

Tatu Niemi

MOBIILIVERKKOTEKNIIKAT TEOLLISUUSAUTOMAATIOSSA

Kandidaatintutkielma
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastaja: Helena Leppäkoski
Heinäkuu 2022

TIIVISTELMÄ

Tatu Niemi: Mobiiliverkkotekniikat teollisuusautomaatiossa
Kandidaatintutkielma, 21 sivua
Tampereen yliopisto
Teknisten tieteiden kandidaatin tutkinto-ohjelma
Heinäkuu 2022

Tämän kandidaatintutkielman tavoitteena on kirjallisuustutkimuksen avulla selvittää, miten uusia mobiiliverkkotekniikoita voidaan soveltaa teollisuudessa. Tutkielma myös tarkastelee erilaisia tekniikoita, joilla mobiiliverkkojen toiminta parantuu.

Mobiiliverkkotekniikojen kehitys tuo mahdollisuuden soveltaa langatonta viestintää teollisuudessa. 5G-tekniologian, eli 5. sukupolven mobiiliverkkotekniologian uusi millimetriaaltotekniologia mahdollistaa suurempien datamäärien lähetyksen sekä pienempien vasteaikojen saavuttamisen verrattuna 4G-tekniologiaan.

Monella teollisuuden alalla työn tekeminen helpottuu, jos prosesseja voidaan seurata haastaviin paikkoihin asennettavilla antureilla. Anturien parantunut akunkesto mahdollistaa kaapeloinnin pois jättämisen, joka helpottaa asennustyötä. Anturien akunkesto kehittyy signaalin hyvän hyötysuhteen ansiosta. 5G-tekniologian tehokkuudesta kertoo esimerkiksi se, ettei matalan tehon anturien akkuja tarvitse vaihtaa arviolta 10 vuoteen. 6G-tekniologialla sama vaihto aika pitenee 20 vuoteen.

Teollisuudessa työkoneiden etäohjauksen tarve on ollut suuri, mutta aiemmat tekniikat eivät ole olleet riittävän nopeita ja luotettavia etäohjauksen mahdollistamiseksi. 5G-tekniologian käyttöönoton jälkeen ihmisen ei enää tarvitse mennä hengenvaarallisiin paikkoihin, vaan työkoneita voidaan ohjata turvallisesta paikasta etänä, nopean ja luotettavan langattoman yhteyden ansiosta.

Verkon tiheän tukiasemaverkon, eli soluverkon, avulla yhteyden luotettavuus kasvaa, mutta myös laitteiden paikannustarkkuus paranee. Ulkotiloissa laite paikannetaan 1 m tarkkuudella ja sisätiloissa 10 cm tarkkuudella. Teollisuuden mobiiliverkoilla voidaan optimoida prosessien kulua yhdenaikaisen ohjauksen ansiosta. Esimerkiksi metallialan yrityksen, Bolidenin, kaivoksilta tulevan malmin siirtämiseen tarkoitettujen ajoneuvot voivat ajoittaa paikalle tulonsa juuri silloin, kun tarve syntyy. Hyvällä optimoinnilla teknologiayhtiö Ericsson on arvioinut Bolidenin säästävän noin 10 % vuotuisista kuluista.

Avainsanat: mobiiliverkko, teollisuus, automaatio, 4G, 5G, 6G, etäohjaus, sovellus

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ALKUSANAT

Kandidaatintutkielma oli mielenkiintoinen ja opettava prosessi tekniikasta ja työn luonteesta. Aihe oli hyvin helppo valita jatkuvasti kehittyvän luonteensa takia, sekä aiheen merkityksestä jokapäiväistä elämää kohtaan. Mobiiliverkkotekniikkojen laajuus sai yllättymään, mutta myös kiinnostumaan enemmän esimerkiksi signaalinkäsittelystä. Tutkielman hitaasta alusta huolimatta työ valmistui tavoitellusti.

Erytisesti haluan kiittää ohjaajaani Helena Leppäkoskea hyvin moitteettomasta ohjauksesta, sekä mielenkiinnosta työtäni kohtaan. Kiitän myös ystäviäni ja perheettä, jotka ovat olleet tukena kandidaatintutkielman aikana.

Tampereella 5. heinäkuuta 2022

Tatu Niemi

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. 5G-TEKNOLOGIAN KEHITYS	3
2.1 5G New Radio -teknologian kehitys	3
2.2 5G-teknologian käyttötapaukset	4
2.3 5G NR -teknologian käyttöönotto	5
3. MOBIILIVERKKOTEKNIKOIDEN NYKYTILANNE	7
3.1 4G, langattoman viestinnän käännekohta	7
3.2 5G, uudet viestintäteknikat	7
3.3 5G, tiheä tukiasemaverkko	8
3.4 5G-teknologian rajoituksia	9
4. MOBIILIVERKKOTEKNIKAT TEOLLISUUDESSA	10
4.1 ABB:n aikakriittinen viestintä	10
4.2 Boliden, etäohjaus ja kuljetusvirran optimointi kaivoksilla	10
4.3 5G-teknologian hyödyntäminen terveydenhuollossa	12
5. MOBIILIVERKKOTEKNIKAT TULEVAISUUDESSA	14
5.1 5G-teknologian keilanmuodostus	14
5.2 Industry 4.0, Teollisuus 4.0	14
5.3 Koneiden välinen M2M-yhteys	15
5.4 6G-teknologian suorituskykyvaatimukset	16
5.5 6G-teknologian uudet protokollat	18
5.6 MEC, mobiilireunalaskenta	18
5.7 Terveydenhuolto 6G-teknologian avulla	19
6. YHTEENVETO	20
7. LÄHDELUETTELO	21

LYHENTEET JA MERKINNÄT

3GPP	engl. 3rd Generation Partnership Project, usean standardointi järjestön yhteistyöorganisaatio
4G	engl. 4th generation, 4. sukupolvi, mobiiliverkon 4. aikakausi
5G	engl. 5th generation, 5. sukupolvi, mobiiliverkon 5. aikakausi
5G-NR	engl. 5G New Radio, 5G-teknologia
6G	engl. 6th generation, 6. sukupolvi, mobiiliverkon 6. aikakausi
AI	engl. Artificial Intelligence, tekoäly, itsestään oppiva algoritmi
AR	engl. Augmented Reality, lisätty todellisuus
CRAN	engl. Cloud RAN, pilvipalvelu RAN
D2D	engl. Device-to-Device, laitteelta laitteelle -viestintä
eMBB	engl. enhanced Mobile BroadBand, tehostettu mobiililaajakaista
EMR	engl. Electronic Medical Record, sähköinen terveystietojärjestelmä
FDD	engl. Frequency Division Duplex, taajuusjakokanavointi
IoE	engl. Internet of Everything, kaiken internet
IoT	engl. Internet of Things, asioiden internet
ITU	engl. International Telecommunication Union, kansainvälinen televiestinnän liitto
LTE	engl. Long term evolution, pitkän aikavälin kehitys
LoRa	engl. Long Range, pitkän kantaman radioverkko
M2M	engl. Machine-to-Machine, koneelta koneelle -viestintä
MEC	engl. Mobile Edge Computing, mobiilireunalaskenta, tieto käsitellään mahdollisimman lähellä laitetta
MIMO	engl. Multiple Input, Multiple Output, usea sisääntulo, usea ulostulo
ML	engl. Machine Learning, koneoppiminen, tekoälyn muoto
mMTC	engl. massive MTC, massiivinen konetyyppinen viestintä
MR	engl. Mixed Reality, hybriditodellisuus
MTC	engl. Machine-Type Communications, konetyyppinen viestintä
MU-MIMO	engl. Multi-User MIMO, monen käyttäjän MIMO
NSA	engl. Non-StandAlone, ei itsenäinen
OFDM	engl. Orthogonal frequency-division multiplexing, ortogonaalinen taajuusjakomultipleksointi
QoS	engl. Quality of Service, tietoliikenteen luokittelu ja priorisointi
RAN	engl. Radio Access Network, radioliityntäverkko
RAT	engl. Radio Access technology, radioliityntäteknologia
SA	engl. StandAlone, itsenäinen
SDN	engl. Software Define Networking, verkon mallin määrittäminen ohjelmallisesti
TDD	engl. Time Division Duplex, aikajakokanavointi
TSN	engl. Time Sensitive Network, aikakriittinen verkko
UE	engl. User Equipment, käyttövälineistö
uHDD	engl. Ultra High Data Density, ultra korkea datatiheys
uHSLC	engl. Ultra-high-speed with low-latency-communication, ultra nopea alhaisen viiveen viestintä
URLLC	engl. Ultra-Reliable Low-Latency Communication, erittäin luotettava matalan viiveen viestintä
VR	engl. Virtual Reality, virtuaalitodellisuus
vRAN	engl. Virtual RAN, virtuaalinen RAN
Wi-Fi	Langattomien verkkoprotokollien perhe
WLAN	engl. Wireless Local Area Network, langaton lähiverkko
XR	engl. extended reality, laajennettu todellisuus

1. JOHDANTO

Tämä kandidaatintutkielma on kirjallisuustutkimus tällä hetkellä uusien mobiiliverkkotekniikoiden sovelluksista teollisuusautomaatioissa. Tutkielma myös käsittelee sovelluksiin vaadittavia teknologioita.

