

Alex Ingman

6G-MOBIILIVERKKO: VISIO, KÄYTTÖKOhteita JA TEKNINEN PERUSTA

Kandidaatintutkielma
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Tarkastaja: Mikko Valkama
Huhtikuu 2023

TIIVISTELMÄ

Alex Ingman: 6G-mobiiliverkko: Visio, käyttökohteita ja tekninen perusta
Kandidaatintutkielma
Tampereen yliopisto
Tieto- ja sähkötekniikan kandidaattiohjelma
Huhtikuu 2023

Tässä kandidaatintutkielmassa selvitetään 6G-mobiiliverkon nykyistä tutkimustilannetta kirjallisuuskatsauksen muodossa. Tutkielma pohjautuu pääasiassa tieteellisiin tutkimusartikkeleihin aiheesta, mutta myös alan organisaatioiden artikkeleita ja nettisivuja on hyödynnetty. Tutkielmassa esitetään 6G-mobiiliverkon visio, minkä lisäksi käsitellään 6G:n mahdollisuuksia ja sille eri tahojen suunnalta asettuja vaatimuksia. Lisäksi käsitellään 6G:n teknistä perustaa, joka mahdollistaa suorituskyvyltään vaatimusten mukaisen mobiiliverkon. Tutkielmassa nostetaan esille myös useita lähteissä esiintyneitä tulevaisuuden käyttökohteita mobiiliverkolle. Kuitenkin aiheen laajuuden vuoksi mahdollisia potentiaalisiaakin käyttökohteita ja teknologisia mahdollistajia on rajattava tutkielman ulkopuolelle. Lisäksi tulee huomioida 6G:n olevan vasta tutkimus- ja kehitysasteella, joten 6G:stä ei ole olemassa määrittelevää standardia. Siksi tämä tutkielma perustuu pitkälti ennustamiseen nykyisen tutkimusmateriaalin pohjalta.

Tutkielmassa määriteltynä 6G:n visiona on luoda kaikin tavoin entistä suorituskykyisempi verkko, joka kykenee vastaamaan yhteiskunnan kasvaviin datankäyttötarpeisiin. Lisäksi verkon tulee huomioida merkittävät yhteiskunnalliset teemat, kuten tietoturva ja energiankulutuksen ongelmat. Tavoitteena on myös luoda entistä kokonaisvaltaisempi mobiiliverkko, joka kykenee aivan uudella tavalla yhdistämään sosiaalisen, digitaalisen ja fyysisen maailman lähemmäs toisiaan. Tämän mahdollistaa muun muassa verkon kyky toimia reaaliaikaisena tilannetiedon lähteenä. Aikaisemmin mobiiliverkkoa on käytetty ennen kaikkea tiedonsiirtoon, mutta tulevaisuudessa myös mobiiliverkon luontaisia paikannusominaisuuksia ja kykyä aistia ympäristöään voitaisiin hyödyntää uudella tavalla.

Tutkielmassa esitetään potentiaalisina tulevaisuuden käyttökohteina laajennetun todellisuuden sovellukset, liikenteen ja kulkuneuvojen mahdollisuudet sekä teollisuuden uudet mahdollisuudet useilla eri aloilla. Verkon entistä tarkempi kyky paikantaa laitteita ja aistia ympäristöään tarjoavat myös näihin käyttökohteisiin lukuisia uusia mahdollisuuksia. Huomioitavaa on myös, ettei mobiiliverkko pysty saavuttamaan yhtäaikaaisesti maksimaalista suorituskykyään kaikilla parametreilla mitattuna. Tämän vuoksi 6G-aikakaudella voidaan odottaa olevan paljon aliverkkoja, jotka kykenevät palvelemaan halutun käyttökohteen vaatimuksia. Tällöin 6G-mobiiliverkko voidaan nähdä monien aliverkkojen muodostamana verkkojen verkkona.

Tutkielmassa huomioidaan 6G:n teknisen kehityksen vaativan vielä paljon tutkimustyötä. Uusien entistä korkeampien taajuusalueiden saaminen mobiiliverkon käyttöön tarjoaa luontaisen pohjan entistä suorituskykyisemmän verkon rakentamiseksi. Kuitenkin on myös huomioitava korkeampien taajuuksien signaalien haasteet suuren kantaman mobiiliverkon rakentamisen osalta, kuten signaalin nopeampi vaimeneminen etäisyyden funktiona. Voidaankin olettaa nykyisen 5G-mobiiliverkon taajuuksien ja teknologian tarjoavan pohjan myös 6G-mobiiliverkolle. Tutkielmassa nostetaan 6G:n mahdollistavista teknologioista esille muun muassa massiiviset MIMO-järjestelmät, modulaatiomenetelmien tutkimus sekä tekoälyn ja koneoppimisen tarjoamat mahdollisuudet. Ottamalla tekoäly mukaan esimerkiksi aistivan verkon luomiseen, voidaan luoda entistä kognitiivisempi verkko.

Avainsanat: 6G, mobiiliverkkojen tulevaisuus, aistiva verkko, radioaallot, 6G käyttökohteet, 6G teknologiat

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO	1
2	6G VISIO JA MAHDOLLISUUDET	3
2.1	Odotukset ja mobiiliverkkojen kehitys.....	3
2.2	6G:n käyttökohteet.....	7
2.2.1	<i>Verkkojen verkko</i>	7
2.2.2	<i>Aistiva verkko</i>	8
2.2.3	<i>Digitaalinen kaksonen ja mallintaminen</i>	8
2.2.4	<i>Teollisuuden uudet mahdollisuudet</i>	9
2.2.5	<i>Autot ja liikenne</i>	10
2.2.6	<i>Laajennettu todellisuus ja hologrammit</i>	11
3	TAAJUUDET	13
3.1	Käytössä olevat taajuudet.....	13
3.2	Uudet taajuusalueet.....	15
4	TEKNOLOGIAT JA VAATIMUKSET	18
4.1	Tekoäly ja koneoppiminen	18
4.2	MIMO-tekniikat ja modulaatiomenetelmät	19
4.3	Tietoturva	21
4.4	Energiätehokkuus ja ympäristöystävällisyys	22
5	AISTIVA VERKKO	23
5.1	Visio	23
5.2	Käyttökohteet.....	25
5.3	Tekoäly osana aistivaa verkkoa	26
5.4	Vaatimukset ja haasteet	27
6	YHTEENVETO	28
	LÄHTEET	31

1 JOHDANTO

Nykyajan digitalisoituneessa yhteiskunnassa yhä useampi laite on kytkettynä verkkoon, jolloin myös verkossa liikkuvan datan määrä on kasvanut räjähdysmäisesti verrattain lyhyessä ajassa. Esimerkiksi ensimmäisen kerran tekstiviestien lähettämisen puhelimien välillä mahdollisti GSM-standardin alle julkaistu toisen sukupolven mobiiliverkko eli 2G, joka julkaistiin Suomessa vuonna 1991 [1]. Tästä on aikaa vain hieman yli 30 vuotta, mutta nykyään mobiiliverkko mahdollistaa asioita, jotka vaikuttivat vielä muutama vuosikymmen sitten mahdottomilta. Esimerkiksi työskentely verkon yli, esineiden internet ja korkealaatuisten videoiden striimaaminen puhelimella ovat meille nykyään arkipäivää. Jotta pystymme vastaamaan lisääntyneeseen datan käyttöön ja luomaan tulevaisuudessa yhä uusia käyttötapoja mobiiliverkolle täytyy myös verkon itsessään kehittyä vastaamaan tulevaisuuden tarpeita.

Viime vuosina viidennen sukupolven mobiiliverkkoa eli 5G:tä on maailmanlaajuisesti rakennettu ja kehitetty kiihtyvällä tahdilla. Nyt 5G:n kattavuus alkaa olla erityisesti teknologisesti kehittyneiden maiden asukaskeskittymissä erittäin hyvä, mutta harvempaan asutuilla seuduilla kattavuus on vielä maantieteellisesti melko pientä etenkin Afrikassa ja Aasiassa [2]. Nyt 5G-verkon rakentamisen edetessä yhä pidemmälle tutkijoiden ja organisaatioiden mielenkiinto tulevaa kuudennen sukupolven mobiiliverkkoa eli 6G:tä kohtaan on alkanut etenevissä määrin kasvaa.

Perinteisesti matkapuhelinverkkojen uusia sukupolvia on otettu käyttöön noin kymmenen vuoden välein ja 6G:n on ennustettu jatkavan perinnettä. 6G:n tutkiminen aloitettiin jo vuonna 2018 ja sen on ennustettu tulevan käyttöön 2030-luvun vaihteessa. Ensimmäisen standardin julkaisun ennustetaan tapahtuvan vuosina 2027–2028. Myös Suomi on vahvasti mukana 6G:n kehityksessä, sillä maailman ensimmäinen 6G-tutkimusohjelma käynnistettiin Oulun Yliopistossa

Vuonna 2018 nimellä 6G Flagship [3]. Myös monet suuret teknologiayritykset ovat olleet hyvin kiinnostuneita 6G:stä ja ovatkin aloittaneet tutkimus- ja kehitystyön aiheesta. Esimerkiksi Samsung, Ericsson, Nokia ja Huawei ovat erittäin vahvasti mukana 6G:n kehitystyössä [4].

Tässä kandidaatintutkielmassa perehdytään yleisesti siihen, mitä 6G-teknologialla tarkoitetaan, mihin 6G:tä tarvitaan ja millaisia uusia käyttökohteita ja -tarkoituksia 6G mahdollistaa tulevaisuudessa mobiiliverkon käyttäjille. Lisäksi tutkielmassa syvennyttään tarkemmin 6G-mobiiliverkon kykyyn tuntea ja havainnoida ympäristöään.

