaa laitteiden pitkäikäisyyttä. Kun
laitteista tehtäisiin kestävämpiä ja pitkäikäisempiä, niin hiilijalanjälki pysyisi maltillisem-
pana.

ITU voisi myös mahdollisesti luoda kokonaan standardin, joka vaatii päästöraportin.
Tämmöisiä standardeja on jo luotu, kuten vaikka ITU-T L.1420. Itu voisi kuitenkin 6G
standardejen yhteydessä lisätä sinne kohdan, jossa esimerkiksi teleoperaattoreja/verk-
kotoimijoita velvoitettaisiin seuraamaan ja raportoimaan omaa hiilijalanjälkeään. Näin
pystyttäisiin seuraamaan ja varmistamaan kestävä kehityksen tavoitteiden toteutumisen.
ITU:lla on myös standardejen lisäksi tapana kannustaa ja neuvoa ICT asioissa eikä
ainoastaan määrätä. ITU siis voisi kannustaa ja auttaa tutkimaan mahdollisuuksia miten
esimerkiksi uusiutuvaa energiaa voitaisiin paremmin hyödyntää 6G:ssä. [19]

3.3 Vaatimukset

ITU-vaatimukset viittaavat Kansainvälisen televiestintäliiton laatimiin standardeihin, suo-
situksiin ja sääntöihin, jotka ohjaavat maailmanlaajuisia televiestinnän ja tietoliikenteen
käytäntöjä. ITU-vaatimukseen kuuluu mm. tekniset standardit, jotka määrittelevät teknolo-
gioiden, kuten viestintäprotokollien, laitteiden ja järjestelmien, toiminnalliset vaatimukset.
ITU-vaatimukset on luotu useista syistä: ne varmistavat yhteen toimivuuden, jotta eri
maiden ja yritysten kehittämät järjestelmät ja teknologiat voivat kommunikoida keske-
näin saumattomasti. Optimoivat rajallisten resurssien, kuten radiotaajuuksien, käytön
maailmanlaajuisesti ja estävät teknologioiden tai palveluiden aiheuttamat häiriöt tois-
tensa välillä. Lisäksi ITU-vaatimukset tukevat globaalia yhdenmukaisuutta edistämällä
kansainvälistä kauppaa ja liiketoimintaa luomalla yhtenäiset standardit, jotka alentavat
kehitys- ja käyttökustannuksia. Ne myös helpottavat uusien teknologioiden käyttöönottoa
mahdollistamalla niiden integroinnin olemassa oleviin järjestelmiin sekä edistävät oikeu-
denmukaisia markkinaehtoja luomalla standardit, joihin kaikki toimijat voivat sitoutua.
GSM-, 3G-, 4G-, 5G- ja tulevaisuuden 6G-verkot noudattavat ITU:n määrittelemiä stan-
dardeja ja vaatimuksia, jotka mahdollistavat matkapuhelinten käytön maailmanlaajui-
sesti. [20]

3.3.1 5G ja 6G vaatimukset

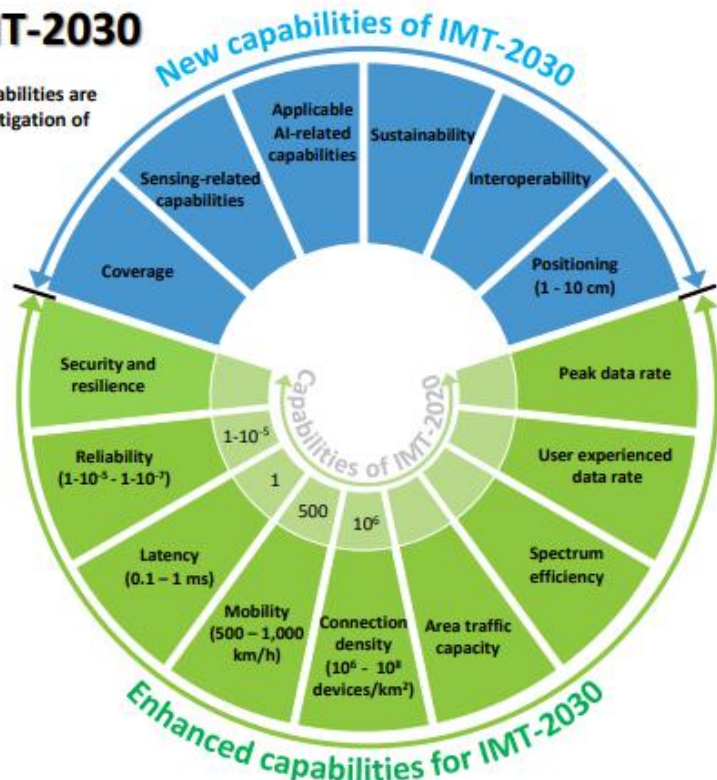
ITU määrittäi vähimmäistekniset suorituskykyvaatimukset IMT-2020:lle (5G:lle) vuonna 2017 ja ne julkaistiin virallisesti ITU-R suosituksessa M.2410-0. Tässä asiakirjassa määritellyt keskeiset vähimmäistekniset suorituskykyvaatimukset on laadittu IMT-2020-radio-liittymäteknologioiden (RIT) ja niiden yhdistelmien (SRIT) ehdokkaiden yhtenäisen määrittelyn, spesifioinnin ja arvioinnin mahdollistamiseksi ITU-R suositusten ja raporttien, kuten IMT-2020 yksityiskohtaisten teknisten spesifikaatioiden kehittämisen yhteydessä. Näiden vaatimusten tarkoituksena on varmistaa, että IMT-2020-tekniikat pystyvät täyttämään IMT-2020-tavoitteet ja asettaa tietty suorituskykytaso.

IMT-2030:lle (6G:lle) ITU määrittäi vähimmäistekniset suorituskykyvaatimukset vuonna 2023 ja ne julkaistiin virallisesti ITU-R suosituksessa M.2160-0. IMT-2030 odotetaan tarjoavan parannettuja ominaisuuksia verrattuna IMT-2020 määriteltyihin ominaisuuksiin. Ominaisuuksille annettujen arvojen vaihteluväliä pidetään tutkimuksen ja kehityksen tavoitteina IMT-2030 osalta. Kaikilla vaihteluvälin arvoilla on yhtä suuri tärkeys tutkimuksessa ja kehityksessä.

IMT-2020 ja IMT-2030 yhteisiin vähimmäisteknisiin suorituskykyvaatimuksiin kuuluu huippudatanopeus, käyttäjän kokema tiedonsiirtonopeus, spektritehokkuus, alueen liikennekapasiteetti, liitännätiheys, liikkuvuus, latenssi, luotettavuus sekä tietoturva ja resilienssi. Näiden lisäksi IMT-2030 tuo mukanaan uusia vaatimuksia, jotka ovat peittoalue, aistimiseen liittyvät kyvykkyydet, sovellettavat tekoälyyn liittyvät kyvykkyydet, kestävyys, yhteen toimivuus ja paikannus. Kuvassa 3 nähdään IMT-2020 olemassa olevat vaatimukset ja niiden vähimmäisteknilliset suorituskykyvaatimukset sekä IMT-2030 tulevat vaatimukset ja niiden vähimmäisteknilliset suorituskykyvaatimukset.

Capabilities of IMT-2030

NOTE: The range of values given for capabilities are estimated targets for research and investigation of IMT-2030.



Kuva 3: IMT-2020 ja IMT-2030 vaatimukset [21]

Suorituskykyyn liittyviin vaatimuksiin kuuluu huippudatanopeus, käyttäjän kokema tiedonsiirtonopeus ja spektritehokkuus, jotka ovat jaettu edelleen huippudatanopeuteen, huippuspektritehokkuuteen, käyttäjän kokemaan datanopeuteen, käyttäjän spektritehokkuuden 5. prosenttipisteeseen, keskimääräiseen spektritehokkuuteen ja kaistanleveyteen.

Huippudatanopeudella tarkoitetaan suurinta saavutettavissa olevaa datanopeutta ihanteellisissa olosuhteissa (bit/s), mikä tarkoittaa vastaanotettuja databittejä virheettömissä olosuhteissa, jotka voidaan osoittaa yhdelle mobiiliasemalle, kun kaikki vastaavan linkisuunnan osoitettavat radiovarat ovat käytössä. IMT-2020:lle huippudatanopeuden vähimmäisvaatimukset ovat seuraavat: alalinkin huippudatanopeus on 20Gbit/s ja ylälinkin huippudatanopeus on 10Gbit/s. Huippuspektritehokkuudella puolestaan tarkoitetaan suurinta datanopeutta ihanteellisissa olosuhteissa kanavakaistaan suhteutettuna (bit/s/Hz), jossa suurin datanopeus tarkoittaa vastaanotettuja databittejä virheettömissä olosuhteissa, jotka voidaan osoittaa yhdelle mobiiliasemalle, kun kaikki vastaavan linkisuunnan osoitettavat radiovarat ovat käytössä. Huippuspektritehokkuuden vähimmäisvaatimukset IMT-2020:lle ovat: alalinkin huippuspektritehokkuus on 30 bit/s/Hz ja ylälinkin huippuspektritehokkuus on 15 bit/s/Hz. Käyttäjän kokema datanopeus on käyttäjän

läpimenonopeuden kumulatiivisen jakaumafunktion (CDF) 5% kohta. Käyttäjän läpimenonopeus määritellään oikein vastaanotettujen bittien määräksi, eli niiden bittien määräksi, jotka sisältyvät palveludatayksiköihin, jotka on toimitettu kerrokseen 3 tietyn ajanjakson aikana. Käyttäjän kokemien datanopeuksien tavoitearvot IMT-2020:lle ovat: alalinkin datanopeus on 100Mbit/s ja ylalinkin datanopeus on 50Mbit/s. [21] IMT-2030:lle huipputiedonsiirtonopeuden tutkimustavoitteet ovat suurempia kuin IMT-2020 vastaavat. Esimerkkeinä tietyissä skenaarioissa mainitaan 50, 100 ja 200 Gbit/s, mutta myös muita arvoja harkitaan. Käyttäjän kokeman tiedonsiirtonopeuden tutkimustavoitteet ovat myös suurempia kuin IMT-2020 vastaavat. Esimerkkeinä mainitaan 300 ja 500 Mbit/s, mutta myös suurempia arvoja tutkitaan ja harkitaan. Spektritehokkuuden tutkimustavoitteissa mainitaan esimerkiksi arvoja, jotka ovat 1,5- ja 3-kertaiset verrattuna IMT-2020 vastaviin, mutta myös suurempia arvoja voidaan tutkia ja harkita. [21]

Käyttäjän spektritehokkuuden 5. prosenttipiste on normalisoidun käyttäjän läpimenonopeuden kumulatiivisen jakaumafunktion 5% kohta. Normalisoitu käyttäjän läpimenonopeus määritellään oikein vastaanotettujen bittien määräksi, eli niiden bittien määräksi, jotka sisältyvät palveludatayksiköihin, jotka on toimitettu kerrokseen 3 tietyn ajanjakson aikana, jaettuna kanavakaistalla. Se mitataan yksikössä bit/s/Hz. Eri testikäyttöympäristöjen vähimmäisvaatimukset IMT-2020:lle ovat taulukossa 1.

