

**Olli-Pekka Valtteri Hakkarainen**

# **5G Satelliittiverkot**

Tietotekniikan pro gradu -tutkielma

1. syyskuuta 2021

Jyväskylän yliopisto

Informaatioteknologian tiedekunta

**Tekijä:** Olli-Pekka Valtteri Hakkarainen

**Yhteystiedot:** olli.p.v.hakkarainen@student.jyu.fi

**Ohjaajat:** Timo Hämäläinen ja Jani Puttonen

**Työn nimi:** 5G Satelliittiverkot

**Title in English:** 5G Non-Terrestrial Networks

**Työ:** Pro gradu -tutkielma

**Suuntautumisvaihtoehto:** Ohjelmistotekniikka

**Sivumäärä:** 51+0

**Tiivistelmä:** Mobiiliteknologiat ovat kehittyneet aikojen saatossa merkittävän nopeasti, mutta maailman tiedonsiirtotarpeet ovat kasvaneet sitäkin nopeammin. 5G-verkolta vaaditaan suurta tiedonsiirtonopeutta, luotettavuutta ja tehokkuutta kaikkialla, kaiken aikaa. Näihin vaatimuksiin on vaikea vastata hyödyntämällä ainoastaan maaverkkoja. Maaverkkojen kattavuus eikä kapasiteetti välttämättä riitä täyttämään 5G-verkoille asetettuja suuria vaatimuksia. Hyödyntämällä satelliittiverkkoja 5G-maaverkkojen yhteydessä voitaisiin tarjota nopea yhteys myös paikkoihin, joissa maaverkkojen kapasiteetti tai kantavuus ei riitä. Tässä tutkimuksessa selvitetään kuinka hyvin satelliittiverkot toimivat 5G-radorajapinnassa simuloimalla verkon suorituskykyä verkkosimulaattorilla 3GPP:n määrittelemissä kalibraatioskenaarioissa.

**Avainsanat:** 5G, NTN

**Abstract:** Mobile technologies have developed greatly in the past decades, but global demand for data has grown even faster. 5G network has strict requirements to fill, meaning that fast, reliable and efficient connection should be available anywhere, anytime. These requirements will be difficult to meet using only traditional terrestrial networks as the capacity and coverage of these networks may not be sufficient. Using non-terrestrial networks combined with traditional terrestrial networks could make it possible to meet the requirements set for 5G. The aim of this study is to find out how well non-terrestrial networks function using 5G

radio access technology. The results are obtained using a network simulator to simulate the performance in non-terrestrial network calibration scenarios defined by 3GPP.

**Keywords:** 5G, NTN

## Kuviot

Kuvio 1. Massiivinen MIMO -yhteyspisteen toiminta (Marzetta 2015) .....	6
Kuvio 2. Häiriösignaalit verkon tiheyttämisessä (Liu ym. 2017) .....	7
Kuvio 3. Satelliittiverkkojen arkkitehtuuri (Rinaldi ym. 2020) .....	10
Kuvio 4. Kalibraatioskenaariot (3GPP TR 38.821, “Solutions for NR to support non terrestrial networks (NTN)”, V16.0.0 (2019-12).) .....	21
Kuvio 5. Kalibraatioskenaarioissa käytetty yleinen parametriasetus 1 .....	22
Kuvio 6. Kalibraatioskenaarioiden virranhallinnan P0-arvon optimoimiseen käytetty parametrilista .....	24
Kuvio 7. Kalibraatioskenaarioiden 6 ja 7 lähetyksenopeus per käyttäjälaite (3GPP TR 38.821, “Solutions for NR to support non terrestrial networks (NTN)”, V16.0.0 (2019-12).) .....	25
Kuvio 8. Kalibraatioskenaarioiden 6 ja 7 interferenssin ja häiriösignaalien suhde.....	26
Kuvio 9. Kalibraatioskenaarioiden 9 ja 10 interferenssin ja häiriösignaalien suhde .....	27
Kuvio 10. Kalibraatioskenaarioiden 9 ja 10 lähetyksenopeus per käyttäjälaite .....	28
Kuvio 11. Kalibraatioskenaarioiden 14 ja 15 interferenssin ja häiriösignaalien suhde .....	29
Kuvio 12. Kalibraatioskenaarioiden 14 ja 15 lähetyksenopeus per käyttäjälaite.....	30
Kuvio 13. Simulaatioiden ajossa käytetty lopullinen parametrilista .....	30
Kuvio 14. GEO-satelliittien kalibraatioskenaarioiden lähetyksenopeus.....	32
Kuvio 15. GEO-satelliittien kalibraatioskenaarioiden latausnopeus .....	33
Kuvio 16. LEO-satelliittien kalibraatioskenaarioiden lähetyksenopeus Ka-kaistalla .....	34
Kuvio 17. LEO-satelliittien kalibraatioskenaarioiden latausnopeus Ka-kaistalla .....	35
Kuvio 18. LEO-satelliittien kalibraatioskenaarioiden lähetyksenopeus S-kaistalla.....	36
Kuvio 19. LEO-satelliittien kalibraatioskenaarioiden latausnopeus S-kaistalla .....	37

# Sisällys

1	JOHDANTO .....	1
2	5G.....	3
	2.1 Vaatimukset.....	3
	2.2 Avainteknologiat ja innovaatiot.....	4
	2.2.1 Millimetriaallot .....	5
	2.2.2 Massiivinen MIMO.....	5
	2.2.3 Verkon tiheyttäminen .....	6
	2.2.4 5G New Radio .....	8
	2.2.5 Standardointi.....	9
3	SATELLIITTIVERKOT (NTN).....	10
	3.1 Arkkitehtuuri .....	10
	3.1.1 UAV .....	11
	3.1.2 HAP .....	11
	3.1.3 Satelliitit.....	11
	3.2 Satelliittiverkkojen hyödyt .....	12
	3.3 Tärkeät tekniikat.....	13
	3.3.1 Latausyhteyden synkronointi.....	13
	3.3.2 Hajasaanti .....	14
	3.3.3 Ajastusennakko .....	15
	3.3.4 Hybridi automaattiset uudelleenlähetyspyynnöt .....	15
	3.3.5 Kattavuuskeilan muodostus .....	16
	3.3.6 Dynaaminen kaistankäyttö .....	16
4	5G NTN .....	17
	4.1 5G-maaverkkojen haasteet .....	17
	4.2 Satelliittiverkkojen hyödyntäminen yhdessä 5G-maaverkkojen kanssa .....	18
5	TUTKIMUKSEN TOTEUTUS .....	20
	5.1 Aineiston keruu.....	20
	5.2 Kalibraatioskenaariot.....	20
	5.2.1 Yleiset parametrit .....	22
	5.2.2 GEO-satelliittien kalibraatioskenaariot .....	23
	5.2.3 LEO-satelliittien kalibraatioskenaariot .....	24
	5.2.4 Ka-kaistan kalibraatioskenaariot .....	24
	5.2.5 S-kaistan kalibraatioskenaariot.....	26
6	ANALYYSI .....	31
	6.1 GEO-satelliittien kalibraatioskenaariot.....	31
	6.2 LEO-satelliittien kalibraatioskenaariot .....	32
	6.2.1 Ka-kaistan kalibraatioskenaariot .....	34
	6.2.2 S-kaistan kalibraatioskenaariot.....	35

6.2.3 Kytkevämennus .....	38
7 JOHTOPÄÄTÖKSET .....	40
LÄHTEET .....	41

# 1 Johdanto

Mobiiliteknologiat ovat kehittyneet merkittävän nopeasti viime vuosikymmenten aikana. Mobiiliverkkojen käyttäjien ja mobiiliverkkoja käyttävien laitteiden määrän kasvaessa räjähdysmäisesti tarve tehokkaammille mobiiliverkoille kasvaa entisestään. Mobiiliverkkojen odotetaan kykenevän ylläpitämään entistä enemmän laitteita säilyttäen kuitenkin pienet vasteajat ja tarjoten entistä nopeampia yhteyksiä. 5G-verkot ovatkin nykyään esillä monien palveluntarjoajien sekä muiden yritysten toimesta ja ihmisiä kiinnostavat 5G-verkot sekä niihin yhdistettävät laitteet. 5G-verkkojen rakentaminen onkin käynnissä monissa maissa ja entistä useammalla ihmisellä on käytettävissään 5G-yhteys. 5G-yhteyksien ennustetaan kattavan vuoteen 2026 mennessä yli puolet kaikesta tiedonsiirrosta (*Ericsson Mobility Report 2020*).

Vaikka 5G-verkkoja laajennetaankin nopeaa tahtia, luotettavaa 5G-yhteyttä ei ole saatavilla tällä hetkellä yleisesti isompien kaupunkien ulkopuolella. Monet 5G-verkkoja tarvitsevat laitteet, kuten esimerkiksi itseajavat tai yhdistetyt ajoneuvot (V2X) tarvitsevat 5G-verkkojen tarjoamaa pientä vasteaikaa sekä suurta tiedonsiirtokapasiteettia. Tämä rajoittaa näiden keksintöjen käyttömahdollisuuksia. (MacHardy ym. 2018) Jotta voitaisiin todella hyötyä 5G:n tarjoamista eduista, olisi kattavuus ja kapasiteetti saatava paljon laajemmaksi. 5G-verkkojen infrastruktuurin rakentaminen kaikkialle ei kuitenkaan ole järkevää tai paikoittain edes mahdollista. Alueille, joilla sijaitsee vain vähän ihmisiä on rahallisesti vähemmän houkuttelevaa rakentaa 5G-verkkoja kuin alueille, joilla asuu paljon ihmisiä. Lisäksi todella tiheästi asutuilla alueilla maaverkkojen tarjoama kapasiteetti ei välttämättä riitä kaikkien käyttäjien tarpeisiin. Verkkojen rakentamisen lisäksi ongelmia tuo 5G-verkkojen ylläpitäminen. Alueilla, joilla tapahtuu paljon luonnononnettomuuksia tai jotka ovat rauhattomia, on vaikeampi ja kalliimpi ylläpitää maaverkkoja kuin vakaammilla alueilla. Tähän ongelmaan ratkaisu voitaisiin saada 5G satelliittiverkoista (*5G NR NTN, New Radio Non-Terrestrial-Networks*).

5G-satelliittiverkko tarkoittaa järjestelmää, johon kuuluu maanpäällä sijaitseva terminaali, ilmassa tai avaruudessa sijaitseva tukiasema sekä yhteyspiste, joka yhdistää maanpäälisen terminaalin ja liikkuvan tukiaseman. Satelliittiteknologoiden yhdistämistä mobiiliverkkoihin esiteltiin ensimmäisen kerran 3GPP:n (*3rd Generation Partnership Program*) julkaisussa 15, jonka jälkeen on pyritty kehittämään 5G NR-NTN käyttöönottotilanteita sekä para-

metrisointia. Satelliittiverkkojen arkkitehtuuria ja protokollia kehitetään 3GPP:n seuraavissa spesifikaatioissa 5G satelliittiverkkojen mahdollistamiseksi. (Giordani ja Zorzi 2020)

Tutkielman tarkoitus on käydä läpi 5G-satelliittiverkkojen haasteita, oleellisia teknologioita ja innovaatioita sekä miten teknologioiden yhteistoiminta käytännössä onnistuu. Tutkielman empiirisen osuuden tavoitteena on selvittää miten 5G-satelliittiverkot soveltuvat satelliittiverkkojen käyttötarkoitukseen simuloimalla niiden suoritusta 3GPP:n määrittelemissä kalibraatioskenaarioissa.

Tutkielman luvussa 2 käydään läpi 5G-maaverkkojen vaatimuksia sekä onnistumisen kannalta tärkeitä teknologioita ja innovaatioita. Luvussa 3 tutustutaan satelliittiverkkojen arkkitehtuuriin ja tekniikoihin sekä verrataan satelliittiverkkoja maaverkkoihin. Tämän jälkeen luvussa 4 käydään läpi teknologioiden yhdistämisen kannalta tärkeitä toimenpiteitä, kuten standardointia. Tutkielman teoriaosuuden jälkeen seuraa 5G-satelliittiverkkojen suorituskyvyn simulointi 3GPP:n esittelemissä kalibraatioskenaarioissa, jota seuraa tulosten analyysi ja pohdinta.



## 2 5G

Tietoliikenneteknologiat ovat kehittyneet merkittävän nopeasti vuosikymmenten aikana, joiden vuosikymmenen kehittämiseen kuluu noin vuosikymmen, toteavat Katz, Matinmikko-Blue ja Latva-aho (2018). 5G-verkoille on asetettu useita tehokkuuden mittareita, jotka niiden tulisi pystyä täyttämään. Näistä vaatimuksista kerrotaan tarkemmin alaluvussa 2.1. ITU (*International Telecommunication Union*) ennustaa siirretyn datan määrän saavuttavan viisi tsettatavaa vuoteen 2030 mennessä. Tähän suureen siirretyn määrän kasvuun vastaaminen edellyttää 5G:n tarjoamien mahdollisuuksien, kuten kaistantehokkuuden ja laajemman käytävissä olevan kaistan täyttämistä hyödyntämistä (Katz, Matinmikko-Blue ja Latva-aho 2018). Alaluvussa 2.2 käydään läpi 5G:n avainteknologiat, joiden hyödyntäminen on tärkeää näiden vaatimusten täyttämiseksi.

### 2.1 Vaatimukset

5G-verkkojen tehokkuuden mittarit on esitelty 3GPP:n spesifikaatiossa 38.913 (*3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Study on Scenarios and Requirements for Next Generation Access Technologies; (Release 14)*). Tehokkuuden mittarit sisältävät sekä käyttäjälouhteisia että verkoille asetettuja vaatimuksia. Luonteen lisäksi vaatimukset vaihtelevat käyttötarkoituksesta riippuen. Erilaiset etäohjauskäyttötapaukset kuten esimerkiksi dronejen hallinta vaativat korkeaa luotettavuutta, itseajavat autot sekä erilaiset virtuaalisen todellisuuden käyttötapaukset edellyttävät alhaista viivettä, kun taas esimerkiksi puettavat terveysteknologiat sekä teollisuuden automaatio voivat edellyttää sekä luotettavaa, että alhaisen viiveen omaavaa mobiiliverkkoa. (Ullah ym. 2019)

Yksi suurimmista syistä kehittää viidennen sukupolven mobiiliverkkoja on siirretyn datan määrän räjähdysmäinen kasvu. 4G-mobiiliverkkoihin verrattuna tiedonsiirtonopeuden vaatimukset ovatkin jopa 100-kertaiset. (Andrews ym. 2014) Suurin teoreettinen tiedonsiirtonopeus, jolla dataa siirretään virhevapaasti 5G-yhteyden ylitse (*Data rate*) tulisi olla latausnopeudelle (*Downlink*) yli 20Gbps ja lähetysopeudelle (*Uplink*) yli 10Gbps. Käyttäjien tiheästi asutetuissa kaupungeissa kokema tiedonsiirtonopeus tulisi olla ladatessa 100 Mbps ja

lähettäessä 50 Mbps.

5G-verkkoja hyödyntävien laitteiden kasvavan määrän myötä kaistantehokkuuden (*Spectral efficiency*), eli käytännössä kuinka paljon yhteyksiä on mahdollista saada mahtumaan rajatulle kaistalle merkitys korostuu. Kaistantehokkuuden tulisi kaupungeissa olla parhaimmassa tapauksessa latausyhteydessä 30 bps/Hz ja lähetysyhteydessä 15 bps/Hz sekä keskimäärin 7,8 bps/Hz ladatessa ja 5,4 bps/Hz. Huonoimmassakin tilanteessa, eli viidennessä persentiilissä kaistantehokkuuden tulisi olla kaupungissa vähintään 0,225 bps/Hz ladatessa ja 0,15 bps/Hz lähettäessä. Laitemäärässä mitattuna 5G-mobiiliverkon tulisi pystyä ylläpitämään miljoonaa yhdistettyä laitetta per neliökilometri.