Jo pitkään markkinoilla ollutta 4G -teknologiaa on hyödynnetty mobiiliverkkokäytössä, mutta sen tehokkuus automaatiosovelluksissa on riittämätön teollisuuden tarpeisiin. Se ei pysty vastaamaan alle 1 ms viivevaatimukseen, jolloin prosessin katsottaisiin olevan reaaliaikainen. Puutteittensa takia 4G -teknologia on vakiintunut pitkälti matkapuhelinsovelluksiin.

Markkinoille tulooan tekevä 5G-teknologia mahdollistaa nopeamman tiedonsiirron. Uuden tiedonvälitysteknologiansa ansiosta se mullistaa mobiiliverkkojen kehityksen erilaisiin sovelluksiin. Sitä on suunniteltu käytettäväksi muun muassa teollisuudessa langattomassa tiedonsiirrossa. 5G-teknologia mahdollistaa esimerkiksi reaaliaikaisen etäohjauksen ja on osatekijä prosessiteollisuuden joustavuudessa, jos prosessit ovat alle 1 millisekunnin tarkkuudella samassa ajassa.

5G-teknologian odotetaan olevan täysin käytössä maailmanlaajuisesti vuoteen 2023 mennessä. Tällä hetkellä 5G-teknologia ei pysty vastaamaan verkon vaatimukseen käyttäjien määrän suuren kasvun takia, eikä se tällöin pysty täysin palvelemaan kaikkia toimintoja, jotka käyttävät täyttä kapasiteettia. Sekä käyttäjien, että toimintojen kasvava kysyntä edellyttää 6G-teknologian käyttöönottoa mahdollisimman pian. [1, s. 300]

6G-teknologiaa aloitettiin kehittämään heti 5G-teknologian julkistuksen jälkeen, jotta voitaisiin paikata 5G-teknologiassa jo kehityksen aikana huomattuja puutteita esimerkiksi viiveen ja nopeuden suhteen. 6G-teknologialla päästään automaatiosovelluksissa jo toivottuihin alle 1 ms vasteaikoihin, ja liki 10 Gbps tiedonsiirtonopeudet riittävät kattamaan suuria sovelluksia. 6G:n avulla teollisuusyritysten tiedonsiirtotoiminnot pystyvät tavoittelemaan kriittisiltä osin täysin langattomia yhteyksiä.

Langattomien verkkojen kautta tarjottavien dataintensiivisten, viiveettömyyttä vaativien sovellusten käyttäjien kysynnän kasvaessa eksponentiaalisesti, optinen liityntäverkko on

tunnistettu kestäväksi sillaksi, joka yhdistää langattomat tiedot ydinverkkoihin. Optiset siirtoverkot eivät kuitenkaan ole kehittyneet samassa tahdissa kuin langattomat verkot. [2, s. 152]

Tämän tutkielman rakenne on seuraava. Luvussa 2 esitellään 5G-tekniikan keskeisiä tavoitteita ja tekniikoita. Luvussa 3 käydään läpi langattomien verkkoteknologioiden nykytilannetta sekä Luvussa 4 tutkitaan mitä mobiiliverkkotekniikat voivat tarjota yrityksille tällä hetkellä 5G:n osalta. Luvussa 5 tehdään spekulatioita mobiiliverkkotekniikoiden tulevaisuuden sovelluksista. Lopuksi Luvussa 6 esitetään yhteenveto työstä ja sen tuloksista.

2. 5G-TEKNOLOGIAN KEHITYS

4G-verkkoon siirryttäessä otettiin käyttöön *long term evolution (LTE)* eli 4. sukupolven tiedonsiirtotekniikka, joka ei merkitse vain suuria muutoksia ilmarajapinnassa, vaan myös siirtymistä koodijakoisesta multipleksauksesta ortogonaaliseen taajuusjakokanavointiin (*Orthogonal frequency division multiplexing, OFDM*), jossa taajuudet eivät häiritse toisiaan. Samalla mahdolliseksi tuli aikajakokanavointi, jossa lähetys ja vastaanotto tapahtuvat eri aikaan (*time division duplex, TDD*) ja taajuusjakokanavointi, jossa eri lähetykseen ja vastaanottoon käytetään eri taajuusaluetta (*frequency division duplex, FDD*). [3, s. 2]

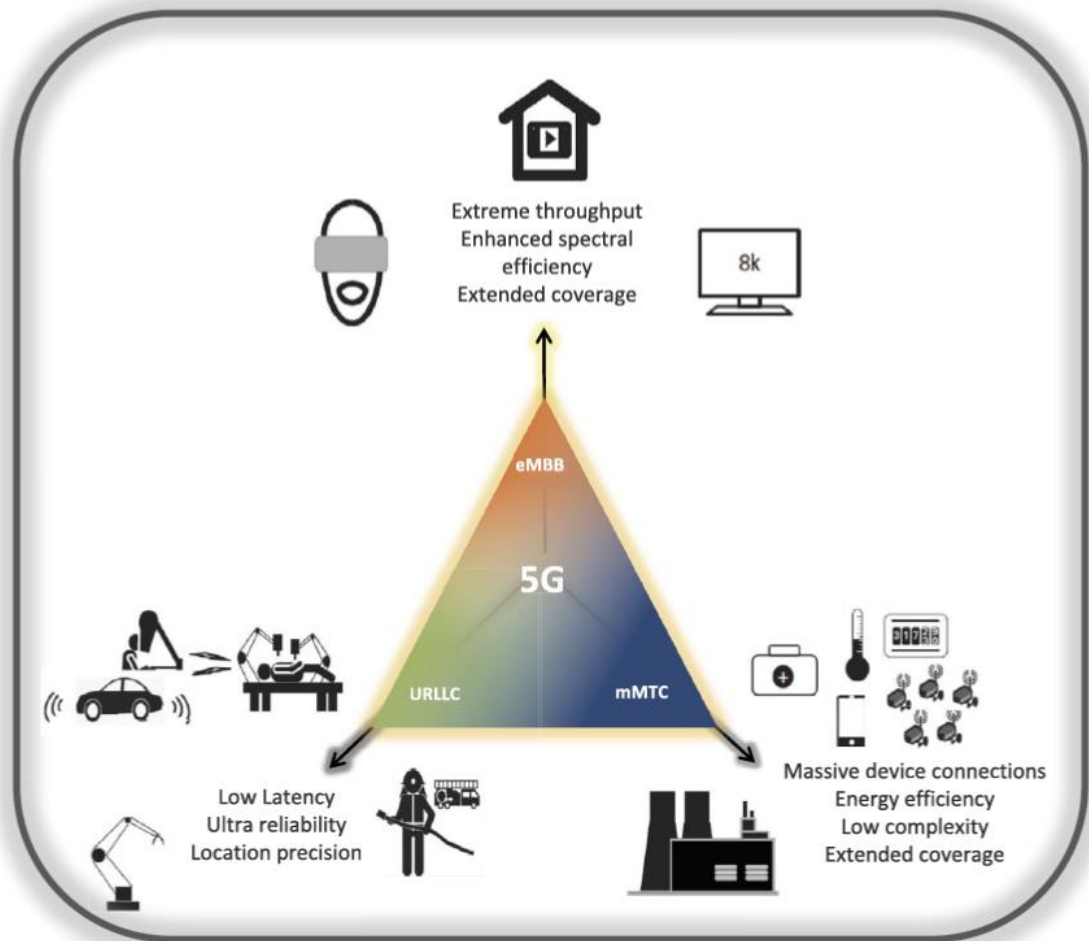
2.1 5G New Radio -teknologian kehitys

Langattoman 5G-liityntäteknologian tutkimus- ja konseptikehitys alkoi yli vuosikymmen sitten uusia inspiroivia sovelluksia ja liiketoimintatapauksia silmällä pitäen. 5G-liityntäteknologia on ollut nimeltään *5G New Radio* vuodesta 2016. Tutkimustyö johti 5G-testipenkien kehittämiseen niin yliopistoissa kuin teollisuudessaakin. Kuten aiempien sukupolvien solukkojärjestelmät, 5G NR:n kehittäminen on hyvin koordinoitua globaalia työtä. Työssä käsitellään uusia taajuuksia maailmanlaajuisesti ja alueellisella tasolla 5G NR:lle ja globaaliin 5G NR -standardointiin 3GPP:ssä (*3rd Generation Partnership Project, usean standardointijärjestön yhteistyöorganisaatio*). Se perustuu kansainvälisen televiestintäliiton (*International telecommunication union, ITU*) määrittelemiin 5G-vaatimuksiin. [3, s. 4]

3GPP-spesifikaatiot on jaettu julkaisuihin, joissa jokainen julkaisu koostuu valmiista ja erillisestä määrittämissarjasta. Tämä tarkoittaa, että tietty julkaisu sisältää kaikki komponentit, joita tarvitaan täydellisen matkapuhelinverkon rakentamiseen, ei vain äskettäin lisättyjä ominaisuuksia. Kun julkaisu on valmis, ominaisuudet ovat määritetty ja ovat valmiita käyttöönotettavaksi. Kun julkaisu on määritetty, vain olennaiset korjaukset ovat sallittuja. Lisää toimintoja on lisättävä seuraavaan julkaisuun. Eri julkaisujen työstämisessä on jonkin verran päällekkäisyyttä, joten uuden julkaisun työstäminen alkaa ennen nykyisen julkaisun valmistumista. Julkaisujen tulee olla taaksepäin yhteensopivia, jotta yhdelle julkaisulle kehitetty käyttäjälaite (*user equipment, UE*) voi toimia myös solussa, jossa on toteutettu aikaisempi julkaisu. [3, s. 6]

2.2 5G-tekniikan käyttötapaukset

5G kohdistuu kolmeen käyttötapauserheeseen, joilla on hyvin erilaisia ominaisuuksia: tehostettu mobiililaajakaista (*enhanced mobile broadband, eMBB*), massiivinen kone-tyyppinen viestintä (*massive machine-type communications, mMTC*) ja erittäin luotettava matalan latenssin viestintä (*ultra-reliable low-latency communications, URLLC*). Seuraavaksi kuvataan näiden kolmen käyttötapauserheiden ominaisuuksia, jotka on visualisoitu Kuvassa 1 [3, s. 8].