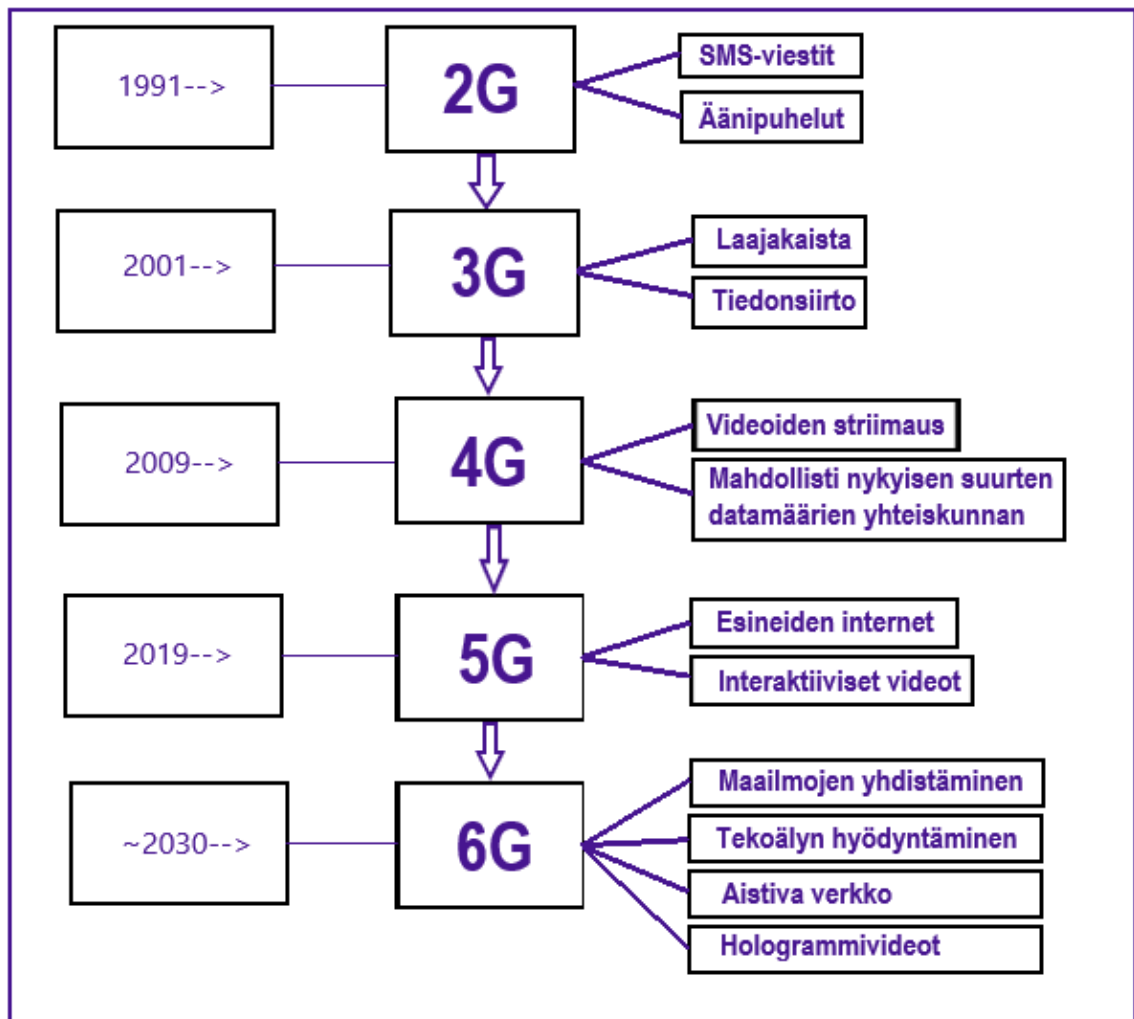
Tutkielman toisessa luvussa käsitellään 6G:n visiota, tavoitteita ja mahdollisuuksia. Lisäksi käsitellään nykyajan ja tulevaisuuden yhteiskunnan asettamia vaatimuksia 6G:lle, sekä millaisia olisivat mahdolliset 6G:n käyttötarkoitukset. Tutkielman kolmas luku käsittelee 6G:n suunniteltuja taajuusalueita. Luvussa käsitellään 6G:tä radiotaajuuksien osalta, sekä käsitellään tämän mukanaan tuomia haasteita ja mahdollisuuksia. Neljäs luku käsittelee olennaisimpia teknologioita, joita 6G:n luomiseen tarvitaan. Lisäksi käsitellään 6G-mobiiliverkon rakentamisen vaatimuksia. Viides luku syventyy yhteen 6G-mobiiliverkon tärkeimmistä tulevaisuuden ominaisuuksista eli kykyyn aistia ympäristöään.

2 6G VISIO JA MAHDOLLISUUDET

Tämä luku keskittyy yleisellä tasolla tutkimaan 6G:n visiota ja tavoitteita nykyisen tutkimustiedon pohjalta. Huomioon on kuitenkin otettava 6G:n olevan vasta tutkimus- ja kehitysasteella, joten tämä luku perustuu tämänhetkiseen tutkimustietoon ja ennusteisiin aiheesta. Lisäksi tässä luvussa tutkitaan tärkeimpiä 6G:n mahdollistamia tulevaisuuden käyttökohteita.

2.1 Odotukset ja mobiiliverkkojen kehitys

Perinteisesti jokainen uusi mobiiliverkkojen sukupolvi on tuonut uusia käyttökohteita, joita vanhempien mobiiliverkkoteknologioiden suorituskyky ei ole mahdollistanut. Esimerkiksi GSM-verkot mahdollistivat ihmisten välisen viestinnän mobiiliverkossa puheluiden ja tekstiviestien muodossa. 4G taas mahdollisti vallankumouksen kohti yhteiskuntaa, jossa massiiviset datankäyttömäärät ovat tavallisia. Esimerkiksi videoiden suoratoistosta puhelimella tuli mahdollista suurempien tiedonsiirtonopeuksien ansiosta ja pienempi viive mahdollisti esimerkiksi uskottavan verkkomoninpelien pelaamisen vain mobiiliverkolla. 5G taas nosti verkon suorituskykyä entisestään tarjoten esimerkiksi paremmat mahdollisuudet esineiden internetin ratkaisujen toteuttamiselle ja teollisuuden automaatiojärjestelmille. [5] Myös 5G:n tärkeimpänä kaupallisena motivaattorina toimii edelleen entistä parempi mobiililaajakaista loppukäyttäjille. Kuvassa 1 esitetään matkapuhelinverkkojen sukupolvet sekä niiden tärkeimmät teemat havainnollistavasti.



Kuva 1: Mobiiliverkkojen historia ja tärkeimmät käyttökohteet. [5]

Seuraava tutkinnan aihe onkin tärkeimmät 6G:n tarjoamat uudistukset ja kehityskohteet sekä se, onko mahdollisesti havaittavissa jo nyt tulevaisuuden käyttökohteita, joihin 5G:n suorituskyky ei enää pystyisi vastaamaan. 6G:n odotetaan tuovan parannuksia 5G:hen verkon jokaisella osa-alueella. Sen odotetaan tuovan suuremman kapasiteetin ja tiedonsiirtonopeuden, pienemmän viiveen sekä entistäkin luotettavamman ja vakaamman yhteyden. Taulukossa 1 esitetään ennustettua 6G-verkon suorituskykyä verrattuna edellisen sukupolven verkkoihin tilanteen suuruusluokan havainnollistamiseksi. Taulukon arvot ovat arvioituja karkeita maksimiarvoja ihanteellisissa olosuhteissa kyseiselle mobiiliverkkoteknologialle. 5G:n ja 4G:n arvot perustuvat standardoituihin tavoitearvoihin ja 6G:n arvot tutkimuksissa luotuihin ennusteisiin. Kyseiset arvot ovat teoreettisia maksimeja, jolloin todellisuudessa esimerkiksi 4G:n viiden

millisekunnin viive ei toteudu juuri koskaan, vaan viivearvot ovat muutaman kymmenen millisekunnin luokkaa.

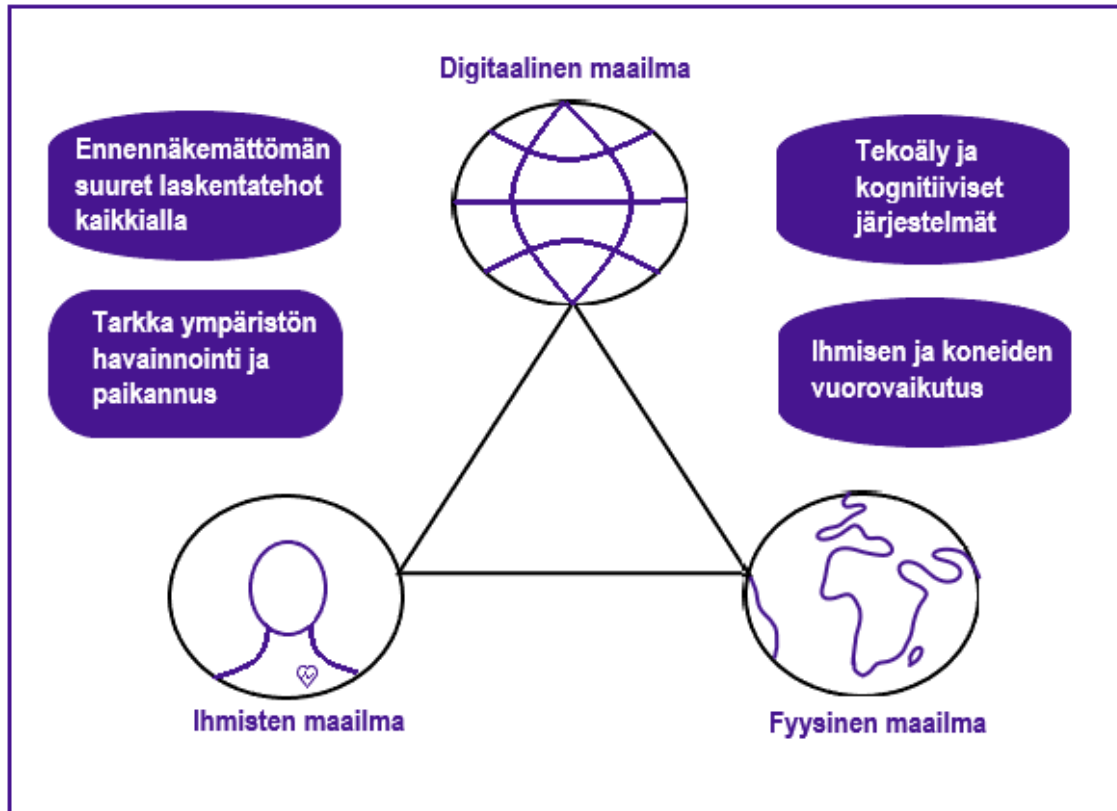
Taulukko 1: Suorituskyvyn vertailu optimaalisissa olosuhteissa. [6] [7] [8] [9]

Teknologia	Tiedonsiirtonopeus (Gb/s)	Viive (ms)	Laite-kapasiteetti (laitetta/km ²)	Luotettavuus (%)	Mobiliteetti (km/h)
4G/LTE	0.3–3 (Riippuen LTE-versiosta)	5–15	2000	99.99	200–300
5G/NR	20	1–10	1 000 000	99.999	500
6G	>100–1000	0.25–1	10 000 000	99.999999	1000

Taulukosta 1 huomataan 6G:n tavoitearvojen parantavan verkon suorituskykyä moninkertaiseksi useilla verkon osa-alueilla edelliseen sukupolveen verrattuna, kuten aikaisempienkin sukupolvien osalta on tapahtunut. Moninkertainen laitekapasiteetti takaa mobiiliverkon toimintakyvyn tulevaisuuden yhteiskunnassa, jossa mobiiliverkkoon yhdistettynä olevien laitteiden määrä kasvaa jatkuvasti. Lisäksi myös esimerkiksi mobiliteettiin, luotettavuuteen ja paikannustarkkuuteen odotetaan merkittäviä parannuksia. Luotettavuuden tavoitearvoksi on tutkimuksissa määritelty jopa 99.999999 %, jolloin katkoksia olisi noin yhdessä tapauksessa sadasta miljoonasta. Verkon mobiliteetin taas odotetaan kehittyvän toimimaan luotettavasti jopa 1000 km/h nopeuksissa, joka vastaisi suunnilleen nopeutta, jolla matkustajalentokoneilla lennetään. [6] Paikannustarkkuuden odotetaan nousevan jo 5G-aikakaudella senttimetrien luokkaan, mutta 6G:n odotetaan vievän myös tämän uudelle tasolle [5].