Jotkut käyttötapaukset, kuten itseajavat autot tai erilaiset turvallisuusteknologiat vaativat erittäin hyvää luotettavuutta sekä pientä vasteaikaa. 5G-mobiiliverkon tulisi pystyä takaamaan 99,999%:n luotettavuus tiedonsiirrossa sekä korkeintaan 1 millisekunnin viive. Yhteyden tulisi toimia silloinkin, kun yhdistetty laite liikkuu jopa 500km/h vauhdilla eikä yhteys saisi katketa tukiasemaa vaihtaessa.

Nopeuden, tehokkuuden ja luotettavuuden lisäksi vaatimuksia kohdistuu myös 5G-yhteyden energiatehokkuuteen. 5G-yhteyden hyödyntämisen ei pitäisi heikentää käyttölaitteiden akukestoa merkittävästi. Tämä on mahdollista toteuttaa esimerkiksi käyttämällä lepotila-toimintoa, jossa yhteys kuluttaisi vähemmän virtaa yhteyden ollessa vähemmällä käytöllä.

## **2.2 Avainteknologiat ja innovaatiot**

Maailman tiedonsiirtotarpeiden kasvaessa räjähdysmäisesti liikutaan nykyisten LTE-verkkojen kapasiteetin ylärajoilla. Tarvitaan uusia teknologioita, joilla voidaan vastata 5G-verkoille asetettuihin suuriin vaatimuksiin. 5G-verkkojen vaatimuksiin ei välttämättä ole olemassa ratkaisua, joka sopisi kaikkiin tilanteisiin (Shafi ym. 2017). Tarvitaan uusia radioratkaisuita, keinoja saada käyttöön lisää kaistaa, parempia antenniteknologioita sekä kehittää yhteistyötä eri verkkoratkaisujen välillä.

### 2.2.1 Millimetriaallot

Mobiiliverkkojen kapasiteetin lisääminen ei onnistu, jos käytettävissä olevaa kaistaa ei saada kasvatettua. Tähän ongelmaan ratkaisua etsitään millimetriaalloilta, eli aalloilta joiden taajuusalue sijoittuu 30 GHz:n ja 300 GHz:n välille. Tällä välillä on runsaasti vapaata kaistaa, mikä auttaisi tukemaan kaistaa paljon vaativien palveluiden, kuten korkealaatuisen videomateriaalin suoratoiston käyttämistä, toteavat Niu ym. (2015). Millimetriaaltojen hyödyntäminen yhdessä aikaisempien teknologioiden kanssa ei kuitenkaan ole täysin ongelmatonta.

Millimetriaaltojen suurimmat heikkoudet liittyvät sen käyttämään korkeaan taajuusalueeseen. Signaalin heikkeminen sekä sen herkkyys esteille vaativat suunnittelua arkkitehtuuri- ja protokollatasolla, jotta olisi mahdollista saada täysi hyöty millimetriaalloista. Signaalin levittämisen lisäksi ongelmia muodostuu kun yritetään yhdistää vanhoja mikrometriaaltoja hyödyntäviä teknologioita millimetriaaltoja hyödyntäviin tekniikoihin. (Niu ym. 2015)

Ratkaisuja edellämainittuihin ongelmiin on ehdotettu. Signaalin heikkeminen ja herkkyys esteille rajoittavat millimetriaaltojen sijoitusmahdollisuuksia. Rappaport ym. (2013) suorittaman tutkimuksen perusteella tukiasemien tulisi sijaita korkeintaan 200 metrin etäisyydellä toisistaan ja rakennuksien sisätiloihin tulisi asentaa yhdyspisteitä, sillä millimetriaaltojen välittyminen rakennusmateriaalien lävitse on heikkoa. Tukiasemien tiheän sijoittamisen lisäksi Niu ym. (2015) mukaan säteenmuodostus ja suuntaaminen ovat tärkeitä tekniikoita millimetriaaltojen hyödyntämiseksi. Näin ollen millimetriaallot eivät ehkä ole paras ratkaisu tiheästi rakennettuihin kaupunkeihin, vaan sopivatkin kenties parhaiten välittämään yhteyttä sisätiloissa ja avoimissa olosuhteissa. Ratkaisuksi yhdistämisongelmaan on pyritty kehittämään standardeja, joilla voitaisiin yhdenmukaistaa tekniikoita.

### 2.2.2 Massiivinen MIMO

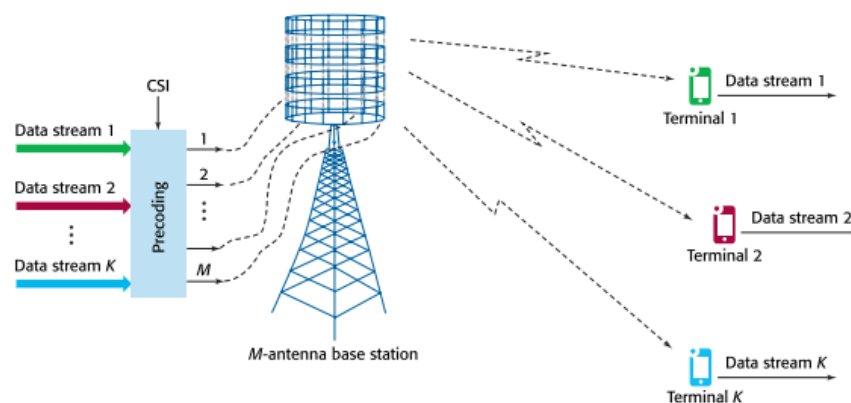
Marzetta (2015) mukaan on olemassa kaksi ajatonta totuutta, tarve suuremmalle langattomalle lähetysteholle kasvaa aina ja olemassaoleva sähkömagneettinen kaista ei ikinä kasva. Lähetystehon kasvattamiseen on yleisesti olemassa kolme eri ratkaisutapaa. Käytettävän kaistan kasvattaminen, useampien yhteyspisteiden hyödyntäminen sekä antennimäärien kasvattaminen yhteyspisteissä. Massiivinen MIMO (*Multiple-Input-Multiple-Output*) lukeutuu

viimeisimpään näistä ratkaisutavoista. Kuviossa 1 havainnollistetaan massiivinen MIMO -yhteyspisteen toimintaa. Yhteyspisteessä useampi datavirta kanavoidaan siten, että useampi datavirta pystyy käyttämään samoja taajuuksia. (Marzetta 2015) Massiivinen MIMO voidaan jakaa vielä kahteen alakäsitteeseen, Point-To-Point MIMO ja Multi-User MIMO.

Point-to-Point MIMO, eli tavanomaisemmat MIMO-järjestelmät edellyttävät, että sekä signaalin lähettäjällä että vastaanottajalla on käytössä useampi antenni. Tämä ei kuitenkaan ole välttämättä järkevää tai edes mahdollista. Multi-User MIMO, jota kutsutaan myös virtuaaliseksi MIMO:ksi, taas käyttää hajautettujen laitteiden antenneja muodostaakseen samankaltaiset hyödyt kuin tavanomainen MIMO. Virtualisoinnin tuomia häirtävaikutuksia ovat järjestelmän kompleksisuus sekä laitteiden välisen kommunikoinnin vaativa signaalimäärä. Edut ovat kuitenkin huomattavia, sillä kapasiteetin ja kattavuuden kasvattaminen Multi-User MIMO:n avulla on merkittävästi edullisempaa kuin tavanomaisella MIMO:lla. (C. Wang ym. 2010)

### 2.2.3 Verkon tiheyttäminen

Tukiasemien tehostaminen ja käytettävissä olevan kaistan lisääminen eivät ole ainoat tavat vastata tulevaisuuden tiedonsiirtotarpeisiin. Tähän mennessä lupaavin ratkaisu ongelmaan tiheästi asutetuilla alueilla näyttäisi olevan verkon tiheyttäminen käyttämällä pieniä solutukia-



Kuvio 1. Massiivinen MIMO -yhteyspisteen toiminta (Marzetta 2015)

semia, toteaa Liu ym. (2017). Käytännössä tämä tarkoittaa yhteyspisteiden määrän lisäämistä ja yksittäisen solun koon pienentämistä. Käyttämällä pienempiä tukiasemia voidaan paikallisesti uudelleenkäyttää samoja taajuuksia ja sitten saavuttaa parempi kaistan tehokkuus.

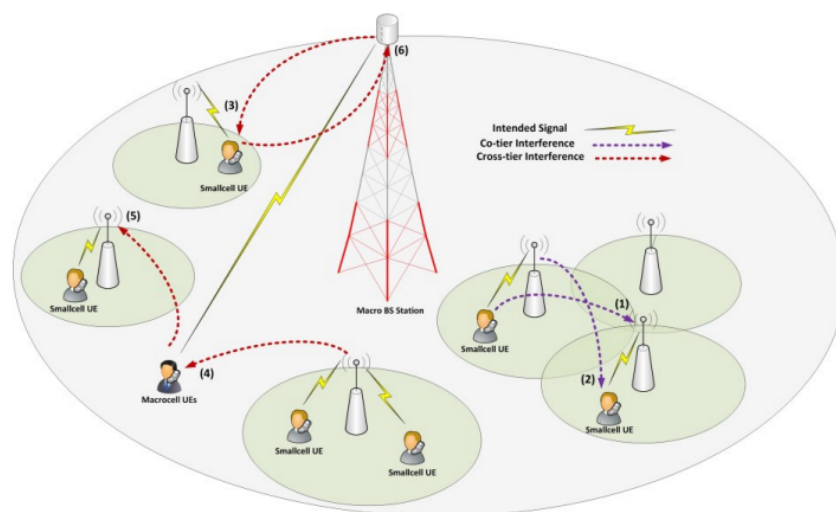
Tukiasemien määrän lisääminen loputtomasti ei kuitenkaan ole ratkaisu. Signaalin heikentyminen ei ole ongelma lyhyillä etäisyyksillä, mutta tukiasemien määrän lisääntyessä häiritsevien signaalien määrä myös kasvaa.

Kaistan kapasiteetti voidaan laskea Shannonin kaavalla:

$$C = s \left( \frac{W}{n} \right) \log_2 \left( 1 + \frac{P}{N+I} \right), \quad (2.1)$$

jossa  $s$ ,  $n$  ja  $W$  kuvaavat vastaavasti kanavoinnin tehokkuutta, kuormituskerrointa ja kaistanleveyttä, samassa järjestyksessä. Nämä ovat tärkeimmät muuttujat solukkojärjestelmän kapasiteetin kasvattamisessa, toteavat Liu ym. (2017). Jotta voidaan kasvattaa kaistanleveyttä, tulee ottaa käyttöön uusia taajuuksia. Kanavoinnin tehokkuuden lisäämiseksi tulee lisätä antennien määrää. Kuormitusta helpottaakseen taas tulee lisätä solujen määrää. Solujen määrän lisääminen vähentää signaalin heikentymistä ja kasvattaa sekä halutun signaalin tehoa ( $P$ ) että häiriösignaalien ( $I$ ) määrää.

Suurin haaste verkon tiheyttämisessä onkin häiriösignaalien hallinta. Erityisesti ongelmia aiheuttavat erilaisten tukiasemien yhteistoiminta. Kuviossa 2 on kuvattu erilaiset häiriösig-



Kuvio 2. Häiriösignaalit verkon tiheyttämisessä (Liu ym. 2017)

naalin aiheuttajat verkon tiheyttämisessä. Häiriötä on samalla tasolla tapahtuvaa ja tasojen halki tapahtuvaa. Kuvion tapauksessa [1] häiriösignaaleita syntyy lähekkäisillä soluilla, kun eri käyttäjien laitteet jakavat saman taajuusalueen. Tapauksessa [2] häiriötä syntyy, kun pieni solutukiasema aiheuttaa käyttäjän laitteelle häiriötä latausyhteydessä. Tapaukset [3], [4], [5] ja [6] taas edustavat tasojen halki tapahtuvaa häiriötä. Tapaus [3] kuvaa eri lähetystehojen aiheuttamaa häiriötä, [4] kuvaa käyttäjän kokemaa häiriötä ollessaan samaan aikaan yhteydessä isompaan soluun ja lähellä pientä solutukiasemaa, tapaus [5] kuvaa isompaan soluun yhteydessä olevien käyttäjälaitteiden aiheuttamaa häiriötä piensolutukiasemalle ja [6] kuvaa piensolun kanssa yhteydessä olevan ja isomman tukiaseman toisilleen aiheuttamaa häiriötä. (Liu ym. 2017)

Häiriösignaalien lisäksi ongelmia aiheuttaa energiatehokkuuden heikentyminen. Tukiasemien määrän kasvattaminen alueella lisää kaistantehokkuutta, mutta tiheyden kasvaessa häiriösignaalien määrä heikentää energiatehokkuutta entisestään. Liu ym. (2017) mukaan tämä vaikuttaa erityisesti sisätiloissa.

Liu ym. (2017) toteavat, että verkon tiheyttämisen toteuttamiseksi tarvitaan älykkäämpiä radioyhteyksiä, käyttäjien klusterointia, käyttäjien laitteiden välisen kommunikoinnin tehostamista sekä häiriöiden vaimennustekniikoita.

#### **2.2.4 5G New Radio**

5G New Radio on viidennen sukupolven langattoman yhteyden teknologia, jonka avulla pyritään vastaamaan 5G-mobiiliverkoille asetettuihin suuriin vaatimuksiin. Käyttötapauksia 5G New Radiolle on monia, näihin lukevat tehostettu laajakaista, erittäin pienen viiveen omaava luotettava kommunikointi sekä teollisuusautomaatio. 5G NR:n tärkeimmät ominaisuudet ovat sen joustavuus, luotettavuus, antenniteknologiat sekä energiatehokkuus. (Lin ym. 2019)

New Radio -teknologiaa on mahdollista hyödyntää itsenäisesti olemassa olevista verkoista riippumatta tai sitten yhdessä LTE-verkkojen kanssa. Tämä johtuu siitä, että 5G New Radio tukee taajuuksia 6 GHz:n molemmin puolin. Valitsemalla sopiva arkkitehtuuri mahdollistetaan taaksepäin yhteensopivuus eri tilanteissa. NR-solua voidaan käyttää joko pääyhteyspisteinä tai sitten vahvistimena yhdessä LTE-solun kanssa, jolloin voidaan tukea useita eri

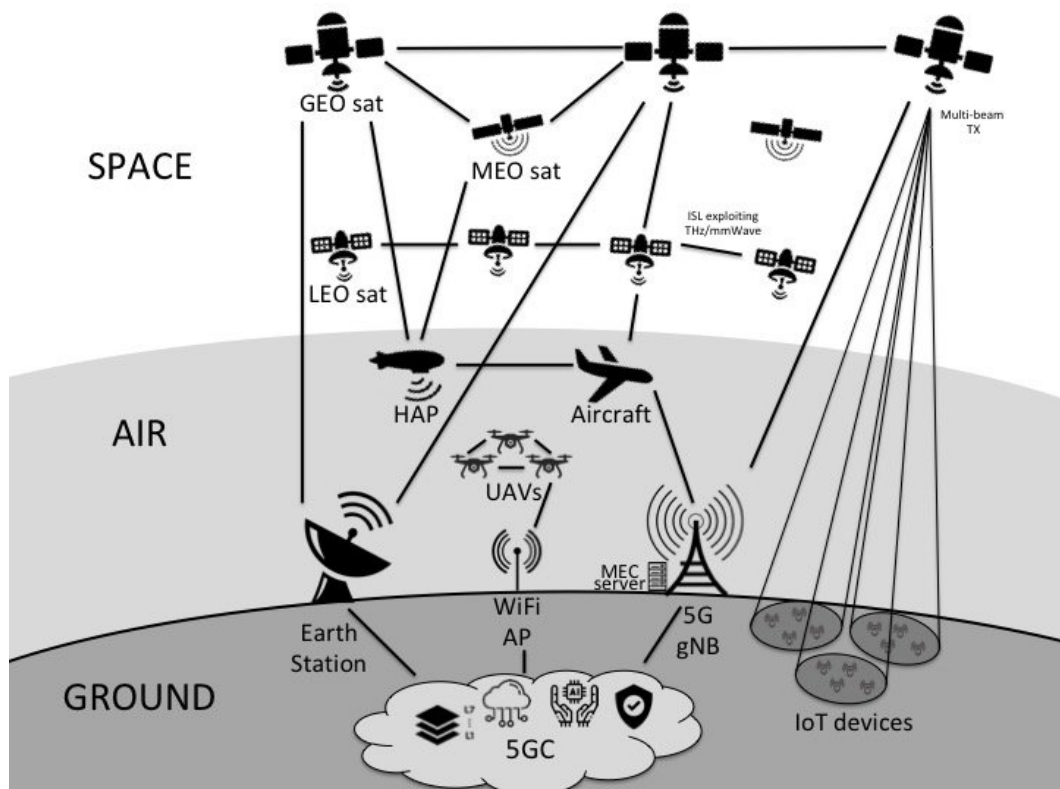
käyttöönottilanteita. (Lien ym. 2017)

### **2.2.5 Standardointi**

Kuten luvussa on tullut ilmi tähän mennessä, 5G-verkoille asetettuihin vaatimuksiin vastaamiseksi on kehitetty monia tekniikoita, jotka kehittävät sekä ydinverkkoa että siihen yhdistämistä. Jotta näistä tekniikoista voitaisiin todella hyötyä, tulisi maanpäällisten verkkojen kanssa hyödyntää satelliittiverkkoja. Tässä piilee kuitenkin haasteita, sillä yhteistyö eri verkkojen välillä tulisi olla saumatonta. (Guidotti ym. 2020)

### 3 Satelliittiverkot (NTN)

Satelliittiverkkoja pidetään avainteknologiana kustannustehokkaan ja kattavan mobiiliverkon mahdollistamisessa. Vaikka satelliittiverkkoja pidetäänkin tärkeänä, on niiden suunnittelussa vielä kehitettävää, toteavat Giordani ja Zorzi (2020). Oikeanlaisella verkon suunnittelulla voidaan mahdollistaa mahdollisimman laaja kattavuus sekä pieni viive. Tässä luvussa esitellään ensin satelliittiverkkojen arkkitehtuuri, jonka jälkeen käydään läpi avaintekniikoita satelliittiverkkojen tehokkaaseen hyödyntämiseen. Luvun lopuksi esitellään vielä satelliittiverkkojen avaintekniikoita, joiden avulla voidaan tehostaa satelliittiverkkojen toimintaa.