Kuva 1. 5G:n tärkeimpien teknologioiden käyttöesimerkkejä. [3, s. 10]

Tehostettu mobiililaajakaista (eMBB) on luonnollinen jatko klassiselle mobiililaajakaistatayhteydelle nykyisten matkaviestintästandardien mukaisesti. Se käsittelee ihmiskeskeistä liitettävyyttä, mukaan lukien pääsyä multimediiasisältöön, palveluihin ja dataan. Tämä tehdään tarjoamalla korkeat tiedonsiirtonopeudet, joita tarvitaan tulevien multimediaal palveluiden tukemiseen, ja näiden palveluiden tuottamaan kasvavaan liikennemäärään. eMBB-käyttötapauserhe kattaa useita skenaarioita, mukaan lukien Hotspot-yhteyden, jolle on ominaista suuri käyttäjätiheys ja erittäin suuret tiedonsiirtonopeudet sekä alhai-

nen liikkuvuus. Toisena esimerkkinä eMBB:hen liittyy laaja-aluekattavuus, jossa käyttäjätiheys ja tiedonsiirtonopeudet ovat alhaisemmat, mutta liikkuvuus on suurempi. [3, s. 9]

Erittäin luotettavan matalan latenssin viestinnän (URLLC) tiukat vaatimukset sekä viiveelle että luotettavuudelle ovat merkittävimmät ominaisuudet tälle käyttötapausluokalle, joka on kohdistettu pääasiassa konetyyppiseen tietoliikenteeseen (*Machine type communication, MTC*). Suunniteltuja sovelluksia ovat teollisuuden valmistus- ja tuotantoprosessien langaton ohjaus, lääketieteellinen etäkirurgia, kuljettajattomat ja/tai kauko-ohjatut ajoneuvot, ja jakeluautomaatio älykkäissä sähköverkoissa. [3, s. 9]

Massiivisessa konetyypin viestinnässä (*Massive MTC, mMTC*) langattomien laitteiden määrää kasvattaa esineiden internetti (*Internet of things, IoT*). IoT -laitteiden määrän odotetaan pian ylittävän ihmisten aiheuttamaa liikennettä kuljettavien laitteiden määrän. mMTC:n painopiste on yhteyksien tarjoamisessa suurelle määrälle laitteita, joiden oletetaan välittävän satunnaisesti vähän liikennettä, mikä ei ole viivekriittistä. mMTC-laitteiden akun käyttöiän odotetaan olevan erittäin pitkä, jotta ne voidaan ottaa käyttöön etänä. Tämän käyttötapausten ainutlaatuinen piirre on, että MTC-laitteet ovat erittäin heterogeenisiä ominaisuuksien, kustannusten, energiankulutuksen ja lähetystehon suhteen. [3, s. 9]

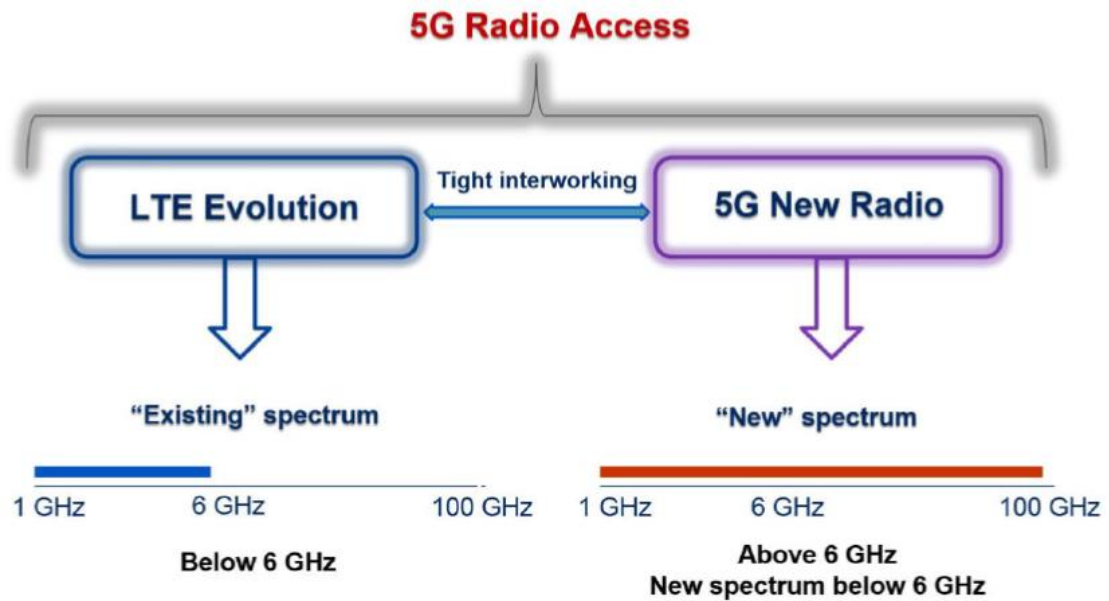
Kaiken internet (*Internet of Everything, IoE*), on yläkäsite IoT:lle ja on siksi vahvasti sidoksissa mMTC:n käyttötapaukseen. IoE:ssa on neljä pilaria: ihmiset, prosessit, data ja asiat, rakentuu IoT:n päälle, jolla on yksi pilari: asiat. Lisäksi IoE kehittää edelleen Internetin kykyä parantaakseen liiketoiminnan ja teollisuuden tuloksia, ja parantaakseen viime kädessä ihmisten elämää lisäämällä IoT:n kehitystä. [4]

2.3 5G NR -teknologian käyttöönotto

5G NR -verkon käyttöönotto tulisi aloittaa olemassa olevasta 4G LTE -verkosta, jolla on jo hyvä kattavuus. Kuten Kuvasta 2 näkyy, NR voi olla rinnakkain ja toimia yhdessä LTE:n kanssa, mikä lyhentää NR:n markkinoille tuloaikaa. 5G NR -verkon kaupallisen käyttöönoton odotetaan tapahtuvan kahdessa vaiheessa:

1. Ensimmäinen vaihe on ei-itsenäinen (*non-standalone, NSA*) tila, jossa 5G NR:n ja LTE:n välillä on tiivis yhteistoiminta, kuten kuvassa 1. Tämä vaihtoehto käyttää LTE:tä ohjaustason tukena NR:lle, ja se käyttää joko LTE:tä tai NR:ää käyttäjäläikenteelle (käyttäjätasolle).

2. Toinen vaihe on itsenäinen (*standalone, SA*) tila, jossa sekä ohjaustaso että käyttäjätaso ovat olemassa 5G NR -tekniikalla. SA-tilan 5G-spesifikaatio julkaistiin vuoden 2018 puolivälissä. [3]



Kuva 2. LTE ja 5G NR taajuusalueet. [3, s. 4]

NR:n on toimittava rinnakkain ja yhdessä LTE:n kanssa tulevina vuosina, ei vain keinona lyhentää markkinoille tuloaikaa, vaan myös varmistaakseen hyvän kattavuuden ja liikkuvuuden. 5G NR:n käyttöönottojen myötä uudet käyttötapaukset lisääntyvät ja 5G-laitteet tulevat markkinoille. Itsenäisen NR:n käyttöönoton nähdään alkavan, kun laitteita on saatavilla laajemmin, uudet käyttötapaukset (esim. URLLC, teollinen IoT) alkavat kehittyä nopeasti ja NR:llä on paremmat mahdollisuudet käyttää sekä uusia että olemassa olevia taajuuksia. Viime kädessä 5G NR:stä tulee todennäköisesti yleisin matkapuhelinteknologia, jota käytetään useiden käyttötapauksien käsittelemiseen useilla toimialoilla. [3 s. 14]

Antennitekniikan kehitys on mahdollistanut useiden antennielementtien digitaalisen ohjauksen, jota kutsutaan massiiviseksi usean tulon ja usean lähdon -tekniikaksi (*massive multiple-input multiple-output, massive MIMO*). Tämä mahdollistaa paremman kyvyn tilan moniantennikäsitteilyssä, mikä mahdollistaa korkeamman spektritehokkuuden. Tästä syystä NR tarjoaa paremman tuen monen käyttäjän MIMO:lle (*multiuser MIMO, MU-MIMO*). [3, s. 25]

3. MOBIILIVERKKOTEKNIKOIDEN NYKYTILANNE

Nykyiset mobiiliverkkotekniikat ovat mahdollistaneet kehityksen siihen pisteeseen, että niitä voidaan alkaa käyttämään teollisuuden tarpeisiin yhä paremmin. Tämä luku esittelee mobiiliverkkojen tärkeimpiä tekniikoita, jotka ovat tulevaisuudessa mahdollistavassa asemassa teollisuuden langattomuuteen siirryttäessä.