Taulukko 1: Käyttäjän spektritehokkuuden 5. prosenttipiste

Testiympäristö	Alalinkki (bit/s/Hz)	Ylalinkki (bit/s/Hz)
Sisätilan hotspot – eMBB	0,3	0,21
Tiheä kaupunkiympäristö – eMBB	0,225	0,15
Maaseutu – eMBB	0,12	0,045

Keskimääräinen spektritehokkuus on kaikkien käyttäjien yhteenlaskettu läpimenonopeus, jaettuna tietyn taajuuskaistan kanavakaistalla sekä Transmission Reception Point (TRxP) -yksiköiden määrällä. Se mitataan yksikössä bit/s/Hz/TRxP. Eri testikäyttöympäristöjen keskimääräisen spektritehokkuuden vähimmäisvaatimukset IMT-2020:lle ovat taulukossa 2.

Taulukko 2: Keskimääräinen spektritehokkuus

Testiympäristö	Alalinkki (bit/s/Hz/TRxP)	Ylälinkki (bit/s/Hz/TRxP)
Sisätilan hotspot – eMBB	9	6,75
Tiheä kaupunkiympäristö – eMBB	7,8	5,4
Maaseutu – eMBB	3,3	1,6

Kaistanleveys on suurin yhdistetty järjestelmän kaistanleveys. Kaistanleveys voi olla yhden tai useamman radiotaajuuskantajan (RF) tukema. Kaistanleveyden vähimmäisvaatimus IMT-2020:lle on vähintään 100 MHz. RIT-/SRIT-teknologian tulee tukea jopa 1 GHz kaistanleveyksiä korkeammilla taajuusalueilla (esim. yli 6 GHz). [21] IMT-2030:lle ei olla ITU-R suosituksessa annettu arvoja käyttäjän spektritehokkuuden 5. prosenttipisteeseen, keskimääräiseen spektritehokkuuteen eikä kaistanleveyteen.

Kapasiteettiin ja tiheyteen liittyviin ominaisuuksiin kuuluu alueen liikennekapasiteetti ja liitännäistiheys. Alueen liikennekapasiteetti on kokonaisliikenteen läpäisykyky tietyllä maantieteellisellä alueella (Mbit/s/m^2). Läpäisykyky tarkoittaa oikein vastaanotettujen bittien määrää, jotka sisältyvät kerrokseen 3 toimitettuihin palveludatayksiköihin (Service Data Unit, SDU) tietyn ajanjakson aikana. Alalinkin alueellisen liikennekapasiteetin tavoitearvo on 10 Mbit/s/m^2 sisätilan hotspotympäristössä. Liitännäistiheys on kaikkien tietyn palvelutason (Quality of Service, QoS) täyttävien laitteiden kokonaismäärä tietyllä alueella (laitteet/ km^2). Liitännäistiheyden vähimmäisvaatimus on 1 000 000 laitetta/ km^2 . [21] Alueellisen liikennekapasiteetin mahdolliset tutkimustavoite arvot IMT-2030:lle ovat 30 ja 50 Mbit/s/m^2 , jotka ovat suurempia kuin IMT-2020 vastaavat. Tässäkin myös suurempia arvoja voidaan tutkia ja harkita. Liitännäistiheyden tutkimustavoitteet ovat puolestaan 10^6 – 10^8 laitetta/ km^2 . [21]

Käyttäjä kokemukseen ja liikkeeseen liittyvät ominaisuudet ovat käyttäjätason viive, ohjaustason viive, liikkuvuus ja liikkuvuuden keskeytysaika. Käyttäjätason viive on radioviestintäverkon osuus ajasta, joka kuluu, kun lähde lähettää paketin ja kohde vastaanottaa sen (ms). Se määritellään yksisuuntaisena aikana, joka tarvitaan sovelluserroksen paketin/viestin onnistuneeseen toimitukseen. Käyttäjätason viiveen vähimmäisvaatimukset ovat: 4 ms eMBB ja 1 ms Ultra-Reliable Low Latency Communication (URLLC).

Ohjaustason viive viittaa siirtymäaikaan kaikkein ”energiätehokkimmästä” tilasta jatkuvan tiedonsiirron alkamiseen. Ohjaustason viiveen vähimmäisvaatimus on 20 ms, mutta kehittäjiä rohkaistaan harkitsemaan matalampaa ohjaustason viivettä, esimerkiksi 10

ms. Liikkuvuus tarkoittaa suurinta mobiiliaseman nopeutta (km/h), jolla määritelty QoS voidaan saavuttaa. Tämä vaatimus on määritelty arviointia varten eMBB-käyttöskenaariossa, joka on taulukossa 3.

Taulukko 3: Liikkuvuus

Testiympäristö	Normalisoitu liikennekanavan linkin datanopeus (bit/s/Hz)	liikkuvuus (km/h)
Sisätilan hotspot – eMBB	1,5	10
Tiheä kaupunkiympäristö – eMBB	1,12	30
Maaseutu – eMBB	0,8	120
	0,45	500

Liikkuvuuden keskeytysaika on järjestelmän tukema lyhin aikajakso, jonka aikana käyttäjäpäälaite ei voi vaihtaa käyttäjätason paketteja minkään tukiaseman kanssa siirtymätilanteiden aikana. Liikkuvuuden keskeytysajan vähimmäisvaatimus on 0 ms. [21] IMT-2030:lle liikkuvuuden tutkimustavoitteet voivat olla 500 – 1000 km/h välillä, jotka ovat suurempia kuin IMT-2020 vastaavat. [21]

Turvallisuuteen ja vakauteen liittyviin ominaisuuksiin kuuluu luotettavuus ja energiatehokkuus. Luotettavuus tarkoittaa todennäköisyyttä, että kerroksen 2/3 paketti siirretään onnistuneesti vaaditun enimmäisajan kuluessa. Luotettavuuden vähimmäisvaatimus IMT-2020:lle on onnistumistodennäköisyys $1-10^{-5}$ kerroksen 2 PDU (protokolladatan yksikkö) siirrossa, jonka koko on 32 tavua ja joka toimitetaan 1 ms kanavalaadun ollessa peittoalueen reunalla Urban Macro-URLLC-testikäyttöympäristössä. Energiatehokkuus tarkoittaa RIT-/SRIT-tekniikan kykyä minimoida radioverkon energiakulutus suhteessa tarjottuun liikennekapasiteettiin. RIT-/SRIT-tekniikan tulee kyetä tukemaan korkeaa lepotilan suhdetta ja pitkää lepotilan kestoa IMT-2020:ssä. [21] IMT-2030:lle luotettavuuden tutkimustavoite voi vaihdella välillä $1-10^{-5}$ ja $1-10^{-7}$. IMT-2030 vaatimuksissa on mainittuna myös erikseen tietoturva ja resilienssi. Tietoturva viittaa käyttäjätietojen ja signaalien luottamuksellisuuden, eheyden ja saatavuuden säilyttämiseen sekä verkkojen, laitteiden ja järjestelmien suojaamiseen kyberhyökkäyksiltä, kuten hakeroinnilta, hajautetuilta palvelunestohyökkäyksiltä, väliintuloilta ja muilta vastaavilta. Resilienssi taas viittaa verkkojen ja järjestelmien kykyyn toimia oikein luonnollisen tai ihmisen aiheuttaman häiriön aikana ja sen jälkeen, kuten esimerkiksi ensisijaisen virtalähteen menetyksen yhteydessä. [21]

IMT-2030:n uudet vaatimukset ovat peittoalue, aistimiseen liittyvät kyvykkyydet, sovellettavat tekoälyyn liittyvät kyvykkyydet, kestävyys, yhteen toimivuus ja paikannus. Peittoalue viittaa kykyyn tarjota käyttäjille pääsy viestintäpalveluihin halutulla palvelualueella. Tässä yhteydessä peittoalue määritellään yksittäisen solun reunaviivan etäisyytenä, joka lasketaan linkkibudjetin analyysin avulla. Paikannus on kyky laskea liitettyjen laitteiden likimääräinen sijainti. Paikannustarkkuus määritellään erona lasketun vaakapystysuoran sijainnin ja laitteen todellisen vaakapystysuoran sijainnin välillä. Paikannustarkkuuden tutkimustavoite voi olla 1–10cm. Aistimiseen liittyvät kyvykkyydet viittaavat kykyyn tarjota toimintoja radion käyttöliittymässä, kuten etäisyyden/nopeuden/kulman estimointia, kohteiden havaitsemista, paikannusta, kuvantamista ja kartoitusta. Näitä kyvykkyyksiä voidaan mitata tarkkuuden, resoluution, havaintotahdin, virrehälytysten määrän ja muiden vastaavien ominaisuuksien perusteella. Sovellettavat tekoälyyn liittyvät kyvykkyydet viittaavat kykyyn tarjota tiettyjä toimintoja IMT-2030-järjestelmän kautta tekoälypohjaisten sovellusten tukemiseksi. Näihin toimintoihin kuuluvat hajautettu datankäsittely, hajautettu oppiminen, tekoälylaskenta, tekoälymallien suorittaminen ja mallien päätelyprosessi sekä muita vastaavia toimintoja. Kestävyys viittaa verkkojen ja laitteiden kykyyn vähentää kasvihuonepäästöjä ja muita ympäristövaikutuksia koko elinkaarensa aikana. Energiatohokkuus on mitattavissa oleva kestävyuden mittari. Se viittaa siirrettyjen tai vastaanotettujen informaatiobittien määrään energiakulutuksen yksikköä kohden (bit/Joule). Energiatohokkuuden odotetaan parantuvan kapasiteetin kasvun myötä, jotta kokonaisenergiankulutus voidaan minimoida. Yhteen toimivuus viittaa radion käyttöliittymän perustuvan osapuolten osallistavuuteen ja läpinäkyvyyteen, jotta järjestelmän eri yksiköiden välinen toiminnallisuus voidaan mahdollistaa. [21]

4. TIEDONSIIRTOTEKNOLOGIAT

Tiedonsiirtoteknologiat muodostavat perustan mobiiliverkoille. Niiden avulla mahdollistetaan tehokas, luotettava ja turvallinen kommunikaatio käyttäjien sekä verkkojen välillä. Tiedonsiirtoteknologiat ovat vuosien aikana kehittyneet ja uusia on kehitetty tarpeiden kasvaessa. 2G:ssä analogisista äänilyhteyksistä siirryttiin digitaaliseen tiedonsiirtoon, 3G toi mukanaan laajakaistapalvelut ja internet pohjaiset ratkaisut saapuivat 4G:n ja 5G:n myötä. Suuret tiedonsiirto nopeudet, terahertsialueet ja massiivinen laitemäärä tuovat mukanaan uusia haasteita tiedonsiirtoteknologioille, kun siirrytään 6G verkkoihin.

4.1 Modulaatiotekniikat

Modulaatio tekniikat ovat yksi tärkeä osa nykypäivän mobiiliverkkoja. Niiden avulla data koodataan sähkömagneettiseen signaaliin, jolloin se voidaan lähettää viestintäkanavan kautta. Modulaatio tekniikoita on useita ja niitä kehitetään, jotta tieto saadaan siirrettyä mahdollisimman tehokkaasti ja luotettavasti. Tässä kappaleessa tutustutaan muutamiin modulaatio tekniikoihin, joita uskotaan olevan käytössä kuudennen sukupolven mobiiliverkoissa. Näitä tekniikoita ovat kehittyneet OFDM tekniikat, OTFS ja NOMA.