Kuvio 3. Satelliittiverkkojen arkkitehtuuri (Rinaldi ym. 2020)

#### 3.1 Arkkitehtuuri

Satelliittiverkkojen pääkomponentit ovat maanpäällinen tukiasema, ilmassa tai avaruudessa sijaitseva tukiasema, radioasema, joka yhdistää maanpäällisen ja ilmassa olevan tukias-



man sekä yhdyskäytävä, joka liittää satelliittiverkon maanpäälliseen verkkoon. Kuvassa 3 on nähtävissä erilaisia lentäviä välineitä, joita voidaan käyttää tukiasemana satelliittiverkoille. Jotkin välineet sopivat paremmin tiettyihin tehtäviin kuin toiset, sillä niiden kantama, lähetysteho sekä kustannustehokkuus vaihtelevat.

### **3.1.1 UAV**

Alimman korkeuden tukiasema on UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*), joka lentää muutamien satojen metrien korkeudessa. UAV:t ovat joustavia ja niitä on mahdollista ottaa käyttöön lyhyellä varoitusajalla. Tästä syystä UAV:t ovat hyödyllisimmillään esimerkiksi hätätilanteissa tai jos tarvitaan nopeasti yhteys erilaisten maanpäällisten rakennelmien välille. Haasteena UAV:lle nähdään niiden energiankulutus. UAV:t kuluttavat paljon energiaa pysyäkseen ilmassa, joten niitä ei ole kannattavaa lennättää pidempiä ajanjaksoja. (Giordani ja Zorzi 2020)

### **3.1.2 HAP**

HAP (*High Altitude Platform*) sijaitsee noin 20:n kilometrin korkeudessa ilmakehässä. HAP:n etuja ovat sen suuri kattavuus sekä nopea ja edullinen käyttöönotto. HAP pystyy kattamaan halkaisijaltaan jopa satojen kilometrien kokoisen alueen, minkä ansiosta niitä pidetään tehokkaina tukiasemina satelliittiverkkojen kattavuuden laajentamisessa. HAP:ien kohdalla haasteena on energiankäytön säätely ja siten ilmassaoloajan pidentäminen. HAP:n tankkaaminen voi olla haastavaa, mutta voimanlähteenä voidaan hyödyntää myös aurinkoenergiaa. Kurt ym. (2021) mukaan perinteisiä polttoainekenoja tulisi käyttää ainoastaan hätätilanteissa tai väliaikaisena ratkaisuna. Pidempikestoisilla lennoilla tulisi hyödyntää aurinkoenergiaa, jotta voidaan välttää laskeutumista ja siten tehdä lentämisestä kustannustehokkaampaa.

### **3.1.3 Satelliitit**

Satelliitteja on mahdollista hyödyntää eri korkeuksissa ja siten tarjota eri ominaisuuksia. Tyypillisesti satelliitit luokitellaan kiertoradan ominaisuuksien mukaan. GEO(*Geostationary Earth Orbit*)-satelliitit sijaitsevat päiväntasaajalla noin 35800 kilometrin korkeudessa. GEO-

satelliitit pysyvät maasta katsottuna paikallaan ja ovat kokoajan näkyvissä maanpäällisille tukiasemille tarjoten yhteyden hyvinkin suurelle alueelle huolimatta etäisyydestä johtuvasta signaalin heikkenemisestä.

Geostationarisella kiertoradalla sijaitsevien satelliittien lisäksi on olemassa MEO (*Medium Earth Orbit*) ja LEO(*Low Earth Orbit*) satelliitteja. MEO-satelliitit sijaitsevat 7000 - 25000 kilometrin korkeudessa, kun taas LEO-satelliitit sijaitsevat 300 - 1500 kilometrin korkeudessa. Poiketen geostationarisista satelliiteista, LEO- ja MEO-satelliittien kiertonopeus on suurempi kuin maapallon kiertoliike, joten satelliitit eivät pysy maan suhteen paikoillaan, vaan kiertävät maapallon 1,5 - 10 tunnissa (Rinaldi ym. 2020). Näiden alhaisemman korkeuden satelliittien kattavuusalue on pienempi kuin geostationaaristen satelliittien, mutta geostationaaristen satelliittien käyttöönotto on kalliimpaa, toteavat Ghosh ym. (2019). Matalammalla sijaitsevia satelliitteja siis tarvitaan suurempi määrä, jotta voidaan tarjota kattava yhteys.

### **3.2 Satelliittiverkkojen hyödyt**

Erilaisia vaihtoehtoja liikkuvaksi tukiasemaksi on useita, kuten aiemmassa alaluvussa esiteltiin. Tästä johtuen satelliittiverkot ovat luonnostaankin hyvin joustavia, sillä eri tilanteisiin voidaan käyttää eri tukiasemia. Hyötyjä satelliittiverkoista olisi mahdollista saada muun muassa kattavuuden laajentamisessa, verkon luotettavuuden parantamisessa sekä verkon skaalautuvuuden tehostamisessa. (Zhang, Zhu ja Wang 2020)

Satelliittiverkkoja on mahdollista tarjota alueille, joilla ei ole välttämättä mahdollista tarjota maaverkkojen kattavuutta. Valitsemalla oikea tukiasematyyppe, voidaan tehdä kattavuuden laajentamisesta hyvinkin kustannustehokasta. GEO-satelliitit pystyvät tarjoamaan maailmanlaajuisen kattavuuden jopa vain kolmen satelliitin avulla, mutta niiden käyttöönotto on kallista ja tällä tavoin haasteena on suuri kierros aika (*Round-trip Time, RTT*), selvittävät Ghosh ym. (2019). Satelliiteista on myös hyötyä alueilla, joilla on maaverkkojen kattavuus. Käyttämällä laajempaa verkkoa LEO- tai MEO-satelliitteja voidaan tarjota hyvinkin suuren kapasiteetin omaava verkko ruuhkaisemmilla alueilla, kuten asutuskeskuksissa (Zhang, Zhu ja Wang 2020).

Luotettavuus on ongelma kun käytössä on paljon IoT-laitteita tai kun käyttäjälaitteet, kuten

esimerkiksi lentokoneet tai autot, liikkuvat hyvin nopeasti. Käyttämällä satelliittiverkkoja voidaan varmentaa maaverkkojen toimintaa verkkojen reuna-alueilla sekä vähentää häiriösignaalien määrää ruuhkaisemmillä alueilla. Verkkojen katkeamattomuus on erityisen tärkeää tehtäväkriittiselle viestinnälle, kuten itseajaville autoille. (Zhang, Zhu ja Wang 2020)

### 3.3 Tärkeät tekniikat

Satelliittiverkoille luonteisia ongelmia ovat suuri viive, doppler-ilmiö sekä satelliitin signaalin heikentyminen. Näiden ongelmien ratkaisuksi on kehitetty ratkaisuja, jotka esitellään seuraavaksi.

#### 3.3.1 Latausyhteyden synkronointi

Satelliittiyhteyden muodostamisen mahdollistamiseksi käyttäjän laitteen täytyy saada tietoja yhteyden synkronisoinnista. Synkronisointitietojen keräämisen toimenpide on hyvin samankaltainen, kuin LTE-yhteyden kanssa mutta joustavampi ja monimutkaisempi, toteaa Guidotti ym. (2020). Synkronisointitiedot, jotka sisältävät taajuusvälin sekä ajoituksen, saadaan niinkutsutusta synkronisointisignaalilohkosta (*SSB, Synchronization Signal Block*). Synkronointisignaali sisältää neljä kanavointisymbolia, joista ensimmäinen sisältää yhden kolmesta mahdollisesta primäärisynkronointisignaalista (*PSS*). Nämä kolme primäärisynkronointisignaalia käyttävät 127 apukantoaaltoa käytössä olevista 240:stä. Muuttamalla maksimipituussekvenssiä voidaan niiden joukosta löytää parhaan suorituskyvyn omaava primäärisynkronointisignaali. Primäärisynkronointisignaalin tunnistamisen jälkeen taajuuseron arvioinnin avulla voidaan tunnistaa korrelaatiohuippu. Tarkempi arvio voidaan sen jälkeen saada käyttämällä taajuuskompensaatiotekniikkaa. Seuraavaksi selvitetään sekundäärinen synkronointisignaali, joka löytyy kolmannesta kanavointisymbolista. Tämä symboli sisältää samat 127 apukantoaaltoa, kuten ensimmäinenkin. Sekundäärinen synkronointisignaali (*SSS*) voidaan havaita näistä käyttämällä aiemmin saatua synkronointisignaalia. Käyttämällä primääri- ja sekundäärisynkronointisignaaleita on mahdollista laskea solun identiteetti (*ID*) -indeksi seuraavasta kaavasta:

$$ID = 3 \times SSS_{id} \times PSS_{id} \quad (3.1)$$

Jäljellä olevia apukantoaaltoja käytetään pääkanavan kantamiseen. Pääkanavalohko sisältää 432 hyötykuormaresurssisignaalia sekä 144 demodulaatiosignaalia. Pääkanava sisältää pääinformaatiolohkon, jonka avulla voidaan saada salattu hyötykuorma sekä useita tärkeitä tietoja yhteyden muodostamiseksi, kuten tietoja yhteydessä olevasta solusta. Pääsynkronointisignaali on New Radion ainut aina-aktiivinen signaali ja sitä käyttämällä voidaan vähentää energiankulutusta ja sopeutua paremmin solun olosuhteisiin. (Guidotti ym. 2020)

### 3.3.2 Hajasaanti

Hajasaanti (*Random Access*) mahdollistaa lähetyksyhteyden synkronoinnin sekä tarjoaa käyttäjän laitteelle tarkan tiedon lähetyksen ajoituksesta. Hajasaanti on mahdollista solun tunnistamisen jälkeen. Solun tunnistaminen voi tapahtua kahdella eri tavalla, joko etsimällä parhaiten palvelevan solun käytössäolevilta radioaalloilta tai käyttämällä aiemmin tallennettua tietoa kantoaaltoajuuksista ja solun parametreista. (Guidotti ym. 2020).

Hajasaantitoimenpiteitä on olemassa kahdenlaisia, kilpailuun perustuvia ja kilpailuun perustumattomia, toteavat Saarnisaari, Laiyemo ja de Lima (2019). Heidän mukaansa kilpailuun perustuvia toimenpiteitä käytetään käyttäjälaitteen liittyessä verkkoon joko ensimmäistä kertaa tai yhteyden katkeamisen jälkeen. Kilpailuun perustumattomia toimenpiteitä taas käytetään silloin kun yhteys on jo muodostettu, kuten esimerkiksi sädettä vaihtaessa. Erona näissä on se, että kilpailuun perustumattomissa tukiasema tarjoaa käyttäjälaitteelle varauksen, kun taas kilpailuun perustuvissa useat laitteet voivat kilpailla yhteydestä.

Hajasaantitoimenpiteen aikana käyttäjän laite ja tukiasema vaihtavat keskenään neljä viestiä, joiden tarkoitus on identifioida laite ja muodostaa yhteys. Toimenpiteen alussa käyttäjän laite lähettää alustusviestin, johon tukiasema pyrkii vastaamaan aikarajoitteen puitteissa. Mikäli käyttäjän laite saa vastauksen ajoissa, pyritään aloittamaan yhteys. Guidotti ym. (2020) mukaan alustus sisältää kolme osaa, etuliitteen, satunnaisen sekvenssin sekä suoja-ajan. Ongelmia esiintyy kahden eri laitteen käyttäessä samaa alustusta. Kilpailutilanteet ratkaistaan lähettämällä kiistanratkaisuviesti. Jos käyttäjän laite ei saa vastausta alustusviestiin ajois-

sa, lähetetään alustusviesti suoja-ajan jälkeen uudestaan. (Saarnisaari, Laiyemo ja de Lima 2019)

### 3.3.3 Ajastusennakko

Ajastusennakko on toimenpide, jolla pyritään vähentämään lähetyshäiriöiden ja lataushäiriöiden toisilleen aiheuttamaa häiriötä, jota ilmenee kun yhteydet limittyvät samassa aika-taajuus-resurssissa. Ajastusennakkoa voidaan arvioida hajasaannin alustusviestien etuliitteiden avulla. Hajasaannin aikana ajastusennakko on

$$T_{TA}(\mu) = (N_{TA}(\mu) + N_{TA,offset})T_C, \quad (3.2)$$

jossa  $T_C = 1/(480 \times 10^3 \times 4096) \approx 5,08 \times 10^{-10}$  sekuntia,  $N_{TA}(\mu) = T_A \times (16 \times 64)2^{-\mu}$  ja  $T_A$  kokonaisluku 0 ja 3864 välillä. Ajastusennakon maksimaalinen arvo tarjoaa maksimijoituserotuksen käyttäjälaitteiden välillä ja siten se liittyy maksimaalimaaliseen kattavuuskeilan kokoon. (Guidotti 2019)

### 3.3.4 Hybridi automaattiset uudelleenlähetyspyynnöt

Hybridi automaattiset uudelleenlähetyspyynnöt (*HARQ, Hybrid Automatic Repeat reQuest*) ovat yksi New Radion tärkeimmistä teknologioista yhteyden sopeuttamiseksi radiorajapintaan, selvittävät Guidotti ym. (2020). HARQ-teknologia hyödyntää mukautuvaa koodausta ja modulaatiota sekä virranhallintaa. Käyttäjän yhteyden koodausta ja modulaatiota säädetään mukautuvasti, jotta voidaan varmistaa luotettava yhteys. Virranhallinnan avulla voidaan tarjota paremmat lähetysolosuhteet ja siten auttaa yhteyden mukauttamisessa.