3.1 4G, langattoman viestinnän käännekohta

LTE on pohjimmiltaan taitavasti muokattu kopio langattomasta lähiverkosta (*Wireless Local Area Network, WLAN*), joka on osoittautunut hyödylliseksi tekniikaksi nopeaan langattomaan viestintään OFDM:n avulla. Tämä mahdollistaa tehokkaan keinon päästä eroon niin sanotusta ylimääräisestä viiveestä, joka ei ollut mahdollista aiemmillä tekniikoilla. [5, s. 76]

LTE ilmestyi ilman suurta mainostusta ja oli houkutteleva useimmille, ellei kaikille, käyttäjille. Sitä myös parannetaan jatkuvasti – esimerkiksi MIMO:sta on tullut massiivinen MIMO, jossa viiveet pienenevät entisestään, bittinopeudet kasvavat edelleen ja laitteelta-laitteelle (*Device to Device, D2D*) -standardi on valmis liitettäväksi tuotteisiin. LTE on osoittautunut erittäin tehokkaaksi ja suosituksi tekniikaksi, jota on helppo jatkokehittää. Kehityksessä havaittiin myös, että langattomat verkot tuottavat jatkuvasti kasvavaa tuloa, vaikka tämä siirtyy yhä enemmän operaattoreista ja langattoman infrastruktuurin tarjoajista markkinajohtajayrityksiin ja sisällöntuottajiin. [5, s. 76]

3.2 5G, uudet viestintätekniikat

5G lupaa korkeita tiedonsiirtomääriä, pientä viivettä ja korkeaa luotettavuutta aikaherkille ja tehtäväkriittisille sovelluksille. 5G lupaa 10–100 -kertaisen tiedonsiirtoliikenteen, 1 000 -kertaisen kaistanlaajuuden jokaista alueella olevaa yksikköä kohden, 100 % kattavuuden ja 0.01–0.001 -kertaisen viiveen edeltäjäänsä 4G:hen verrattuna. [2, s. 146]

5G kohtaa monin tavoin myös haasteita. Vaikka 5G-matkapuhelinjärjestelmä tukee URLLC:tä, URLLC:n haittapuolena ovat lyhytpakettipohjaiset toiminnot ja sensoripohjaiset toiminnot, jotka rajoittavat korkean luotettavuuden ja matalan viiveen palvelujen toimittamista suurilla tiedonsiirtonopeuksilla. [7, s. 19] Alhaisen viiveen palveluita ovat kaikki laajennetun todellisuuden (*Extended Reality, XR*) palvelut. XR on yläkäsite lisätylle todellisuudelle (*Augmented Reality, AR*), hybriditodellisuudelle (*Mixed Reality, MR*)

ja virtuaalitodellisuudelle (*Virtual Reality, VR*), joissa käytetään tietokoneella luotua ympäristöä ihmisen todellisen maailman korvaajana tai osana [6, s. 3]. Tulevat IoE-sovellukset vaativat viestintä-, anturi-, ohjaus- ja laskentatoimintojen integroitumista, mikä on jäänyt 5G:ssä suurelta osin huomiotta. [7, s. 19]

Rethink Technology Researchin tekemän tuoreen 74 matkapuhelinoperaattorin tutkimuksen mukaan markkinoita mullistavien teknologioiden kaupallisen käyttöönoton esteitä ovat virtuaaliverkkotoimintojen yleisen hintatason ja hallinnan epävarmuus, uusiin radioliityntäverkon (*RAN, radio access network*) tukiasemiin tehtävien investointien kustannukset sekä epäluottamus järjestelmän kestävyys. [7]

Virtualisoidun RANin (*vRAN*) käyttöönotto on paljon alan tarkkailijoiden tekemää ennustetta hitaampaa kuin esimerkiksi protokollien, laitteiston tai yhteyden kehitys. Suurimmat ongelmat laajamittaiselle *vRAN*-asennukselle ovat olleet verkkotoimittajien vastustus. Omiin verkkoelementeissä pitäytyminen on ollut olennaista niiden kyvyille pitää hinnat ja marginaalit korkeina ja asiakkaat sidoksissa yhteen toimittajaan. [7]

3.3 5G, tiheä tukiasemaverkko

Solun reunassa voidaan käyttää useita tiheitä pieniä soluja vastaamaan korkeisiin tietojen luotettavuusvaatimuksiin. On ehdotettu, että pieniä soluja voidaan hallita keskitetyllä sijaintiarkkitehtuurilla, jota kutsutaan pilviradiopääsyverkoksi (*Cloud radio access network, C-RAN*). *C-RAN*-arkkitehtuuri luo supertukiaseman hajautetuilla antennilla, jotka tukevat useita *RAN*-protokollia ja mukauttavat dynaamisesti signaalinkäsittelyresurssejaan maantieteellisen peittoalueensa vaihtelevan liikennekuorman perusteella. *C-RAN*:in kehitys sisältää kehittyneitä tekniikoita, kuten useiden käyttäjien signaalien yhteiskäsittelyn ja demoduloinnin, sekä yhteisen resurssien allokoinnin useiden radioliityntäteknikoiden (*Radio access technology, RAT*) kesken 5G-kapasiteetin lisäämiseksi ja viiveen vähentämiseksi. [8, s. 636]

Operaattorit ovat yrittäneet rakentaa myös 4G:hen avoimen rajapinnan kantataajuusyksikön ja etäradioyksikön välille, mutta siirtyminen tavallisesta julkisesta radorajapinnasta kehittyneeseen 5G:n julkiseen radorajapintaan näyttää jäävän tavoitteestaan. Pienen viiveen ja korkeiden tiedonsiirtonopeuksien, viestinnän ja anturien konvergenssi sekä avoimien rajapintojen vaatimukset edellyttävät 6G:n uutta verkkoarkkitehtuuria. [7, s. 19]

Nykypäivän 5G seuraa aiempien matkaviestinjärjestelmien teknologista polkua ja on 4G:n jatke, mikä johtaa siihen, että se törmää suorituskykymuuriin. Kaikkien parannusten odotetaan olevan marginaalisia. [7, s. 20]

Tiheät verkot, joissa on pienempi solukoko ja enemmän antennia, kuten massiivinen MIMO, lisäävät vastaavasti solujen välisiä ja solunsisäisiä häiriöitä. Vaikka massiivisen MIMO:n käyttö 5G:ssä mahdollistaa häiriöiden poistamisen yksinkertaisilla lineaarisilla operaatioilla, keilanmuodostusmalli tekee tyypillisesti kompromissin solujen välisten häiriöiden poistamisen ja signaalin, häiriön ja kohinasuhteen maksimoimisen välillä. [7, s. 20]

3.4 5G-teknologian rajoituksia

Perinteiset häiriönpoistotekniikat eivät ole enää optimaalisia resurssinkäyttötekniikoita, joten innovatiivisia tapoja hyödyntää häiriötä on syntymässä. Koska tulevaisuuden langattomissa verkoissa ennakoidaan aggressiivisempaa verkkoresurssien jakamista ja tiiviimpää yhteistyötä solujen kesken, tulee häiriönhallinnasta kasvava haaste. Häiriönhallintaa on olennaista edistää, jotta voidaan saavuttaa tehokkaampien radioresurssien käyttö uusissa langattomissa konsepteissa, kuten häiriön hyödyntämisessä. Häiriön hyödyntämisessä solunsisäisiä ja solujen välisiä häiriöitä voidaan käyttää hyödyllisten signaalien lähteenä, ja parantaa järjestelmän suorituskykyä. Häiriöiden hyödyntäminen tuottaa hyötyjä laajamittaisella yhteistyöllä hajautettujen langattomien verkkojen reitittämien välillä ja mahdollistamalla korkean OFDM:n monen käyttäjän lähetysten kautta. [7, s. 20]

Vaikka 5G-verkot riittävät nykyisille sovelluksille, sillä on kuitenkin joitain rajoituksia, eikä se pysty tukemaan kaikkia tulevia sovelluksia. Esimerkiksi hologrammiviestintä voi vaatia tiedonsiirtonopeutta TBps:ssä, kun taas 5G tukee 10 Gbps:n enimmäisnopeutta. Myös IoT:n integraatio lisääntyy päivä päivältä ja on johtanut valtavaan kasvuun niiden laitteiden määrässä, joiden tarvitsee viestiä keskenään ja isäntäkoneen kanssa. 5G ei ehkä pysty tarjoamaan verkkoyhteyttä näin suurelle määrälle laitteita tulevaisuudessa, mikä johtaa verkon ruuhkautumiseen. Nykyinen menetelmä verkkojen konfiguroimiseksi ja optimoimiseksi tehdään manuaalisesti, jolloin verkkoja ei voida skaalata erittäin suuriin langattomiin kokonaisuuksiin, jotka ovat dynaamisia ja monimutkaisia. Nämä rajoitukset odotetaan ohitettavan tulevilla 6G-verkoilla, jotka tarjoavat useita AI-tekniikoihin integroituvia toimintoja. [1. s. 280]

4. MOBIILIVERKKOTEKNIIKAT TEOLLISUUDESSA

Tässä luvussa käsitellään tarkemmin sitä, mitä hyötyjä mobiiliverkkotekniikoista on teollisuudessa tällä hetkellä. 4G:llä ei ole mainittavia sovelluksia, joten luku keskittyy käsittelemään pääasiassa 5G:n mahdollisuuksia.