OFDM eli Orthogonal Frequency Division Multiplexin on tiedonsiirtotekniikka, jossa data jaetaan alikantoaaltoihin. Aallot ovat rinnakkain ja ortogonaalisilla eli ei häiritsevilla taajuuskaistoilla. Tämän avulla saavutetaan korkea spektri tehokkuus ja OFDM toimii todella hyvin staattisissa ympäristöissä, jossa kanavaolosuhteet eivät muutu merkittävästi ajan kuluessa. Heikkoutena tässä tekniikassa onkin sen herkkyyks muuttuville kanavaolosuhteille, joka voi häiritä ortogonaalisuutta ja heikentää tiedonsiirron luotettavuutta. Sopivilla alikanavaleveyden ja symbolipituuden parametrisoinneilla OFDM toimii kuitenkin hyvin mobiilikanavassa. [22]

OTFS eli Orthogonal Time Frequency Space on OFDM tapaan kehittynyt aaltomuoto-tekniologia, mutta se eroaa tästä signaalimodulaatiota koskevassa lähestymistavassaan. OTFS tekniikassa symbolit jaetaan sekä aika- että taajuusalueille eikä ainoastaan yhdelle ulottuvuudelle niin kuin OFDM tekniikassa. Tieto on siis jaettu laajemmalle alueelle, jolloin yksittäinen häiriö tai signaalin heikkeneminen ei vaikuta merkittävästi. OTFS on myös rakennettu viive-Doppler-pohjaisesti, jonka myötä se kestää aika hajontaa ja doppler-vaikutusta. Näiden ominaisuuksien ansiosta OTFS sopii hyvin olosuhteisiin, jossa käyttäjä liikkuu nopeasti kuten korkeanopeuksiset junat tai lentokoneet. [22]

NOMA eli Non-Orthogonal Multiple Access on modulaatio tekniikka, jossa suuri määrä käyttäjiä pystyy jakamaan saman aika- ja taajuusresurssin. NOMA:n lähestymistapa eroaa aiemmin esitellyistä tekniikoista siinä, että käyttäjien signaalit erotetaan toisistaan teho- tai koodijaon avulla. [23] Tehojaossa käyttäjien signaalit yhdistetään superposi-tiokoodauksen avulla ja eri käyttäjien signaalit kerrostetaan eri tehontasoilla. Vastaanot-timessa signaalit erotellaan toisistaan algoritmin avulla. Tämä tapahtuu siinä järjestyk-sessä, että korkeamman tehotason signaalit erotellaan ensin ja sen jälkeen edetään kohti heikompaa tehotasoa. Koodijakoon on monia tapoja, mutta käytetään esimerkkinä Sparse Code Multiple Access:ia (SCMA). Siinä käyttäjät lähettävät signaalin käyttäen ”koodikirjoja”. Nämä jakavat käyttäjän signaalin useille eri taajuuksille. Vastaanottimessa käyttäjän signaalit tunnistetaan käyttämällä algoritmia, joka purkaa koodit iteratiivisesti ja näin saadaan käyttäjän alkuperäinen signaali. [24]

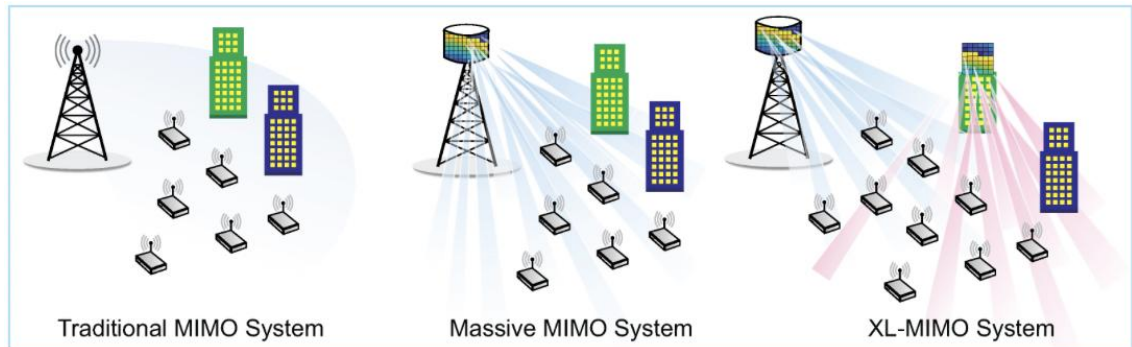
4.2 MIMO

Mobiiliverkkojen kehittyessä on myös laitteiden määrä kasvanut räjähdysmäisesti. 5G oli suuri harppaus verrattuna 4G:hen ja se toi mukanaan uusia vaatimuksia. Datanopeuden piti olla 10 Gbps, viive 1 ms, luottavuus 10^{-5} ja yhteydessä olevia laitteita pitäisi pystyä olemaan noin miljoona yhtä neliökilometriä kohden. Kuten on jo aiemmin selvinnyt niin 6G vaatimuksia ei ole määritetty, mutta ne tietenkin ovat taas harppauksen kovempia kuin 5G:ssä. Tämän myötä tarvitaan uusia teknologioita ja tässä isossa roolissa on usean antennin teknologiat eli MIMO sovellukset. MIMO sovelluksia, joita tullaan käyttä-mään 6G:ssä ovat massiivinen moninkertainen sisään- ja ulostulo (massive MIMO, mMIMO), siitä suurempi versio erittäin laajamittainen MIMO (Extra-Large MIMO, XL-MIMO), älykkäät heijastavat pinnat (Reconfigurable Intelligent Surface, RIS) ja soluton mMIMO (cf-mMIMO) eMBB. [25]

M-MIMO:ssa siis perinteisiin MIMO järjestelmiin lisätään huomattava määrä antennielementtejä. Sen avulla saadaan lisättyä spektri- ja energiatehokkuutta. Monien antennien ansiosta on esimerkiksi mahdollista luoda entistäkin paremmin suunnattuja antennikei-loja ja palvella monia käyttäjiä samanaikaisesti käyttäen samoja aika- ja taajuusresurs-seja. Sunnattujen keilojen ansiosta saadaan energia kohdistettua paremmin halutulle käyttäjälle, mikä vähentää häiriötä. [25]

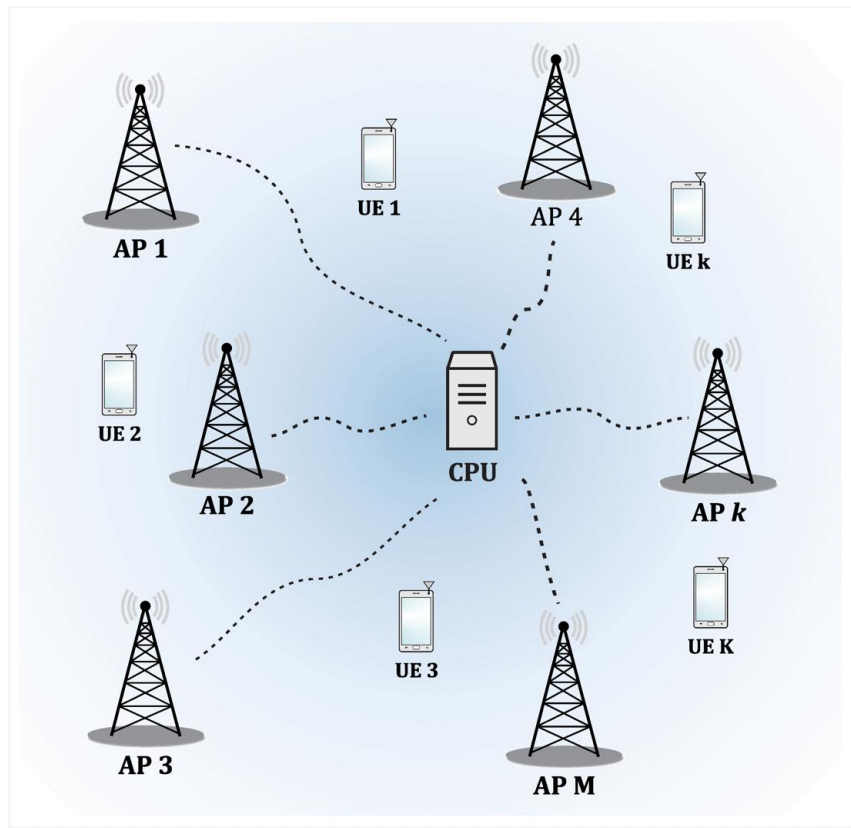
M-MIMO on ollut jo käytössä 5G:ssä, mutta 6G:tä varten on ollut suunnitteilla jo tästäkin parannettu versio, joka ei ole vielä käytössä. Se on nimeltään XL-MIMO ja toimii samalla periaatteella kuin perinteinen mMIMO. XL-MIMO:ssa käytetään vielä suurempia anten-nijärjestelmiä ja ne voidaan kiinnittää suuriin pintoihin, kuten rakennusten julkisivuihin,

ostoskeskuksiin, lentokenttiin jne. Järjestelmät voidaan sijoittaa joko keskitetysti yhteen paikkaan tai hajautetusti. Kuva 4 havainnollistaa hyvin, kuinka XL-MIMO:ssa antenni keiloja ei tule ainoastaan perinteisistä mastoista vain myös rakennusten seinistä. Uusi teknologia tuo mukanaan lisää nopeutta ja spektritehokkuutta, mutta siinä on vielä paljon ratkaisemattomia ongelmia. [25]



Kuva 4: MIMO, M-MIMO ja XL-MIMO esitettynä havainnollistavina kuvina [25]

CF-mMIMO on aivan uusi konsepti, jota koitetaan tuoda 6G verkkoihin. Se yhdistää MIMO järjestelmän ja soluttoman paradigman. Järjestelmä koostuu useista tukipisteistä, jotka on hajautettu. Tukipisteet palvelevat pienempää määrää käyttäjiä samalla taajuus- ja aikaresurssilla. Tukipisteet on yhdistetty keskusyksikköön, joka vastaa näiden yhteistyöstä. Järjestelmää ei siis ole rajattu perinteisiin soluihin, vaan verkko toimii kaikkialla tukipisteiden kattavuusalueella. Järjestelmän etuja ovat se, että solujen välinen häiriö poistuu ja signaalien laatu paranee. [23]



Kuva 5: CF-mMIMO järjestelmä [25]

Uusin MIMO järjestelmiin liittyvä teknologia on IRS eli älykkäät heijastavat pinnat. Se on siis tasomainen matriisi, joka koostuu passiivisista ja edullisista heijastuselementeistä. Elementtien ominaisuuksia voidaan muuttaa, mikä luo aivan uuden tavan parantaa viestintäkanavia. Tähän asti on pystytty ainoastaan säätämään lähetintä ja vastaanotinta, mutta nyt kyettäisiin säätämään myös muuta ympäristöä. IRS elementtien etuna on myös se, että niissä ei ole perinteistä antennien vahvistuskohinaa eikä itsehäiriötä. Näitä elementtejä kyetään sijoittamaan esimerkiksi rakennusten julkisivuihin tai ajoneuvoihin. [25]

