

Joona Piirainen

LANGATON TIEDONSIIRTO THZ- JA SUB- THZ-TAAJUUKSILLA

Kandidaatintyö
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Tarkastaja: Mikko Valkama
Kesäkuu 2023

TIIVISTELMÄ

Joona Piirainen: Langaton tiedonsiirto THz- ja sub-THz-taajuuksilla
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Tieto- ja sähkötekniikan kandidaatin tutkinto-ohjelma
Kesäkuu 2023

Langatonta tiedonsiirtoa hyödyntävien laitteiden määrä ja vaatimukset kasvavat jatkuvasti vuodelta. Vaatimusten täyttämiseksi langattomia tiedonsiirtojärjestelmiä on kehitettävä jatkuvasti ja korkeampia taajuuskaistoja on tuotava mukaan langattomien verkkojen toimintaan. Korkeimpia näistä taajuuksista ovat terahertz- ja sub-terahertz-taajuudet, jotka määritellään 100—10000 GHz välisiksi taajuuksiksi. Kandidaatintyössä tarkastellaan terahertz- ja sub-terahertz-taajuuksien hyödyntämistä langattomassa tiedonsiirrossa sekä näiden taajuuksien käyttöönottoon liittyviä haasteita. Tämän lisäksi työssä tarkastellaan haasteita ja ratkaisuja myös laitteistotasolla sekä mahdollisia käyttötarkoituksia, missä terahertz- ja sub-terahertz-taajuuksia voidaan hyödyntää.

Tutkielma on toteutettu kirjallisuuskatsauksena, jossa tehtävänä on perehtyä langattomaan tiedonsiirtoon terahertz- ja sub-terahertz-taajuuksilla. Aineistoksi on valittu viime vuosien aikana julkaistuja aihealueeseen liittyviä tutkimuksia, artikkeleita ja konferenssijulkaisuja. Työssä tärkeimpänä aineistona toimii IEEE 802.15.3d -standardi, joka on tällä hetkellä ainoa standardi langattomalle tiedonsiirrolle terahertz- ja sub-terahertz-taajuusalueella.

Työn tuloksista nähdään, että terahertz- ja sub-terahertz-taajuudet ovat varteenotettava vaihtoehto langattomaan tiedonsiirtoon, mutta taajuuksien käyttöönotto vaatii vielä teknologista innovaatiota ja lisätutkimusta ennen kuin taajuuksia voidaan konkreettisesti hyödyntää langattomassa tiedonsiirrossa. Terahertz- ja sub-terahertz-taajuuksilla saadaan suurempi kaistanleveys ja korkeampi tiedonsiirtonopeus, mutta toimintaa rajoittavat korkea etenemisvaimennus sekä huono läpäisevyys. Näiden rajoittavien tekijöiden vuoksi tiedonsiirtoetäisyydet ovat maksimissaan muutamia satoja metrejä ja lähettimellä ja vastaanottimella on oltava esteetön näköyhteys toisiinsa. Laitteistotasolla energiatehokkuus tuottaa ongelmia, sillä korkeiden taajuuksien luominen ja hyödyntäminen vaativat paljon laitteistolta. Tämän lisäksi laitteistojen tuotantokustannukset ovat myös aivan liian suuria. Näiden syiden takia laitteistoja on yksinkertaistettava mahdollisimman paljon, jotta molemmat vaatimukset voidaan täyttää. IEEE 802.15.3d -standardin langattomilla sub-terahertz-yhteyksillä voidaan korvata langallisia yhteyksiä esimerkiksi verkkoinfrastruktuurissa, datakeskuksissa ja tiedonsiirtolaitteissa. Tämän lisäksi muita käyttökohteita ovat datakioskit, jotka toimivat kohdistettuina *hotspot*-alueina.

Avainsanat: Terahertz, sub-terahertz, langaton tiedonsiirto, standardi, laitteisto

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ALKUSANAT

Suuri kiitos työni ohjaajalle Mikko Valkamalle tuesta ja ohjauksesta työn kirjoituksen aikana. Haluan myös kiittää perhettäni ja läheisiäni, jotka ovat tukeneet ja kannustaneet työn teossa.