5G-teknologialta odotetaan suuria hyötyjä erilaisille automaatioyrityksille. Esimerkiksi teknologiayritys Ericssonin tekemän kenttäkokeen tärkeimmistä havainnoista on, että jopa 70 prosenttia työvoimakustannuksista voidaan säästää, kun perinteinen satama päivitetään 5G-tekniikkaa vastaavaksi. Työvoimakustannussäästöt on arvioitu Qingdaon sataman automaatioprojektin perusteella. [9] Täysin automatisoidut satamat käyttävät pilvipohjaisia ohjelmistoja, jotka auttavat toimitusvirran sujuvoittamisessa [10]. Satamanosturien ja konttien välinen kommunikaatio auttaa siihen, että satamakontteja ei unohdeta, tai ne eivät häviä kesken kuljetuksen [11]. Perinteisen sataman tapauksessa jokainen kontti on jonkun henkilön vastuulla, jolloin mahdollisuus inhimilliselle virheelle kasvaa.

4.1 ABB:n aikakriittinen viestintä

Ericsson ja ABB tekevät yhteistyötä saadakseen mobiiliverkoista kaiken hyödyn käyttöön tutkimalla, miten 5G:n voi integroida ABB:n aikakriittisen internetin (*time sensitive network*, TSN) kanssa täydellisellä aikasykronoinnilla, mikä on ollut mahdotonta toteuttaa 4G:llä. Teollisuuden aikasykronointi 5G-verkolla voidaan mahdollistaa laitteen toiminnan verkossa täydellisellä samanaikaisuudella missä päin tahansa tehdasalueetta, mikä on avaintekijä joustavalle automatisoidulle tuotannolle. [12] Tuotannon joustavuutta pystytään lisäämään keskustietokonejärjestelmän kautta, jossa pystytään suorittamaan reaaliaikaista tuotannon seurantaa sekä hallitsemaan koko tuotannon prosessia esimerkiksi ongelmatilanteissa [13]. Paine tuotannon muutoksessa edellyttää tehtaita kehittämään erilaisia prosesseja ja prosessimalleja joustavammiksi muuttuviin vaatimuksiin nähden. [12]

4.2 Boliden, etäohjaus ja kuljetusvirran optimointi kaivoksilla

Kaivoksen 5G-mobiiliviestinnän tärkeimmät ominaisuudet ja edut ovat yhteyden kattavuus, luotettavuus, alhainen viive, parempi paikannustarkkuus, suuri kaistanleveys ja

kyky käyttää monia laitteita, antureita tai kauko-ohjattavia koneita. Kun mobiiliviestinnän kattavuutta parannetaan, kaivosteollisuudesta tulee yksi innovaatiovalmis ala mobiiliviestinverkkoriippuvien sovellusten kehittämisen kautta. [14]

Aitik on laajentuva kaivos. Kuparimalmiin pääsemiseksi on poistettava paljon kiviä, ja joka vuosi kiviä siirretään järjestelmässä yhä enemmän. Riippuen siitä, missä malmi sijaitsee, kiven suhde malmiin vaihtelee. Keskimäärin jokaista malmitonnia kohden siirretään uudelleen noin 1 tonni kiviä. Lisäksi jokainen räjähdys synnyttää myrkyllisiä kaasuja, joiden on haihduttava ennen kuin ihmiset voivat tulla alueelle ja aloittaa kaivaukset. [14]

Viiteen Aitikin porakoneeseen on jälkiasennettu autonominen käyttö ja kauko-ohjaus. Yhteyden nykyinen kaistanleveys mahdollistaa vain keskilaatuisen videon suoratoiston, mikä rajoittaa kauko-ohjauskykyä ja tekee jälkiasennuksesta rajallisen. Porakoneen automatisointi voi lisätä käyttötunteja 5 000 tunnista 7 000 tuntiin vuodessa, mikä antaisi Bolidenille mahdollisuuden suorittaa näillä viidellä muunnetulla porauslaitteella saman määrän räjäytystoimenpiteitä kuin seitsemällä tai useammalla perinteisellä porauskoneella. Tämä automatisointi vähentää myös tarvetta lisähenkilöstölle, huoltoasemille, pysäköintialueille, kuljetusta vilkkailla sisääntuloteilla ja henkilökunnan vaarallista liikkuamista kaivoksen sisällä. Näiden logististen haasteiden ratkaisemisen lisäksi automaatiolla on merkittäviä tehokkuusetuja, koska Boliden pystyy käsittelemään lisääntyneen määrän räjäytysiskuja samanlaisilla laitteilla ja henkilöstömäärällä. [14]

Tehokkaan viestinnän ansiosta kaivoksen käytettävissä on useita turvallisuus- ja tehokkuustoimenpiteitä. Joidenkin sovellusten tarvitsee lähettää vain pieniä määriä dataa, kun taas toiset (kuten täysin kauko-ohjattavat koneet) tarvitsevat matkaviestinnän, kuten 4G:n ja erityisesti 5G:n, tarjoamia ominaisuuksia ja kapasiteettia. Kaivosteollisuus yleensä ja erityisesti Boliden eivät kuitenkaan halua lopettaa automatisointiansa tähän. Automatisointia voidaan jatkaa esimerkiksi monimutkaisen porauksen kehittämisellä, automatisoiduilla kuorma-autoilla, sekä automatisoidulla suunnittelulla ja lähetyksellä, joissa tarvitaan tehokasta viestintää (esimerkiksi 5G) useiden 3D-videovirtojen käsittelemiseen ja erittäin monimutkaisten tehtävien etähallintaan. [14]

Itsenäistä toimintaa varten Bolidenin viestintäjärjestelmä tarvitsee kyvyn:

1. Ottaa käyttöön täysi etävalvonta, joka sisältää erittäin suuren kaistanleveyden ja alhaiset viivevaatimukset
2. Kuljettaa autonomisia ja kauko-ohjattavia koneita, eri valmistajilta ja erilaisilla ohjausjärjestelmillä

3. Käsitellä jatkuvasti muuttuvaa tuotantoympäristöä ja maantieteellistä sijaintia
4. Ylläpitää laaja kattavuus kaivoksen kaikissa paikoissa, joissa koneita tai henkilökuntaa voi mahdollisesti sijaita
5. Seurata ja koordinoita mobiililaitteita, antureita ja muita laitteita samassa tietoliikenneverkossa. [14]

Tasaisempi kuljetusvirta, tasaisempi nopeus ja vähemmän liikettä tarkoittavat pienempää polttoaineenkulutusta, ja Ericsson arvioi tämän säästöpotentiaalin olevan noin 10 prosenttia. Tällainen tehokkuuden parantaminen vähentäisi Aitikin vuotuisia päästöjä noin 9 400 tonnilla hiilidioksidia. Toinen etu kestäväen kehityksen näkökulmasta on laitteiden ja koneiden määrän väheneminen, koska tällöin myös niiden tuotantoon liittyvät vaikutukset vähenevät. [14]

Markkinat kehittyvät nopeasti ja monet viestintätekniikat kilpailevat vastatakseen teollisuuden tarpeisiin. Wi-Fi on jo saatavilla ja useissa kaivoksissa käytössä tietyntyyppisiin vähemmän vaativissa käyttötapauksissa. Mobiiliverkkoteollisuudella on vuosikymmenten kokemus yritysasiakkaiden kanssakäymisestä ja markkinoiden muutoksiin reagoimisesta. [14]

4.3 5G-tekniologian hyödyntäminen terveydenhuollossa

Lääkärit ja terveydenhuollon tutkijat käyttävät tekoälyä parantamaan potilaiden hoitoa pitäen samalla tarkkuuden korkeana ja kustannukset alhaisina. Sitä käytetään lähes kaikilla terveydenhuollon osa-alueilla, kuten lääketieteellisten kuvien lukemisessa (esim. magneettikuvat, röntgenkuvat) ja tilan diagnosoinnissa, luonnollisen kielen prosessoinnissa puhetekstiksi ja automaattisessa dokumentoinnissa. Tekoälyä käytetään myös tarkempien lääkkeiden kehittämiseen. Lääkkeet voidaan räätälöidä potilaan anatomian mukaan eikä samaa vakiolääkettä tarjota kaikille. [1, s. 292]

Turvallinen ja tehokas tiedonhallintajärjestelmä nimeltä EdgeCare on kehitetty mobiiliterveydenhuoltojärjestelmiä varten [15, s. 1]. EdgeCare käyttää kolmitasoista hierarkista arkkitehtuuria datan käsittelyä varten [15, s. 4]. Alin kerros on käyttäjäkerros, jonka tehtävänä on kerätä tietoja käyttäjien puuttavista IoT-laitteista, jotka pystyvät mittaamaan käyttäjän elintärkeiden toimintojen tilaa reaaliajassa. Reaaliaikaista tietoa sekä potilaan elektronista lääketieteellistä raporttia (*Electronic Medical Record, EMR*) käytetään raakatietona, joka sitten lähetetään reunapalvelimille analysointia varten. Seuraava kerros on reunakerros, jossa koko verkko on jaettu useisiin osa-alueisiin, joilla kullakin on oma

henkilökohtainen valvojansa. Valvoja on vastuussa ladattujen tietojen tallentamisesta ja siitä, kenelle tiedot tulee toimittaa. Tässä kerroksessa suoritetaan erilaisia tehtäviä, kuten käyttäjätilien hallinta (luominen ja estäminen epäilyttävän toiminnan varalta), tallennus, tietojen esihallinta ja analysointi sekä lopuksi käyttöoikeuksien jako. Ylin kerros on ydinkerros, jonka tehtävänä on varmistaa tietosuoja ja yksityisyyden suoja koko verkossa. Se myös koordinoi eri paikallisviranomaisten toimintaa verkostojen eri alueilla. Ydinkerroksen läsnäolo jalostaa koko järjestelmän toimintaa ja varmistaa paremman koordinaation. [1, s. 292]