4.3 LEO satelliittiviestintä

Satelliittiviestintä on yksi uusista mobiiliverkkoihin yhdistettävistä tiedonsiirtomahdollisuuksista, kun edetään kuudennen sukupolven mobiiliverkkoihin. Erityisesti matalalla kiertoradalla olevat suuret Low Earth Orbit (LEO) satelliitit nähdään suurena mahdollisuutena maailmanlaajuiselle, kattavalle ja suurinopeuksiselle tiedonsiirrolle. [26]

Nämä satelliitit täydentäisivät langattomia lähiverkkoja ja soluverkkoja muodostaen ”yhteyskolmion”, joka tarjoaisi nopean ja matalan viiveen internet yhteyden maalla, merellä sekä ilmassa. 6G järjestelmien suorituskykyvaatimusten saavuttamiseksi suunnitellaan

erittäin suunnattujen lähetysten käyttöä millimetriaaltotaajuuksilla ja jopa terahertsitaajuuksilla. Suunnattuja yhteyksiä pystytään käyttämään satelliitin ja maan välisissä yhteyksissä, että myös satelliittien välisissä yhteyksissä eli ristilinkeissä. Ristilinkeissä harkitaan myös optisen spektrin käyttöä sillä se tarjoaisi terahertsitaajuusalueitakin korkeammat tiedonsiirtonopeudet. Haasteena on kuitenkin erittäin kapean säteen mahdolliset kohdistusvirheet. [26]

LEO satelliittijärjestelmissä on muutamia hyviä etuja esimerkiksi laitteiston osittainen uudelleenkäyttö. Tämä tekee satelliiteista yksinkertaisempia, kevyempiä ja halvempia. Avaruudessa on myös paremmat olosuhteet mmWave- ja THz-taajuuksien käyttöön, sillä siellä ei ole ilmakehää absorboimassa energiaa. [26]

Järjestelmässä on tietysti myös haasteita esimerkiksi suuren taajuuden satelliittiviestintä saattaa häiritä olemassa olevia langattomia verkkoja. Maanpäälliset verkot, tutkajärjestelmät ja maan tutkimussatelliitit saattaisivat häiriintyä. Suuntaavien satelliittiristilinkkien väliset häiriöt ovat myös mahdollisia. Tämä on tärkeää huomioida, jotta useat LEO järjestelmät voivat toimia rinnakkaisilla kiertoradoilla. Nämä haasteet, kun ratkaistaan tulevaisuudessa, niin LEO järjestelmät tulevat olemaan tärkeä osa 6G mobiiliverkkoja. [26]

5. TEKOÄLY JA KONEOPPIMINEN

Tekoäly ja koneoppiminen ovat keskeisessä roolissa kuudennen sukupolven mobiiliverkkojen kehityksessä, sillä ne mahdollistavat älykkäät, joustavat ja tehokkaat verkot. Perinteiset viestintäverkot keskittyivät ensisijaisesti yhteyksien muodostamiseen ihmisten ja laitteiden välillä. 6G-verkoissa painopiste siirtyy kohti tekoälyn (AI) ja koneoppimisen (ML) integroimista verkkoarkkitehtuuriin suorituskyvyn, energiatehokkuuden sekä luotettavuuden parantamiseksi. 6G-verkoissa tekoälyratkaisujen avulla voidaan saavuttaa merkittäviä etuja, kuten pienempi latenssi, suurempi spektritehokkuus ja parempi energiatehokkuus. Lisäksi hajautettu tekoälylaskenta ja liittoutunut oppiminen mahdollistavat tietoturvallisen ja yksityisyyttä kunnioittavan tiedon käsittelyn. Tulevaisuuden 6G-verkoissa tekoälyä ei käytetä vain verkon optimointiin, vaan se toimii myös mahdollistajana täysin uusille sovelluksille ja palveluille, jotka vaativat reaaliaikaisia ja luotettavia ratkaisuja.

5.1 Sovellukset

Tekoälyn ja koneoppimisen integrointi langattomiin verkkoihin on kehittynyt merkittäväksi tutkimusalueeksi, erityisesti 6G-verkkojen kehittyessä yhä monimutkaisemmiksi ja vaatiessa tehokkaita ratkaisuja tiedonsiirtoon, resurssien hallintaan ja ennakoivaan analytiikkaan. Näiden teknologioiden avulla voidaan optimoida verkkojen suorituskykyä ja parantaa niiden kykyä mukautua dynaamisiin olosuhteisiin.

Massiivisissa MIMO-järjestelmissä ja OFDM-tekniikkaa hyödyntävissä verkoissa tekoälypohjaiset ratkaisut, kuten neuraaliverkot (NN), tarjoavat tarkempaa kanavaestimaatiota huomattavasti pienemmällä laskentateholla verrattuna perinteisiin menetelmiin, kuten vähimmäisneliöiden estimaatioon (LS) ja vähimmäiskeskivirhe-estimaatioon (MMSE). Esimerkiksi matalan neuraaliverkon käyttö, joka on kehitetty MMSE-estimaattorin mallista, mahdollistaa lähes optimaalisen suorituskyvyn ja tehokkuuden parannukset. Lisäksi mallipohjaiset lähestymistavat, kuten mpNet, yhdistävät perinteiset mallipohjaiset ja koneoppimiseen perustuvat menetelmät mahdollistaen reaaliaikaisen mukautumisen epävarmisiin verkko-olosuhteisiin. Uudelleenkonfiguroitavat älypinnat (RIS) ovat myös esimerkki teknologiasta, jossa valvottuun oppimiseen perustuvat ratkaisut voivat hallita monimutkaisia kanavaestimaatiotarpeita. [27]

Hajautetut massiiviset MIMO-verkot (D-MIMO), jotka yhdistävät useita hajautettuja tukiasemia keskitettyyn prosessointiyksikköön, hyötyvät suuresti tekoälypohjaisista resurssienhallintamenetelmistä. Hexa-X:n ehdottama PowerNet_Ext käyttää syvää neuroverkkoa (DNN) optimoimaan teho- ja fronthaul-resurssien allokointia, mikä mahdollistaa tiedonsiirtonopeuden maksimoinnin ja parantaa suorituskykyä huomattavasti vähäisemmällä laskennallisella monimutkaisuudella. Lisäksi tekoälyyn perustuvat ratkaisut, kuten puristettu aistiminen (Compressed Sensing, CS) ja oppivat sparse-dekooderit, parantavat keilanvalintaprosessia ja nopeuttavat yhteyksien palautumista latenssikriittisissä sovelluksissa. [27]

AI-as-a-Service (AlaaS) -lähestymistapa mahdollistaa tekoälymallien tarjoamisen palveluna asiakaslaitteille. Tämä parantaa verkkojen kykyä mukautua käyttäjien tarpeisiin esimerkiksi tarjoamalla reitin laatua (QoS) ennustavia ratkaisuja tai päätöksenteon tukea autonomisen ajamisen sovelluksissa. AlaaS hyödyntää avoimia rajapintoja, jotka mahdollistavat verkon tiedon käytön turvallisesti ja yksityisyyttä kunnioittaen. Tämä lähestymistapa keventää asiakaslaitteiden laskennallista kuormitusta ja tukee erityisesti kaupallisia sekä turvallisuuskriittisiä sovelluksia, kuten teollisuusautomaatio ja ajonauvojen hallinta. [27]

5.2 Dynaaminen optimaalinen reititys

Aiempien mobiiliverkkojen reitityskäytännöt olivat staattisia ja jäykkiä, mutta ne olivat riittäviä alkuvaiheen verkkoinfrastruktuurien vakaiden yhteyksien ylläpitämiseksi. Nykyajan yhteyksien monimutkaisuuksien myötä nämä lähestymistavat osoittavat kuitenkin rajoitteensa eivätkä ne kykene tehokkaasti hyödyntämään 6G:n laajoja datamahdollisuuksia. 6G:n myötä, joka tuo mukanaan valtavia datakapasiteetteja, monimuotoisten laitteiden integrointia ja pyrkimyksen erittäin alhaiseen viiveeseen, tarvitaan vahvempia verkkohallintaratkaisuja. Nämä tekniset edistysaskeleet luovat mahdollisuuksia reaaliaikaisille sovelluksille, kuten etäohjatuille robottikirurgioille ja autonomisille ajoneuvoille. Samalla ne kuitenkin korostavat pysyvää viivehaastetta ja tarvetta dynaamisille ja älykkäille reitityksille. [28]

Tekoäly (AI) ja koneoppiminen (ML) ovat osoittautuneet lupaaviksi ratkaisuksiksi 6G:n monimutkaisuuksien hallinnassa. Erityisesti Long Short-Term Memory -verkot (LSTM) ovat saaneet tunnustusta kyvystään mallintaa monimutkaisia ja ei-lineaaraisia riippuvuuksia verkon aikasarjadatasta, mikä muuttaa 6G:n ennakoivaa analytiikkaa. LSTM-verkot ovat olleet käytössä liikenne-ennustusmenetelmissä, jotka tukivat hybridien datakeskusverkkojen (DCN) valopolkujen uudelleenkonfigurointia. Tekoäly- ja koneoppimisalgoritmien

joukossa LSTM-verkot, jotka ovat yksi RNN-verkon (Recurrent Neural Network) muoto, ovat nousseet erityisen tehokkaiksi työkaluiksi myös ennakoivassa analytiikassa. LSTM-verkkojen kyky hahmottaa pitkän aikavälin riippuvuuksia aikasarjadatasta tekee niistä ihanteellisia verkkoliikenteen luontaisten ajallisten mallien käsittelyyn. Tämä kyky oppia menneistä tapahtumista ennustaakseen tulevia verkkoruuhiä on korvaamatonta ennakoivassa verkkohallinnassa. Ennustamalla mahdollisia ruuhkautumisalueita LSTM-pohjaiset mallit mahdollistavat dataliikenteen ennakoivan uudelleenreitityksen, mikä vähentää ruuhkia ja parantaa verkon läpäisykykyä. [28]

Perinteinen LSTM on vankka, mutta siinä on parantamisen varaa, joihin Speed optimized LSTM (SP-LSTM) vastaa suoraan tuoden joukon innovatiivisia parannuksia. SP-LSTM virtaviivaistaa klassisen neljän portin LSTM-rakenteen yhdistämällä unohdus- ja syöttöportit yhdeksi päivitysportiksi, joka saavuttaa suuremman tehokkuustason. Koska LSTM on altis ylikouluttamiselle suuren parametrimääränsä vuoksi, SP-LSTM sisältää sisäänrakennetun regularisoinnin. Tämä kokonaisvaltainen lähestymistapa vähentää ylikouluttamisen riskiä ilman, että suorituskyky kärsii. SP-LSTM-malli on vahvistettu eksplisiittisellä muistimekanismilla, joka muistuttaa muistiverkkoja. Tämä innovaatio antaa SP-LSTM:lle valmiudet hallita pitkiä sekvenssejä entistä paremmin, erityisesti tilanteissa, joissa vaaditaan laajojen ajallisten tietojen käsittelyä. Yksi SP-LSTM:n urauurtavista ominaisuuksista on sen sisäänrakennettu selitettävyyys. Hyödyntämällä huomiointimekanismeja se ei ainoastaan tarjoa tarkkoja ennusteita, vaan myös antaa arvokkaita tulkin-toja korostaen, mitkä syötteen osat olivat keskeisiä ennustuksen aikana. [28]