Verkon parempi luotettavuus ja pieni viive ovat myös erittäin tärkeitä, koska tulevaisuudessa yhä useampi laite ja järjestelmä esimerkiksi teollisuuden automaatiassa ja kriittisissä järjestelmissä tulee käyttämään mobiiliverkkoa osana toimintaansa. Mobiiliverkosta odotetaan ajan kuluessa tulevan yhtä kriittinen osa yhteiskuntaamme kuin sähköverkko on nykypäivänä. Tällöin myös esimerkiksi verkon tietoturvan tulee olla ensiluokkaista, koska mitä riippuvaisemmiksi tulemme verkosta, sen kriittisempää verkon toimivuus on. Yksi 6G:n merkittävä visio on luoda verkko, joka yhdistää digitaalista maailmaa,

fyysistä maailmaa ja ihmisten maailmaa entistä paremmin yhteen, jolloin verkosta tulee myös entistä kokonaisvaltaisempi tekijä maailmaan [5]. Kuvassa 2 esitetään tämä visio havainnollistavasti.



Kuva 2: Visio 6G:stä maailmoja yhdistävänä verkkona. [5]

Tulevaisuudessa myös entistä energiatehokkaammat ratkaisut ovat tärkeitä, joten 6G:ssä voidaan odottaa merkittäviä parannuksia myös energiatehokkuuteen. 6G Flagship -projektissa energiatehokkuuden tavoitearvoksi on määritelty vähintään kymmenkertainen energiatehokkuus verrattuna aiempaan sukupolveen [10]. Tärkeää on kuitenkin tiedostaa, että kaikkiin tässä luvussa esiteltyihin verkon vaatimuksiin ei välttämättä pystytä vastaamaan samanaikaisesti, vaan eri verkon ominaisuuksia painotetaan käyttötarpeen mukaisesti.

2.2 6G:n käyttökohteet

Tarkastellaan seuraavaksi, miten edellisessä luvussa mainittuja verkon ominaisuuksia voidaan hyödyntää ja millaisia uusia käyttökohteita 6G-mobiiliverkolla voisi olla aiempiin sukupolviin verrattuna.

2.2.1 Verkkojen verkko

Mobiiliverkon ei voida olettaa pystyvän saavuttamaan samanaikaisesti kaikkien ominaisuuksiensa suurinta mahdollista potentiaalia. Verkon eri käyttäjät ja käyttökohteet kuitenkin asettavat verkolle erilaisia vaatimuksia, jolloin verkon on pystyttävä mukautumaan paikallisesti käyttökohteen vaatimuksien mukaiseksi. Esimerkiksi nykyinen 5G pystyy tarjoamaan erittäin luotettavia matalan viiveen yhteyksiä (URLLC), joita 6G tulee parantamaan entisestään [5]. Ne mahdollistavat mobiiliverkon käytön laajemmin muun muassa kriittisissä teollisuuden ja terveydenhuollon laitteissa, mutta vaativat erittäin luotettavaa ja viiveetöntä yhteyttä. Samanaikaisesti verkossa voi olla suuria datansiirtonopeuksia vaativa käyttökohde, jolloin saattaa syntyä ongelma molempien käyttökohteiden vaatimusten täyttämiseen samanaikaiseksi.

6G-mobiiliverkossa voidaankin odottaa olevan aliverkkoja, jotka täyttävät halutun käyttökohteen vaatimukset. Tällöin muodostuu verkkojen verkkoja osaksi mobiiliverkkoa. Esimerkiksi koneiden alueverkot, joissa voi olla satoja antureita koneen alueella vaativat erittäin luotettavaa ja viiveetöntä toimintaa koneen toiminnan mahdollistamiseksi. Laitteiden, kuten autojen ja robottien, suunnittelijoille aidosti täysin langattomasti toimiva järjestelmä avaisi paljon uusia mahdollisuuksia, koska kaapelijärjestelmien käyttämä tila voitaisiin hyödyntää toisella tavalla. [5]

Lisäksi aliverkkoja tarvitaan myös moniin muihin käyttökohteisiin. Esimerkiksi laajaa spektrialuetta käyttävien kapasiteettia ja kattavuutta tavoittelevien verkkojen joustavaan käyttöönnottoon, tehokkuutta tarjoaviin pilvipohjaisiin verkkoratkaisuihin ja äärimmäistä luotettavuutta tarjoaviin mesh-verkkoihin [10].

2.2.2 Aistiva verkko

Yksi 6G:n tärkeimmistä ennustetuista osa-alueista on sen kyky aistia ympäristöään ennennäkemättömällä tavalla. Tämän tutkielman viides luku syventyy aiheeseen tarkemmin, joten tässä kappaleessa käsitellään aihetta vielä hyvin pintapuolisesti tiivistäen.

Aistittavan internetin tarkoitus on mahdollistaa ihmisten ja koneiden vuorovaikutus tietokoneen välityksellä olematta itse paikalla. Tulevaisuudessa 6G:n mahdollistama entistä korkeampien taajuuksien käyttö mahdollistaa tilanteen, jossa fyysisen maailman objekteista kimpoilevan signaalin avulla pystyttäisiin luomaan fyysisen maailman objekteista kopioita, joiden muoto, tyyppi, suhteellinen sijainti, nopeus ja mahdollisesti jopa materiaaliominaisuuksia pystytään selvittämään. Tällöin pystymme aistimaan jokaisen paikan, jonne verkon signaali ylettyy. [5]

Luonnollisesti syntyvät datamäärät ja datan monimutkaisuus ovat erittäin suuria aistittavan verkon kaltaisessa tilanteessa, jolloin erityisesti tekoälyn ja koneoppimisen merkitys korostuu huomattavasti, jotta saamme hyödynnettyä verkon avulla keräämäämme tietoa maksimaalisella tehokkuudella [11].

2.2.3 Digitaalinen kaksonen ja mallintaminen

Digitaalisella kaksoisella tarkoitetaan fyysisen maailman objekteista luotua yksityiskohtaista virtuaalista kopiota. Virtuaalinen kopio sisältää monia samoja ominaisuuksia ja tietoja alkuperäisen kappaleen kanssa, jolloin sitä voidaan hyödyntää useiden kopioiden luomiseksi alkuperäisestä kappaleesta täysin automatisoidusti. Digitaalisen kaksoiskappaleen mahdollisuuksien odotetaan realisoituvan 6G-mobiiliverkkojen kehityksen edetessä, mutta se on jo nyt herättänyt suurta kiinnostusta eri teollisuudenaloilla. Erialaisten teollisuuden laitteiden käyttö- ja hallintakustannuksia voisi olla mahdollista alentaa vertaamalla digitaalisen kaksoiskappaleen ominaisuuksissa ajan kuluessa tapahtuvia muutoksia esimerkiksi tekoälyn ja koneoppimisen avulla. [12]

Digitaaliset kaksoset ovat myös hyvin vahvasti linkittyneet aistivaan verkkoon, koska ne mahdollistavat esimerkiksi digitaalista kaksosta muokkaamalla tapahtuvan tosielämän vastineen muokkauksen, joka vaatii hyvin reaaliaikaista käsitystä todellisesta maailmasta ilman ihmisen havainnointia fyysisestä maailmasta. Yksi mahdollinen digitaalisten kaksosten käyttökohteita on älykkäiden kaupunkien hallintaan luotu ohjelma. [10]

2.2.4 Teollisuuden uudet mahdollisuudet

5G käynnisti niin kutsutun teollisuuden neljännen vallankumouksen eli Industry 4.0:n monien uusien teknologioiden avulla, ja 6G:n käyttöönoton edetessä odotetaan siirtymisen kohti teollisuuden viidennettä vallankumousta eli Industry 5.0:aa kiihtyvän [5]. Teollisuuden neljännen vallankumouksen keskeisimpiä teknologioita ovat muun muassa esineiden internet, pilvipalvelujärjestelmät, kyberturvallisuus, robotiikka, sekä tekoäly ja koneoppiminen [13]. Tämä nähdään hyvin vahvasti Industry 5.0:n pohjana, jossa lähestytään teollisuutta hieman eri näkökulmasta kuin Industry 4.0:ssa, jossa erityisesti tietotekninen kehitys ja tuottavuuden kasvu on keskiössä. Industry 5.0:ssa visiona on ihmisten työskentely kehittyneiden teknologioiden ja tekoälyllä toimivien robottien rinnalla työprosessien kehittämiseksi. Tärkeitä arvoja ovat esimerkiksi ihmiskeskeisyys, keskittyminen kestävyteen, sekä prosessien joustavuus. [14]

Aistiva verkko tarjoaa mahdollisuuksia myös teollisuudelle, sillä 6G-verkon toiminta sensorina mahdollistaa aistimisen, paikannuksen ja viestinnän yhden järjestelmän avulla, jolloin teollisuuden kustannuksia on mahdollista alentaa [5]. Yksi esimerkki 6G:n käyttökohteista teollisuudessa on robotit ja teollisuuden automaatiojärjestelmät, jotka vaativat erittäin pientä viivettä ja hyvää luotettavuutta reaaliaikaisen hallinnan toimimiseksi. Näissä järjestelmissä paremmat mobiiliverkkoyhteydet mahdollistavat etähallinnan, jossa ihmiset voivat suorittaa etävalvontaa vaikkapa virtuaalitodellisuuden tai hologrammityyppisen viestinnän avulla tuntoantureita apuna käyttäen. [6]

Terveystieteissä on myös paljon uusia mahdollisuuksia 6G:n osalta. Esimerkiksi diagnoosien antaminen etänä, kuntouttaminen etänä ja kirurgisten toimenpiteiden suorittaminen etänä tarjoaisivat mahdollisuuden saavuttaa tarvittava lääketieteellinen asiantuntemus mistä päin maailmaa tahansa ilman fyysistä läsnäoloa. Esimerkiksi etänä tapahtuvassa leikkauksessa kirurgi voisi suorittaa leikkauksen robotin avulla vastaanottamalla jatkuvaa reaaliaikaista tietoa potilaasta. [6] Yksinkertaisten lääketieteellisten operaatioiden suorittaminen etäyhteydellä olisi varmasti melko ongelmaton jo lähitulevaisuudessa, mutta monimutkaisempien ja potentiaalisesti hengenvaarallisten leikkausten tekemiseen on varmasti vielä matkaa. Varmasti teknologinen kehitys tulee tämän mahdollistamaan melko pian, mutta teknologiasta riippumattomat tekijät saattavat rajoittaa tätä edistysaskelta melko pitkäänkin.