Tampereella, 11.6.2023

Joona Piirainen

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. LANGATON TIEDONSIIRTO	2
2.1 Yleisesti	2
2.2 THz- ja sub-THz-taajuudet	3
2.3 Spektin säännöstely	4
2.4 Standardointi	5
3. LAITTEISTO JA TIEDONSIIRTOTEKNIIKAT	7
3.1 Laitteisto	7
3.1.1 Antennit	7
3.1.2 Vahvistimet	8
3.1.3 Suodattimet	8
3.1.3 Paikallisoskillaattori	9
3.1.3 Muuntimet	9
3.2 Tiedonsiirtotekniikat	10
3.2.1 Moniantennitekniikat	10
3.2.2 Modulaatiomenetelmät	11
4. MAHDOLLISUUDET JA SOVELLUKSET	15
4.1 Langaton fronthaul ja backhaul	16
4.2 Langaton tiedonsiirto datakeskuksissa	16
4.3 Datakioski	17
4.4 Laitteiden sisäinen langatontiedonsiirto	17
4.5 Muita mahdollisia käyttökohteita	18
5. YHTEENVETO	19
LÄHTEET	21

LYHENTEET JA MERKINNÄT

3GPP	<i>3rd generation partnership project</i>
5G	Viidennen sukupolven mobiilitekniikka
6G	Kuudennen sukupolven mobiilitekniikka
ABS	<i>Aerial base station</i> , Ilmatukiasema
APU	<i>Antenna processing unit</i> , antenni prosessointiyksikkö
BBU	<i>Baseband unit</i>
CEPT	<i>European Conference of Postal and Telecommunications Administrations</i>
CITEL	<i>The Inter-American Telecommunication Commission</i>
EESS	<i>Earth exploration satellite service</i> , maantutkimussatelliittipalvelu
ETSI	<i>European Telecommunications Standards Institute</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IGthz	<i>Terahertz Interest Group</i>
ITU	<i>International Telecommunication Union</i>
LOS	<i>Line-of-sight</i> , näköyhteydellinen väli
MIMO	<i>Multiple-input-multiple-output</i>
OOK	<i>On-off keying</i>
PLL	<i>Phased-locked-loop</i> , vaihelukittua silmukkaa
PN	<i>Phase noise</i> , vaihekohina
PSK	<i>Phase shift keying</i> , vaihemodulaatio tekniikka
QAM	<i>Quadrature amplitude modulation</i>
RRU	<i>Remote radio unit</i> , etäradioyksikkö
SNR	<i>Signal-to-noise ratio</i> , signaali-kohinasuhde
THF	<i>Tremendously high frequency</i> , nimi ITU:n määrittelemälle 300–3000 GHz taajuusvälille
UE	<i>User equipment</i> , käyttäjälaite
WRC	<i>World radio conference</i>

1. JOHDANTO

Teknologian kehittyessä ja langattomien laitteiden määrän, monimuotoisuuden ja vaatimusten kasvaessa on myös löydettävä uusia toimintatapoja yhdistää näitä laitteita langattomaan verkkoon niiden tarpeet ja rajoitteet huomioon ottaen. Tiedonsiirto vaatimusten kasvaessa on yleisesti siirrytty hyödyntämään korkeampia taajuuskaistoja tai korkeamman tason modulointitekniikoita, joilla taajuusspektriä voidaan hyödyntää mahdollisimman tehokkaasti. Langattoman tietoliikenteen suuri kasvu on johtanut terahertz-taajuuksien tutkimiseen [1], sillä ne tarjoavat suurempaa kaistanleveyttä, minimaalista viivettä ja korkeampia tiedonsiirtonopeuksia, kuin tällä hetkellä käytössä olevat kaistat. Uusi taajuuskaista tuo kuitenkin mukanaan haasteita, jotka on ratkaistava ennen kuin terahertz-taajuuksia voidaan alkaa hyödyntämään laajemmin langattomissa verkoissa.