Satelliittiverkkojen kontekstissa ongelmia aiheuttaa merkittävästi kasvanut kierrosaika. Suurempi kierrosaika lisää HARQ-prosessin viivettä ja muistivaatimuksia, mikä taas vaikuttaa negatiivisesti suorituskykyyn. Suurin mahdollinen rinnakkaisten HARQ-prosessien määrä voidaan laskea kaavalla

$$N_{HARQ} = RTT(N_{TX} - 1)2^{\mu}, \quad (3.3)$$

jossa kierrosaika (RTT) ilmaistaan sekunneissa ja varauksen pituus on  $2^{-\mu}$  millisekuntia. Kaavan mukaan huonoimmassa tilanteessa, eli geostationaaristen satelliittien tapauksessa suurin yhdenaikaisten HARQ-prosessien määrä on 1635. (Guidotti ym. 2020)

### **3.3.5 Kattavuuskeilan muodostus**

Kierrosajan kasvaessa satelliittiverkkojen kontekstissa kattavuuskeilan koon maksimoinnin merkitys korostuu. Maksimaalisen kattavuuskeilan koon laskemiseksi tärkeimmät tekijät ovat hajasaanti ja ajastusennakko. Guidotti (2019) selvittää, että ajastusennakon ollessa maksimi, suurin keilankokoa rajoittava tekijä on hajasaannin suoja-aika.

### **3.3.6 Dynaaminen kaistankäyttö**

Dynaamisella kaistankäytöllä tarkoitetaan LEO-satelliitin kykyä hyödyntää muille satelliiteille, kuten GEO-satelliiteille allokoituja vapaita kanavia kasvattaakseen kaistanleveyttään. Liu (2019) selittää, että kaistan niukkuuden vuoksi dynaaminen kaistankäyttö sopii erittäin hyvin satelliittiverkon kaistankäytön tehostamiseen.

Ongelmallista dynaamisen kaistankäytön kannalta on se, että suurin osa tekniikoista on kehitetty maanpäällisille verkoille eikä niissä ole huomioitu satelliittiympäristön uniikkeja haasteita. Näitä ongelmia ovat virhealtis kaistantunnistus, korkea liikkuvuus, LEO- ja GEO-satelliittien suuri kattavuus sekä etäisyydestä johtuva suuri signaalin viive. (Liu 2019)

Kaistantunnistuksen tulokset ovat erityisen virhealttiita silloin kun satelliitti liikkuu GEO-satelliittin kattavuuskeilan sisällä. Suuri liikenoisuus itsessään heikentää tuloksia, mutta varsinkin kun liikutaan lähellä GEO-satelliitin kattavuuskeilan pääsäiettä tulokset saattavat vaihdella merkittävästi hyvinkin lyhen ajan sisällä. Nykyiset dynaamisen kaistankäytön ratkaisut ovat suunniteltu melko staattiseen ympäristöön ja siten eivät sellaisenaan välttämättä sovellu satelliittikontekstiin. (Liu 2019)

## 4 5G NTN

Tutkimuksessa on tähän mennessä käyty lävitse 5G:n sekä satelliittiverkkojen toimintaperiaatteet sekä avainteknologiat, joilla niistä voidaan saada aikaiseksi paras mahdollinen suorituskyky. Tässä luvussa käydään lävitse 5G-maaverkkoihin kohdistuvia haasteita, jonka jälkeen esitellään ratkaisuja näihin haasteisiin.

### 4.1 5G-maaverkkojen haasteet

5G-verkoille asetettuihin erittäin korkeisiin vaatimuksiin vastaaminen on kenties suurin haaste 5G-verkoille tällä hetkellä. Kuten luvussa 2.1 esitellyissä vaatimuksissa kävi ilmi, erittäin nopea, energiatehokas ja kaistaa tehokkaasti hyödyntävä yhteys tulisi olla saatavilla missä vain, milloin vain entistä suuremmalle käyttäjämäärälle. Ainoastaan maaverkkoja hyödyntämällä tämä vaikuttaa melko haastavalta tilanteelta.

5G:lle asetettujen vaatimusten tason lisäksi ongelmaksi muodostuu aika. Chen ja Zhao (2014) mukaan maaverkkojen olemassaoleva, vanhentunut arkkitehtuuri ei ole riittävä 5G:lle asetettuihin vaatimuksiin. Tarvitaan siis uusia verkkoratkaisuja, jonka lisäksi laitteiden määrä kasvaa koko ajan. Shafi ym. (2017) toteavat ajoituksen olevan erittäin haastava 5G-verkoille, sillä samanaikaisesti rakennetaan infrastruktuuria, luodaan standardeja tulevaisuuden verkoille sekä koekäytetään laitteita verkkojen hyödyntämiseksi.

Infrastruktuurin rakentaminen on myös kallista. *Greensill, Financing the Future of 5G* (2019) analyysin mukaan vuoden 2020 loppuun mennessä maailmanlaajuisesti pelkästään 5G-verkon infrastruktuurin rakentamiseen on käytetty yli biljoona dollaria. Infrastruktuurin lisäksi rahaa on käytetty arviolta 1.7 biljoonaa dollaria erilaisiin 5G-verkkojen liitännäisiin kuten IoT-laitteisiin ja ohjelmistoihin. Vaikka verkkoihin on upotettu jo tällä hetkellä merkittävät määrät rahaa, on kattavuus tällä hetkellä vielä riittämätön vaatimuksiin nähden. Infrastruktuurin hinnan lisäksi ongelmia aiheuttaa verkon tarjoaminen paikkoihin, joihin ei ole mahdollista rakentaa maaverkkoja.

Maaverkkojen infrastruktuuria parantamalla ja verkkoja tiheyttämällä voidaan vain tiettyyn

rajaan asti vastata kasvavaan käyttäjämäärään. Liu ym. (2017) toteavat, että suurin este tiheydetyille verkoille on häiriösignaalien määrä sekä kompleksisuus. Käyttäjien määrän kasvassa tiheästi asutetuilla alueilla tiheyttäminen ei siis välttämättä ratkaise kapasiteettiongelmiä. Käyttäjämäärän lisäksi ongelmia aiheuttaa siirretyn datan epäsymmetrisyys. Erman ym. (2011) mukaan nopeiten kasvava käyttötarkoitus mobiililaitteille on videoiden suoratoisto. Tämä tarkoittaa, että verkossa ladataan entistä enemmän dataa suhteessa lähetyn datan määrään. Chen ja Zhao (2014) selvittävät, että nykyiset verkot, jotka jakavat taajuudet symmetrisesti latausliikenteen ja lähetysliikenteen välille, eivät sovellu kovin hyvin ylläpitämään epäsymmetristä tiedonsiirtoa.

## **4.2 Satelliittiverkkojen hyödyntäminen yhdessä 5G-maaverkkojen kanssa**

Kuten edellisessä luvussa 4.1 todettiin, pelkästään maaverkkoja hyödyntämällä on hyvin haastavaa vastata 5G:lle asetettuihin vaatimuksiin. Giambene, Kota ja Pillai (2018) mukaan onkin odotettu, että tulevaisuudessa olisi käytössä langaton verkkojärjestelmä, johon olisi integroitu satelliittiverkko sekä muut langattoman yhteyden järjestelmät, kuten Wi-Fi ja mobiiliverkko. Käyttäjälaitteiden tulisi siis pystyä olemaan saumattomassa yhteydessä kaikkiin verkkoihin. Tämä on erityisen tärkeää käyttötarkoituksille, joissa yhteys ei saa katkea hetkessä, kuten 5G-yhteyttä hyödyntäville turvallisuusratkaisuille.

Kaupunkiolosuhteissa satelliittiverkkojen avulla voitaisiin helpottaa maaverkkojen kapasiteettirasitetta ohjaamalla liikenne satelliittiverkkoon kautta runkoverkkoon sen sijaan, että käytettäisiin jo ruuhkaisia maaverkkojen tukiasemia. Verkkojen ollessa saumattomassa yhteydessä myös liikkuminen eri tukiasemien välillä ei katkaisisi tai heikentäisi yhteyttä liiaksi, vaan siirtymä ajan aikana käytettäisiin satelliittiverkkoa maaverkon sijasta. (Giambene, Kota ja Pillai 2018)

Satelliittiverkoista voisi olla erityisen suurta hyötyä IoT-laitteiden kanssa, toteavat Soret ym. (n.d.). Heidän mukaansa LEO-satelliittimuodostelmia käyttämällä voitaisiin saada suuria hyötyjä kahdessa eri tilanteessa. Ensimmäisessä tilanteessa satelliittiverkkoa käytetään tarjoamaan laitteille sivuyhteys pois ruuhkaisesta verkosta ja siten vähentämään verkon rasi-



tetta ja toisessa tilanteessa satelliittiverkkoa voitaisiin käyttää runkoyhteyden tarjoamiseksi maaseudun alueille, joilla ei ole maanpäällisiä runkoyhteyksiä ydinverkkoon. Qu ym. (2017) toteavat, että ainoastaan LEO-satelliittimuodostelmat täyttävät pientä viivettä vaativien IoT-käyttötarkoitusten viivevaatimuksen. Korkeamman viiveen omaavia satelliitteja, kuten GEO-satelliitteja voitaisiin kuitenkin käyttää esimerkiksi vaikka sääasemilla tai muissa viivettä sietävissä käyttötapauksissa.

Kuten aiemmin luvussa 4.1 mainittiin, maaverkoille on ongelmallista siirretyn datan epäsymmetrisyys. *Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2017–2022 White Paper* artikkelissa todettiin, että vuoteen 2022 mennessä lähes 80 prosenttia maailman langattomasta tiedonsiirrosta on videota. Suoratoistettava video on myös ongelmallista johtuen siitä, että sille ei välttämättä ole esitysajankohtia, vaan käyttäjä voi aloittaa videon katsomisen milloin vain. N. Wang ym. (2018) selvittävät, että satelliittiverkko soveltuu erityisen hyvin videoliikenteen jakamiseen johtuen sen suuresta kaistanleveydestä ja hyvästä monilähetys-tuesta. Satelliittiverkkossa on esimerkiksi mahdollista säilyttää paljon kyselyä videosisältöä välimuistissa ja siten tarjota pääsy siihen entistä nopeammin, koska sitä ei tarvitse ladata ydinverkosta. Satelliittiverkkoja hyödyntämällä voitaisiin siis lievitellä maaverkkojen rasitusta merkittävästi siirtämällä videoliikenteen aiheuttamaa rasitusta satelliittiverkoille.

Satelliittiverkot ovat erityisen tärkeässä asemassa verkon laajentamisessa maalle, merelle ja ilmaan. Evans (2014) toteaa, että tulevaisuudessa entistä useammat ihmiset odottavat saavansa saman verkon kattavuuden olivat he sitten kaupungissa, laivassa, junassa tai lentokoneessa. Satelliittiverkkojen laaja kattavuus on erityisen hyödyllistä hätätilanteiden sattuessa tai esimerkiksi ajoneuvojen välisessä kommunikoinnissa.

## 5 Tutkimuksen toteutus

Tutkielman empiirinen tutkimus suoritetaan määrällisenä tutkimuksena ja tutkimusmenetelmänä käytetään simulointia. Tämä tarkoittaa todellisten olosuhteiden jäljittelemistä niin hyvin kuin mahdollista. Simuloimalla on mahdollista saada faktatietoa siitä, kuinka hyvin satelliittiverkot toimivat 5G-radorajapinnan käyttötarkoituksessa. Satelliittiverkkojen 5G-radorajapinnan määrittely on vielä kesken, joten simuloimalla voidaan saada tärkeää ja hyödyllistä tietoa satelliittiverkkojen todellisesta suorituskyvystä.

Tutkimus toteutettiin yhdessä Jyväskylässä toimivan Magister Solutions Oy:n kanssa hyödyntämällä heidän kehittämäänsä verkkosimulaattoria (*Jani Puttonen, Lauri Sormunen, Henrik Martikainen, Sami Rantanen, Janne Kurjenniemi, "A System Simulator for 5G Non-Terrestrial Network Evaluations", IEEE WoWMoM workshop on NTN in 6G Wireless, June 2021*), joka on kehitetty avoimella lähdekoodilla toimivan ns-3 -verkkosimulaattorin pohjalta. Tutkimuksessa simuloimalla kerätty aineisto kerättiin huhtikuun 2021 aikana, ja aineiston analysointi suoritettiin huhti-toukokuun vaihteessa.

### 5.1 Aineiston keruu

Tutkimuksessa hyödynnetty aineisto kerättiin simuloimalla satelliittiverkkojen verkkoliikennettä pakettitasolla 3GPP:n määrittelemissä kalibraatioskenaarioissa. Kuviossa 4 on esitetty kaikki 30 3GPP:n määrittelemää kalibraatioskenaariota. Skenaarioissa asetetaan tietyt skenaariolla ominaiset parametrisoinnit ja simuloidaan satelliittiverkon suorituskykyä näissä tilanteissa. Suorituskykytilastoihin lukeutuvat esimerkiksi verkon tiedonsiirtonopeus ja häiriösignaalien määrä.

### 5.2 Kalibraatioskenaariot

3GPP on määritellyt näistä 30:stä kalibraatioskenaariosta kahdeksan tärkeintä satelliittiverkkojen tutkimuksen ensimmäistä vaihetta varten. Tärkeimmät kalibraatioskenaariot ovat merkitty kuviossa 4 ilman tähteä, toisen prioriteetin tapaukset yhdellä tähdellä ja kolmannen

Case	Satellite orbit	Satellite parameter set	Central beam elevation	Terminal	Frequency Band	Frequency/Polarization Reuse
1	GEO	Set 1	45 deg	VSAT	Ka-band	Option 1
2	GEO	Set 1	45 deg	VSAT	Ka-band	Option 2
3*	GEO	Set 1	45 deg	VSAT	Ka-band	Option 3
4*	GEO	Set 1	45 deg	Handheld	S-band	Option 1
5*	GEO	Set 1	45 deg	Handheld	S-band	Option 2
6	LEO-600	Set 1	90 deg	VSAT	Ka-band	Option 1
7	LEO-600	Set 1	90 deg	VSAT	Ka-band	Option 2
8*	LEO-600	Set 1	90 deg	VSAT	Ka-band	Option 3
9	LEO-600	Set 1	90 deg	Handheld	S-band	Option 1
10	LEO-600	Set 1	90 deg	Handheld	S-band	Option 2
11*	LEO-1200	Set 1	90 deg	VSAT	Ka-band	Option 1
12*	LEO-1200	Set 1	90 deg	VSAT	Ka-band	Option 2
13*	LEO-1200	Set 1	90 deg	VSAT	Ka-band	Option 3
14	LEO-1200	Set 1	90 deg	Handheld	S-band	Option 1
15	LEO-1200	Set 1	90 deg	Handheld	S-band	Option 2
16**	GEO	Set 2	45 deg	VSAT	Ka-band	Option 1
17**	GEO	Set 2	45 deg	VSAT	Ka-band	Option 2
18**	GEO	Set 2	45 deg	VSAT	Ka-band	Option 3
19**	GEO	Set 2	45 deg	Handheld	S-band	Option 1
20**	GEO	Set 2	45 deg	Handheld	S-band	Option 2
21**	LEO-600	Set 2	90 deg	VSAT	Ka-band	Option 1
22**	LEO-600	Set 2	90 deg	VSAT	Ka-band	Option 2
23**	LEO-600	Set 2	90 deg	VSAT	Ka-band	Option 3
24**	LEO-600	Set 2	90 deg	Handheld	S-band	Option 1
25**	LEO-600	Set 2	90 deg	Handheld	S-band	Option 2
26**	LEO-1200	Set 2	90 deg	VSAT	Ka-band	Option 1
27**	LEO-1200	Set 2	90 deg	VSAT	Ka-band	Option 2
28**	LEO-1200	Set 2	90 deg	VSAT	Ka-band	Option 3
29**	LEO-1200	Set 2	90 deg	Handheld	S-band	Option 1
30**	LEO-1200	Set 2	90 deg	Handheld	S-band	Option 2
NOTE 1: no star = 1 <sup>st</sup> priority, * = second priority scenario, ** = third priority scenario						
NOTE 2: Only 1 <sup>st</sup> priority cases will be considered for calibration phase 1						

Kuvio 4. Kalibraatioskenaariot (3GPP TR 38.821, “Solutions for NR to support non terrestrial networks (NTN)”, V16.0.0 (2019-12).)

prioriteetin tapaukset kahdella tähdellä. Tutkimuksen koon rajaamiseksi aineiston keruussa keskitytään näihin kahdeksaan kalibraatioskenaarioon. Jokaista käytettyä kalibraatioskenaariota kohden täytyy löytää oikeat parametrisoinnit, joilla saadaan todennäköisemmin luotettavaa ja käyttökelpoista tietoa. Jotta suorituskykyä voitaisiin simuloida mahdollisimman todenmukaisesti, tulee jokaiselle kalibraatiotapaukselle löytää optimaalinen käyttäjälaitteen virranhallinnan arvo. Tämä tarkoittaa tasapainopistettä, jossa lähettimen suorituskyky on mahdollisimman korkea aiheuttamatta liikaa häiriösignaaleita. Kalibraatioskenaarioita varten simulaattorissa on lista yleisempiä parametreja, joilla voidaan simuloida todellisia tilanteita. Näiden parametrien lisäksi on olemassa yksittäisille skenaarioille olennaisia parametreja. Seuraavaksi käydään lävitse nämä yleisemmät parametrit, joiden jälkeen perehdytään skenaariokohtaiseen parametrisointiin.