2.2.5 Autot ja liikenne

Mobiiliverkkojen kehityksellä voidaan tulevaisuudessa tehdä liikenteen toimivuudesta ja turvallisuudesta entistä sujuvampaa. Ajoneuvojen viestintä toisten ajoneuvojen sekä liikenteen infrastruktuurin välillä voisi vähentää esimerkiksi liikenneonnettomuuksia ja liikenneturvauksia. 6G:n tarjoamia keskeisiä toiminnallisuksia liikenteessä ovat esimerkiksi ajoneuvojen linkitys toisiinsa mobiiliverkon avulla, täysin automatisoitu ajaminen, ja kehittynyt kuljettajan avustaminen. [6]

Ennen kaikkea tärkeintä on keskittyä liikenteen kehityksessä turvallisuuteen ja sen kehittämiseen. Liikenteessä käytettävien sensorien ja ohjausjärjestelmien on kehityttävä entisestään, joka vaatii myös käytettävältä verkolta enemmän. Tulevaisuuden verkkoon yhteydessä olevat ajoneuvot sisältävät suuren määrän sensoreita ja mittalaitteita turvallisuuden maksimoimiseksi. Algoritmien täytyykin olla hyvin kehittyneitä, jotta useilta sensoreilta ja muilta lähteiltä tulevaa dataa pystytään hyödyntämään tehokkaasti entistä turvallisemman liikenneympäristön luomiseksi. Toimiakseen tehokkaasti osana liikennettä mobiiliverkolta vaaditaan erittäin suurta luotettavuutta, hyvin matalaa viivettä, ja korkeiden taajuuksien hyödyntämistä. [15] Myös datamäärät voivat olla hyvin suuria riippuen kohteen

vaatimuksista, mutta esimerkiksi autonomisesti ajavan auton järjestelmän sensorien ja muiden laitteiden yhteenlaskettu tiedonsiirtonopeus voisi olla 1 Gb/s. Tietoturva on myös äärimmäisen tärkeää hallittaessa liikennettä verkon avulla, sillä onnistunut tietoturvahyökkäys tai virhe järjestelmässä voisi aiheuttaa hengenvaarallisia tilanteita. [6]

2.2.6 Laajennettu todellisuus ja hologrammit

Laajennetussa todellisuudessa yhdistyvät lisätty todellisuus, virtuaalinen todellisuus ja yhdistetty todellisuus. Kyseessä on kattokäsite, jonka voidaan odottaa tulevaisuudessa korvaavan edelle mainitut käsitteet niiden sulautuessa yhä vahvemmin toisiinsa. Laajennettu todellisuus yhdistää ihmisen aistiman ympäristön ja tietokoneella luodut elementit ja virtuaalitodellisuudet. Tällä hetkellä tutkimuksissa ja kehitteillä olevissa tuotteissa on huomattu laajennetun todellisuuden ratkaisujen potentiaali muun muassa tietokonepeleissä, lääketieteessä, opetuksessa ja insinööritieteissä esimerkiksi monimutkaisten mallien visualisoinnin ja analysoinnin tukena. [16]

5G:n odotetaan tuovan paljon uusia mahdollisuuksia laajennetun todellisuuden sovelluksille tarjoamalla mahdollisuuden saumattomaan käyttäjäkokemukseen missä ja milloin vain, sillä 5G-aikakaudella mobiiliverkon suorituskyky alkaa olla ensimmäistä kertaa riittävällä tasolla laajennetun todellisuuden sovellusten käytölle langattomassa verkossa. Kuitenkin 5G-aikakaudella laajennettu todellisuus on vasta hyvin alussa ja rajoitteita sovelluksille ja teknologian käytön yleistymiselle on vielä paljon. Yksi ongelma on 5G:n kapasiteetin rajallisuus erityisesti taajuusalueen reunoilla, joka estäisi sulavan laajennetun todellisuuden käytön osalle käyttäjistä. Tähän ongelmaan on esitetty ratkaisuksi esimerkiksi ”flexible spectrum access” -mallia, jossa laajennetun todellisuuden käyttäjiä voitaisiin joustavasti siirtää eri taajuusalueiden kantoaaltojen välillä toimivuuden takaamiseksi. [16]

Esimerkiksi laajennetun todellisuuden sovellus, joka käyttää 360 asteen näkökenttää vaatii huomattavasti suuremman tiedonsiirtonopeuden kuin tavallisen 2D-videon toistaminen. 5G:llä on vielä osittain ongelmia vastata tähän,

mutta 6G:n voidaan odottaa tarjoavan viimeistään riittävän verkon suorituskyvyn vastaamaan vaativimpiinkin laajennetun todellisuuden sovelluksiin. [12] Yksi multimedian kuluttamisen seuraavista askeleista 6G-aikakaudella tulee olemaan kolmiulotteisen käyttäjäkokemuksen mahdollistavat hologrammiteknologiat. Hologrammi koostuu useista kolmiulotteisista kuvista, joiden tulee muuttua käyttäjän asennon muuttuessa kolmiulotteisen vaikutelman luomiseksi. Lisäksi käyttäjän vuorovaikutuksen mahdollistaminen hologrammien kanssa on hyvin olennainen osa hologrammiteknologioita. Nämä vaativat kuitenkin äärimmäisen suurta tiedonsiirtonopeutta ja erittäin lyhyttä vasteaikaa hologrammien sujuvan käyttäjäkokemuksen mahdollistamiseksi. Hologrammit vaativat myös äärimmäisen tarkkaa synkronointia monista lähteistä tulevan tiedon hyödyntämiseksi, sekä suurta reaaliaikaista laskentatehoa sovelluksen suurten datamäärien hyödyntämiseksi. [6]

3 TAAJUUDET

Radiotaajuudet antavat fysikaalisen pohjan koko mobiiliverkkojen langattoman tiedonsiirron mahdollistamiseksi. Eri taajuusalueita käytetään mobiiliverkoissa eri tarkoituksiin, sillä fysikaalisten ominaisuuksiensa vuoksi eri taajuusalueiden signaalit tarjoavat erilaista suorituskykyä muun muassa signaalin kantaman ja tiedonsiirtokapasiteetin osalta. Matalamman taajuuskaistan signaalit esimerkiksi kykenevät pidempään kantomatkkaan ja parempaan esteiden läpäisyyn, mutta niiden tiedonsiirtokapasiteetti on hyvin rajallista. Korkeamman taajuusalueen signaalit taas pystyvän korkeisiin tiedonsiirtonopeuksiin, mutta verkon rakentamisessa on otettava huomioon signaalin lyhyempi kantomatka. Tässä luvussa keskitytään 6G-mobiiliverkon rakentamisessa mahdollisesti käytettäviin taajuusalueisiin ja pohditaan eri taajuusalueiden käytön haasteita ja mahdollisuuksia. Voidaan olettaa tavoitteena olevan uuden teknologian toiminta myös nykyisillä taajuuksilla, jolloin nykyiset taajuusalueet toimivat pohjaratkaisuna myös uudelle 6G-mobiiliverkolle. Käsitellään tämän vuoksi aluksi hieman nykyisiä 5G-verkolla käytössä olevia taajuusalueita.

3.1 Käytössä olevat taajuudet

Fysikaalisten rajoitusten vuoksi taajuusalueita on vain rajallinen määrä, joka on johtanut taajuusalueiden käytön tarkkaan sääntelyyn. Radiosignaalit eivät pysähdy valtioiden rajoilla, joten valtiot ovat halunneet yhtenäistää radiotaajuuksien sääntelyä ja radiotaajuusspektrin käyttöä. Tämän vuoksi kansainvälinen televiestintäliitto (ITU) järjestää neljän vuoden välein maailman radiokonferenssin (WRC), jossa tarkastellaan esimerkiksi taajuusspektrin käyttöä vahtivia kansainvälisiä sopimuksia ja mahdollisesti myönnetään taajuusalueita uusiin käyttötarkoituksiin. Maailmanlaajuisesti mobiiliverkkojen standardoinnista vastaa 3GPP-organisaatio, joka koostuu tietoliikenteen standardoinnista vastaavista organisaatioista ympäri maailman. 3GPP noudattaa toiminnassaan

ITU:n määrittämiä vaatimuksia. 3GPP on määritellyt uusimmassa julkaisussaan Release 18:ssa 5G:lle kaksi eri taajuusaluetta, matalammilla alle 7 GHz:n taajuuksilla toimivan alueen, sekä korkeammilla usean kymmenen GHz:n taajuuksilla toimivan alueen [17]. Taulukossa 2 on esitelty tarkemmin taajuusalueet.

Taulukko 2: 3GPP:n Release 18:ssa määrittämät taajuusalueet 5G:lle. [17]

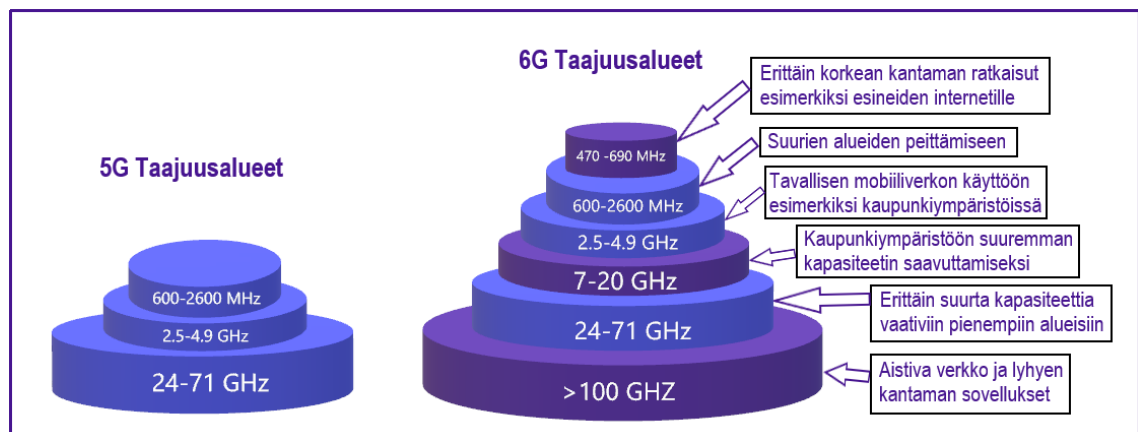
Taajuusalueen nimi		Vastaava taajuus
Taajuusalue 1		410 MHz – 7125 MHz
Taajuusalue 2	Taajuusalue 2.1	24250 MHz – 52600 MHz
	Taajuusalue 2.2	52600 MHz – 71000 MHz

Taulukosta 2 huomataan, että taajuusalue 2 on jaettu kahteen osaan, jotka kuitenkin muodostavat yhden yhtenäisen taajuusalueen välille 24.25–71 GHz. Syynä tähän on uusi pääasiassa tulevan 5G-advanced -standardin käyttöön määritelty taajuusalue 2.2, jota ei ollut vielä 3GPP:n aiemmassa julkaisussa Release 17 [17].

Suomessa radiotaajuuksien sääntelyä ja käyttöä valvoo Traficom. Suomessa 5G:n käyttöön on määritelty viisi eri taajuuskaistaa, joista neljä sijaitsee taulukon 2 matalammalla taajuusalue 1:llä ja yksi korkeammalla taajuusalue 2.1:llä [18]. 5G:n taajuuskaistat ovat Suomessa 700 MHz:n, 2 GHz:n, 2.6 GHz:n, 3.5 GHz:n ja uusimpana 26 GHz:n taajuuksilla [18]. Taajuusalue 2.2 on vielä hyvin uusi ja vasta määritelty taajuusalue, joten sille ei ole vielä toistaiseksi määritelty taajuuskaistoja Suomessa. Nähtäväksi jää saadaanko esimerkiksi 2023 joulukuussa järjestettävän seuraavan maailman radiokonferenssin jälkeen entistä selkeämpää tietoa uuden taajuusalueen käytöstä. Esimerkiksi vuoden 2019 maailman radiokonferenssissa uusista 5G-taajuusalueista tehtyjen päätöksien jälkeen Suomessa otettiin käyttöön korkein tämän hetkinen 5G:n taajuusalue 26 GHz:n taajuudella [19]. 5G:n käyttöön määriteltyjen taajuusalueiden käyttö on myös melko kallista. Suomessa kolme suurinta operaattoria ostivat jokainen itselleen seitsemällä miljoonalla eurolla käyttöoikeuden 800 MHz laajuiseen taajuuskaistaan 26 GHz:n taajuusalueen huutokaupassa vuonna 2020 [20].