Tässä työssä tarkastellaan terahertz- ja sub-terahertz-taajuuksien mahdollista hyödyntämistä langattomassa tiedonsiirrossa, sekä haasteita ja mahdollisia ratkaisuja taajuuskaistan käyttämisessä. Työssä käydään yleisesti läpi terahertz- ja sub-terahertz-taajuuksien perusteet, hyödyt ja haitat, sekä haasteita ja mahdollisia ratkaisuja terahertz-laitteiston suunnittelussa. Terahertz-taajuuksien tutkiminen on vielä keskeneräistä ja potentiaalisesti parempia ratkaisuja ja uusia mahdollisuuksia tullaan varmasti löytämään lisää tulevaisuudessa. Tämä työ toimii katsauksena terahertz- ja sub-terahertz-taajuuksien tutkimusten tämän hetkisestä tilasta ja ensimmäisestä *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)* -standardista sub-terahertz-taajuuksille.

Luvussa 2 käydään yleisesti läpi langattoman tiedonsiirron ja terahertz-taajuuskaistan perusteet, spektrin säännöstely sekä standardoinnin nykyaikainen tilanne. Luvussa 3 keskitytään terahertz-taajuuskaistan tuomiin haasteisiin laitteiston ja sen komponenttien suunnittelussa sekä tiedonsiirtotekniikoihin, joita voitaisiin hyödyntää langattomassa tiedonsiirrossa terahertz-taajuuksilla. Lopuksi luku 4 antaa katsauksen mahdollisiin käyttö-tarkoituksiin ja sovelluksiin, joissa terahertz- ja sub-terahertz-taajuuksia voitaisiin hyödyntää.