Tekoäly- ja koneoppimisteknologiat ovat olleet ratkaisevassa roolissa reititysprosessien tehokkuuden parantamisessa ja vahvistusoppiminen eli RL (Reinforcement Learning) on osoittanut merkittävää potentiaalia dynaamisissa reitityssovelluksissa. RL, joka on koneoppimisen alalaji, mahdollistaa optimaalisen päätöksenteon ympäristön vuorovaikutuksen kautta hyödyntäen palautetta toimintojen iteratiiviseen hienosäätöön. Dynaamisen reitityksen skenaariossa RL-agentti oppii jatkuvasti ja mukauttaa optimaalisia reitityskäytäntöjä. Tarkkailemalla nykyistä verkon tilaa agentti tekee reitityspäätöksiä ja saa palautetta näiden päätösten vaikutuksista verkon kokonaissuorituskykyyn. Tämä toistuva toiminta-palautte-prosessi edistää agentin reititysstrategian asteittaista parantamista iteraatioiden myötä. RL-pohjaisen reititysjärjestelmän ensisijaisena tavoitteena on maksimoida palkintofunktio, joka kuvastaa haluttuja verkkotiloja. Tämä funktio voi sisältää mitareita, kuten viiveen vähentämisen, ruuhkien minimoinnin ja verkon kuormantasauksen. Esimerkiksi agentti voi ansaita positiivisia palkintoja vähentäessään verkkoviivettä ja ne-

gatiivisia palkintoja toiminnoista, jotka lisäävät ruuhkia. Tämä RL-pohjainen lähestymistapa dynaamiseen reititykseen hyödyntää tekoälyn ja koneoppimisen vahvuuksia luodakseen entistä vankemman, mukautuvamman ja tehokkaamman verkonhallintajärjestelmän. Kun tämä yhdistetään SP-LSTM-pohjaiseen ennakoivaan analytiikkaan, muodostuu tehokas yhdistelmä, joka kykenee hallitsemaan sekä ennustettavia että ennustamattomia verkko-olosuhteiden vaihteluita. Näiden tekoäly- ja koneoppimismenetelmien yhdistelmä ei ainoastaan paranna verkonhallinnan reagoitokykyä ja mukautuvuutta, vaan myös avaa tien aidosti autonomisten verkkosysteemien toteuttamiseen. [28]

6. PAIKANNUS JA AISTIMINEN

Matkapuhelimien paikannus otti ensiaskeleet 1990-luvulla, jolloin matkapuhelimia paikannettiin sen avulla mihin tukiasemaan ne olivat yhdistyneet. Tämä oli kuitenkin hyvin epätarkka ja kertoi vain suuren alueen mistä matkapuhelin löytyisi. Paikannus alkoi kuitenkin kehittymään, kun teleoperaattoreilta alettiin vaatia tarkempaa paikannusta, jotta hätäpuhelijujen sijaintitiedot pystyttiin selvittämään. Tämän myötä 2000-luvulla GPS yleisty matkapuhelimissa ja sen avulla saatiin tarkempi sijainti selville. Tämä oli kuitenkin hidasta, koska GPS-signaalin hakemiseen meni aikaa. Tämän jälkeen keksittiin hyödyntää hybridi ratkaisuja, jossa käytettiin sekä GPS, että matkapuhelinverkkoja ja saatiin aikaan nopeampi paikannus. 4G ja 5G verkot ovat tuoneet mukanaan tarkempia paikannus tekniikoita, jolloin paikannus tarkkuus on parhaimmillaan senttimetrejä. 6G jatkaa paikannuksen kehittämistä ja sen uskotaan saavuttavan jopa millimetrin tarkkuudella toimivaa paikannusta.

Paikannuksesta puhuttaessa täytyy ymmärtää, että on olemassa kahden tyyppistä matkapuhelimien paikannusta, jotka ovat matkapuhelinverkkoihin perustuva paikannus ja GNSS-järjestelmät. GNSS-järjestelmä tarkoittaa paikannusta, joka toimii laitteesta löytyvän GNSS vastaanottimen avulla. Vastaanotin vastaanottaa tietoa suoraan satelliitilta, eikä tällöinen järjestelmä vaadi matkapuhelinverkkoa toimiakseen. Matkapuhelinverkkoihin perustuva paikannus puolestaan toimii ilman edellä mainittua vastaanotinta. Tässä paikannustyyppissä hyödynnetään esimerkiksi tukiasemia, signaalin ajoitusta ja voimakkuutta. Tässä kappaleessa perehdytään nimenomaan paikannukseen, joka liittyy matkapuhelinverkkoihin ja siihen mitä uutta 6G tuo mukanaan.

6G tuo mukanaan myös aivan uuden tekniikan, jota kutsutaan aistimiseksi. Aistiminen viittaa kykyyn käyttää viestintäjärjestelmän radioaaltoja ympäristön tarkkailuun ja analysointiin. Tämä tarkoittaa, että 6G-verkot voivat tiedon välityksen lisäksi havaita ja mitata fyysisiä olosuhteita, kuten kohteiden etäisyyttä, liikettä, nopeutta, suuntaa, muotoa ja sijaintia. Esimerkiksi radioaallot voivat toimia ”tutkamaisina” työkaluina, jotka mahdollistavat tarkat paikannus- ja seurantatoiminnot. Aistiminen yhdistää viestinnän ja ympäristön analysoinnin, mikä avaa uusia mahdollisuuksia esimerkiksi älyliikenteessä, robotiikassa, terveydenhuollossa ja turvallisuussovelluksissa.

Aistimisen sovelluksia ovat esimerkiksi autonomiset ajoneuvot, jotka hyödyntävät 6G-aistimiskykyä esteiden tunnistamisessa ja reittien suunnittelussa, sekä terveydenhuol-

lon etädiagnostiikka, jossa voidaan tarkkailla potilaiden elintoimintoja ilman fyysistä kontaktia. Näin 6G tuo mukanaan uuden ulottuvuuden verkkojen toimintaan, jonka avulla verkot eivät ainoastaan yhdistä laitteita ja käyttäjiä, vaan myös ”havaitsevat” ympäristönsä reaaliaikaisesti, mahdollistaen entistä älykkäämmät ja turvallisemmat sovellukset.

6.1 10 cm:n tarkkuustason paikannus 6G verkoissa

Paikannusta tarvitaan monissa tilanteissa, kuten esimerkiksi pelastuspalveluissa, omaisuuden seurannassa, logistiikassa ja autonomisessa ajamisessa. GNSS-järjestelmät tarjoavat hyvän perustan paikannukseen ja toimivatkin hyvin ulkona. Sisätiloissa ja tiheään asutuilla kaupunkialueilla ne eivät kuitenkaan ole luotettavia. Nykymaailmassa kuitenkin paikannus myös sisätiloissa on tärkeää ja 6G mobiiliverkkojen uskotaan olevan isossa roolissa tässä, koska ne tuovat mukanaan esimerkiksi Sub-Thz-taajuuudet, laajan kaistanleveyden sekä tekoälyn ja koneoppimisen. Tavoitteena 6G:ssä olisi siis saada 10 cm:n tarkkuustason paikannus. Tähän on monia keinoja, mutta olosuhteet täytyy ottaa huomioon. Avoimella ulkoalueella, kaupungin keskustan alueella ja sisätiloissa on kaikissa omat erityispiirteensä ja ratkaisunsa, miten tarkkuus saavutetaan. [29]

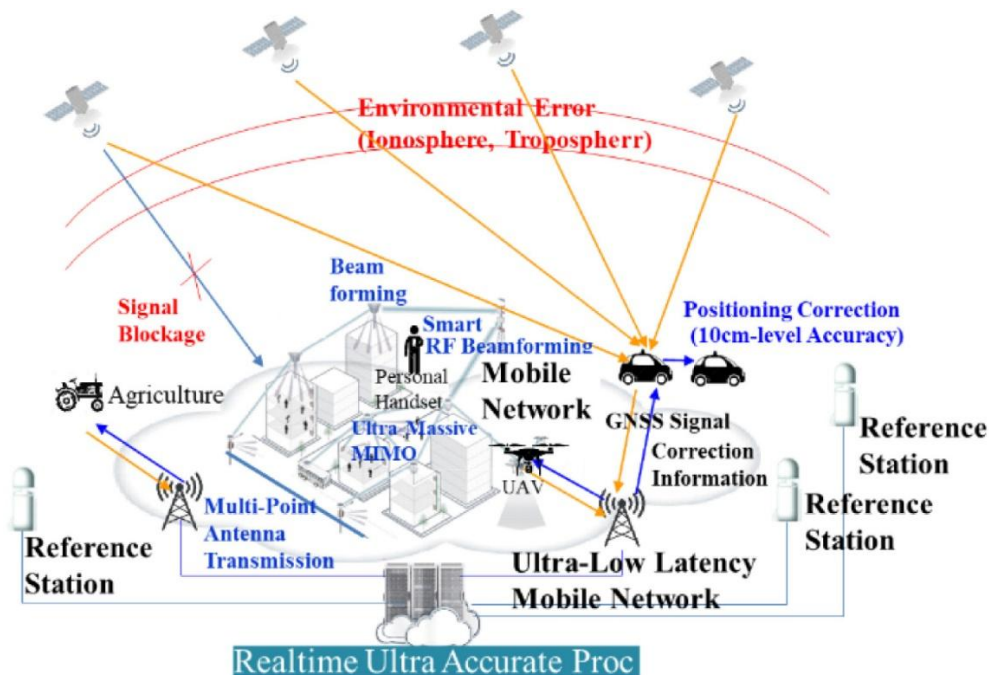
Avoimilla ulkoalueilla toimii parhaiten satelliittien avulla toteutettu paikannus ja viestintäjärjestelmien avulla toteutettu paikannus. Tällöin alueilla satelliitit ovat aina näkyvissä, joten paikannus on mahdollista suorittaa niiden avulla. Tällöin paikannuksessa pitää ainoastaan saada poistettua virheitä kuten ionosfäärien aiheuttamat paikannusvirheet käyttämällä useita taajuuksia tukevia vastaanottimia. Viestintäjärjestelmien avulla toteutettu paikannus on myös helposti toteutettavissa, sillä suora näkyvyys on myös mahdollista näihin. Tukiasemia täytyy vain olla vähintään neljä, jolloin saadaan tarkka 3D paikannus toteutettua. Haluttuun 10 cm:n tarkkuuteen vaaditaan myös vähintään 3 GHz:n näytteenottotaajuus. [29]