Niin kutsutulla reunatekoälyllä on toteutettu kaatumisen havaitseminen pienitehoisella laajan alueen verkolla, LoRa-verkolla (*Long Range, LoRa*). Reunatekoäly suorittaa laskennan MEC-tekniikalla, josta on oma lukunsa myöhemmin. Järjestelmä vähentää prosessointia anturisolmuissa ja siirtää tehtävän reunasolmuihin. Ihmisen elintärkeiden toimintojen mittaukset (esim. aivo- ja lihassähkökäyrät) ja ympäristölukemat (esim. kosteus, lämpötila) lähetetään Bluetoothin kautta reunasolmuun. Ensisijainen prosessointi tehdään reunasolmuissa tekoälyn avulla ja ne pystyvät havaitsemaan kaatumisen suuressa tarkkuudella. Näiden tasojen tulokset lähetetään LoRa-pohjaiseen tukiasemaan, jossa käytetään pitkälle kehitettyjä algoritmeja, ja lopuksi ne välitetään pilvipalvelimille lopullista tietojenkäsittelyä varten. [1, s. 292]

5. MOBIILIVERKKOTEKNIIKAT TULEVAISUUDESSA

Tämä luku käsittelee mobiiliverkkotekniikoiden mahdollisuuksia kehittyä. 5G:n osalta tärkeitä käsiteltäviä aiheita on paljon, mutta niistä nousee esille erityisesti Industry 4.0, teollinen vallankumous. 6G:ssä nostetaan esille uudet protokollamallit sekä mobiilireunälaskenta.

5.1 5G-teknologian keilanmuodostus

Koska 5G:llä on rajoitettu langaton spektri, yksi tekniikka suurten tiedonsiirtonopeuksien mahdollistamiseksi on pienentää solun sädettä ja pitää verkossa satoja ja tuhansia pienempiä soluja. Sen lisäksi, että verkossa on pieniä soluja, 5G:ssä on myös muita tärkeitä ominaisuuksia, kuten massiivinen MIMO ja keilanmuodostus yhden solun tukeman kapasiteetin lisäämiseksi. [2, s. 146]

Langattoman viestinnän suojaus viittaa yleensä kykyyn suojata salakuuntelua ja häiriöitä vastaan. Toisaalta, kun otetaan huomioon, että THz-signaalin keila on kapea, lähettimen keila tulisi osoittaa täydellisesti vastaanottimen antenniin tiedon välittämiseksi onnistuneesti. Sellaisenaan salakuuntelija ei voi vastaanottaa THz-signaalia lähettimestä tai ei edes huomata THz-lähetystä, kun salakuuntelija sijaitsee lähettimen säteen ulkopuolella. Näin ollen salakuuntelijan on vaikea salakuunnella THz-signaalin sisältämää tietoa. Toisaalta suuri kaistanleveys saa THz-viestinnän piiloon häirinnältä ja kestää häiriöitä. Tämä takaa THz-signaalien hyvän häirinnän eston avoimessa radioympäristössä. [16, s. 6]

5.2 Industry 4.0, Teollisuus 4.0

6G tarjoaa täysin automatisoidun palvelun, joka perustuu tekoälyyn. Teollisuuden 4.0 vallankumous alkoi 5G:stä, joka on järjestelmäpohjainen valmistusprosessi, jossa käytetään automaatiota ja tietoliikennettä. 6G-automaatiojärjestelmät tarjoavat erittäin luotettavaa, skaalautuvaa ja turvallista viestintää käyttämällä korkean tiedonsiirtonopeuden ja alhaisen viiveen provisiointia, eli ultra nopean alhaisen viiveen viestinnän (*Ultra-high-speed with low-latency-communication, uHSLLC*), konetyypin viestinnän ja ultra korkean datatiheyden (*ultra high data density, uHDD*) palveluita. 6G-järjestelmä mahdollistaa

myös verkon eheyden, koska se varmistaa virheettömän tiedonsiirron ilman tiedonhäviöitä lähetyksen ja vastaanoton välillä. [17, s. 963]

Viestinnällä on erittäin tärkeä rooli Industry 4.0 -järjestelmien ja -teknologioiden mahdollistamisessa. Industry 4.0:n tapaan matkapuhelinverkkostandardin viides sukupolvi on viime aikoina herättänyt paljon kiinnostusta sekä tiedemaailmassa että tutkimusyhteisössä. 5G pyrkii käsittelemään Industry 4.0:aa osana M2M-vaatimuksia (*Machine-to-Machine, M2M*) ihmisen tuottamien datavaatimusten lisäksi. [8, s. 635]

5.3 Koneiden välinen M2M-yhteys

Massiivinen M2M-yhteys vaatii tukiaseman, joka tukee satoja tuhansia kenttälaitteita. Tällaisten monien yhteyksien ylläpidon tulisi olla hyvin vähäistä, joten kenttälaitteiden erittäin pitkä akun käyttöaika on välttämättömyys. Vaikeasti tavoitettavia laitteita, joilla on alhainen tiedonsiirtonopeus ja vähäinen huoltotarve, voidaan käyttää langattomissa rajapinnoissa osana järjestelmää, kun akun käyttöikä ylittää 10 vuotta. Luotettavuudella on erittäin tärkeä rooli teollisuuden vaatimissa turvallisuussuoja- ja ohjaussovelluksissa. Erittäin suuren tiedonsiirtonopeuden järjestelmiä voidaan tarvita esimerkiksi tehtaalla, jonka koko toimintaa ylläpidetään ja ohjataan virtuaalisen läsnäolon kautta. Kaikkien näiden vaatimusten lisäksi 5G:n pitäisi myös pystyä tarjoamaan kattavaa yhteyskokemusta laitteille, jotka voivat siirtyä ulkotiloista sisätiloihin mobiiliskenaariossa. Yksi tiedonsiirto-protokolla ei pysty täyttämään kaikkia vaatimuksia, joten käytännössä standardi sisältää erilaisia radioliityntäteknikoita saumattoman yhteyskokemuksen aikaansaamiseksi. [8, s. 635]

M2M-viestintä Industry 4.0:ssa vaatii usein erittäin alhaisen viiveen verkkoja. 5G:n ehdotetaan tarjoavan alle 5 ms viivettä. Viivettä voidaan parantaa, jos käsittelyn tarvetta vähennetään merkittävästi. Alhaiset viivevaatimukset eivät ehkä ole toteutettavissa nykyisillä OFDM-pohjaisilla aaltomuodoilla. Tämän vaatimuksen täyttämiseksi tulisi harkita uusia aaltomuodon modulaatiomenetelmiä. Laitteiden välinen tiedonsiirto (D2D) auttaa pienen viiveen vaatimuksessa, koska tässä tapauksessa hyötykuorman siirtoa ei tarvitse tehdä makrosolun tukiaseman kautta. Koko hyötykuormaviestintä voi olla paikallista, mikä vähentäisi tukiaseman kuormitusta. [8, s. 636]

Langattomien protokollien energiankulutuksen minimoiminen on keskeistä Industry 4.0:n laitteiden tuotannossa. Kyseenalaista on, voidaanko M2M-palveluita tarjota teknisistä ja

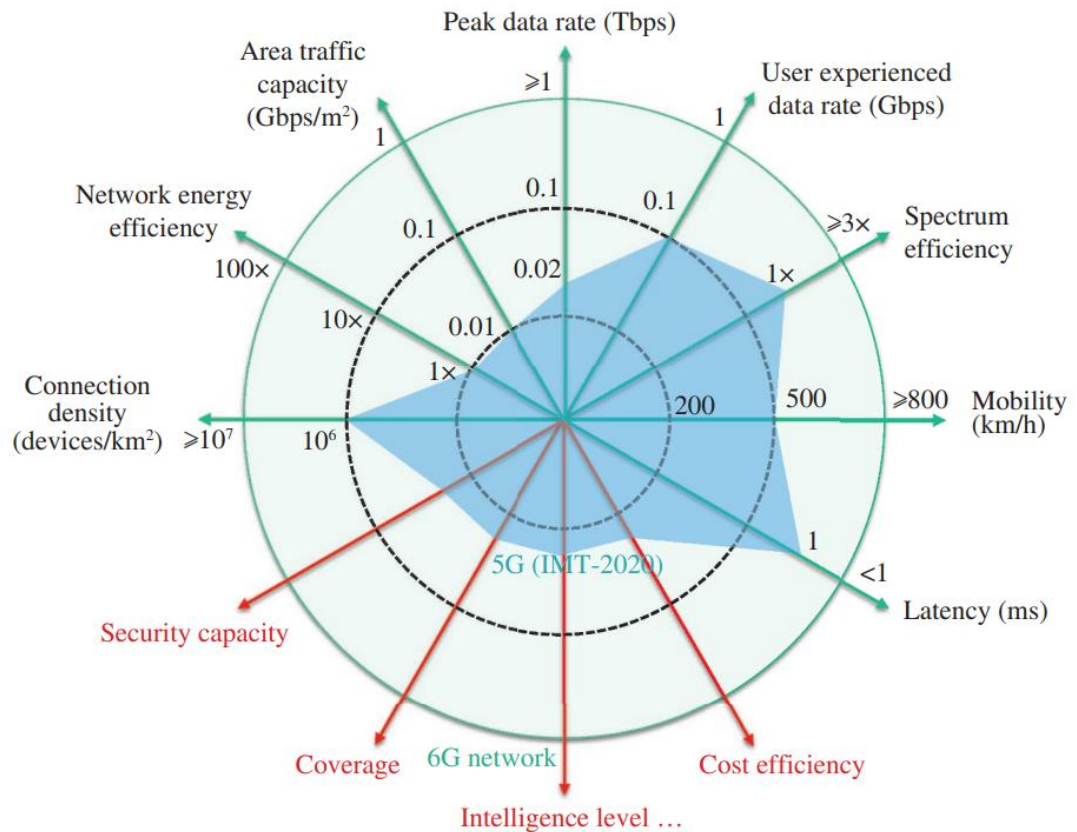
taloudellisista haasteista huolimatta erittäin suuressa mittakaavassa nykyisillä solukkojärjestelmillä, koska niiden protokollat vaativat liian paljon tiedonsiirtoa synkronointiin, kanavien varaamiseen ja liikkuvuuden/yhteyksien hallintaan. Tämän seurauksena ne eivät täytä laajamittaisen M2M-solu-anturi-järjestelmän tehovaatimuksia. 5G-standardi tähtää yli 10 vuoden akun kestoon erilaisille alhaisen nopeuden, vähän tehoa käyttäville antureille ja toimilaitteille. Ulkoskenaariossa alle-GHz-pohjaiset pitkän kantaman ja alhaisen datanopeuden ratkaisut voivat olla ratkaisu antureiden ja toimilaitteiden pitkäikäisyyden pidentämiseen. [8, s. 637]