3.2 Uudet taajuusalueet

Uudet mobiiliverkkosukupolvet ovat yleensä ottaneet käyttöön uusia taajuusalueita vastatakseen uuden sukupolven käyttökohteiden kasvaneisiin tiedonsiirtonopeuden ja kapasiteetin vaatimuksiin. Esimerkiksi 5G-aikakaudella on otettu käyttöön uusia taajuusalueita millimetriaaltojen spektriltä aina usean kymmenen GHz:n taajuuksiin asti. 6G-verkon aikakaudella mahdollisia uusia taajuuksia verkolle voisi löytyä esimerkiksi väliltä 7–20 GHz. Ensisijaisesti tältä taajuusalueelta oletetaan löytyvän taajuuskaistoja, jolla voitaisiin luoda riittävän kapasiteetin ja signaalin kantaman mahdollistava mobiiliverkko myös ulkotiloissa. Tällä taajuuskaistalla on myös muita käyttäjiä, mutta täältä oletetaan silti tulevaisuudessa löytyvän tilaa myös 6G-verkon tarpeisiin. Jotta 6G voisi tarjota erittäin pitkän kantaman ratkaisuja esimerkiksi esineiden internetin sovelluksille, on esitetty myös taajuuskaistaa väliltä 470–690 MHz 6G:n käyttöön. [21] Kuvassa 3 on esitetty 6G:n uudet potentiaaliset taajuusalueet vertaillen niitä jo olemassa oleviin 5G:n taajuusalueisiin.



Kuva 3: 5G:n ja 6G:n taajuusalueet ja niiden käyttökohteet. [21]

Yksi mahdollinen uusi taajuusalue lyhyen kantaman verkoille on välillä 100 GHz – 1 THz. Näillä taajuusalueilla signaalin tiedonsiirtonopeudet olisi mahdollista nostaa suurimmille 6G:n tavoittelemille tasoille, ja esimerkiksi myös paikannustarkkuuteen ja aistivan verkon sovelluksiin korkeammat taajuudet avaisivat uusia mahdollisuuksia. Kyseisellä taajuusalueella on muitakin käyttökohteita, jolloin ei voida olettaa koko taajuusaluetta myönnettäväksi 6G-

mobiiliverkolle, mutta taajuusalueen ollessa kuitenkin suuri tarjoaa se 6G:lle mahdollisuuden löytää tarvittava määrä uutta taajuuskaistaa. Kuitenkin suuressa osassa tästä taajuusalueesta signaalin kantama olisi hyvin pieni äärimmäisen suuren taajuuden takia, mikä vaikeuttaa käyttöä yli muutaman metrin kantamaa vaativissa käyttökohteissa. [6]

Seuraavassa taulukossa 3 on havainnollistettu signaalin teoreettista heikkenemistä laskemalla vapaan tilan vaimennus eri taajuuksille lähtien 5G:n taajuuksista muutamasta GHz:stä aina 6G:lle suunniteltuun yhteeseen THz:iin asti.

Taulukko 3: Vapaan tilan vaimennus eri taajuuksilla.

Taajuus (GHz)	Vaimennus etäisyydellä 1 m (dB)	Vaimennus etäisyydellä 10 m (dB)	Vaimennus etäisyydellä 100 m (dB)	Vaimennus etäisyydellä 1000 m (dB)
3,5	43.33	63.33	83.33	103.33
10	52.45	72.45	92.45	112.45
25	60.41	80.41	100.41	120.41
50	66.43	86.43	106.43	126.43
100	72.45	92.45	112.45	132.45
300	81.99	101.99	121.99	141.99
500	86.43	106.43	126.43	146.43
1000	92.45	112.45	132.45	152.45

Taulukosta 3 huomataan signaalien vaimentuvan merkittävästi, kun siirrytään mahdollisille uusille taajuusalueille. Huomioitavaa on taulukon logaritmisuus, jolloin lineaarisella asteikolla vaimennukset olisivat erittäin suuria isommilla taajuuksilla verrattuna pienempiin. Esimerkiksi 10 GHz:n taajuinen signaali vaimenisi ideaaleissa olosuhteissa sadan metrin matkalla yhtä paljon kuin 1000 GHz:n signaali metrin matkalla. Huomioitavaa on myös signaalin merkittävästi vapaan tilan vaimennusta suurempi vaimeneminen todellisuudessa, kun otetaan huomioon esimerkiksi ympäristön ja rakennuksien negatiiviset vaikutukset signaalin etenemiseen. Suuresta vaimenemisesta johtuen voidaan todeta

suuremman kattavuusalueen verkon luomisen nykyteknologialla mahdolliseksi terahertsitaajuuksilla. Kuitenkin nämä voivat mahdollistaa suuren kapasiteetin tiedonsiirron langattomasti pienillä etäisyyksillä, esimerkiksi jonkin yksittäisen laitteen sisällä. Langaton tiedonsiirto laitteen sisällä taas vapauttaa langallisen tiedonsiirron käyttämän fyysisen tilan muuhun käyttöön, joka tarjoaa uusia mahdollisuuksia suunnittelijoille.

Tällä hetkellä tutkitaan useita teknologioita, joissa voisi olla potentiaalia riittävän hyvän signaalin lähtötehon ja hyötysuhteen saavuttamiseen mobiiliverkon tarpeisiin myös entistä suuremmilla taajuuksilla. Nykytekniikalla riittävän tehokkaan signaalivahvistuksen saavuttaminen olisi teoriassa mahdollista aina 300 GHz:n taajuuksiin asti, mutta tästä suuremmilla taajuuksilla ei pystytä vielä nykypäivänä tarjoamaan riittävän tehokasta signaalin vahvistusta mobiiliverkon tarpeisiin. Kysymys onkin, vaatiiko 6G-verkko teknologioiden kehittämistä entistä paremmiksi suurempien taajuuksien verkkojen toteuttamiseksi, ja mikä teknologia olisi tässä mahdollisesti paras ratkaisu. [11]

Suuri haaste 6G-verkon luomiseksi ylemmillä millimetriaalto-taajuuksilla sekä terahertsitaajuuksilla onkin siis laitteistokapasiteetin riittävyys suuremman kantaman verkon luomiseksi. Nykypäivänä myös järjestelmien energiankulutukseen on alettu kiinnittää entistä tarkemmin huomiota ja riittävä energiatehokkuus onkin yksi tärkeä kriteeri 6G-verkon rakentamisessa. [10] Riittämätön laitteistokapasiteetti ja tavoiteltu parempi energiatehokkuus ovat yhdistelmänä ongelma, jonka ratkaiseminen on erittäin kriittistä halutunlaisen 6G-verkon rakentamiseksi.

4 TEKNOLOGIAT JA VAATIMUKSET

Tässä luvussa käsitellään halutunlaisen 6G-verkon luomiseen ja rakentamiseen tarvittavia teknologioita. Teknologian kehitys myös muilla aloilla kuin suoranaisesti tietoliikenteen saralla avaa monia uusia mahdollisuuksia myös entistä paremman ja tehokkaamman mobiiliverkon luomiselle. Myös yhteiskunta asettaa 6G-mobiiliverkolle tiettyjä vaatimuksia muillakin osa-alueilla kuin pelkästään verkon varsinaisessa suorituskyvyssä. Esimerkiksi tietoturva ja erilaisten järjestelmien energiankulutus ovat aiheuttaneet suurta yhteiskunnallista keskustelua ja huolta viime vuosina, joten myös tällä saralla 6G-verkon on kehityttävä edeltäjistään ja pystyttävä vastaamaan yhteiskunnan odotuksiin ja vaatimuksiin.

4.1 Tekoäly ja koneoppiminen

Tekoäly ja koneoppiminen ovat kehittyneet viime vuosina huomattavasti, joka on lisännyt keskustelua koneoppimisen ja tekoälyn mahdollisista käyttökohteista ja mahdollisuuksista. Myös tekoälyn ja koneoppimisen käyttöä osana tulevaisuuden mobiiliverkkoja on alettu tutkia etenevässä määrin ja onkin huomatta tekoälyn olevan yksi potentiaalisimpia 6G:n mahdollistavia teknologioita. Tekoäly on äärimmäisen hyvä käsittelemään suuria määriä dataa, josta on hyötyä esimerkiksi monissa verkon hallintaan ja toiminnan optimointiin liittyvissä tehtävissä.

Verkon toiminnan optimointi käy yhä haasteellisemmaksi ihmisille mobiiliverkon rakenteen monimutkaistuessa tulevaisuudessa, jolloin esimerkiksi koneoppimista voitaisiin hyödyntää apuna. Moniantennijärjestelmissä tekoälyä ja koneoppimisen algoritmeja voitaisiin hyödyntää entistä paremmin mukautuvaan tiedonsiirtoon. Myös entistä tehokkaampi RF-suunnittelu on mahdollista ottamalla tekoäly avuksi esimerkiksi keilanmuodostuksessa ja tehonvahvistimien

paremmassa optimoinnissa. [12] Koneoppimista olisi mahdollista hyödyntää myös signaalin symbolien tunnistamisessa, koodauksen purkamisessa ja demodulaatiossa erityisesti tilanteissa, joissa kanavassa on paljon häiriötä [6]. Tekoälyn ja koneoppimisen käyttöönotto langattomien signaalin lähettimien ja vastaanottimien suunnittelussa muun muassa parantaa verkon suorituskykyä, tekee verkosta entistä sopeutuvamman langattomaan ympäristöön, tekee verkoista kestävämpiä laitteistohäiriöitä vastaan ja tarjoaa mahdollisuuden entistä energiatehokkaampaan verkkoon [10]. Ennen kaikkea tärkeää on tiedostaa, että tekoälyn kehitys on vasta alussa ja sen tarjoamat mahdollisuudet tulevat muuttamaan verkon hallintaa ja suunnittelua ennennäkemättömillä tavoilla, jolloin esimerkiksi lähes täysin automatisoidusti toimiva mobiiliverkko ei välttämättä ole kovin kaukana tulevaisuudessa.

4.2 MIMO-tekniikat ja modulaatiomenetelmät

MIMO-teknologiat (Multiple Input and Multiple Output) ovat olleet yksi tärkeimmistä 5G:n mahdollistavista teknologioista, joten voimme odottaa niiden kehityksen jatkuvan myös 6G-aikakaudella ja olevan yksi tärkeimmistä teknologioista 6G:tä toteutettaessa. MIMO:n perusidea on, että datan lähettämiseen tukiasemalta käyttäjälle käytetään useaa antennia yhden sijasta. Useamman antennin käyttö mahdollistaa monella tavalla tehokkaamman tiedonsiirron esimerkiksi mahdollistamalla paremmin suuntaavaan signaalinmuodostuksen, suuremmat tiedonsiirtonopeudet ja kapasiteetin sekä tehokkaamman taajuuspektrin käytön. Edellä mainittujen parametrien tulosten parantamiseksi 5G-aikakaudella on otettu käyttöön massiiviset MIMO-järjestelmät, joissa antennien määrää on kasvatettu huomasti. [12] 6G-aikakaudella voidaan odottaa massiivisten MIMO-järjestelmien kasvavan entistä suuremmiksi 6G:n vaatimuksien mahdollistamiseksi [6].