2. LANGATON TIEDONSIIRTO

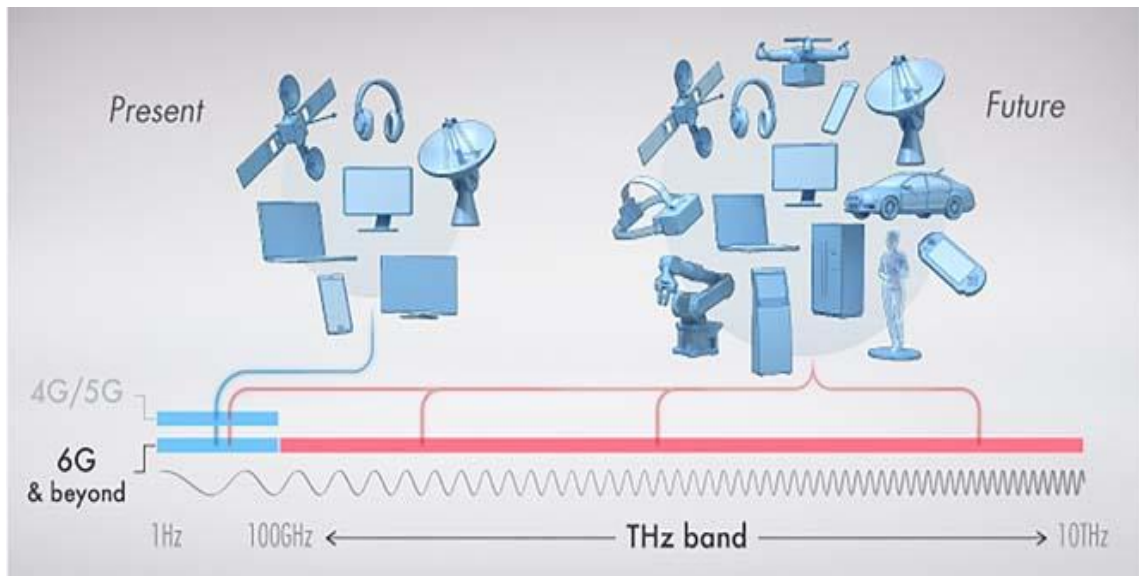
2.1 Yleisesti

Langaton tiedonsiirto perustuu sähkömagneettisten aaltojen lähettämiseen ja vastaanottamiseen. Näihin sähkömagneettisiin aaltoihin moduloidaan lähettimen puolelta digitaalinen data, joka halutaan lähettää [2]. Tämän jälkeen signaali lähetetään vastaanottimelle, joko tyhjiön tai fyysisen ympäristön, kuten ilmakehän läpi [3]. Kun signaali saapuu vastaanottimeen, se demoduloidaan, eli data poimitaan sähkömagneettisesta aallosta [2]. Kun puhutaan sähkömagneettisista aalloista langattomassa tiedonsiirrossa, käytetään niistä yleensä termiä radioaalto [3], sillä lähes kaikki langaton tiedonsiirto tapahtuu radioaalloilla. Radioaaltojen taajuusspektriin kuuluvat 1 Hz:n ja 3000 GHz:n väliset taajuudet, jotka ovat jaettu useampaan pienempään osa-alueeseen eli kaistaan. Eri maat asettavat lakeja säännöstelemään näiden kaistojen käyttöä, hyödyntäen yleensä *International Telecommunication Union* (ITU) -nimisen organisaation asettamien säännöksiä taajuuskaistoista.

Tiedonsiirron onnistumiseksi on tärkeää tiedostaa eri taajuuskaistojen vaatimukset ja rajoitteet, jotta voidaan valita oikea taajuuskaista tiedonsiirtoa varten. Teknologian kehittyessä vaatimukset langattomalle tiedonsiirrolle ovat yleisesti ottaen kasvaneet ja yksi suurimmista vaatimuksista on ollut tiedonsiirtonopeuden kasvattaminen. Suurempien tiedonsiirtonopeuksien saavuttamiseksi modulaatiotekniikoita on jouduttu monimutkaistamaan paremman spektritehokkuuden saavuttamiseksi [2]. Toinen vaihtoehto tiedonsiirtonopeuden kasvattamiseen on kasvattaa kaistanleveyttä, minkä takia langattomassa tiedonsiirrossa on usein haluttu siirtyä käyttämään korkeampia taajuuksia. Vaikka tiedon siirtäminen korkeataajuisen aallon kautta vaikuttaakin teoriassa paremmalta vaihtoehdolta, näitä aaltoja on käytännössä vaikeampi tuottaa ja ne ovat taajuuden kasvaessa alttiimpia esteistä heijastumiselle ja sateeseen imeytymiselle [3]. Koska terahertz- ja subterahertz-taajuudet ovat korkeimpia radioaaltotaajuuksia, ne vaimenevat jo pelkästään vapaan tilan vaikutuksesta niin aggressiivisesti, että niiden hyödyntäminen tiedonsiirrossa tulee mitä todennäköisimmin rajoittumaan lyhyille etäisyyksille.

2.2 THz- ja sub-THz-taajuudet

ITU:n määritelmässä terahertz-kaista määritellään 300–3000 GHz:n laajuiseksi taajuusalueeksi, josta osta voidaan myös käyttää nimitystä *tremendously high frequency* (THF). Terahertz- ja sub-terahertz-taajuuksille ei kuitenkaan ole täysin tarkkaa määritelmää, jonka takia tässä työssä 100–1000 GHz:n väliset taajuudet voidaan luokitella sub-terahertz-taajuuksiksi ja terahertz-taajuudet ovat 1–10 THz välisiä taajuuksia. Terahertz-kaista on esitettyä kuvassa 1, josta voidaan myös nähdä mahdollisia käyttökohteita tulevaisuuden langattomissa verkoissa.