Satellite orbit		GEO	LEO-1200	LEO-600
Satellite altitude		35786 km	1200 km	600 km
Satellite antenna pattern		Section 6.4.1 in [2]	Section 6.4.1 in [2]	Section 6.4.1 in [2]
Payload characteristics for DL transmissions				
Equivalent satellite antenna aperture (Note 1)	S-band (i.e. 2 GHz)	22 m	2 m	2 m
Satellite EIRP density		59 dBW/MHz	40 dBW/MHz	34 dBW/MHz
Satellite Tx max Gain		51 dBi	30 dBi	30 dBi
3dB beamwidth		0.4011 deg	4.4127 deg	4.4127 deg
Satellite beam diameter (Note 2)		250 km	90 km	50 km
Equivalent satellite antenna aperture (Note 1)	Ka-band (i.e. 20 GHz for DL)	5 m	0.5 m	0.5 m
Satellite EIRP density		40 dBW/MHz	10 dBW/MHz	4 dBW/MHz
Satellite Tx max Gain		58.5 dBi	38.5 dBi	38.5 dBi
3dB beamwidth		0.1765 deg	1.7647 deg	1.7647 deg
Satellite beam diameter (Note 2)		110 km	40 km	20 km
Payload characteristics for UL transmissions				
Equivalent satellite antenna aperture (Note 1)	S-band (i.e. 2 GHz)	22 m	2 m	2 m
G/T		19 dB K <sup>-1</sup>	1.1 dB K <sup>-1</sup>	1.1 dB K <sup>-1</sup>
Satellite Rx max Gain		51 dBi	30 dBi	30 dBi
Equivalent satellite antenna aperture (Note 1)	Ka-band (i.e. 30 GHz for UL)	3.33 m	0.33 m	0.33 m
G/T		28 dB K <sup>-1</sup>	13 dB K <sup>-1</sup>	13 dB K <sup>-1</sup>
Satellite RX max Gain		58.5 dBi	38.5 dBi	38.5 dBi
NOTE 1: This value is equivalent to the antenna diameter in Sec. 6.4.1 of [2].				
NOTE 2: This beam size refers to the Nadir pointing of the satellite				
NOTE 3: All these satellite parameters are applied per beam.				
NOTE 4: The EIRP density values are considered identical for all frequency re-use factor options.				
NOTE 5: The EIRP density values are provided assuming the satellite HPA is operated with a back-off of [5] dB.				

Kuvio 5. Kalibraatioskenaariossa käytetty yleinen parametriasetus 1

### 5.2.1 Yleiset parametrit

Kuviossa 4 on esitelty kalibraatioskenaariot ja niiden pääparametrit. Priorisoitujen kalibraatioskenaarioiden osalta käytössä on ainoastaan yleinen parametriasetus 1, joka on esitelty kuvassa 5. Yleiset parametrit eroavat hieman S-kaistan ja Ka-kaistan skenaarioiden sekä latausyhteyden ja lähetyisyhteyden välillä. Yleiset parametrit sisältävät satelliitin antennin koon, antennin maksimaalisen säteilytehon (*EIRP*, *Effective Isotropically Radiated Power*), satelliitin lähetyksen vahvistuksen (Tx max Gain) sekä keilan koon. Parametrit on esitelty tarkemmin spesifikaatiossa *3GPP TR 38.821*, “*Solutions for NR to support non terrestrial networks (NTN)*”, *V16.0.0 (2019-12)*. Taulukossa 6 on esitelty simulaattorissa P0-optimointia varten käytetty yleinen sekä skenaariokohtainen parametrilista. Seuraavaksi lyhyesti esiteltynä näiden parametrien tarkoitus. UeNumPergNb tarkoittaa yleisesti samanaikaisten käyttäjien määrää tukiasemaa kohti, mutta simulaattorin tapauksessa se tarkoittaa samanaikaisten käyttäjien määrää yhtä keilaa kohti. Vierekkäin sijaitsevat keilat aiheuttavat toisilleen häiriötä. WrapAroundInterference-asetuksella voidaan määrittellä onko ympäröivien keilojen aiheuttama häiriö voimassa ja wrapAroundUsersPerBeam kertoo ympäröivillä

keiloilla sijaitsevien käyttäjien määrän. ChannelCondition kertoo miten kanavan tila määritetään, asetuksen ollessa "DYNAMIC-tila määritetään dynaamisesti esimerkiksi käyttäjän sijainnin perusteella. UplinkEnabled-asetus määrittää, että pystyykö käyttäjälaite lähettämään dataa satelliitin suuntaan. TrafficType-asetus kertoo, millaista applikaatiomallia käytetään. Tässä tapauksessa käytetty FULL\_BUFFER-tila tarkoittaa, että dataa on aina lähetettävissä. NoBeams-asetus kertoo käytössä olevien keilojen määrän. UIPowerControl-asetuksen avulla voidaan määrittää käytetäänkö virranhallinnan oletusasetuksia lähetystehon säätämiseksi vai käytetäänkö jotain tiettyä arvoa lähetystehon optimointiin. TargetBler-asetus kertoo tavoitellun virheprosentin ensimmäiselle HARQ-lähetykselle. SatelliteMobility ja ueMobility-asetukset määrittävät, liikkuvatko satelliitit ja käyttäjät suhteessa toisiinsa. MaxHarqRetransCount, numHarqProcess ja dynamiBlindHarqEnabled -asetuksia käytetään hienosäätämään simuloinnissa käytettyjä fyysisen tason uudelleenlähetystyksiä. MaxHarqRetransCount viittaa siihen, kuinka monta kertaa maksimissaan lähetetään sama paketti, jos se ei mene läpi. Käyttäjälaiteella voi olla käynnissä samanaikaisesti useampi toisistaan riippumaton HARQ-prosessi, jolloin se pystyy lähettämään paketteja vaikka ei olisi saanut kuittausta aiemmista paketeista. Tämä parametri määrittää näiden prosessien määrän. Blind HARQ tarkoittaa, että sama paketti lähetetään useamman kerran ilman aiempien lähetysten kuittauksia, dynaamisesti asetettuna tämä tarkoittaa, että lähetettyjen pakettien määrä säädetään käyttäjäkohtaisesti tukiaseman toimesta. PfSchedulerEnabled-asetus tarkoittaa, että käyttäjille jaetaan paikkoja yhteyksissä tavoitteena maksimoida siirretyn datan määrä sekä taa-ta yhteyden reilu jakaantuminen käyttäjien välillä. Toinen vaihtoehto olisi jakaa jokaiselle yhteydelle tasaisesti yhtä paljon paikkoja, jolloin suorituskyky ei välttämättä ole yhtä hyvä. FdSchedulerEnabled-asetus määrittää, ajoitetaanko käyttäjiä samoihin resursseihin, mutta eri taajuuksilla. NrUePhy::alpha-asetus määrittää virranhallinnan optimoimiseen käytetyn lähetysvaimennuksen alfa-arvon. Seuraavaksi käydään läpi kalibraatioskenaarioiden optimaalisen virranhallinnan arvon määrittäminen.

### **5.2.2 GEO-satelliittien kalibraatioskenaariot**

Kalibraatioskenaariot 1 ja 2 ovat priorisoiduista kalibraatioskenaarioista ainoat, joissa simuloidaan GEO-satelliitteja. Molemmat tapaukset myös käyttävät samaa vastaanottajan laitete-

--ueNumPergNb	10										
--wrapAroundInterference	TRUE										
--wrapAroundUsersPerBeam	1										
--channelCondition	DYNAMIC										
--uplinkEnabled	TRUE										
--trafficType	FULL_BUFFER										
--noBeams	7										
--ulPowerControl	TRUE										
--targetBlor	0.10										
--satelliteMobility	DOPPLER										
--ueMobility	DOPPLER										
--channelCondition	DYNAMIC										
--maxHarqRetransCount	3										
--numHarqProcess	16										
--dynamBlindHarqEnabled	FALSE										
--pfSchedulerEnabled	FALSE										
--fdSchedulerEnabled	TRUE										
--ns3::NrUePhy::alpha	0.6										
Number of drops	10										
Calibration case	--calibrationCase	--wrapAroundTiers	--maxNumUesScheduled	--bandwidth_Hz	--cqiCbsSymbols	--simTime	--warmUpTime	--harqEnabled	--ns3::NrUePhy::P0		
1	1	1	1	6	30	13	5	3.5	FALSE		-43
2	2	2	2	2	30	13	5	3.5	FALSE		-43
6	6	1	1	6	30	13	3	1	TRUE	-45,-50,-55,-60,-65	
7	7	2	2	2	30	13	3	1	TRUE	-45,-50,-55,-60,-65	
9	9	1	1	10	30	1	3	1	TRUE	-45,-50,-55,-60,-65	
10	10	2	2	10	30	1	3	1	TRUE	-45,-50,-55,-60,-65	
14	14	1	1	10	30	1	3	1	TRUE	-45,-50,-55,-60,-65	
15	15	2	2	10	30	1	3	1	TRUE	-45,-50,-55,-60,-65	

Kuvio 6. Kalibraatioskenaarioiden virranhallinnan P0-arvon optimoimiseen käytetty parametrilista

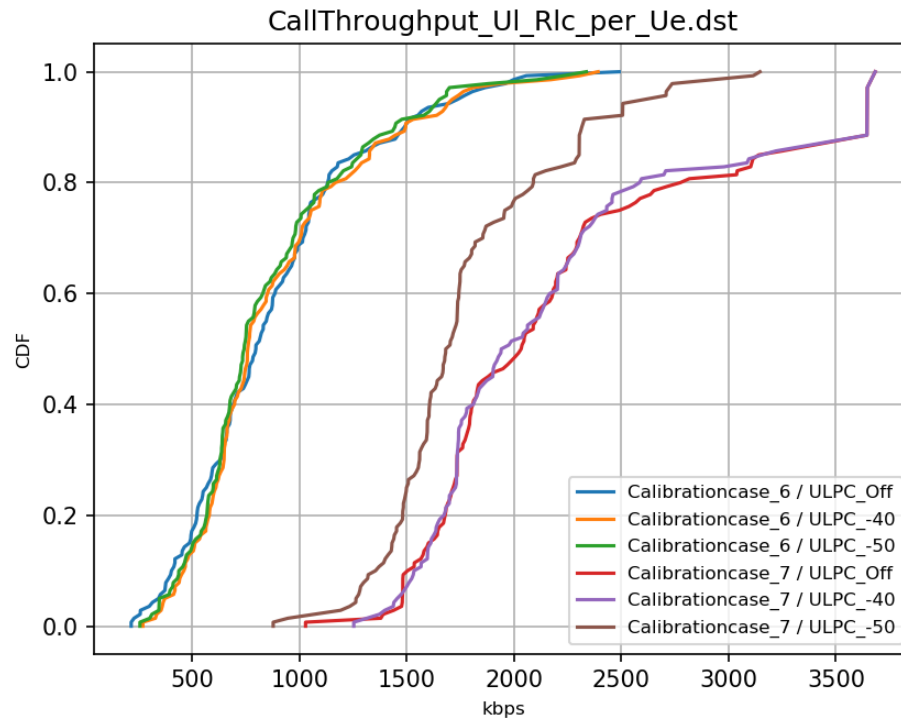
ta, eli lautasantennia. Skenaariot hyödyntävät myös samaa kaistanleveyttä, joka tässä tapauksessa on 26.5 ja 40 GHz välillä sijaitseva Ka-kaista. Kalibraatiotapausten parametrusoinnit kuitenkin eroavat hieman. Kalibraatioskenaariossa 1 aikataulutettujen käyttäjien määrä on isompi, mutta ympäröiviä, häiriötä aiheuttavia keiloja on yksi taso vähemmän kuin skenaariossa 2. Optimaalista virranhallinnan arvoa P0 ei ole tässä simulaatiossa varioitu samoin kuten muiden kalibraatioskenaarioiden tapauksessa, vaan P0 arvo saatiin Magister Solutions Oy:n jo valmiksi tekemistä simuloinneista.

### 5.2.3 LEO-satelliittien kalibraatioskenaariot

Kalibraatioskenaarioissa 6, 7, 9, 10, 14 ja 16 simuloidaan LEO-satelliittien suorituskykyä eri taajuusalueilla, käyttäjälaiteilla sekä korkeuksilla.

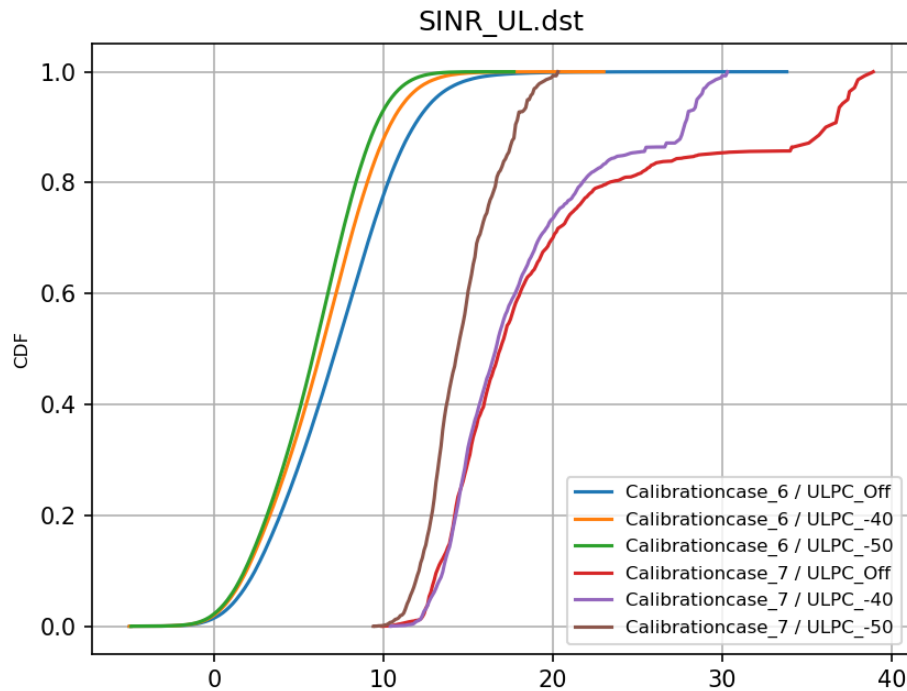
### 5.2.4 Ka-kaistan kalibraatioskenaariot

Kalibraatioskenaariot 6 ja 7 sijoittuvat Ka-kaistalle, kuten kalibraatioskenaariot 1 ja 2. Näissäkin kalibraatioskenaarioissa erona on lähinnä häiriötä aiheuttavien keilojen ja aikataulutettujen käyttäjien määrä. Kuvaajasta 7 voidaan nähdä, että virran lisääminen ei erityisesti paranna yhteyden nopeutta. Kuviosta 8 taas nähdään, että SINR-arvo (*Signal Interference and*



Kuvio 7. Kalibraatioskenaarioiden 6 ja 7 lähetyksenopeus per käyttäjälaite (3GPP TR 38.821, “Solutions for NR to support non terrestrial networks (NTN)”, V16.0.0 (2019-12).)