Kaupungin keskustojen alueella perinteiset satelliitit eivät saavuta tarkkaa paikannusta. Tämä johtuu siitä, että kaupunki alueilla on korkeita rakennuksia ja alikulkuja, mitkä aiheuttavat heijastuksia sekä signaalikatkoksia. Tämän takia näissä olosuhteissa voidaan käyttää yhdistelmäratkaisuja. Tällöin voidaan toimia niin, että vastaanotetaan kaikki signaalit. Tämän jälkeen antennijärjestelmien avulla poistetaan epäsuoran näkyvyyden signaalit, jolloin jäljelle jää vain suoran näkyvyyden signaalit ja käyttäjä kyetään paikantamaan. Kaupunkialueilla paikannus kuitenkin voidaan hoitaa mobiiliverkkojen avulla. Kaupungin alueelle pitäisi sijoittaa pieniä antennejä esimerkiksi katulamppuihin, liikennevaloihin tai muuhun ympäröivään infrastruktuuriin. Lähettimen ja vastaanottimen etäisyys pysyisi näin lyhyenä ja kulmamittausrvirhe olisi pienempi. Kaupunkialueilla olisi myös

hyvä käyttää millimetrialto tai terahertsi taajuudella, jolloin monitieongelma vähenisi. [29]

Sisätiloissa oltaessa satelliiteilla ei kyetä tarkkaan paikannukseen. Mobiiliverkot puolestaan tarjoavat tähän tulevaisuudessa hyvät mahdollisuudet. Yksinkertaisin tapa paikantaa sisätiloissa olisi verkkojen infrastruktuurin sijoittaminen sisätiloihin, jolloin saadaan suora yhteys laitteeseen ilman esteitä. Massiivisten MIMO-järjestelmien sijoitus rakennusten julkisivuihin auttaisi myös sisätilapaikannuksessa, koska kulmamittaukset paransivat. Thz-taajuudet myös auttavat sisätilapaikannuksessa, koska niitä käyttämällä saadaan paremmin eroteltua heijastuvat, taittavat ja vaimenevat signaalit. [29]

Ray-tracing ja sormenjälkipaikannus ovat tapoja, joilla voidaan paikantaa sisätiloissa. Ne ovat osittain olleet jo aiemmin. käytössä, mutta 6G tulee parantamaan niitä huomattavasti. Ray-tracing käyttää signaalin etenemismallinnusta, joka perustuu siihen, miten signaalit heijastuvat pinnoista, etenevät suorassa näkyvyydessä tai käyttäytyvät epäsuorassa näkyvyydessä. 6G:n korkeammat taajuudet sopivat hyvin ray-tracing mallinnukseen. Toinen tapa on niin sanottu sormenjälkipaikannus. Se perustuu siihen, että jokaisella sijainnilla on uniikki radiosignaalien joukko, jota kutsutaan sormenjäljeksi. Rakennusvaiheessa määritetään viitepisteet, jotka lähettävät radiosignaaleja erisuuntiin. Tämän jälkeen tunnistetaan ja tallennetaan signaalin ominaisuudet eri kohdissa. Paikannusvaiheessa kohdelaite vastaanottaa signaaleja ja vertaa niitä tallennettuihin tietoihin ja tämän avulla kyetään päättelemään sijainti hyvinkin tarkasti. [29]



Kuva 6: Havainnollistava kuva paikantamisesta tulevaisuudessa [29]

Tässä oli lyhyesti esiteltynä eri skenaarioita, missä paikannusta tarvitaan ja miten se kyetään toteuttamaan. Esiteltyjä tapoja on myös havainnollistettu kuvassa 6 ja sieltä löytyy esimerkiksi satelliitteja, droneja ja mobiilitukiasemia. Aikaisemmin olemme aina kyenneet luottamaan pelkkään satelliittipaikannukseen, koska tarpeet ovat olleet lähinnä navigointia yms. Tulevaisuudessa kuitenkin tarpeet lisääntyvät, jolloin satelliitit eivät enää riitä. Ne tarjoavat hyvän pohjan ja toimivatkin avoimilla paikoilla hyvinkin tarkasti, mutta 6G:tä tarvitaan kaupunkialueilla ja varsinkin sisätiloissa, jotta vaadittu 10 cm:n paikannus kyetään toteuttamaan. On hyvä huomioida, että myös muita tapoja paikantaan kuten valokuva paikannus on olemassa, mutta tässä kappaleessa keskityttiin nimenomaan 6G tuomiin asioihin ja miten se parantaa satelliitti paikannusta. [29]

6.2 NTN-pohjainen 6G-paikannus

Satelliitti viestinnän mahdollisuuksia esiteltiin tässä työssä jo aiemmin kappaleessa 4.3, jossa käytiin läpi sen mahdollisuuksia parantaa mobiiliverkkojen kattavuutta ja luoda uusia mahdollisuuksia kuudennen sukupolven mobiiliverkoille. Sen lisäksi, että se auttaisi nimenomaan internet yhteyksissä sen avulla pystytään myös parantamaan mobiiliverkkojen paikannusta. Non-Terrestrial Network (NTN) -pohjainen paikannus tarkoittaa siis paikannusta, jossa käytettäisiin ilmassa olevia asemaverkkoja. Tällä tarkoitetaan verkkoja, jossa käytetään maanpinnasta irrallaan olevia komponentteja kuten satelliitteja, todella korkealla olevia ilmapalloja tai droneja [30]

Keskeisimpiä NTN-pohjaisia paikannusmenetelmiä, mitä tulevaisuudessa todennäköisimmin tullaan käyttämään ovat saapumisaikaero (Time Difference of Arrival, TDOA), edestakainen viive (Round-Trip Time, RTT) ja saapumistaajuusero (Frequency Difference of Arrival, FDOA). TDOA:ssa paikannus perustuu siihen, että vertaillaan signaalin saapumisaikoja useisiin eri vastaanottimiin. Menetelmän haasteena on se, että se vaatii useita vastaanottimia, joilla on sama kattavuus. RTT:ssä mitataan signaalin lähetys- ja paluuaikaa käyttäjän laitteen ja satelliitin välillä. Tämä kokonaisaika mitataan ja sen perusteella arvioidaan etäisyys ja sijainti. FDOA puolestaan perustuu Doppler-ilmiöön, eli signaalin taajuuden muutokseen satelliitin ja käyttäjän välisessä liikkeessä. Käyttäjän lähettämä signaali saapuu vastaanottimeen eri taajuudella, minkä avulla saadaan tietoja käyttäjän nopeudesta ja sijainnista. [30]

NTN-pohjaisella paikannuksella uskotaan olevan paljon mahdollisuuksia tulevaisuudessa, mutta siihen liittyy myös paljon haasteita. Paikannus on tällä hetkellä vasta varhaisessa vaiheessa, sillä sitä ei ole standardoitu vielä riittävän tarkasti 3GPP:n standardeissa. Keskusteluja käydään kuitenkin jo ja tavoitteena alkuun on saada paikannettua

laitteen sijainti 10km tarkkuudella ilman GNSS vastaanottimen hyödyntämistä. Satelliittien käyttö vaatii myös algoritmien ja signaalinkäsittelytekniikoiden kehittymistä. Kuudennen sukupolven verkkojen saapumiseen on kuitenkin vielä vuosia, joten aikaa ongelmien ratkaisuun on ja tämä paikannus tulee todennäköisesti olemaan isossa roolissa tulevaisuudessa. [30]

6.3 JSAC ja ISAC

Tulevaisuuden 6G-verkot sisältävät uusia ominaisuuksia, joista yksi merkittävimmistä on yhdistetty havainnointi ja viestintä (Joint Sensing and Communication, JSAC). Tämä tarkoittaa, että viestintäverkon infrastruktuuria voidaan käyttää myös ympäristön havainnointiin, kuten liikenteen valvontaan, paikannukseen ja esteiden tunnistamiseen. JSAC-järjestelmän keskeinen etu on, että verkko on jo valmiiksi rakennettu kattamaan laajoja alueita viestintää varten, jolloin sen käyttö havainnointiin ei vaadi suuria lisäinvestointeja. Teknologia hyödyntää radioaaltojen heijastuksia, joita voidaan analysoida ympäristön hahmottamiseen, nopeuden mittaamiseen ja paikkatiedon laskentaan. Korkeilla taajuuksilla, kuten subterahertsialueella, saavutetaan jopa millimetriluokan tarkkuus paikannuksessa, mutta myös perustaajuuksilla voidaan tarjota perushavainnointia. [31]

JSAC kuitenkin vaatii useiden järjestelmien, kuten CCTV-kameroiden, integrointia ja datan yhteensovittamista toimiakseen. 6G tuo mukanaan paremman ratkaisun: Integroitu havainnointi ja viestintä (Integrated Sensing and Communication, ISAC). Aiemmin radioaajuuksia on käytetty erikseen viestintään ja havainnointiin, mutta 6G:n ISAC yhdistää nämä kaksi toimintoa yhdeksi järjestelmäksi. 6G-verkoissa voidaan siis käyttää viestintäsignaaleja ympäristön kartoittamiseen ja liikkeiden tunnistamiseen, samalla kun ne toimivat perinteisenä mobiiliviestintäjärjestelmänä. ISAC ei siis vaadi erillisiä sensoreita toimiakseen, vaan sekä havainnointi että viestintä toimivat saman verkon sisällä. Tämä tekee siitä teknisesti yksinkertaisemman ja kustannustehokkaamman ratkaisun. [32]

Moniantennitekniikat ovat keskeisessä roolissa ISAC-verkoissa. Matalilla taajuuksilla voidaan käyttää digitaalista signaalinkäsittelyä, kun taas korkeilla taajuuksilla tarvitaan energiatehokkaampia ratkaisuja, kuten hybridiprekoodausta, joka yhdistää analogisen ja digitaalisen signaalinkäsittelyn. Analoginen säteenmuodostus on yksinkertainen ja tehokas menetelmä, mutta se ei tue monimutkaisempia käyttötapauksia, kuten useiden käyttäjien tai kohteiden yhtäaikaista havainnointia. Hybridiratkaisut tarjoavat paremman suorituskyvyn ja joustavuuden, mikä tekee niistä erityisen hyödyllisiä ISAC-verkoissa. [33]

ISAC:lla on yli 30 tunnistettua mahdollista käyttökohdetta eri toimialoilla. Niihin kuuluu dronien seuranta ja törmäysten estäminen, erityisesti lentokieltoalueilla ja kriittisissä ilmatiloissa. Autonomisten ajoneuvojen ja junaliikenteen parantaminen tunnistamalla esi-
neitä ja vaaratilanteita jo ennen kuin ne tulevat näkyviin. Tehtaissa ja varastoissa ISAC voi auttaa robottien ja ihmisten turvallisessa liikkumisessa. Tavaroiden paikantaminen suurissa tiloissa, kuten varastoissa tai hotelleissa. Digitaalisten kaksosten luominen. ISAC voi myös estää signaalihäiriöt ennakoimalla, jos este, kuten auto, on katkaisemassa viestintäsignaalin ja siirtää yhteyden paremmalle taajuudelle tai tukiasemalle. [32]

ISAC-infrastruktuuuri rakentuu monipuoliselle matkapuhelinverkkojen perustalle, johon kuuluvat makro-, mikro- ja pikosolut sekä satelliitit ja dronet, jotka laajentavat kattavuutta erityisesti korkeilla taajuuksilla. Verkossa hyödynnetään uudelleenohjattavia heijastavia pintoja (RIS), joiden avulla voidaan parantaa signaalin luotettavuutta ja vähentää esteistä johtuvia häiriöitä. Havainnointi toteutetaan kameroiden, tutkien ja LiDAR-laitteiden avulla. Lisäksi verkkoon on integroitu koneoppimisratkaisuja, jotka analysoivat verkon toimintaa ja optimoivat resurssien käyttöä reaaliaikaisesti. [33]