Kuva 1. Terahertz-kaista ja sen mahdollisia käyttökohteita. [1]

Terahertz- ja sub-terahertz-taajuuksien hyödyntäminen langattomassa tiedonsiirrossa on vielä suhteellisen rajoitettua, eikä sitä vielä voida hyödyntää kaupallisissa tuotteissa laitteiston tuotantokustannusten takia, mutta terahertz-kaistan taajuuksia hyödynnetään kyllä jo esimerkiksi kuvantamisessa ja tutkissa. Terahertz-taajuuksia tullaan siis varmasti hyödyntämään lisää, kunhan teknologisten innovaatioiden kautta laitteistoa saadaan parannettua ja tuotantokustannuksia laskettua. Esimerkiksi kuudennen sukupolven mobiiliteknikassa (6G) voidaan jo todennäköisesti nähdä sub-terahertz-taajuuskaistan matalampia taajuuksia, sillä jotkin 6G-sovellukset tulevat tarvitsemaan laajempaa kaistanleveyttä suurten tiedonsiirtonopeus vaatimusten takia. Sub-terahertz-taajuudet tulevat siis todennäköisesti pienempien taajuuksien lisäksi täydentämään 6G:n laajaa taajuuskais-tavalikoimaa. [4] [5]

Vaikka terahertz- ja sub-terahertz-taajuudet tarjoavat suurempaa kaistaa ja korkeampaa tiedonsiirtonopeutta, ne tuovat mukanaan myös useita haasteita, joiden ratkaisemiseen

vaaditaan paljon tutkimustyötä, suunnittelua ja teknologisia innovaatioita. Korkeataajuiset signaalit ovat matalataajuisia signaaleja alttiimpia etenemisvaimentumiselle, minkä takia niitä ei voida hyödyntää pitkillä etäisyyksillä. Terahertz- ja sub-terahertz-taajuuksilla on myös huono läpäisevyys, jonka takia lähettimen ja vastaanottimen välillä ei voi olla esteitä, kuten seiniä tai rakennuksia. Lisäksi korkeataajuiset signaalit ovat herkempiä sääolosuhteille ja sade voi lisätä signaalin vaimentumista entisestään. [3] Tämän takia sub-terahertz-taajuuksien käyttö todennäköisesti rajoittuu suorille näköyhteyksille (*line-of-sight*, LOS) [6]. Korkeampien taajuuksien tuottaminen vaatii myös suuria määriä energiaa, mikä lisää vaatimuksia laitteiden energiatehokkuudessa. Laitteiden olisi myös pysyttävä prosessoimaan dataa huomattavasti nykyistä nopeammin, jotta nopeammasta siirtonopeudesta olisi mitään hyötyä.

2.3 Spektrin säännöstely

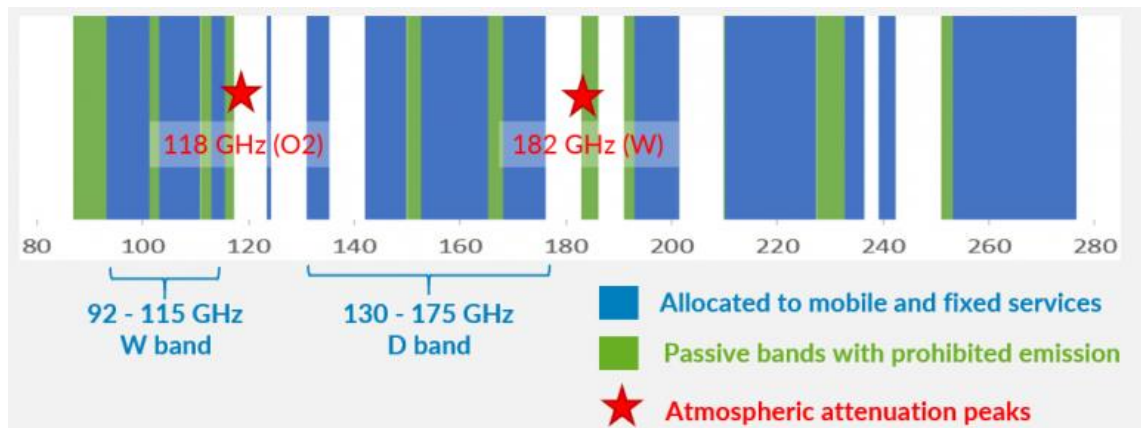
Jotta langaton tiedonsiirto olisi mahdollisimman toiminnallista ja tehokasta, taajuuskais-tojen käyttöä täytyy säännöstellä. Eri maiden asiantuntijavirastot määräävät oman maansa radiospektrin säännöstelystä, mutta useimmat maat tekevät yhteistyötä tois-tensa kanssa ja pyrkivät allokoimaan kaistat yhdenmukaisesti kansainvälisten säännös-telyjen mukaan. Säännöstelyn standardoinnista vastaavat useat kansainväliset organ-isaatiot, kuten ITU, *European Conference of Postal and Telecommunications Admin-istrations* (CEPT) ja *The Inter-American Telecommunication Commission* (CITEL). Spektrin säännöstelystä on tullut ajan saatossa entistä tärkeämpää, koska radiotaajuuk-sia hyödyntävien laitteiden määrä ja niiden tiedonsiirto tarpeet ovat kasvaneet teknolo-gisten innovaatioiden kautta.