Yksi tutkimuskysymys 6G:n osalta on optimaalisesta keilanmuodostusarkkitehtuurista. 5G:ssä matalammilla muutaman GHz:n taajuuksilla digitaalinen keilanmuodostus on edelleen suosittua, mutta suuremmilla 5G:n millimetriaaltotaajuuksilla digitaalinen keilanmuodostus aiheuttaa suurta energiankulutusta ja käyttökustannuksia, joten analoginen

keilanmuodostus on suositumpaa. Tämän vuoksi onkin syytä tutkia optimaalisinta keilanmuodostustapaa suuremmilla taajuuksilla. [6]

Myös hajautettujen antennijärjestelmien kehitys viime vuosina on myös ollut merkittävää. Soluton massiivinen MIMO voisi olla yksi lupaava tapa näiden toteuttamiseen entistä energia- ja spektritehokkaammin. Kuitenkin käytännön toteutuksissa edut saattavat erota siitä, mitä teoriassa ne voisivat olla, joten aiheesta on syytä vielä tutkia enemmän. Esimerkiksi yksi haaste käytännön toteutuksissa on synkronoinnin toteuttaminen monien hajautettujen yhteyspisteiden ja käyttäjien välillä. [6]

Massiivisen MIMO:n toteuttamiseen tulevaisuuden mobiiliverkoissa on määritelty useita tutkimusongelmia. Näistä esimerkkejä ovat erittäin suurten antenniryhmien käyttöönotto, kanavan ennustamisen rajoitukset ja langattoman viestinnän perusrajoitukset massiivisella MIMO:lla. [12] Muita mielenkiintoisia aiheeseen liittyviä kehityskohteita ovat esimerkiksi älykkäiden pintojen avulla tapahtuva viestintä sekä OAM-multipleksointia (orbital angular momentum) käyttävät järjestelmät [6].

Myös modulaatiomenetelmien osalta lisätutkimuksen tekeminen ja kehittäminen voi olla tarpeen 6G:tä toteutettaessa. OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) on ollut hallitseva modulaatiomenetelmä 4G:ssä ja 5G:ssä. Sen suosio perustuu kapasiteetin maksimoinnin optimaalisuuteen taajuusselektiivisissä kanavissa. Toinen syy suosiolle on yhteensopivuus taaksepäin, koska OFDM:n käyttö 4G:ssä vaikutti siihen, että sitä alettiin käyttää myös 5G:ssä. 6G:ssä voidaan myös odottaa OFDM:n säilyttävän asemansa ainakin jossain määrin juuri taaksepäin yhteensopivuuden ansiosta. Kuitenkin 6G-järjestelmien vaatimukset eroavat toisistaan entistä enemmän, joka johtaa todennäköisesti useampien eri modulaatiomenetelmien käyttöön tilanteissa, joihin OFDM ei ole optimaalinen valinta. OFDM:n kolme suurinta haastetta ovat herkkyys taajuushajonnalle, spektrisen tehokkuuden rajallisuus johtuen syklisestä etuliitteestä, sekä korkea huippu-keskitehosuhde. Nämä kaikki muuttuvat entistä kriittisemmiksi ominaisuuksiksi siirryttäessä entistä suurempiin taajuuksiin. [12]

4.3 Tietoturva

Tietoturvan merkitys on kasvanut datamäärien kasvaessa ja tietotekniikan merkityksen korostuessa monilla elämän osa-alueilla. Viime vuosina keskustelu ja kiinnostus eri palveluiden ja teknologioiden tietoturvan ympärillä on ollut merkittävää, joka on vaikuttanut myös mobiiliverkkojen kehitykseen verkkojen tietoturvan ollessa nykyään yksi erittäin tärkeä määrittävä tekijä verkkojen kehityksessä. Tietoturva ja yksityisyys ovat välttämättömiä, jotta voidaan arvioida verkon toiminnan turvallisuuden riittävyyttä infrastruktuurin, laitteiden, tietojen ja omaisuuden suojaamiseksi [12]. 5G-verkon protokollan standardoinnissa ja arkkitehtuurin luomisessa panostettiin erityisen paljon tietoturvaan verrattuna edellisen sukupolven mobiiliverkkoihin [6].

6G-aikakaudella verkon turvallisuudelle on paljon uudenlaisia uhkia. Verkossa voi olla miljardeja päätelaitteita ja miljoonia aliverkkoja, jotka eivät lähtökohtaisesti ole luotettavia. Lisäksi heterogeeninen pilvipalveluiden ympäristö, verkon arkkitehtuurin hajanaisuus, avoimet rajapinnat ja lähdekoodit, sekä useiden valmistajien ohjelmistojen yhdistelmät tuottavat haasteita verkon turvallisuudelle ja yksityisyydelle. Myös tekoälyn kehittyminen ja käyttö osana verkkoja altistaa uusille uhille. Tekoälyyn pohjautuvat hyökkäykset sekä tekoälyllä toimivia järjestelmiä vastaan toteutetut hyökkäykset aiheuttavat uudenlaisia riskejä järjestelmille. [10]

Tärkeimmät tehtävät mobiiliverkkojen tietoturvan saralla ovat luottamuksellisuus, eheys ja todennus. Luottamuksellisuus varmistaa, ettei tietoja paljastu vieraille tahoille. Eheys takaa, että tiedot pysyvät muuttumattomina ja ettei tietoja muuteta laittomasti. Todennus taas varmistaa verkon viestinnän osapuolten olevan niitä, joita he väittävät olevansa. Myös yksityisyyden suoja on verkkojen tietoturvallisuuden tärkeä osa, jolla vastataan yleiseen huoleen yksityisyydensuojasta, kuten tietoturva-asetukseen Euroopassa. [12] Tärkeitä tekijöitä verkon turvallisuuden mahdollistamiseksi ovat esimerkiksi kvanttiturvallisen kryptografian käyttö, fyysisen kerroksen turvallisuuden varmistus ja lohkoketjuteknologiat [10].

E erityisen tärkeää tietoturvan suunnittelussa on, ettei ajatella vain tiedonsiirron turvaamista kahden laitteen välillä vaan nähdään tietoturva ennen kaikkea kokonaisvaltaisesti järjestelmässä protokolla- ja arkkitehtuuritasolta aina sulautettuihin ohjelmistoihin asti [6]. Mobiiliverkkojen merkityksen kasvaessa tulevaisuudessa luovat luotettavat ja turvalliset verkot perustan sovelluksille ja käyttötapauksille niin yritysten kuin kuluttajien keskuudessa [10].

4.4 Energiatehokkuus ja ympäristöystävällisyys

Viime aikoina myös ympäristöön ja energiaterhokkuuteen liittyvät teemat ovat olleet hyvin vahvasti läsnä yhteiskunnallisessa keskustelussa, joten luonnollisesti myös mobiiliverkkojen on kyettävä tässäkin asiassa vastaamaan yhteiskunnan asettamiin odotuksiin. Tämän vuoksi 6G:n kehityksessä energiaterhokkuus ja ympäristöön sekä kestävään kehitykseen liittyvät aiheet ovat vahvasti läsnä. 6G:n tavoitteena on olla energiankulutukseltaan optimoitu digitaalinen infrastruktuuri, jolla on vaikutusta useaan teollisuudenalaan ja joka osaltaan auttaa tietotekniikan alaa ympäristötavoitteiden ja riittävän vastuullisuuden saavuttamisessa [10].

Tärkeää on myös ymmärtää, ettei kyseessä ole vain suoranaisesti ympäristö- ja hiilijalanjälkeä vähentävän teknologian luominen vaan asiaa on katsottava laajemmasta näkökulmasta. Esimerkiksi 6G-verkkoon liittyvien luonnonvarojen kulutuksen, järjestelmien ja tuotteiden elinkaarten sekä sosiaalisen kestävyuden on oltava vastuullisella ja kestäväällä tasolla. Myös esimerkiksi 6G:n kyky havaita maailmaa reaaliajassa on mahdollista valjastaa kestävyyttä ja kustannustehokkuutta parantavien palveluiden käyttöön. [10]

5G-verkkoa on monissa paikoissa kritisoitu muun muassa suuresta energiankulutuksesta, vaikkakin tämä on parantunut edeltävistä sukupolvista. 6G-mobiiliverkossa myös tätä halutaan parantaa parantamalla bittikohtaista energiankulutusta jopa 10–100 kertaa paremmaksi kuin 5G:ssä. Tämä tekisi mobiiliverkkojen alasta energiaterhokkaamman ja vähentäisi yleistä virrankulutusta. [12]

5 AISTIVA VERKKO

Tässä luvussa syvennytään tarkemmin 6G:n kykyyn aistia ympäristöään, aistivan verkon käyttökohteisiin, ja kognitiivisemmän verkon luomisen vaatimuksiin. Aistivan verkon ennustetaan olevan yksi tärkeimmistä uusista käyttökohteista mahdollistavista tekniikoista 6G-aikakaudella.

5.1 Visio

Mobiiliverkkoja tarkastellessa ja arvioitaessa keskitytään usein lähinnä tiedonsiirtoon liittyviin ominaisuuksiin, kuten viiveeseen tai lähetys- ja latausnopeuksiin. Kuitenkin nykyaikaiset mobiiliverkot pystyvät tarjoamaan myös hyvin tarkkaa ja luotettavaa paikannusta, joka jätetään usein huomiotta. Esimerkiksi 5G:n ominaisuudet, kuten erittäin korkeat taajuudet, suuri kaistanleveys, ja massiiviset antenniryhmät tarjoavat luontaisesti mahdollisuudet erittäin tarkkaan paikannukseen [11]. 6G nostaa käytettäviä taajuuksia entistä suuremmille taajuusalueille, jolloin myös mahdollisuudet suurempien taajuuskaistojen käyttämiseen paranee, joka mahdollistaa entistä tarkemman paikannuksen. Lisäksi suuremmat taajuudet mahdollistavat pienempien antennien käytön, jolloin pienemmissä laitteissa on mahdollista käyttää suurempia antenniryhmiä, joka auttaa paikannuksessa suunnan arvioinnissa [11]. 6G-aikakaudella tavoite on siirtyä paikannustarkkuudessa jopa senttimetrin tasolle sisätiloissa [10]. Entistä tarkempi paikannus toimii myös yhtenä merkittävänä tekijänä aistivan verkon luomisessa.