ISAC-verkoissa voidaan hyödyntää kolmea erilaista havainnointimenetelmää. Monostaattisessa havainnoinnissa lähetys- ja vastaanottopiste sijaitsevat samassa havainnointiin. Bistaattisessa havainnoinnissa lähetin ja vastaanotin ovat fyysisesti erillään, jolloin esimerkiksi auton ja tukiaseman välillä voidaan kerätä havaintodataa eri näkökulmista. Multistaattisessa havainnoinnissa käytetään useita lähettämiä ja vastaanottimia, mikä mahdollistaa ympäristön tarkemman analyysin eri suunnista. Näiden menetelmien avulla verkko pystyy tunnistamaan esineiden sijainnin, liikkeen ja muut ympäristön muutokset, joita voidaan hyödyntää eri palveluissa. [33]

ISAC-tekniikan toiminta perustuu eri taajuusalueiden käyttöön. Mataliin taajuuksiin kuuluvat FR1 (400 MHz – 7 GHz) tarjoaa suuren kattavuuden ja hyvän liikkuvuuden tuen, mutta sen tarkkuus on heikko. FR2-taajuusalue (24-70 GHz) mahdollistaa paremman tarkkuuden, mutta sen kantama on rajallinen. Keskiväyläkaista, jota kutsutaan myös FR3-alueeksi (7-24 GHz), tarjoaa hyvän tasapainon suuren kattavuuden ja nopean tiedonsiirron välillä. Subterahertsialue (100-300 GHz) mahdollistaa erittäin tarkan paikannuksen ja suurten datanopeuksien saavuttamisen, mutta sen kantama jää lyhyeksi. Tulevaisuudessa ISAC-verkoissa tullaan todennäköisesti yhdistämään eri taajuusalueita, jotta saavutetaan paras mahdollinen suorituskyky. [33]

ISAC-verkoilla on myös merkittävä rooli itseoppivassa verkonhallinnassa. Verkko voi hyödyntää koneoppimista tunnistamaan mahdollisia häiriöitä ja ennakoimaan sig-

naalin esteitä. Esimerkiksi ISAC-kartat yhdistävät havainnointidatan ja verkon peittoalueet, jolloin verkko voi reagoida muuttuviin olosuhteisiin ennakoivasti. Koneoppiminen mahdollistaa myös automaattisen resurssienhallinnan, jossa tukiasemat voivat itsenäisesti säätää, kuinka paljon kapasiteettia varataan viestinnälle ja kuinka paljon havainnoinnille. [33]

Verkon ja havainnoinnin yhdistäminen tuo mukanaan teknisiä haasteita, kuten signaalinkäsittelyn ja resurssien jaon optimointia viestinnän ja havainnoinnin välillä. Esimerkiksi eri antenniratkaisuilla, taajuusjako multipleksoinnilla (FDM) tai aikajako multipleksoinnilla (TDM) voidaan tasapainottaa näiden toimintojen yhteiskäyttöä. Tämän teknologian potentiaalisia sovelluksia ovat mm. autonominen liikenne, älykkäät kaupungit ja teollisuusautomaatio. Lopulta JSAC voi johtaa kokonaisvaltaiseen digitaaliseen kaksoseen (digital twin), joka mallintaa ympäristöä tarkasti ja mahdollistaa laajan skaalan uusia sovelluksia. [31]

ISAC-teknologia tulee olemaan keskeinen osa tulevaisuuden 6G-verkkoja. Se mahdollistaa uudenlaiset palvelut eri toimialoilla, parantaa viestintäverkkojen suorituskykyä ja tuo mukanaan uuden tavan yhdistää ympäristön havainnointi ja langaton viestintä. Kehitys on vielä käynnissä, mutta teknologian potentiaali on valtava ja sen onnistunut toteutus voi mullistaa useita teollisuudenaloja. [33]

6.4 Sovellukset lääketieteessä

6G:n myötä terveydenhuoltojärjestelmistä tulee entistä älykkäämpiä. Älykkyys integroituu eri tasoille, kuten aistimiseen, tietojen käsittelyyn, viestintään, laskentaan ja analytiikkaan. Sensoriteknologian, laskentakapasiteetin ja tekoälyn yhdistelmä mahdollistaa reaaliaikaisen terveystiedon analyysin, tarkemman diagnostiikan ja uudenlaiset hoitoratkaisut, kuten etäkirurgian ja AI-avusteisen lääkäripalvelun. Haasteina ovat tietoturva, energiatehokkuus ja hajautetun laskennan integrointi. Kuitenkin 6G:n ultra-alhainen viive, parempi verkkokattavuus ja AI-integraatio mullistavat terveydenhuollon tulevaisuudessa.

6G tuo mukanaan monia tärkeitä teknologioita terveydenhuoltoon, joista tärkeimpiä ovat haptinen viestintä, taktillinen terveydenhuolto, holografinen viestintä, langaton aivo-tiekone-rajapinta (cf-mMIMO) sekä virtuaalitodellisuus (Virtual Reality, VR) & lisätty todellisuus (Augmented Reality, AR).

Haptinen viestintä tuo uuden ulottuvuuden terveydenhuoltoon yhdistämällä kosketusais-tin perinteiseen ääni- ja kuvaviestintään. Sen avulla potilaat voivat esimerkiksi välittää

kipuaan etälääkärille tai kommunikoida tuntemuksiaan tarkemmin. Langaton BCI tehostaa tätä viestintää ja mahdollistaa tunteiden ja fyysisten tuntemusten välittämisen etäyhteyden kautta. Haptinen viestintä voi myös tukea psykologisten sairauksien hoitoa, sillä lääkäriellä on mahdollisuus havaita potilaan tunteita reaaliajassa. Lisäksi tämä teknologia mahdollistaa robottiväestöiden leikkausten ohjaamisen etänä ja kirurgien koulutuksen ilman fyysistä läsnäoloa. 6G:n taktillinen internet takaa viiveettömän tiedonsiirron, mikä mahdollistaa mikrosekuntitason tarkkuudella toimivat etäleikkaukset ja kirurgisen ohjauksen. [34]

Taktillinen terveydenhuolto perustuu nopeaan ja luotettavaan tiedonsiirtoon lääkärin, robottien ja potilaiden välillä. Sen avulla voidaan toteuttaa etäkirurgiaa, telelääketiedettä, etädiagnostiikkaa ja laitteiden etähuoltoa. Taktillisen internetin keskeinen etu on erittäin alhainen viive ja suuri luotettavuus, mikä mahdollistaa reaaliaikaiset ja tarkat lääketieteelliset toimenpiteet. Tämän teknologian suurimpia haasteita ovat resurssirajoitukset erityisesti reunalaskennassa sekä tarve äärimmäisen luotettavalle viestintäinfrastruktuurille, joka pystyy takaamaan jatkuvan ja keskeytymättömän palvelun. [34]

Holografinen viestintä mahdollistaa täysin uudenlaisen tavan kommunikoida terveydenhuollossa. Sen avulla voidaan toteuttaa etäkonsultaatioita ja -diagnostiikkaa sekä tarjota lääkäreille tarkempaa potilastietoa kolmiulotteisessa muodossa. Holografiset järjestelmät voivat sisältää kosketuksen, maun, hajun, näön ja kuulon välittämisen, mikä tekee etälääkärikäynneistä aiempaa todentuntuisempia. Holografista viestintää voidaan hyödyntää myös ambulanssinavigoinnissa ja kirurgisten toimenpiteiden suunnittelussa. Suurin haaste tässä teknologiassa on kehittää tehokkaita holografisia MIMO-antennijärjestelmiä, jotka voivat toimia 6G-taajuuksilla ja mahdollistaa suuren kaistanleveyden viestinnän. [34]

Langaton BCI avaa mahdollisuuksia ihmisen aivojen ja ulkoisten laitteiden väliselle suoralle kommunikaatiolle. Sen avulla voidaan esimerkiksi ohjata robottijärjestelmiä, jotka avustavat potilaita sairaaloissa, tai hyödyntää aivokäyttöisiä lääkinnällisiä implanteja potilaiden hyvinvoinnin seurannassa. Langattoman BCI:n avulla lääkärit voivat seurata potilaiden terveystilaa reaaliajassa ja antaa hoito-ohjeita välittömästi. Teknologian suurin haaste on aivosignaalien tarpeeksi vahva tuottaminen ja niiden luotettava siirtäminen koneille ymmärrettävään muotoon. [34]

Virtuaalitodellisuus ja lisätty todellisuus eli VR ja AR muuttavat merkittävästi terveydenhuollon koulutusta, diagnoosia ja hoitoa. VR:n avulla voidaan toteuttaa etäkirurgiaa, jossa lääkärit voivat suorittaa leikkauksia toiselta paikkakunnalta käsin. Lisäksi virtuaali-

todellisuus tarjoaa kivunlievitystä, sillä sen avulla potilaat voivat saada henkistä helpotusta ilman kipulääkkeitä. VR ja AR tukevat myös kuntoutusta erityisesti aivohalvauksen, selkäydinvammojen ja Parkinsonin taudin hoidossa. Lääketieteellisessä koulutuksessa VR tarjoaa opiskelijoille mahdollisuuden harjoitella anatomiaa ja kirurgisia toimenpiteitä ilman fyysisiä kadavereita. AR puolestaan mahdollistaa potilaan kehon läpinäkyvän tarkastelun, jolloin lääkäri voi analysoida sisäelimiä ja verisuonia MRI- ja CT-kuvien avulla ilman kirurgista toimenpidettä. [34]

6G:n teknologiat, kuten haptinen viestintä, taktillinen internet, holografinen viestintä, langaton BCI sekä VR ja AR, tulevat mullistamaan terveydenhuollon. Ne mahdollistavat reaaliaikaiset etäleikkaukset, tarkemman diagnostiikan ja potilaskeskeiset hoitomuodot. Vaikka teknologiat tarjoavat valtavia mahdollisuuksia, niiden kehittämiseen liittyy merkittäviä haasteita, kuten tietoturva, viestinnän luotettavuus ja tekoälyn integrointi lääketieteellisiin järjestelmiin. Kaikesta huolimatta 6G avaa täysin uuden aikakauden etälääketieteessä, kirurgisessa koulutuksessa ja terveydenhuollon automatisoinnissa, mikä tekee siitä keskeisen osan tulevaisuuden lääketieteellisiä innovaatioita. [34]

7. YHTEENVETO

Tässä työssä perehdyttiin 6G-mobiiliverkkoihin ja siihen, mitä verkolta voidaan odottaa tulevaisuudessa. Työn tavoitteena oli tarjota lukijalla kattava käsitys verkosta, sen toiminnasta ja sovelluskohteista. Uusia ominaisuuksia havainnollistettiin vertailemalla aiemman sukupolven mobiiliverkkoihin ja etenkin 5G:hen.

Aluksi työssä perehdyttiin spektriin ja siihen, miten 6G-verkko tulee hyödyntämään sitä. Työssä lähdettiin liikkeelle tästä, sillä ennen uuden mobiiliverkon julkaisemista pitää määrittää taajuusalue eli spektri, millä sitä tullaan käyttämään. Luvussa käytiin läpi mahdolliset taajuusalueet 6G-verkolle ja sitä, miten spektriä voidaan jakaa sekä hallita.