Terahertz-taajuuskaistan säännöstely on vielä keskeneräinen, mutta globaalit säänte-lyelimet ovat allokoineet kaistoja sub-terahertz alueelta 275 GHz:iin asti. Taajuuskaistan tehokkaan toiminnallisuuden varmistamiseksi osa kaistasta allokoidaan passiiviseksi, jotta kaistoilla tapahtuvasta tiedonsiirrosta syntyvä häiriö saataisiin minimoitua. [6] Kuva 2 havainnollistaa, miten kaista jaetaan niin, että sitä voitaisiin käyttää mahdollisimman tehokkaasti ja ilman häirintää käytössä olevien kaistojen välillä. Kuvan 2 esittämällä alu-eella on lohkoja, jotka sisältävät palveluita, joille ITU on antanut ensisijaisen allokointi-aseman. Kiinteiden palveluiden (*fixed service*, FS) ja mobiilipalveluiden lisäksi ensisijai-sen allokointiaseman omaavia palveluita ovat esimerkiksi maantutkimussatelliittipalvelu (*Earth exploration satellite service*, EESS), avaruustutkimus, satelliittien välinen kommu-nikointi, radionavigointi. Avaruus pohjaiset verkot ovat yleisesti passiivisia ja sen takia erittäin herkkiä häiriöille, minkä takia myös maanpäällistä käyttöä joudutaan rajoittamaan niin etteivät ne tuota häiriöitä avaruus pohjaisille verkoille. Vuonna 2023 pidettävässä

WRC (*World Radio Conference*) konferenssissa yksi harkinnan kohde tulee olemaan 231,5–252 GHz taajuuksien allokointi EESS:n passiivisille järjestelmille. [4]

Kuvassa 2 on myös esitettyä 130–175 GHz taajuuskaista, jota kutsutaan D-kaistaksi (*D-band*). D-kaistan spektristä yli 30 GHz:ä on allokoitu mobiilipalveluiden ja kiinteiden palveluiden käyttöön. Tutkimus D-kaistan käytettävyydestä FS-palveluille valmistui vuonna 2018 CEPT:n toimesta. [6] CEPT:n tärkeimmät huomautukset kiinteistä sub-terahertz palveluista D-kaistalla olivat tiivistettynä:

- erittäin laajat kaistanleveydet, jotka mahdollistavat monien palveluiden toiminnan edullisesti,
- helpompaa käyttöönottoa langallisiin vaihtoehtoihin verrattuna,
- häiriön ja signaalien sieppausten riskien pienentäminen varmistaa korkeamman turvallisuuden [6].