Aistivan verkon visio on hyödyntää korkeataajuisia radiosignaalia fyysisen maailman havainnointiin reaaliajassa vaikkei itse olisi paikalla. Ideana on aistia maailmaa fyysisistä objekteista, kuten ihmisistä tai rakennuksista kimpoilevan radiosignaalin avulla. Jo 5G-taajuuksilla pystytään suorittamaan jonkin tasoista aistimista, mutta 6G-aikakaudella taajuuksien noustessa yhä korkeammiksi on

mahdollista muodostaa signaalin avulla entistä tarkempi kuva fyysisen maailman tilanteesta ja objekteista. Signaalin avulla pystytään määrittelemään objekteista esimerkiksi niiden muoto, nopeus, sijainti ja mahdollisesti myös materiaaliominaisuuksia. [5] [15]

Entistä suurempien taajuuksien käyttäminen toimii aistivan verkon näkökulmasta paremmin myös siksi, että erittäin suurta taajuutta käyttävät signaalit läpäisevät objekteja erittäin huonosti. Objekteja läpäisevä signaali toimisi huonosti aistivan verkon tarkoitukseen, koska se vääristäisi signaalin etenemistä aistivan verkon käyttötarkoituksessa ja loisi erilaisen käsityksen maailmasta signaalin lähettäjälle. [11]

Nykyään tutkajärjestelmissä mitataan usein etäisyyttä katkonaisten suuritehoisten pulssien avulla, tai vaihtoehtoisesti käytetään esimerkiksi kantoaaltojutkia, joissa voidaan etäisyyden lisäksi mitata esimerkiksi Doppler-ilmiötä. Kuitenkin pääasiallinen käyttötarkoitus tutkissa on ympärillä olevan ympäristön havainnointi radioaaltojen avulla. Esimerkiksi kohteiden suuntaa, nopeutta tai etäisyyttä voidaan mitata. Aistivan verkon toimintaperiaatteessa ja tavoitteissa onkin samankaltaisuutta tutkien kanssa. Erittäin korkeilla taajuuskaistoilla, kuten ylemmillä millimetriaalloilla ja terahertsiaalloilla erittäin tarkka mittaus on mahdollista kaikilla edelläkin mainituilla fyysisillä ulottuvuuksilla, jotka ovat siis etäisyys, suunta ja Doppler [11].

Havainnointi ja kuvantaminen on mahdollista sekä passiivisesti että aktiivisesti. Passiivisen ja aktiivisen havainnoinnin eroa voidaan myös havainnollistaa tutkajärjestelmillä, joissa on aktiivissa tutkissa oma lähetin signaalille, mutta passiiviset tutkat käyttävät vierasta lähetintä. Passiivisessa havainnoinnissa hyödynnetään pintojen luonnollisia heijastuksia ja emissiivisyyttä, jolloin toimintaperiaate on hyvin vastaavanlainen kuin tavallisessa kamerassa, mutta taajuusspektrillä huomattavasti alemmilla taajuuksilla. Aktiivisessa havainnoinnissa taas lähetetään ennalta suunniteltua signaalia ja käsitellään vastaanotettua signaalia koherentisti tarkkojen etäisyys-, Doppler- ja suuntatietojen saamiseksi. Aistivan verkon tapauksessa aktiivinen havainnointi mobiiliverkkoa apuna käyttäen on erityisesti kiinnostavaa. [11]

5.2 Käyttökohteet

Aistiva verkko ja entistä tarkempi paikannus tarjoaa lukuisia uusia mahdollisuuksia ja käyttökohteita monilla eri aloilla. Nykyiset mobiiliverkot nähdään ennen kaikkea tiedonsiirron välineinä, mutta tulevaisuudessa verkot pystyvät aivan eri tavalla toimimaan tärkeänä osana monia aloja esimerkiksi tärkeänä tilannetiedon lähteenä. Parempi paikannus ja aistivan verkon ominaisuudet tarjoavat uusia mahdollisuuksia esimerkiksi omaisuuden seurantaan, kuljetus- ja logistiikkajärjestelmiin, laajennetun todellisuuden sovelluksiin, terveydenhuoltoon ja kontekstisidonnaiseen markkinointiin. Esimerkiksi 3D-keilanmuodostus tarjoaa muiden etujensa lisäksi myös erittäin tarkan paikannuksen vaikkapa esineiden internetin sovelluksissa. Myös vertailua perinteisiin paikannusmenetelmiin, kuten GPS:ään on syytä tehdä, sillä niiden paikannus esimerkiksi sisätiloissa- ja kaupunkiympäristöissä on hyvin rajallista verrattuna mobiiliverkon mahdollisuuksiin tulevaisuudessa. [15]

Aistivan verkon tarjoama mahdollisuus reaaliaikaiseen 3D-kuvantamiseen tarjoaa mahdollisuuksia lukuisilla aloilla ja sen voidaankin olettaa olevan tärkeä osa tulevaisuuden teknologioita monilla aloilla. Aistiva verkko voi parantaa esimerkiksi liikenneturvallisuutta tarkalla reaaliaikaisella sijainnin määrittelyllä ja kohteiden havaitsemisella. [15] Autonomisesti toimivalle liikenteelle tämä voisi olla hieno mahdollisuus, sillä aistiva verkko pystyisi havainnoimaan liikenteen kokonaiskuvan ja myös objektien taakse, jonne autonomisesti ajavan ajoneuvon muut sensorit eivät pysty havainnoimaan. Myös muilla teollisuudenaloilla reaaliaikainen ympäristön havainnointi ja mahdollinen digitaalisten kaksosten luominen tarjoaisi uusia mahdollisuuksia. Esimerkiksi teollisuusympäristöissä erilaisten epätoivottujen muutosten havaitseminen ennaltaehkäisevästi voisi olla mahdollista. Myös mobiiliverkon käyttäminen rikosten estämiseen tunkeilijoita havaitsemalla on yksi mahdollinen käyttökohde [11].

Yksi potentiaalinen käyttökohde aistivalle verkolle erittäin korkeilla taajuuksilla on terveydenhuollon laitteet. Tällä hetkellä terveysteknologiassa esimerkiksi kompaktit puettavat biosensorit herättävät suurta kiinnostusta, sillä ne pystyvät tarjoamaan reaaliaikaista fyysikaalista tietoa hyvin kätevästi. Korkeita

radiotaajuuksia voidaan käyttää myös sovelluksiin, kuten ilmeiden ja eleiden tunnistamiseen, sekä sykkeen ja hengitystaajuuden seurantaan. Mobiilia sensoriteknologiaa tarvitaan myös esimerkiksi, jotta voidaan seurata ja mitata myös kotiolosuhteissa ihmiskehon biokemiallisia aineita, kuten hikeä, verta tai sylkeä ja niiden ominaisuuksia. Terahertsitaajuuksilla suoritettulla kuvantamisella on mahdollista tarjota tulevaisuudessa tietolähde lääketieteen käyttöön näiden osalta. [11]

5.3 Tekoäly osana aistivaa verkkoa

Tekoälyn rooli tulee kasvamaan entisestään tärkeämmäksi 6G-aikakaudella. Erityisesti aistivan verkon luomisessa tekoälyllä on merkittävä rooli, jotta verkosta voidaan luoda entistä kognitiivisempi. 6G:ssa käsiteltävät datamäärät tulevat olemaan erittäin suuria myös aistivan verkon osalta, jolloin tekoälyn käyttäminen apuvälineenä mahdollistaa optimaalisemman datan hyödyntämisen. 6G-järjestelmissä suurena osana tulevat olemaan dataan perustuvat koneoppimisen algoritmit, joka tarjoaa mahdollisuuksia myös kehittyneeseen paikannukseen ja havainnointiin [11].

Koneoppiminen tarjoaa mahdollisuuksia paikannukselle erityisesti monimutkaisissa olosuhteissa, kuten sisätiloissa ja kaupunkiympäristöissä. Näissä paikoissa on suuria määriä epäsuoria ja meluisia signaalihavaintoja, joita on vaikea mallintaa perinteisillä signaalinkäsittelytekniikoilla. Tekoälyä voisi käyttää hyödyksi esimerkiksi ymmärtämään, miten järjestelmä toimii esimerkiksi anturien kohinan ja epävarmuustekijöiden osalta. Tekoälyä ja koneoppimista voidaan hyödyntää myös monimutkaisten radiosignaalien samanaikaiseen mallintamiseen ja monien toisiaan täydentävien sensoreiden yhdistämiseen. Ylipäätään 6G-paikannuksen ja -havainnoinnin voidaan olettaa perustuvan paljon erilaisiin syväoppimis- ja todennäköisyysmenetelmiin. [11]

Aistivan verkon luomisessa tekoälyllä on tärkeä osa objektien havaitsemisessa ja tunnistamisessa. Entistä korkeammat taajuusalueet mahdollistavat myös tekoälylle tarkemman uudenlaisten kohteiden tunnistamisen, joita ei ole mahdollista tunnistaa ja havaita nykyisillä taajuusalueilla. Myös fyysisen

maailman havainnoinnista ja aistimisesta tuleva data on hyvin kompleksista, jolloin tekoälyä on syytä hyödyntää maksimaalisen potentiaalin saavuttamiseksi. Tekoälyä voidaan käyttää myös hyödyksi fyysisen maailman tilanteiden ennakointiin verkon avulla havainnoitaessa. [11] Esimerkiksi tekoälyä voisi hyödyntää vaikkapa liikenteessä estämään onnettomuuksia jo etukäteen. Käyttökohteita on siis tekoälylle hyvin laajalti aistivassa verkossa. Idea on kuitenkin luoda tekoälyn avulla entistä kognitiivisempi verkko, jotta verkkoa voidaan aidosti kutsua aistivaksi.

5.4 Vaatimukset ja haasteet

Aistivan verkon luomisessa on paljon hienoja mahdollisuuksia, mutta samalla edessä on vielä monia haasteita ja tutkimusta vaativia kohtia, jotta voitaisiin luoda verkko, jolla tiedonsiirto ja aistiminen toimisi yhtäaikaisesti 6G:n vaatimalla tasolla. Yksi merkittävä ongelma aistivan verkon osalta on signaalien suuri vaimeneminen. Aistiva verkko vaatii kuitenkin erittäin suuria taajuuksia, jotta tarkka ympäristön havainnointi on mahdollista. Tämä aiheuttaa ongelmia, mikäli tavoitteena olisi suorittaa havainnointia yhtään suuremmalla fysikaalisella alueella.

Luonnollisesti vaaditaan myös teknologian kehittämistä ja paljon tutkimusta siitä, miten voidaan saavuttaa 6G:n tärkeimpien teknologioiden avulla todellisuudessa esimerkiksi senttimetritason paikannus tai mahdollisuus suuren tarkkuuden ympäristön havainnointiin ja kuvantamiseen. Lisäksi yksi haaste on luoda paikannus- ja havainnointijärjestelmiä, jotka kykenevät tehokkaaseen resurssienjakoon aika-, taajuus- ja avaruusakseleilla. Myös tekoälyn käyttöä laadukkaiden ja tehokkaiden kuvantamis- ja havaitsemismenetelmien käyttöön mobiiliverkossa täytyy tutkia ja kehittää lisää. [11] Yksi ongelma on myös lähettimen ja vastaanottimen liiallinen eristäminen muusta verkosta. Tulevaisuuden verkossa yhteyspisteet pystyvät luultavasti kommunikoimaan eri kohteiden kanssa ja hyödyntämään eri lähteistä tulevia heijastuksia apuna. [15]

6 YHTEENVETO

Tässä kandidaatintutkielmassa käsiteltiin 6G-mobiiliverkon visiota, käyttökohteita, teknologista perustaa ja verkolle eri tahojen suunnalta asetettuja vaatimuksia. Lisäksi syvennyttiin tarkemmin yhteen merkittävimmistä käyttökohteista eli aistivaan verkkoon. 6G:stä itsessään ei ole vielä mitään standardia olemassa, joten työssä keskityttiin luomaan yleiskatsaus tämänhetkiseen tilanteeseen 6G-tutkimuksen saralla omia näkökulmia aiheeseen lisäten.