5.4 6G-teknologian suorituskykyvaatimukset

Yhdysvaltalainen tutkimus- ja tuotekehitysorganisaatio Bell laboratory ehdotti 6G:lle keskeisiä suorituskykymittareita maaliskuussa 2019. Huipputiedonsiirtonopeuden, eli parhaan mahdollisen tiedonsiirtonopeuden odotetaan olevan yli 100 Gbps. Käyttäjän kokema, niin sanottu normaali tiedonsiirtonopeus on 1–10 Gbps. Viiveen odotetaan olevan alle 0,3 ms. Energiatohokkuuden odotetaan olevan 10-kertaisesti parempi verrattuna 5G:hen. Verkon kapasiteetin odotetaan olevan 10 000-kertaisesti isompi 5G-järjestelmiin verrattuna. Muita mittareita ovat esimerkiksi 10 cm:n tason sisäpaikannustarkkuus ja 1 m:n tason ulkopaikannustarkkuus. 6G on suhteutettu visuaalisesti 5G:n suorituskykyyn Kuvassa 3. Keskeisiksi suorituskykymittareiksi Bell laboratory on ehdottanut:

1. 1 Tbps huipputiedonsiirtonopeus,
2. 1 Gbps käyttäjän kokema tiedonsiirtonopeus,
3. 10–100 μ s viive,
4. 1000 km/h verkon liikkuvuus,
5. 10⁷ laitetta/km²,
6. 1 Gbps/m² alueen verkkokapasiteetti
7. 10–100-kertainen energiatehokkuus verrattuna 5G:hen
8. 5–10-kertainen spektritehokkuus verrattuna 5G:hen. [18, s. 5]

Liikkuvuudella tarkoitetaan käyttäjän mahdollisuutta hyödyntää verkon palveluita tietyissä nopeuksissa. Spektritehokkuudella tarkoitetaan mahdollisimman tehokasta tapaa hyödyntää käytettävää signaalia.



Kuva 3. 6G suhteessa 5G:hen. [19]

Teknologiset sovellukset, käyttötapaukset ja standardit sekä mahdollistavat (ja paljon odotetut läpimurtoa tekevät) teknologiat ovat parhaillaan aktiivisen tutkimuksen ja kokeilun kohteena tulevan 6G-viestintäteknikan muokkaamiseksi. 6G mahdollistaa paljon "älykkäämmän" kommunikaatiomaiseman THz-taajuudella, yli 1 Tbps:n tiedonsiirtonopeuden ja alle millisekunnin viiveen. 6G:ssä on odotettavissa myös paljon optimoituja ja tietoliikennelaskennan konvergoitunutta paradigmaa, jossa läpimurtotekniikoiden, kuten kvanttilaskennan, viestinnän ja verkottumisen odotetaan olevan merkittäviä tekijöitä 6G:ssä. Tällä hetkellä 6G:lle on olemassa suuria visioita, kuten esimerkiksi integroitu avaruus-ilma-maa-verkko, digitaalinen tunnistus ja digitaaliset kaksoset. Se, miten monet sovelluksista toteutuvat, on edelleen haaste, ja se tulee olemaan keskeinen liikkeelle-paneva voima tutkimuksessa ja kehityksessä seuraavan vuosikymmenen aikana. [2, s.146]

6G-verkot mahdollistavat käyttäjäkeskeisen verkkoarkkitehtuurin, jota ohjaavat suurelta osin tekoäly- ja ML-algoritmit, jossa päätepisteet voivat tehdä itsenäisiä verkkopäätöksiä aikaisempien verkkotoimintojen perusteella. Tämä mekanismi vähentää dramaattisesti keskittettyihin ohjaimiin ja niistä pois tapahtuvaa tiedonsiirtoa. Optimoitu verkon hallinta saavutetaan 6G:ssä, jolloin verkon suunnittelu, resurssien allokointi ja päätöksenteko

(kokonaan tai osittain) toteutetaan käyttämällä ML-malleista johdettuja käsityksiä. ML-malleja voidaan ajaa hajautetusti ja käsitellä ML-algoritmeja reaaliajassa (alle millisekunnin viiveellä), mikä saavuttaa monien 6G-sovellusten palvelun laatuvaatimukset (*Quality of Service, QoS*). [2, s.151]

5.5 6G-teknologian uudet protokollat

6G:n on otettava käyttöön uusia, tekoälyohjattuja protokollia verkon langattomille ja optisille segmenteille signaloinnin, ajoituksen ja koordinoinnin suorittamiseksi. Uudet protokollat voivat korvata perinteiset 5G-protokollat, jotka tyypillisesti perustuvat ennalta määrättyihin verkkoparametreihin ja jäykkään kehysrakenteeseen. Nämä uudet 6G-protokollat sitä vastoin mukautuvat jatkuvasti langattoman ja optisen ympäristön nykyiseen ja ennustettuun tilaan. [2, s.152]

6G:n kehittyessä tarvitaan uusia, dynaamisia monikäyttöprotokollia, jotka voivat muuttaa dynaamisesti monikäyttötyyppiä langattomalla toimialueella. Joukko sopivia optisen toimialueen konfiguraatioita tulee määrittää automaattisesti sovellusten tarpeiden ja verkon tilan mukaan. Kaikkien näiden protokollien on oltava hajautettuja ja niillä on voitava hyödyntää verkon reunalla hajautettuja tietojoukkoja. Uusi viestintäarkkitehtuuri mahdollistaisi keskeisten tekijöiden integroinnin, kuten kaikkialle leviävä AI, kommunikaatio-, välimuisti- ja ohjausresurssien hallinta, alle terahertsin ja näkyvän valon viestintämahdollisuudet. [2, s.152]

Koko 6G-verkkoinfrastruktuuri saattaa hyvinkin olla yksittäinen ekosysteemi, joka tukee reaaliaikaisia palveluita ja nopeaa pääsyä. Tämä toteutuu kuitenkin vain ottamalla optinen siirtoverkko huomioon 6G:n suunnitteluvaiheessa – ei ulkoisena elementtinä vaan kiinteänä osana koko 6G-ekosysteemiä. Vain silloin AI:n johtaman viestinnän, laskenta- ja välimuistitoimintojen saumaton integrointi voidaan toteuttaa täysin. [2, s.152]

5.6 MEC, mobiilireunalaskenta

Mobiilireunalaskenta (*Mobile Edge Computing, MEC*) on aina keskeinen mahdollistava teknologia 6G-arkkitehtuurille, joka työntää laskutehtävät suoritettaviksi mahdollisimman lähelle laitteita. Reunalaskentalaitteet, joilla on sekä viestintä- että laskentaominaisuudet, on säilytettävä lähellä IoT-laitteita, joista data tuotetaan. Tämä vähentää keskuspalvelimille lähetettävän tiedon määrää, mikä johtaa lopulta alhaisempaan viiveeseen ja parantaa reaaliaikaisten sovellusten suorituskykyä. Tämä malli tarjoaa myös korkean tietoturvan, koska se tarjoaisi ohimeneviä palveluita reunalaitteiden kautta verkkovian

aikana. Monimutkaisissa verkoissa, kuten MEC, tekoälytekniikat voisivat tarjota parempia tuloksia kuin perinteisten algoritmien käyttö. Tekoälytekniikat voisivat oppia ja analysoida kerättyä dataa ja tukea MEC:n ennustamisessa, optimoinnissa ja päätöksenteossa. [1, s. 290]

5.7 Terveysthuolto 6G-tekniikan avulla

Lääketieteelliset terveydenhuoltojärjestelmät hyötyvät myös langattomista 6G-verkoista, koska innovaatiot, kuten AR/VR, holografinen etäläsnäkö, MEC ja tekoäly, auttavat rakentamaan älykkäitä terveydenhuoltojärjestelmiä. 6G-verkko mahdollistaa terveydenhuoltojärjestelmien luotettavan etävalvontajärjestelmän. Myös etäleikkaus on mahdollista 6G-yhteyden avulla. [17, s. 963]