Noise Ratio) on matalampi korkeammalla lähetystekholla, eli interferenssiä esiintyy enemmän korkeammalla lähetystekholla. Optimaalinen lähetystekhon virranhallinnan arvo P0 näyttäisi olevan noin -43 dBm.



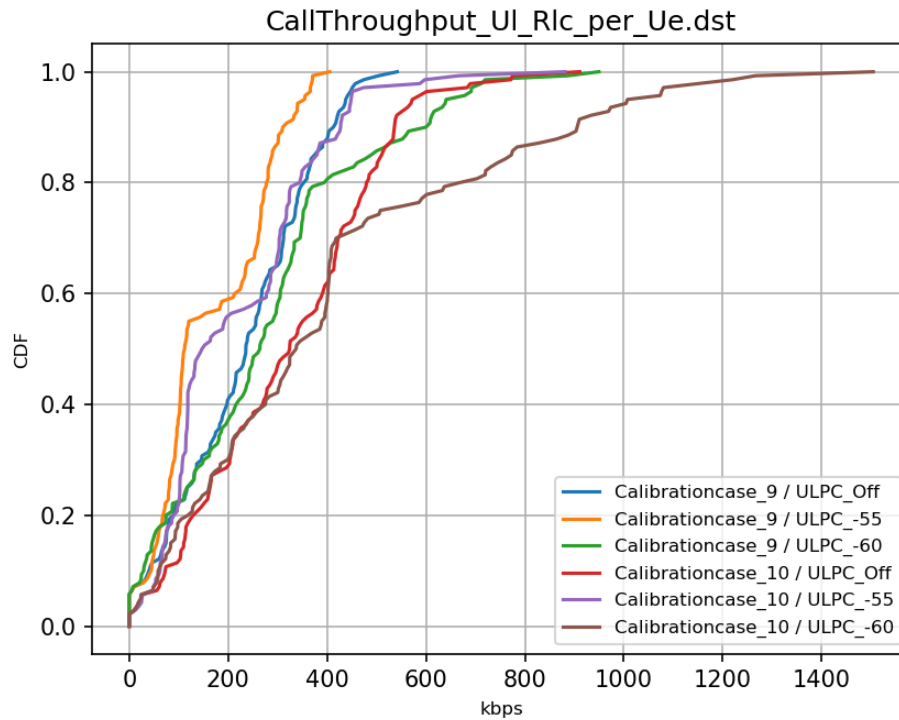
Kuvio 8. Kalibraatioskenaarioiden 6 ja 7 interferenssin ja häiriösignaalien suhde

### 5.2.5 S-kaistan kalibraatioskenaariot

Kalibraatioskenaariot 9, 10, 14 ja 15 ovat LEO-satelliittien kalibraatioskenaarioita, jotka sijoittuvat S-kaistalle. S-kaista sijaitsee taajuuksilla 2 - 4 GHz.

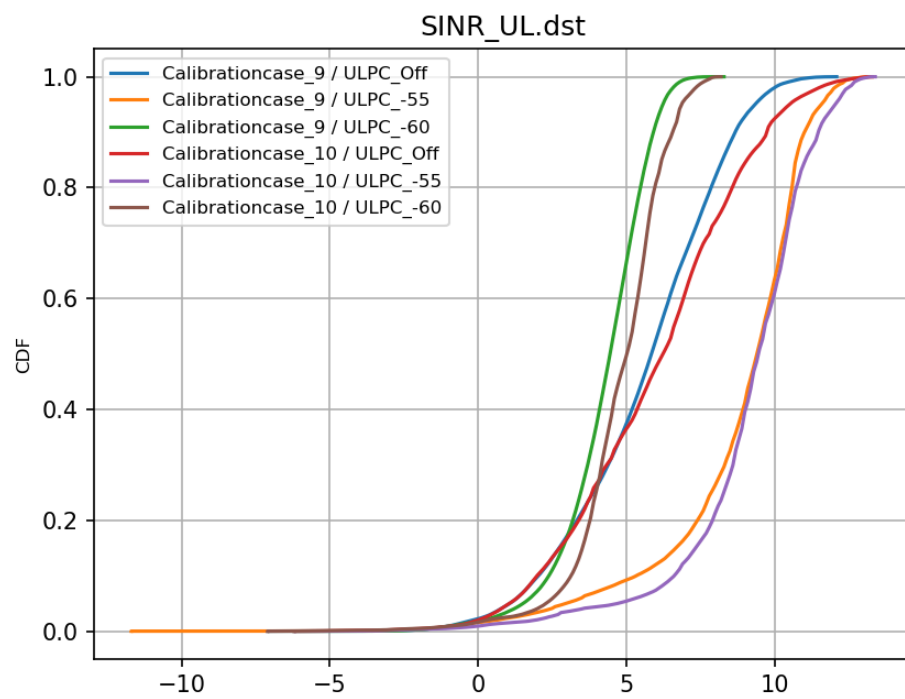
Kalibraatiotapauksilla 9 ja 10 tukiasemana toimii 600 kilometrin korkeudella sijaitseva LEO-satelliitti ja molemmissa skenaarioissa aikataulutettuja käyttäjiä on 10. Aiemmista kalibraatioskenaarioista poiketen käyttäjän laitteena toimii ympärisäteilevä antenni. Kuvaajasta 9 voidaan nähdä selkeästi, että lisäämällä lähetysteho saadaan merkittäviä parannuksia lähetysnopeuteen, eli virranhallinnalla on suuri merkitys suorituskykyyn. Kuvaajasta 10 taas nähdään, että SINR-arvo on melko hyvä riippumatta lähetystehosta. Näin ollen suurempi lähetysteho on parempi. Virranhallinnan  $p_0$  arvoksi valitaan siis -60 dBm.



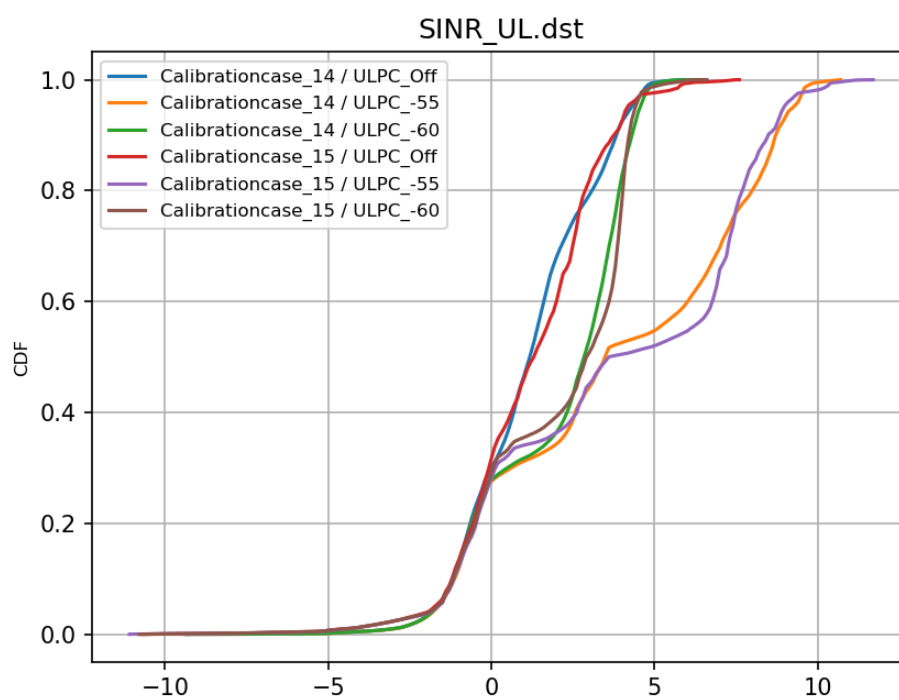


Kuvio 9. Kalibraatioskenaarioiden 9 ja 10 interferenssin ja häiriösignaalien suhde

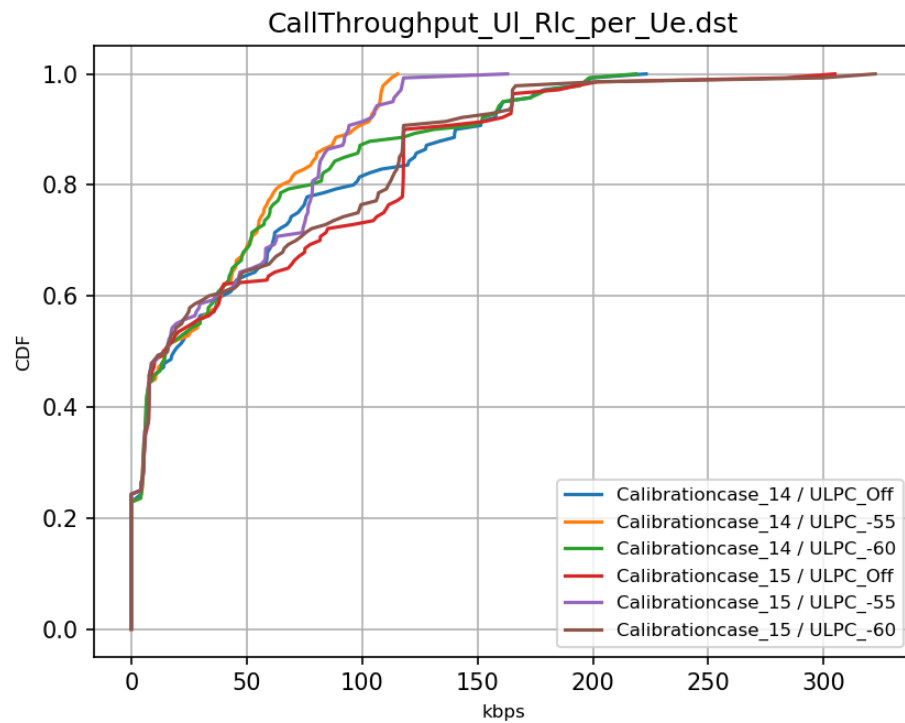
Kalibraatioskenaariot 14 ja 15 käyttävät hieman aiempia LEO-skenaarioita korkeampaa, 1200 kilometrin korkeudessa sijaitsevaa tukiasemaa. Käyttäjälaitteena on tässäkin skenaariossa ympärisäteilevä antenni. Kuvaajasta 12 on nähtävissä, että matalampi lähetysteho heikentää merkittävästi lähetysnopeutta, eli käyttäjälaitteet ovat lähetystehorajoitteisia. Kuvaajasta 11 huomataan, että erot SINR-arvoissa jäävät melko pieniksi ja yleisesti SINR-arvo on melko huono riippumatta lähetystehosta. Näin ollen valitaan korkeampi lähetystehon virranhallinnan arvo. Näissäkin tapauksissa p0-arvoksi valikoituu -60 dBm.



Kuvio 10. Kalibraatioskenaarioiden 9 ja 10 lähetyksenopeus per käyttäjälaite



Kuvio 11. Kalibraatioskenaarioiden 14 ja 15 interferenssin ja häiriösignaalien suhde



Kuvio 12. Kalibraatioskenaarioiden 14 ja 15 lähetysnopeus per käyttäjälaite

--channelCondition	DYNAMIC														
--uplinkEnabled	TRUE														
--trafficType	FULL_BUFFER														
--noBeams	7														
--ulPowerControl	TRUE														
--targetBler	0,10														
--sateeliteMobility	DOPPLER														
--ueMobility	DOPPLER														
--channelCondition	DYNAMIC														
--maxHarqRetransCount	3														
--numHarqProcess	16														
--dynamicBlindHarqEnabled	FALSE														
--pfSchedulerEnabled	FALSE														
--fdSchedulerEnabled	TRUE														
--ns3::NrUePhy::alpha	0,6														
Number of drops	10														
Calibration case	--calibrationCase	--wrapAroundTiers	--maxNumUesScheduled	--bandwidth_Hz	--cqiCbsSymbols	--simTime	--warmUpTime	--harqEnabled	--ns3::NrUePhy::P0						
	1	1	1	6	30	13	5	3,5	FALSE						-43
	2	2	2	2	30	13	5	3,5	FALSE						-43
	6	6	1	6	30	13	3	1	TRUE						-43
	7	7	2	2	30	13	3	1	TRUE						-43
	9	9	1	10	30	1	3	1	TRUE						-60
	10	10	2	10	30	1	3	1	TRUE						-60
	14	14	1	10	30	1	3	1	TRUE						-60
	15	15	2	10	30	1	3	1	TRUE						-60

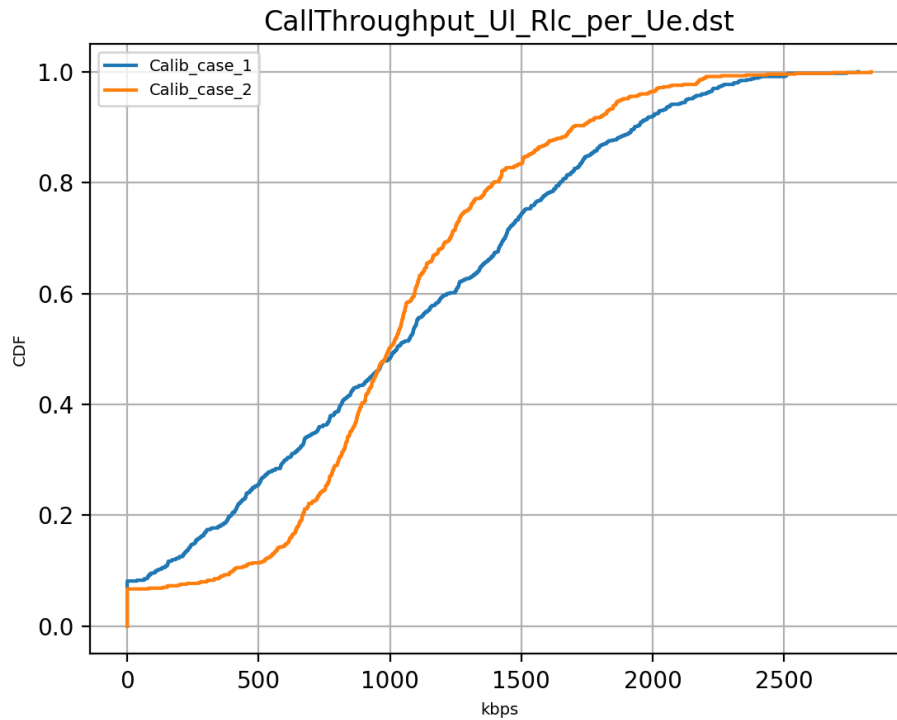
Kuvio 13. Simulaatioiden ajossa käytetty lopullinen parametrilista

## 6 Analyysi

Edellisessä luvussa käytiin läpi eri parametrisoinnit kuten virranhallinnan optimointi. Kuvaajassa 13 on esitelty lopullisten tulosten saamiseksi käytetty parametrisointi. Tässä luvussa esitellään ja analysoidaan kerättyjä tutkimustuloksia. Tulokset esitetään skenaariokohtaisesti, pyrkien selittämään saatuja tuloksia ja vertaamaan niitä referenssituloksiin siltä osin kuin mahdollista. Kalibraatiotuloksista arvioidaan verkon nopeutta (*throughput*), interferenssiä (SINR) sekä kytkentävaimennusta (*coupling loss*). Saadut tulokset vaihtelevat merkittävästi riippuen käytetyistä parametreista, joten tulokset eivät välttämättä ole verrannollisia spesifikaatiossa esitettyihin tuloksiin. Tämä johtuu siitä, että referenssituloksien suorittaneiden yritysten käyttämistä parametreista ei ole tietoa. Tuloksista kytkentävaimennus on kuitenkin hyvin pitkälti parametrisoinnista riippumaton ja siten verrattavissa referenssituloksiin melko luotettavasti.