Luvussa 3 tutustuttiin kansainväliseen televiestintäliittoon (ITU). Aluksi liitto ja sen eri sektorit esiteltiin lyhyesti, jonka jälkeen siirryttiin eri teemoihin, kuten tietoturva ja kestävä kehitys. Tämän jälkeen tutustuttiin ITU:n laatimiin tavoitteellisiin IMT-2030:sen eli 6G:n vaatimuksiin. Näitä tavoitteellisia arvoja vertailtiin IMT-2020:sen eli 5G-mobiiliverkkojen tämänhetkisiin vaatimuksiin.

Luvussa 4 käytiin läpi tiedonsiirtoteknologioita, sillä nämä ovat yksi iso osa mobiiliverkkoja. Teknologioissa lähdettiin liikkeelle esittelemällä eri modulaatio tekniikoita, joita uskotaan käytettävän 6G-mobiiliverkoissa. Tämän jälkeen käytiin isompana kokonaisuutena läpi erilaisia MIMO-järjestelmiä. MIMO:sta esiteltiin ensin perusidea, joka on käytössä myös 5G verkoissa. Tämän jälkeen edettiin uudempiin MIMO-järjestelmiin, jotka tulevat 6G:n mukana. Lopuksi tutustuttiin vielä LEO-viestintään, joka tuo mukanaan esimerkiksi lisää kattavuutta mobiiliverkoille.

Keskeisessä roolissa 6G-verkossa ovat koneoppiminen ja tekoäly, joita käytiin läpi luvussa 5. Aluksi käytiin läpi, miksi ne ovat välttämättömiä ratkaisuja 6G-verkon käyttöönottoon. Tämän jälkeen perehdyttiin sovelluksiin, kuten neuraaliverkkoihin ja ALAAS-lähestymistapaan. Lopuksi luvussa tutustutaan dynaamiseen optimaaliseen reititykseen, johon koneoppiminen ja tekoäly on osoittautunut lupaavaksi ratkaisuksi.

Työn viimeisessä luvussa tutustutaan paikannukseen, joka tulee kehittymään valtavasti ja aistimiseen, joka on aivan uusi ominaisuus mobiiliverkoissa. Aluksi luvussa perehdyttiin paikannukseen ja käytiin läpi, millä tavoilla eri olosuhteissa voidaan saavuttaa 10 cm:n tarkkuus. Tämän jälkeen esiteltiin myös uusi NTN-pohjainen paikannus. Luvussa tutustutaan myös integroituun havainnointi ja viestintä järjestelmään (ISAC) sekä lääketieteellisiin sovelluksiin. Työn avulla lukijalle jää kattava käsitys siitä, mitä 6G-mobiiliverkolta voidaan odottaa tulevaisuudessa.

LÄHTEET

- [1] Rowley Christopher, Uuden sukupolven tietoverkot lisäävät verkossa olevien laitteiden määrää valtavasti – ja herättävät kiperiä kysymyksiä turvallisuudesta, The Ulkopolitist, 2019. <https://ulkopolitist.fi/2019/09/11/uuden-sukupolven-tietoverkot-lisaavat-verkossa-olevien-laitteiden-maaraa-valtavasti-ja-herattavat-kiperia-kysymyksiä-turvallisuudesta/>
- [2] European Comission, Radio spectrum: the basis of wireless communications, European Union official website <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/radio-spectrum>
- [3] GSMA, UAE gives go-ahead to 800 MHz LTE launch, 2015. <https://www.gsma.com/connectivity-for-good/spectrum/wp-content/u>
- [4] MultiTech Iot Wiki, UNLICENSED SPECTRUM <https://multitech.com/iot-wiki/unlicensed-spectrum/>
- [5] <https://www.itu.int/en/mediacentre/backgrounders/Pages/itu-r-managing-the-radio-frequency-spectrum-for-the-world.aspx>
- [6] 6G World, The 6G Spectrum Explained <https://www.6gworld.com/blog/the-6g-spectrum-explained/>
- [7] Ericsson, Sub-terahertz communication in 6G. <https://www.ericsson.com/en/6g/spectrum/sub-thz>
- [8] Ericsson, CmWave: an essential enabler of 6G. <https://www.ericsson.com/en/6g/spectrum/cm-wave>
- [9] Marcus MJ. 6G Spectrum Policy Issues Above 100 GHz. IEEE wireless communications. 2021 <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/document/9690484>
- [10] Sabir B, Yang S, Nguyen D, Wu N, Abuadbba A, Suzuki H, Lai S, Ni W, Ming D, Nepal S, Systematic Literature Review of AI-enabled Spectrum Management in 6G and Future Networks, Arxiv , 2024. https://arxiv.org/html/2407.10981_v1#S4
- [11] Cook D, WHAT IS LICENSED VS. UNLICENSED EM SPECTRUM?, Ericsson, 2021. <https://www.linkedin.com/pulse/what-licensed-vs-unlicensed-em-spectrum-don-cook>
- [12] Semaan E, Tejedor E, Kochar R K, Magnusson S, Parkvall S, 6G spectrum - enabling the future mobile life beyond 2030, Ericsson, 2023. <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/white-papers/6g-spectrum-enabling-the-future-mobile-life-beyond-2030>
- [13] Jakhar D, 6G :Exploring Challenges in the THz Band, LinkedIn, 2023. <https://www.linkedin.com/pulse/6g-exploring-challenges-thz-band-dinesh-jakhar/>
- [14] ITU, About International Telecommunication Union (ITU). <https://www.itu.int/en/Pages/default.aspx>

- [15] M. J. Marcus, "ITU WRC-19 Spectrum Policy Results," in *IEEE Wireless Communications*, vol. 26, no. 6, pp. 4-5, December 2019, <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/document/8938175>
- [16] ITU GCA, Global Cybersecurity Agenda (GCA), ITU. <https://www.itu.int/en/action/cybersecurity/Pages/gca.aspx>
- [17] ITU-D, Sustainable Development Goals. <https://www.itu.int/en/ITU-D/Environment/Pages/Priority-Areas/Sustainable-Development-Goals.aspx>
- [18] ITU, Cutting industry emissions and fighting the climate crisis, ITU-News, 2023. <https://www.itu.int/hub/2023/11/cutting-industry-emissions-and-fighting-the-climate-crisis/>
- [19] Ictfootprint.eu, ITU-T L. 1420 Factsheet. <https://ictfootprint.eu/en/itu-t-l-1420-factsheet>
- [20] ITU-R, Managing the radio-frequency spectrum for the world, ITU, 2024 <https://www.itu.int/en/mediacentre/backgrounders/Pages/itu-r-managing-the-radio-frequency-spectrum-for-the-world.aspx>
- [21] ITU-R, Recommendation ITU-R M.2160-0, 2023. https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.2160-0-202311-I!!PDF-E.pdf
- [22] NANTHAAMORNPHONG A, KUMAR A, ALAMRO H, ALRUWAIS N, ALLAFI R, NEMRI N, et al. ENHANCING OTFS MODULATION FOR 6G THROUGH HYBRID PAPR REDUCTION TECHNIQUE FOR DIFFERENT SUB-CARRIERS. *Fractals* (Singapore). 2024 <https://www.worldscientific.com/doi/pdf/10.1142%2FS0218348X25400146>
- [23] Hassan M, Singh M, Bilal K, Elsayed I. Improving 6G Network Spectrum Efficiency with Non-Cooperative and Cooperative Spectrum Sharing Using NOMA and Massive-MIMO. *ICST Transactions on Mobile Communications and Applications*. 2023 https://andor.tuni.fi/discovery/fulldisplay?docid=cdi_crossref_primary_10_4108_eetmca_3755&context=PC&vid=358FIN_TAMPO:VU1&lang=fi&search_scope=My_inst_and_CI_extended_search&adaptor=Primo%20Central&tab=Everything&query=any,contains,6G%20spectrum%20efficiency&offset=0
- [24] Moltafet M, Yamchi NM, Javan MR, Azmi P. Comparison Study Between PD-NOMA and SCMA. *IEEE transactions on vehicular technology*. 2018 <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/stamp/stamp.jsp?tp=&ar-number=8061028>
- [25] Dala Pegorara Souto V, Dester PS, Soares Pereira Facina M, Gomes Silva D, de Figueiredo FAP, Rodrigues de Lima Tejerina G, et al. Emerging MIMO Technologies for 6G Networks. *Sensors* (Basel, Switzerland). 2023 <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/4/1921>
- [26] S. Aliaga, V. Petrov and J. M. Jornet, "Cross-Link Interference Modeling in 6G Millimeter Wave and Terahertz LEO Satellite Communications," *ICC 2023 - IEEE International Conference on Communications*, Rome, Italy, 2023 <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/document/10278829>

- [27] M. Merluzzi, T. Borsos, N. Rajatheva, A. Benczur, H. Farhadi and T. Yassine., "The Hexa-X Project Vision on Artificial Intelligence and Machine Learning-Driven Communication and Computation Co-Design for 6G," in *IEEE Access*, vol. 11, pp. 65620-65648, 2023 <https://ieeexplore.ieee.org/document/10156818?denied=>
- [28] P. M. Tshakwanda, S. T. Arzo and M. Devetsikiotis, "Advancing 6G Network Performance: AI/ML Framework for Proactive Management and Dynamic Optimal Routing," in *IEEE Open Journal of the Computer Society*, vol. 5, pp. 303-314, 2024 <https://ieeexplore.ieee.org/document/10522874/keywords#keywords>
- [29] Chang K, Kim K, Lee S, Kim JH, Lee J, Kim H, Ko YJ, Kim I, Bang SC. Technical challenges and solutions for 10 cm-level positioning accuracy towards 6G. *ICT express*. 2023 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405959522001394?via%3Dihub#sec4>
- [30] Dureppagari HK, Saha C, Dhillon HS, Buehrer RM. NTN-Based 6G Localization: Vision, Role of LEOs, and Open Problems. *IEEE wireless communications*. 2023 <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=10355106>
- [31] Andersson H, Joint communication and sensing in 6G networks, Ericsson, 2021. <https://www.ericsson.com/en/blog/2021/10/joint-sensing-and-communication-6g>
- [32] Gonzalez-Prelcic N, Furkan Keskin M, Kaltiokallio O, Valkama M, Dardari D, Shen X. The Integrated Sensing and Communication Revolution for 6G: Vision, Techniques, and Applications. 2024 <https://ieeexplore.ieee.org/document/10536135>
- [33] 6G world, 6G and Integrated Sensing & Communications: The Essentials, <https://www.6gworld.com/blog/6g-and-integrated-sensing-communications-the-essentials/>
- [34] Kharche S, Kharche J. 6G Intelligent Healthcare Framework: A Review on Role of Technologies, Challenges and Future Directions. *Journal of mobile multimedia*. 2023 https://www.researchgate.net/profile/Shubhangi-Kharche-2/publication/368739849_6G_Intelligent_Healthcare_Framework_A_Review_on_Role_of_Technologies_Challenges_and_Future_Directions/links/63f77e8b0d98a97717afa019/6G-Intelligent-Healthcare-Framework-A-Review-on-Role-of-Technologies-Challenges-and-Future-Directions.pdf