6G:n visio on luoda uusi kaikin tavoin edeltävää sukupolvea parempi nyky-yhteiskunnan vaatimuksiin vastaava verkko. Tämänhetkinen 5G-verkko ei tule riittämään yhteiskunnan tarpeiden kattamiseen tulevaisuudessa, sillä mobiiliverkossa käyttämämme datamäärät tulevat kasvamaan hurjasti, sekä mobiiliverkkoon kytkettyjen laitteiden määrä tulee kasvamaan hurjasti. Lisäksi jatkuvasti kehitetään ja keksitään uusia potentiaalisia käyttökohteita mobiiliverkolle, joihin vaaditaan entistä suorituskyykyisempää verkkoa.

6G:lle tekninen pohja voidaan rakentaa muun muassa entistä kehittyneemmillä ja suuremmilla MIMO-järjestelmillä. Nämä mahdollistavat entistä suuremman kapasiteetin, tehokkaamman taajuusspektrin käytön ja paremman keilanmuodostuksen. Lisäksi nostamalla taajuusalueita korkeammalle voidaan saavuttaa entistä suorituskyykyisempi verkko lyhyellä kantamalla. Korkeammat taajuudet tarjoavat myös täysin uusia mahdollisuuksia havainnoida ympäristöä mobiiliverkon avulla. On syytä kehittää myös entistä parempia menetelmiä signaalin vahvistamiseen, jotta tulevaisuudessa voisi olla mahdollisuus rakentaa mobiiliverkkoa entistä korkeammalla taajuudella kannattavalla hinnalla.

Tärkeää on myös muistaa operaattoreiden tekevän tulevaisuudessa liiketoimintaa 6G-mobiiliverkoilla. Tällöin erittäin suorituskyykyisenkään verkon

rakentaminen ei ole kannattavaa, jos asiakkaat eivät ole siitä valmiita maksamaan ylimääräistä. Liian suuri hinta onkin ollut yksi ongelma operaattoreilla jo 5G-verkon kanssa, sillä asiakkaat eivät välttämättä koe tarvitsevansa erittäin suorituskykyistä uutta verkkoa vanhan sukupolven verkon riittäessä heidän käyttötarkoituksiinsa.

Lisäksi 6G:n täytyy seurata myös muita nyky-yhteiskunnassa pinnalla olevia teemoja ja mukautua niihin. Esimerkiksi tällä hetkellä yhteiskunnan suunnalta tulee huomattavaa painetta ympäristöystävällisyyden ja energiatehokkuuden huomioimiseksi entistä paremmin teknologioissa alasta riippumatta. ICT-alan järjestelmät kuluttavatkin hurjia määriä energiaa, jonka vuoksi 6G:n odotetaan olevan moninkertaisesti edeltäjänsä energiatehokkaampi. Toinen tärkeä teema on tietoturvan ja yksityisyyden huomioiminen eri teknologioissa. Jo 5G:ssä on huomioitu tietoturva protokollatasolla erinomaisesti, mutta 6G:ssä odottavat uudet uhat, joihin on kyettävä vastaamaan. Ennen kaikkea tietoturvan ja yksityisyyden hallinta täytyy kyetä näkemään kokonaisuutena, jossa yksikin heikko lenkki voi aiheuttaa suurta vahinkoa järjestelmälle. 6G-aikakaudella voidaan odottaa mobiiliverkon vaikutuksen ihmisten elämään kasvavan entisestään. Tulevaisuudessa mobiiliverkosta voi tulla yhtä merkittävä infrastruktuuri ihmisten elämään kuin sähköverkko on tällä hetkellä. Tämän vuoksi verkon luotettava toimivuus on kyettävä varmistamaan joka tilanteessa.

6G-aikakaudella tulemme näkemään suuria määriä hyvin erilaisia käyttökohteita, joilla on kaikilla omanlaisensa vaatimukset. Mobiiliverkko ei kuitenkaan pysty tarjoamaan samanaikaisesti kaikille parasta mahdollista suorituskykyä jokaisella parametrilla mitattuna. Ratkaisu tähän on luoda paljon aliverkkoja, jotka pystyvät vastaamaan yksittäisen käyttökohteen vaatimuksiin. Tällöin voidaan ajatella 6G:tä verkkojen verkkona.

6G pystyy tarjoamaan mahdollisuuksia uusille käyttökohteille esimerkiksi antamalla ensimmäistä kertaa riittävän suorituskyvyn laajennetun todellisuuden sovelluksille ja hologrammivideoille. Yksi ehdottomasti tärkeimpiä 6G:n käyttökohteita on sen mahdollisuus toimia reaaliaikaisen tilannetiedon antajana aistivan verkon ominaisuudessa. Tällöin mobiiliverkko pystyy havainnoimaan

ympäristöään täysin uudella tavalla kaikkialla, minne mobiiliverkko kantaa. Tämä tarjoaa mahdollisuuksia paikannukseen, digitaalisten kaksosten luontiin sekä lukuisille muille aloille. Esimerkiksi liikenne ja autoilu, joka on muutenkin yksi 6G:n tärkeimmistä käyttökohteista voi hyötyä merkittävästi aistivasta verkosta. Toinen hyötyjä on monet teollisuuden alat, jotka nekin saavat 6G:stä paljon uusia mahdollisuuksia. Kun otetaan vielä tekoäly mukaan 6G:n verkon toimintaan voidaan luoda entistä kognitiivisempi verkko.

Verkon kognitiivisuus ja kyky havainnoida maailmaa antaakin mahdollisuuden tarkastella mobiiliverkkoa täysin uudesta näkökulmasta. 6G:n voidaan nähdä olevan kolme maailmaa yhdistävä verkko, jossa ihmisten maailma, fyysinen maailma ja digitaalinen maailma kohtaavat toisensa. Tällöin mobiiliverkosta tulee paljon kokonaisvaltaisempi tekijä maailmaan, jossa aiemmin mobiiliverkko on nähty vain ennen kaikkea tiedonsiirron välineenä.

LÄHTEET

1. ReinhardtHaverans. From 1G to 5G: A Brief History of the Evolution of Mobile Standards [Internet]. 2021 [viitattu 14. maaliskuuta 2023]. Noudettu osoitteesta: <https://www.brainbridge.be/en/blog/1g-5g-brief-history-evolution-mobile-standards>
2. 5G coverage map worldwide - nPerf.com [Internet]. nPerf. [viitattu 14. maaliskuuta 2023]. Noudettu osoitteesta: <https://www.nperf.com/en/map/5g>
3. Curwen P, Whalley J. 6G or not 6G? That is the question. 2021.
4. GreyB T. Top Companies and Universities mapping the 6G Technology [Internet]. GreyB. 2022 [viitattu 14. maaliskuuta 2023]. Noudettu osoitteesta: <https://www.greyb.com/blog/6g-companies/>
5. 6G explained [Internet]. Nokia. [viitattu 14. maaliskuuta 2023]. Noudettu osoitteesta: <https://www.nokia.com/about-us/newsroom/articles/6g-explained/>
6. Tataria H, Shafi M, Molisch AF, Dohler M, Sjöland H, Tufvesson F. 6G Wireless Systems: Vision, Requirements, Challenges, Insights, and Opportunities. Proc IEEE. 2021;109:1166–99.
7. LTE 3GPP releases Overview [Internet]. CableFree. 2015 [viitattu 14. maaliskuuta 2023]. Noudettu osoitteesta: <https://www.cablefree.net/wirelesstechnology/4glte/overview-of-lte-3gpp-releases/>
8. Simmons A. What's the Difference Between 4G LTE and 5G? [Internet]. Dgtl Infra. 2022 [viitattu 23. huhtikuuta 2023]. Noudettu osoitteesta: <https://dgtlinfra.com/explaining-the-key-differences-between-4g-and-5g/>
9. 3GPP. Release 15. 2019.
10. Uusitalo MA, Rugeland P, Boldi MR, Strinati EC, Demestichas P, Ericson M, ym. 6G Vision, Value, Use Cases and Technologies From European 6G Flagship Project Hexa-X. IEEE Access. 2021;9:160004–20.
11. De Lima C, Belot D, Berkvens R, Bourdoux A, Dardari D, Guillaud M, ym. Convergent Communication, Sensing and Localization in 6G Systems: An Overview of Technologies, Opportunities and Challenges. IEEE Access. 2021;9:26902–25.
12. Jiang W, Han B, Habibi MA, Schotten HD. The Road Towards 6G: A Comprehensive Survey. IEEE Open J Commun Soc. 2021;2:334–66.

13. Rao SK, Prasad R. Impact of 5G Technologies on Industry 4.0. *Wirel Pers Commun.* 2018;100:145–59.
14. What is Industry 5.0? (Top 5 Things You Need To Know) [Internet]. [viitattu 19. maaliskuuta 2023]. Noudettu osoitteesta: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/industry-5-0.aspx>
15. Key drivers and research challenges for 6G ubiquitous wireless intelligence.
16. Gao Y, Xue S, Ding M, Peng J, Pang J. Exploring Extended Reality with Flexible Spectrum Access in Wireless Cellular Network. 2021 IEEE 32nd Annu Int Symp Pers Indoor Mob Radio Commun PIMRC [Internet]. Helsinki, Finland: IEEE; 2021 [viitattu 25. maaliskuuta 2023]. s. 1–6. Noudettu osoitteesta: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9569526/>
17. 3GPP. Release 18. 2022.
18. Matkaviestinverkkojen taajuudet ja luvanhaltijat [Internet]. Traficom. 2022 [viitattu 8. huhtikuuta 2023]. Noudettu osoitteesta: <https://www.traficom.fi/fi/viestinta/viestintaverkot/matkaviestinverkkojen-taajuudet-ja-luvanhaltijat>
19. Good result for Finland from the World Radiocommunication Conference [Internet]. Traficom. 2019 [viitattu 8. huhtikuuta 2023]. Noudettu osoitteesta: <https://www.traficom.fi/en/news/good-result-finland-world-radiocommunication-conference>
20. 5G-taajuuksien huutokauppa päätynyt [Internet]. Traficom. 2020 [viitattu 8. huhtikuuta 2023]. Noudettu osoitteesta: <https://www.traficom.fi/fi/ajankohtaista/5g-taajuuksien-huutokauppa-paattynyt>
21. The 6G era’s enormous capacity demands will require new spectrum and extreme massive MIMO [Internet]. Nokia Bell Labs. 2021 [viitattu 23. huhtikuuta 2023]. Noudettu osoitteesta: <https://www.bell-labs.com/institute/blog/6g-eras-enormous-capacity-demands-will-require-new-spectrum-and-extreme-massive-mimo/>