Korkea tiedonsiirtonopeus, pieni viive sekä erittäin luotettava (virheetön) 6G-verkko auttaa siirtämään suuria määriä lääketieteellistä dataa nopeasti ja luotettavasti, mikä parantaa hoidon saatavuutta ja hoidon laatua. THz:llä, yhdellä 6G:n kriittisistä tekniikoista, on kasvava potentiaalinen käyttö terveydenhuoltopalveluissa, kuten terahertsipulssikuvauksessa dermatologiassa, suun terveydenhoidossa, lääketieteellisyydessä ja lääketieteellisessä kuvantamisessa. [17, s. 963]

Myös biolääketieteellinen viestintä on langattoman 6G-viestintäjärjestelmän olennainen mahdollisuus. Kehon sisäiset anturit, joissa on paristottomia viestintätekniikoita, ovat ensisijaisesti toivottavia luotettavaa ja pitkäaikaista valvontaa varten. Kehon anturit voivat mahdollistaa luotettavan ja jatkuvan ihmisen fysiologisten signaalien seurannan kliinisen diagnostiikan, urheilun, sekä ihmisen ja koneen välisissä sovelluksissa. [17, s. 963]

Etädiagnoosi, etäkirurgia ja etäkuntoutus ovat vain muutamia Tactile Internetin (TI) mahdollisista sovelluksista terveydenhuollossa. TI tarkoittaa ihmisen ja kyberfyysisen todellisuuden yhdistämistä tuntoaistin tasolle. Kehittyneiden etädiagnoosiin työkalujen avulla lääketieteellinen asiantuntemus voisi olla saatavilla missä tahansa ja milloin tahansa lääkärin sijainnista riippumatta. Tällöin lääkäri ohjaa potilaan luona olevaa telero-bottia niin, että äänen ja/tai visuaalisen tiedon lisäksi lääkäri saa myös tunto, eli haptista, palautetta. Samaa teknistä periaatetta sovelletaan etäkirurgian sovelluksiin. Etäkuntoutuksessa tekniikoita voidaan käyttää, jotta potilaan liikkeitä voidaan ohjata ja hallita etänä. Kaikissa TI -pohjaisissa terveydenhuollon teknologioissa korkea luotettavuus ja äärimmäinen tarkkuus ovat olennaisia telelääketieteen tekniikan käyttöönoton mahdollistamiseksi. [19, s. 461-462]

6. YHTEENVETO

Tutkielman tavoite oli tutkia mobiiliverkkojen uusia sovelluksia teollisuusautomaatiossa. Erilaisia sovelluksia ja tekniikoita löytyi, mutta tekniikkaa ei vielä hyödynnetä tai näytetä hyödyntävän täydessä potentiaalissaan sovelluksien suhteen. Tutkielma käsitteli mobiiliverkkojen tekniikoita kattavasti. Lähteissä uusista mobiiliverkkotekniikoista ja sovelluksista kerrottiin pääasiassa parhaat puolet. Mobiiliverkkojen todelliseen kykyyn tuoda hyötyä yrityksille tai teollisuuteen ei löytynyt merkittäviä vasta-argumentteja.

4G-teknologia oli aikansa huippunopea viestintätekniikka, joka moninkertaisti tietoliikenneyhteyden kantokyvyn, mutta teollisuuden prosesseihin kyseinen tekniikka on riittämätön. 4G-teknologia on riittävä lähinnä matkapuhelinteknologioiden tukemisessa.

4G-teknologian jälkeen kehitetty 5G-teknologia käyttää hyväkseen millimetriaaltoteknologiaa, jolla datan välitys onnistuu nopeasti ja pienellä viiveellä. 5G-teknologian pienet, noin 1 millisekunnin viiveet ja suuret 1–10 Gbps datanvälityskapasiteetit tekevät 5G-teknologiasta hyödyllisen teknologian teollisuuden prosesseihin.

5G-teknologia parantaa yritysten mahdollisuuksia säästää kustannuksissa, kun langattomasti toimivat laitteet ovat optimoituja kulutuksen kannalta, ja turhasta odottelusta voidaan päästä eroon, kun kaikki laitteet pidetään käytössä jatkuvasti. Vaarallisissa paikoissa toimiminen etäohjauksella on ihmisille turvallisempaa, eikä tilanteet välttämättä vaadi niin paljon turvaamista, kun kyseessä on ihmisten sijaan vain korvattavissa olevia laitteita.

5G-teknologia mahdollistaa myös uusien tekniikoiden käyttöönoton, jonka kautta esimerkiksi ihmisen terveys on helpommin seurattavissa ja turvattavissa. Tiedot käsitellään luottamuksellisesti lähiverkossa, josta niitä voidaan hyödyntää terveyden seurantaan.

6G-teknologian potentiaali teollisuudessa on entistä huomattavampi, kun anturien määrää voidaan lisätä, eikä esimerkiksi akunkesto tai kaapelointi enää ole ongelma. Tällöin 6G-teknologia pystyy pidentämään anturien akunkestoja noin 20 vuoteen saakka. 6G-teknologia tulee olemaan 5G-teknologian jatko.

7. LÄHDELUETTELO

- [1] K. Sheth, K. Patel, H. Shah, S. Tanwar, R. Gupta, N. Kumar, A taxonomy of AI techniques for 6G communication networks, *Computer Communications*, 2020, Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2020.07.035>
- [2] C. Ranaweera, J. Kua, I. Dias, E. Wong, C. Lim, and A. Nirmalathas, 4G to 6G: disruptions and drivers for optical access [Invited], *J. Opt. Commun. Netw.* 14, 2022, A143-A153
- [3] A. Zaidi, F. Athley, J. Medbo, U. Gustavsson, G. Durisi, X. Chen, *5G Physical Layer: Principles, Models and Technology Components*, San Diego: Elsevier Science & technology, 2018, Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/C2017-0-01973-0>
- [4] A. Banafa, The Internet of Everything (IoE), *OpenMind*, 29. 8. 2016, Saatavissa: <https://www.bbvaopenmind.com/en/technology/digital-world/the-internet-of-everything-ioe/>
- [5] K. David, H. Berndt, 6G Vision and Requirements: Is There Any Need for Beyond 5G?, *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 13, no. 3, 9. 2018, pp. 72-80, Saatavissa: <https://doi.org/10.1109/MVT.2018.2848498>
- [6] M. Mattila, Laajennetun todellisuuden hyödyntäminen valmistavassa teollisuudessa: Huollon ja kunnossapidon näkökulma, 2021, Saatavissa: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:tuni-202112239524>
- [7] B. Zong, C. Fan, X. Wang, X. Duan, B. Wang, J. Wang, 6G Technologies: Key Drivers, Core Requirements, System Architectures, and Enabling Technologies, *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 14, no. 3, 9. 2019, pp. 18-27, Saatavissa: <https://doi.org/10.1109/MVT.2019.2921398>
- [8] A. Varghese, D. Tandur, Wireless requirements and challenges in Industry 4.0, 2014 International Conference on Contemporary Computing and Informatics (IC3I), 2014, s. 634-638, Saatavissa: <https://doi.org/10.1109/IC3I.2014.7019732>
- [9] Ericsson and China Unicom announce 5G smart harbor at the Port of Qingdao, Ericsson, 29. 2. 2019, Saatavissa: <https://www.ericsson.com/en/press-releases/2019/2/ericsson-and-china-unicom-announce-5g-smart-harbor-at-the-port-of-qingdao>
- [10] Everything you need to know about port automation, SHM, 27. 11. 2018, Saatavissa: <https://www.shmgroup.com/blog/everything-need-know-port-automation/>
- [11] L. Witschge, Rotterdam is building the most automated port in the world, *Wired*, 7. 10. 2019, Saatavissa: <https://www.wired.co.uk/article/rotterdam-port-ships-automation>
- [12] Shaping the future of 5G with ABB, Ericsson, 2019, Saatavissa: <https://www.ericsson.com/en/cases/2019/abb>
- [13] K. E. Stecke, R. P. Parker, FLEXIBLE AUTOMATION, Swamidass P.M. (eds) *Encyclopedia of Production and Manufacturing Management*, Springer, Boston, MA, 2000, Saatavissa: https://doi.org/10.1007/1-4020-0612-8_343
- [14] A case study on automation in mining, Ericsson, 6. 2018, Saatavissa: <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/consumerlab/reports/a-case-study-on-automation-in-mining>
- [15] X. Li, X. Huang, C. Li, R. Yu, L. Shu, EdgeCare: Leveraging Edge Computing for Collaborative Data Management in Mobile Healthcare Systems, *IEEE Access*, vol. 7, 2019, pp. 22011-22025, Saatavissa: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2898265>
- [16] L. Zhang, Y. Liang, D. Niyato, 6G Visions: Mobile ultra-broadband, super internet-of-things, and artificial intelligence, *China Communications*, vol. 16, no. 8, 8. 2019, pp. 1-14, Saatavissa: <https://doi.org/10.23919/JCC.2019.08.001>
- [17] M. Z. Chowdhury, M. Shahjalal, S. Ahmed, Y. M. Jang, 6G Wireless Communication Systems: Applications, Requirements, Technologies, Challenges, and Research Directions, *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 1, 2020, pp. 957-975
- [18] X. You, CX. Wang, J. Huang et al, Towards 6G wireless communication networks: vision, enabling technologies, and new paradigm shifts. *Sci. China Inf. Sci.* 64, 110301, 2021, Saatavissa: <https://doi.org/10.1007/s11432-020-2955-6>
- [19] M. Simsek, A. Aijaz, M. Dohler, J. Sachs, G. Fettweis, "5G-Enabled Tactile Internet," in *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 34, no. 3, 3. 2016, pp. 460-473, Saatavissa: <https://doi.org/10.1109/JSAC.2016.2525398>