### 6.1 GEO-satelliittien kalibraatioskenaariot

Kuvaajissa 15 ja 14 on esitetty simulaatioissa saatu yhteyden nopeus GEO-satelliittien kalibraatioskenaaroiden lataus- ja lähetyshyteydelle, vastaavassa järjestyksessä. Latausyhteyden kuvaajasta voidaan nähdä selkeästi, että kalibraatioskenaariossa 1 on huomattavasti suurempi huippunopeus ja nopeudet ovat yleisestikin hieman korkeammat. Lähetyshyteyden osalta ero ei ole kovinkaan merkittävä, eikä huippunopeudessa ole suurta eroa. Vaikka nopeudet ovatkin yleisesti pienempiä kalibraatioskenaario 2:n osalta, siinä hajonta on pienempää ja todella huonon yhteyden saavia käyttäjiä on vähemmän kuin skenaariossa 1. Tätä selittää skenaarioissa käytetty taajuuksien jako -asetus (*Frequency reuse*). Skenaariossa 1 on käytetty vaihtoehtoa 1, mikä tarkoittaa, että skenaariossa kaikilla keiloilla on käytössä sama taajuusalue. Skenaariossa 2 taajuusalue on sen sijaan jaettu osiin, jolloin yksittäisellä keilalla on vähemmän kaistaa käytössä, mutta kaista ei ole jaettu viereisen keilan kanssa. Tästä johtuen vaihtoehtoa 1 käyttämällä nopeudet ovat tyypillisesti korkeammat, mutta myös häiriötä esiintyy enemmän. Latausyhteyden osalta keskiarvoksi signaalin suhdetta häiriösignaaleihin kuvaavalle SINR-arvolle saatiin kalibraatioskenaariossa 1 0,92 ja kalibraatioskenaariossa 2 5,92. Lähetyshyteyden osalta vastaavat luvut olivat 5,94 ja 11,81. Kalibraatioskenaariot



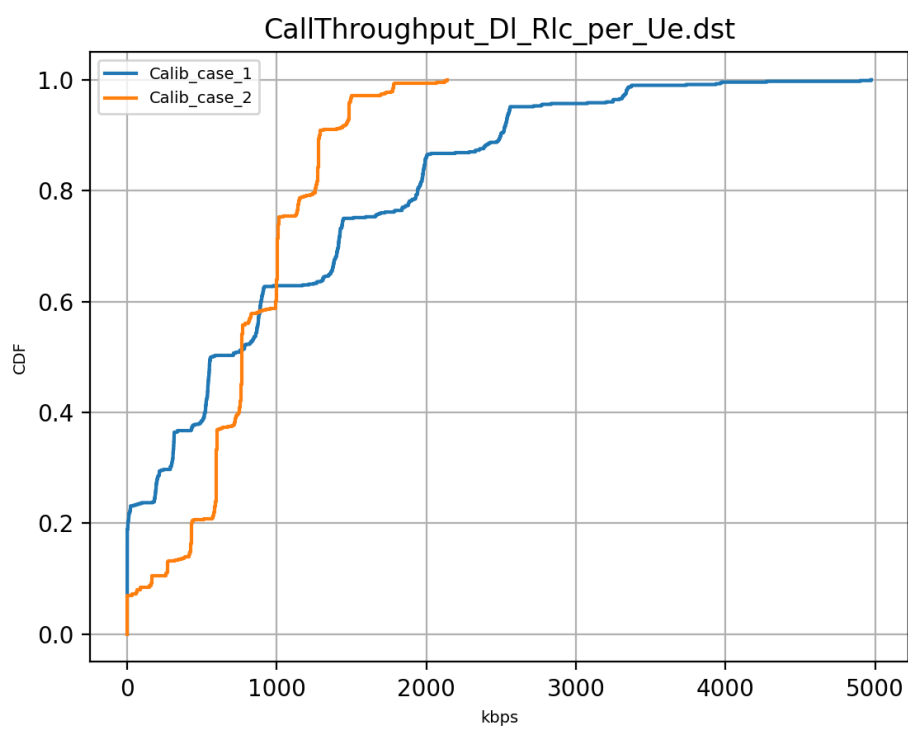
Kuvio 14. GEO-satelliittien kalibraatioskenaarioiden lähetysnopeus

SINR-arvo on merkittävästi parempi kuin kalibraatioskenaariossa 1, mikä kertoo skenaariossa 1 esiintyvän huomattavasti enemmän häiriötä.

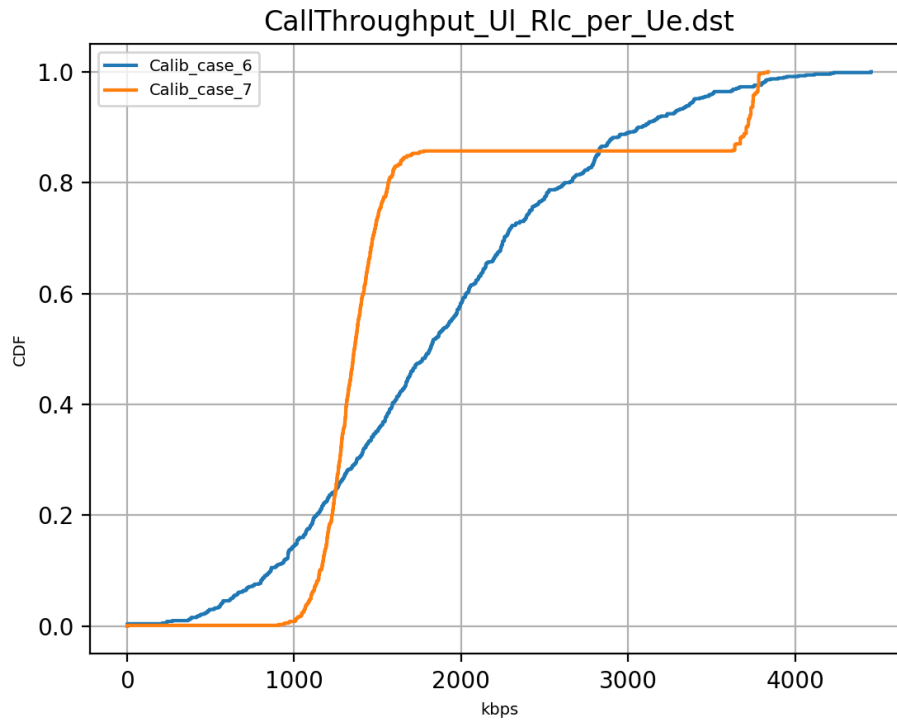
Kuvaajista on tärkeää huomioida myös se, että on olemassa käyttäjiä, joilla yhteyden nopeus on 0 kbps, eli yhteyttä ei ole lainkaan. Tämä liittyy todennäköisesti dynaamiseen kaistan tilaan, eli siihen onko tukiasemalle suora yhteys käyttäjään vai onko edessä esteitä.

## 6.2 LEO-satelliittien kalibraatioskenaariot

Seuraavaksi käydään läpi LEO-satelliittien kalibraatioskenaariot jaoteltuna käytetyn kaistan mukaan. Ka-kaistaa käyttävät skenaariot 6 ja 7 ja S-kaistaa käyttävät puolestaan skenaariot 9, 10, 14 ja 15.



Kuvio 15. GEO-satelliittien kalibraatioskenaarioiden latausnopeus



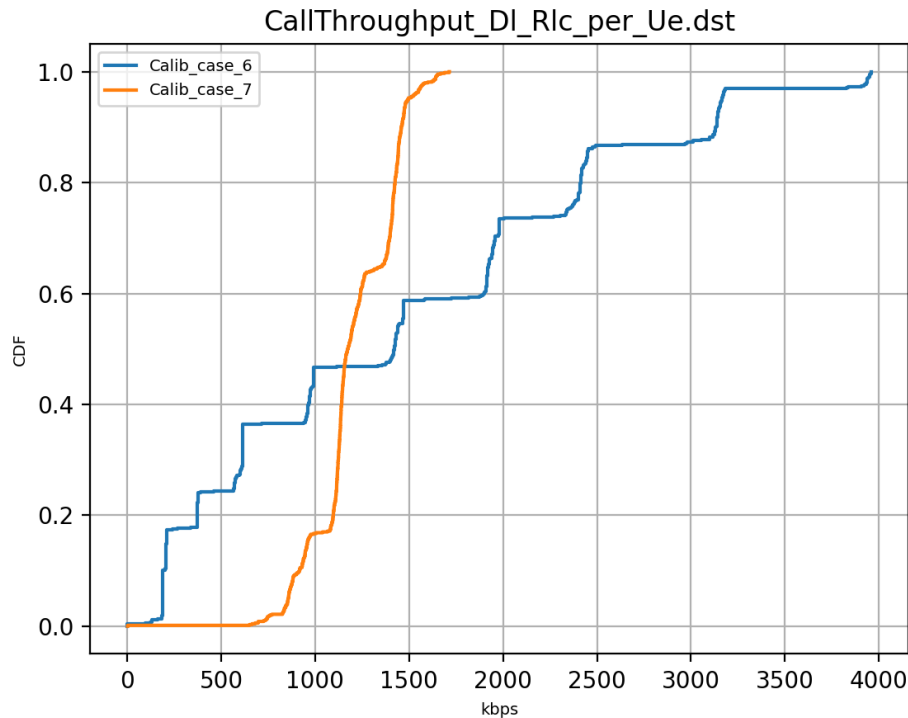
Kuvio 16. LEO-satelliittien kalibraatioskenaarioiden lähetyksenopeus Ka-kaistalla

### 6.2.1 Ka-kaistan kalibraatioskenaariot

Lähetyssyhteyden osalta LEO-satelliittien Ka-kaistan suorituskyky näyttäisi olevan merkittävästi parempi kuin GEO-satelliiteilla, kuten nähdään kuvaajasta 16. Tätä selittänee se, että etäisyys LEO-satelliittien ja käyttäjälaitteiden välillä on huomattavasti pienempi kuin GEO-satelliittien ja käyttäjälaitteiden välillä. Varsinkin kannettavien käyttäjälaitteiden osalta heikko lähetysteho selittää heikentynyttä lähetyssyhteyden nopeutta. Skenaarioiden 6 ja 7 osalta on myös nähtävissä sama ilmiö, joka nähtiin GEO-satelliittien skenaarioiden osalta, eli taajuusalueita jakamalla saadaan vähemmän todella heikkoja nopeuksia, mutta myös yleisesti huonommat nopeudet. Käyttämällä koko taajuusalueita voidaan saada jopa tuplasti suurempi latausnopeus, kuten kuvaajasta 17 on nähtävissä.

SINR-arvoksi saatiin lataussyhteydelle skenaariossa 6 3,67 ja skenaariossa 7 10,00 sekä lähetyssyhteydessä vastaavasti 6,62 ja 18,04. LEO-satelliittien Ka-kaistan skenaarioidenkin osalta pitää siis paikkansa, että jakamalla taajuusalueita voidaan vähentää häiriötä merkittävästi.



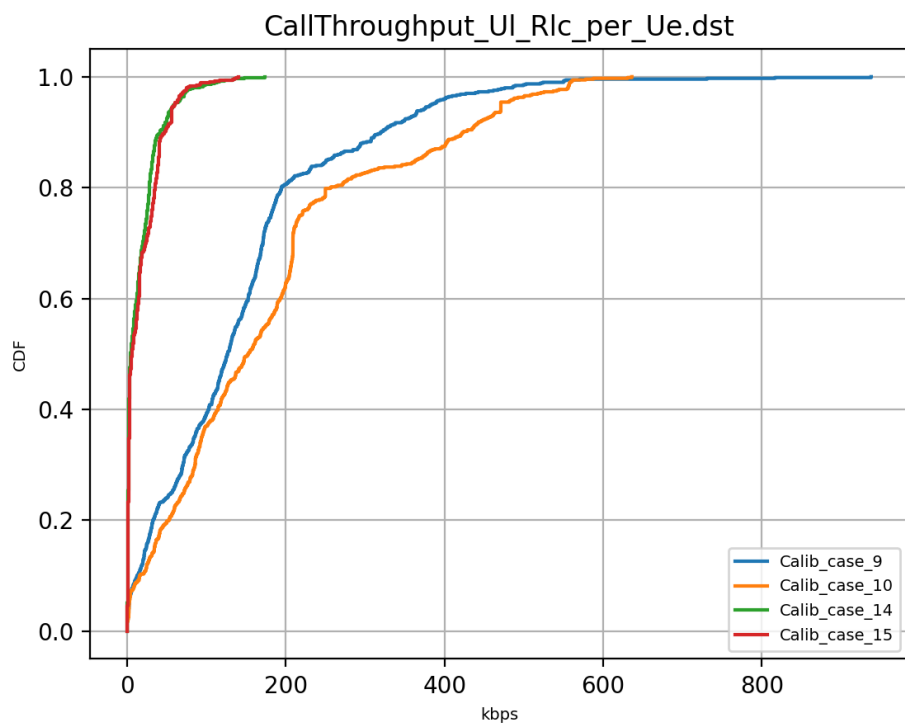


Kuvio 17. LEO-satelliittien kalibraatioskenaarioiden latausnopeus Ka-kaistalla

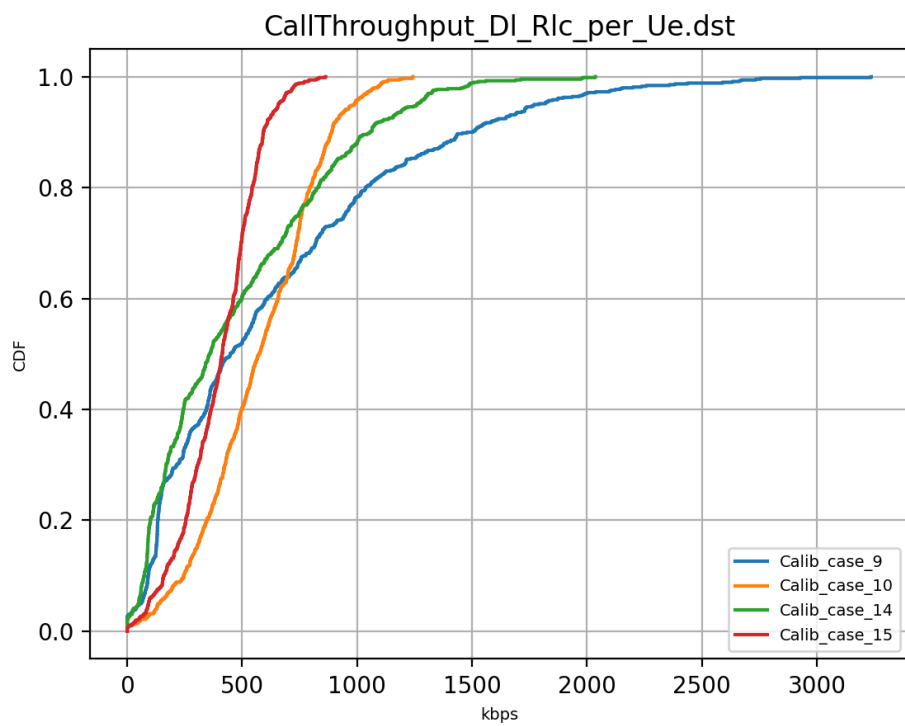
### 6.2.2 S-kaistan kalibraatioskenaariot

S-kaistan kalibraatioskenaarioiden kohdalla suorituskyky näyttäisi olevan merkittävästi huonompi kuin Ka-kaistan kalibraatioskenaarioissa. Tätä eroa selittänee terminaalissa käytetty antenni. Käytössä olevan taajuusalueen lisäksi Ka-kaistan kalibraatioskenaarioissa käyttäjälaitteena on lautasantenni, kun taas S-kaistan skenaarioissa käytetään ympärisäteilevää antennia. Tämä vaikuttaa erityisesti lähetyshyönteiden nopeuteen.

Nopeuserot käyttämällä taajuusalueen jakamista eivät ole S-kaistan kalibraatioskenaarioiden kohdalla yhtä merkittävät kuin muissa skenaarioissa. Kuitenkin latausyhteyden osalta on mahdollista saada merkittävästi korkeampia huippunopeuksia käyttämällä koko kaistaa, kuten nähdään kuvaajasta 19. Lähetyshyönteiden osalta kuviosta 18 voidaan nähdä, että nopeudet jäävät melko huonoiksi suurimmalla osalla käyttäjistä. Parhaimmillaankin lähetyshyönteiden nopeudet ovat huomattavasti heikompia verrattuna Ka-kaistan kalibraatioskenaarioiden nopeuksiin. SINR-arvossa ei ollut merkittäviä eroja, mutta kuitenkin korkeammat SINR-arvot



Kuvio 18. LEO-satelliittien kalibraatioskenaarioiden lähetysopeus S-kaistalla



Kuvio 19. LEO-satelliittien kalibraatioskenaarioiden latausnopeus S-kaistalla

saatiin käyttämällä taajuusalueen jakamista. Tässäkin tapauksessa siis häiriötä esiintyi vähemmän kun käytössä oleva taajuusalue jaettiin osiin.

### 6.2.3 Kytkevävaimennus

Kytkevävaimennus (Coupling loss) kertoo, kuinka paljon yhteys voi heikentyä ollakseen vielä toimintakelpoinen. Kytkevävaimennusta käytetään mittayksikkönä langattomien teknologioiden kantamalle. Seuraavaksi verrataan kalibraatioskenaarioiden simulaatioissa havaittua kytkevävaimennusta spesifikaatiosta löytyviin vertailuarvoihin, jotka ovat keskiarvoja muiden yritysten tuottamista tuloksista.

Oheisissa taulukoissa on esitelty spesifikaatiosta saadut vertailuarvot kytkevävaimennukselle sekä simulaatioista saadut tulokset. 5-persentiilin, eli huonoimmalla 5%:lla käyttäjistä, kytkevävaimennus on jokaisen kalibraatioskenaarion kohdalla vastaava ellei jopa hieman korkeampi kuin referenssiarvo. 50-persentiilin kohdalla saadut tulokset ovat myös vastaavat. Isoin ero nähdään 95-persentiilin tuloksissa, joiden kohdalla saadut tulokset ovat jopa puolet korkeammat kuin referenssiarvot. Näin ollen simulaattorista saadut tulokset ovat kytkevävaimennuksen osalta vastaavia elleivät jopa parempia verrattuna vertailuarvoihin. Tuloksien mahdollista eroavaisuutta vertailuarvoihin selittävät seuraavat asiat: simulaatiot ovat suoritettu eri toteutusta käytävillä simulaattoreilla, kaikki yritysten käyttämät parametrisoinnit eivät ole yleisesti tiedossa ja kytkevävaimennuksen määritelmä ei ole täysin yksiselitteinen.

	Vertailuarvot			Simulaatiotulokset		
	5%	50%	95%	5%	50%	95%
SC1	109.3	113.6	117.9	110.3	115.2	160.2
SC2	109.2	113.6	118.0	110.1	115.2	160.2
SC6	96.2	97.5	98.9	97.5	99.7	101.9
SC7	96.2	97.5	98.9	97.4	99.7	102.0
SC9	123.7	125.3	127.0	125.3	129.3	136.3
SC10	123.7	125.4	127.0	125.1	129.4	136.5
SC14	129.8	131.3	133.0	130.8	135.0	142.1
SC15	129.8	131.4	133.0	130.9	134.9	142.0

Spesifikaation 38.821 referenssiarvot kalibraatioskenaarioiden latausyhteyden kytkentävaimennukselle verrattuna simulaatiotuloksiin

	Vertailuarvot			Simulaatiotulokset		
	5%	50%	95%	5%	50%	95%
SC1	109.2	113.5	117.8	113.6	118.8	169.7
SC2	109.2	113.5	117.8	113.7	118.6	166.0
SC6	96.1	97.4	98.8	101.1	103.2	105.7
SC7	96.1	97.4	98.8	101.1	103.2	105.5
SC9	123.7	125.3	127.1	125.3	129.3	136.3
SC10	123.7	125.4	127.1	125.1	129.4	136.5
SC14	129.7	131.4	133.1	130.8	135.0	142.1
SC15	129.7	131.4	133.1	130.9	134.9	142.0

Spesifikaation 38.821 referenssiarvot kalibraatioskenaarioiden lähetysyhteyden kytkentävaimennukselle verrattuna simulaatiotuloksiin

## 7 Johtopäätökset

Tutkielmassa käytiin läpi 5G:n ja satelliittiverkkojen kannalta olennaiset teknologiat, niiden haasteet sekä miten nämä teknologiat yhdessä pyrkivät ratkaisemaan tulevaisuuden tiedonsiirto-ongelmia. Tutkimusosuudessa simuloitiin satelliittiverkkojen suorituskykyä 5G-radorajapinnassa. Simulaattorista saatujen tuloksien perusteella voidaan todeta, että satelliittiverkot kyllä toimivat 5G-radorajapinnassa kunhan satelliittiverkkojen käyttämisen mahdollistavat muutokset on tehty. Yhteyden toimivuus kuitenkin riippuu monista tekijöistä. GEO-satelliittien tuloksien kohdalla huomattiin, että osa käyttäjistä ei saanut yhteyttä lainkaan todennäköisesti johtuen esteistä. Tämän yhteysongelman lisäksi GEO-satelliittien heikkous on merkittävästi suurempi viive verrattuna LEO-satelliitteihin. Näin ollen satelliittiverkon toimivuuteen vaikuttavat merkittävästi käytössä olevat lähettimet sekä tukiasematyypit. Esimerkiksi satelliitit toimivat parhaiten kun tavoitellaan laajempaa kattavuutta, mutta UAV voi olla tehokkaampi tukiasema jos yhteys halutaan tarjota mahdollisimman tehokkaana kohdistetulle alueelle hetkellisesti. Käyttämällä tilanteeseen sopivia tukiasemia voidaan tarjota tilanteeseen sopiva yhteys. Oikeanlaisten tukiasemien lisäksi toimivuuteen vaikuttavat itse satelliittiverkon toteutus, eli esimerkiksi miten käytössä olevat taajuudet jaetaan ja miten keilojen reunoilla sijaitsevat käyttäjät huomioidaan. Simulaation tuloksista kävi ilmi, että jakamalla taajuusalue osiin, voidaan vähentää toisista keiloista aiheutuvia häiriöitä yhteydelle. Tämä on erityisen tärkeää käyttäjille, jotka sijaitsevat keilojen reunoilla, sillä siellä esiintyy erityisen paljon häiriötä toisten keilojen käyttäjiltä. Käytettävissä olevan kaistan jakaminen osiin ei kuitenkaan ole täysin ongelmatonta, kuten tulokset osoittivat. Taajuusalueen jakaminen on kuitenkin hyvin oleellinen tekniikka häiriön vähentämiseksi. Kenties taajuusalue pitäisi jakaa dynaamisesti, eikä staattisesti, jolloin voitaisiin käyttää mahdollisimman paljon kaistaa aiheuttamatta liikaa häiriötä toisille käyttäjille.

## Lähteet

3GPP TR 38.821, “Solutions for NR to support non terrestrial networks (NTN)”, V16.0.0 (2019-12). [https://www.3gpp.org/ftp//Specs/archive/38\\_series/38.821/38821-g00.zip](https://www.3gpp.org/ftp//Specs/archive/38_series/38.821/38821-g00.zip). Accessed: 2021-03.

3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Study on Scenarios and Requirements for Next Generation Access Technologies; (Release 14). [https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38\\_series/38.913/38913-100.zip](https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38_series/38.913/38913-100.zip). Accessed: 2021-03.

Andrews, J. G., S. Buzzi, W. Choi, S. V. Hanly, A. Lozano, A. C. K. Soong ja J. C. Zhang. 2014. “What Will 5G Be?” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 32 (6): 1065–1082. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2014.2328098>.

Chen, Shanzhi, ja Jian Zhao. 2014. “The requirements, challenges, and technologies for 5G of terrestrial mobile telecommunication”. *IEEE communications magazine* 52 (5): 36–43.

Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2017–2022 White Paper. <https://s3.amazonaws.com/media.mediapost.com/uploads/CiscoForecast.pdf>. Accessed: 2021-04-10.

Ericsson Mobility Report 2020. <https://www.ericsson.com/4adc87/assets/local/mobility-report/documents/2020/november-2020-ericsson-mobility-report.pdf>. Accessed: 2021-03-02.

Erman, Jeffrey, Alexandre Gerber, K. K. Ramadrishnan, Subhabrata Sen ja Oliver Spatscheck. 2011. “Over the Top Video: The Gorilla in Cellular Networks”. Teoksessa *Proceedings of the 2011 ACM SIGCOMM Conference on Internet Measurement Conference*, 127–136. IMC '11. Berlin, Germany: Association for Computing Machinery. ISBN: 9781450310130. <https://doi.org/10.1145/2068816.2068829>. <https://doi-org.ezproxy.jyu.fi/10.1145/2068816.2068829>.

- Evans, B. G. 2014. "The role of satellites in 5G". *Teoksessa 2014 7th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and the 13th Signal Processing for Space Communications Workshop (ASMS/SPSC)*, 197–202. <https://doi.org/10.1109/ASMS-SPSC.2014.6934544>.
- Ghosh, A., A. Maeder, M. Baker ja D. Chandramouli. 2019. "5G Evolution: A View on 5G Cellular Technology Beyond 3GPP Release 15". *IEEE Access* 7:127639–127651. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2939938>.
- Giambene, Giovanni, Sastri Kota ja Prashant Pillai. 2018. "Satellite-5G integration: A network perspective". *IEEE Network* 32 (5): 25–31.
- Giordani, Marco, ja Michele Zorzi. 2020. "Non-terrestrial networks in the 6G era: Challenges and opportunities". *IEEE Network*.
- Greensill, *Financing the Future of 5G*. 2019. [https://greensillwebsite.s3.amazonaws.com/uploads/2019/02/Greensill\\_5G\\_final\\_final.pdf](https://greensillwebsite.s3.amazonaws.com/uploads/2019/02/Greensill_5G_final_final.pdf). Accessed: 2021-3-29, helmikuu.
- Guidotti, A. 2019. "Beam Size Design for New Radio Satellite Communications Systems". *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 68 (11): 11379–11383. <https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2944242>.
- Guidotti, A., S. Cioni, G. Colavolpe, M. Conti, T. Foggi, A. Mengali, G. Montorsi, A. Piemontese ja A. Vanelli-Coralli. 2020. "Architectures, standardisation, and procedures for 5G Satellite Communications: A survey". *Computer Networks* 183:107588. ISSN: 1389-1286. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.comnet.2020.107588>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S138912862031224X>.
- Jani Puttonen, Lauri Sormunen, Henrik Martikainen, Sami Rantanen, Janne Kurjenniemi, "A System Simulator for 5G Non-Terrestrial Network Evaluations", *IEEE WoWMoM workshop on NTN in 6G Wireless, June 2021*. Accessed: 2021-05.
- Katz, Marcos, Marja Matinmikko-Blue ja Matti Latva-aho. 2018. "6Genesis Flagship Program: Building the Bridges Towards 6G-Enabled Wireless Smart Society and Ecosystem", 1–9. Marraskuu. <https://doi.org/10.1109/LATINCOM.2018.8613209>.



- Kurt, Gunes, Mohammad G. Khoshkholgh, Safwan Alfattani, Ahmed Ibrahim, Tasneem S. J. Darwish, Md Sahabul Alam, Halim Yanikomeroğlu ja Abbas Yongacoglu. 2021. *A Vision and Framework for the High Altitude Platform Station (HAPS) Networks of the Future*. arXiv: 2007.15088 [cs.IT].
- Lien, S., S. Shieh, Y. Huang, B. Su, Y. Hsu ja H. Wei. 2017. “5G New Radio: Waveform, Frame Structure, Multiple Access, and Initial Access”. *IEEE Communications Magazine* 55 (6): 64–71. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1601107>.
- Lin, X., J. Li, R. Baldemair, J. T. Cheng, S. Parkvall, D. C. Larsson, H. Koorapaty ym. 2019. “5G New Radio: Unveiling the Essentials of the Next Generation Wireless Access Technology”. *IEEE Communications Standards Magazine* 3 (3): 30–37. <https://doi.org/10.1109/MCOMSTD.001.1800036>.
- Liu, J., M. Sheng, L. Liu ja J. Li. 2017. “Network Densification in 5G: From the Short-Range Communications Perspective”. *IEEE Communications Magazine* 55 (12): 96–102. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1700487>.
- Liu, Wenqi. 2019. “Cognitive satellite communications and representation learning for streaming and complex graphs”. Accessed: 2021-03. Tohtorinväitöskirja. <https://ir.library.louisville.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=4489&context=etd>.
- MacHardy, Z., A. Khan, K. Obana ja S. Iwashina. 2018. “V2X Access Technologies: Regulation, Research, and Remaining Challenges”. *IEEE Communications Surveys Tutorials* 20 (3): 1858–1877. <https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2808444>.
- Marzetta, T. L. 2015. “Massive MIMO: An Introduction”. *Bell Labs Technical Journal* 20:11–22. <https://doi.org/10.15325/BLTJ.2015.2407793>.
- Niu, Yong, Yong Li, Depeng Jin, Li Su ja Athanasios V Vasilakos. 2015. “A survey of millimeter wave communications (mmWave) for 5G: opportunities and challenges”. *Wireless networks* 21 (8): 2657–2676.
- Qu, Z., G. Zhang, H. Cao ja J. Xie. 2017. “LEO Satellite Constellation for Internet of Things”. *IEEE Access* 5:18391–18401. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2735988>.

- Rappaport, T. S., S. Sun, R. Mayzus, H. Zhao, Y. Azar, K. Wang, G. N. Wong, J. K. Schulz, M. Samimi ja F. Gutierrez. 2013. "Millimeter Wave Mobile Communications for 5G Cellular: It Will Work!" *IEEE Access* 1:335–349. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2013.2260813>.
- Rinaldi, F., H. -L. Maattanen, J. Torsner, S. Pizzi, S. Andreev, A. Iera, Y. Koucheryavy ja G. Araniti. 2020. "Non-Terrestrial Networks in 5G Beyond: A Survey". *IEEE Access* 8:165178–165200. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3022981>.
- Saarnisaari, H., A. O. Laiyemo ja C. H. M. de Lima. 2019. "Random Access Process Analysis of 5G New Radio Based Satellite Links". Teoksessa *2019 IEEE 2nd 5G World Forum (5GWF)*, 654–658. <https://doi.org/10.1109/5GWF.2019.8911737>.
- Shafi, M., A. F. Molisch, P. J. Smith, T. Haustein, P. Zhu, P. De Silva, F. Tufvesson, A. Benjebbour ja G. Wunder. 2017. "5G: A Tutorial Overview of Standards, Trials, Challenges, Deployment, and Practice". *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 35 (6): 1201–1221. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2017.2692307>.
- Soret, Beatriz, Israel Leyva-Mayorga, Stefano Cioni ja Petar Popovski. n.d. "5G satellite networks for Internet of Things: Offloading and backhauling". *International Journal of Satellite Communications and Networking* n/a (n/a). <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/sat.1394>. eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/sat.1394>. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/sat.1394>.
- Ullah, H., N. Gopalakrishnan Nair, A. Moore, C. Nugent, P. Muschamp ja M. Cuevas. 2019. "5G Communication: An Overview of Vehicle-to-Everything, Drones, and Healthcare Use-Cases". *IEEE Access* 7:37251–37268. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2905347>.
- Wang, C., X. Hong, X. Ge, X. Cheng, G. Zhang ja J. Thompson. 2010. "Cooperative MIMO channel models: A survey". *IEEE Communications Magazine* 48 (2): 80–87. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2010.5402668>.
- Wang, N., N. Nouwell, C. Ge, B. Evans, Y. Rahulan, M. Boutin, J. Desmuts ym. 2018. "Satellite Support for Enhanced Mobile Broadband Content Delivery in 5G". Teoksessa *2018 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/BMSB.2018.8436902>.

Zhang, Shunliang, Dali Zhu ja Yongming Wang. 2020. "A survey on space-aerial-terrestrial integrated 5G networks". *Computer Networks* 174:107212. ISSN: 1389-1286. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.comnet.2020.107212>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128619314045>.