Kuva 2. 90–275 GHz taajuuskaistalta allokoituja kaistoja maanpäälliseen langattomaan viestintään. [7]

2.4 Standardointi

Terahertz- ja sub-terahertz-taajuuksien standardointi on vielä vaiheessa, mutta ensimmäinen IEEE-standardi kaistan alemmille taajuuksille on jo tehty ja muita standardeja tullaan todennäköisesti näkemään lisää muutaman vuoden sisällä IEEE:n ja muiden organisaatioiden toimesta. IEEE aloitti terahertz-taajuuskaistan tutkimisen mahdollisena langattoman tiedonsiirron välineenä vuoden 2008 alussa, kun *Terahertz Interest Group* (IGthz) niminen ryhmä perustettiin. Tämän ryhmän jäsenet loivat perustan suunnitteluvalinnoista ja suorituskykyennusteista, jonka avulla IEEE TG100G-työryhmä jatkoi taajuuksien tutkintaa vuonna 2014. Tämän työn tuloksena syntyi IEEE:n ensimmäinen sub-THz-standardi (IEEE Std. 802.15.3d-2017), joka hyväksyttiin ja julkaistiin vuonna 2017. [5] [8]

Standardi 802.15.3–2017 on parannus aikaisempaan IEEE Std. 802.15.3–2016-standardiin. Siinä määritetään 100 Gb/s siirtonopeuksiin pystyvien langattomien *point-to-point* linkkien käyttöä, jota on myös mahdollisuus laskea pienemmille nopeuksille. Standardin päätavoitteena on näyttää sub-THz-taajuuksien käyttökelpoisuutta langattoman tiedonsiirron välineenä, jolla voidaan tarjota yksinkertaista, mutta samalla nopeaa langatonta tiedonsiirtoyhteyttä. [5] [8]

3rd generation partnership project (3GPP) on useiden standardointiorganisaatioiden yhteistyöorganisaatio, joka pyrkii luomaan teknisiä spesifikaatioita mobiiliverkoille, jotka hyväksytään standardeiksi standardointijärjestöjen, kuten *European Telecommunications Standards Institute* (ETSI) -järjestön toimesta. 3GPP:n vuonna 2022 julkaisemassa *release 17*-spesifikaatiossa ei vielä esiinny taajuuksia terahertz-kaistalta, mutta lähitulevaisuudessa tutkimusten oletetaan siirtyvän myös terahertz-kaistan alemmille sub-terahertz-taajuuksille [9].

3. LAITTEISTO JA TIEDONSIIRTOTEKNIIKAT

3.1 Laitteisto

Laitteiston suorituskyky ja valmistuskustannukset ovat suuria rajoittavia tekijöitä terahertz-taajuuksien konkreettisesti hyödyntämisessä langattomassa tiedonsiirrossa. Uudelle taajuusalueelle siirtyminen vaatii teknologisia innovaatioita laitteiston suunnittelussa, koska nykyaikaiset laitteistot eivät yksinkertaisesti pysty toimimaan terahertz-taajuuksilla. Esimerkiksi nykyiset puolijohdekomponentit eivät saavuta terahertz-taajuuksilla toimimisen vaatimuksia. [4] Terahertz-taajuuksien tuottaminen ja prosessointi on hyvin virtaa kuluttavaa, minkä takia tehonkulutus onkin yksi suurimmista haasteista langattomalle terahertz-laitteistolle [10]. Seuraavissa alaluvuissa tutkitaan eri laitteisto komponentteja, sekä niille asetettuja vaatimuksia ja haasteita langattomassa terahertz-laitteistossa.

3.1.1 Antennit

Antennit ovat yksi tärkeimmistä elementeistä langattomassa viestintäjärjestelmässä, jonka suorituskyvyllä on suuri vaikutus koko järjestelmän laatuun viestinnässä [11]. Terahertz-taajuuksille soveltuvat antennit ovat pieniä kokoisia, sillä antennin koko on suoraan verrannollinen signaalin aallonpituuteen, mikä on terahertz-taajuuksilla noin 3–0,03 mm. Antennien pienessä koossa on positiivista se, että laitteiden sisäiset antennit eivät kasvata laitteen kokoa huomattavasti ja niitä on suhteellisen helppo sisällyttää pienikokoistenkin mobiililaitteidenkin sisälle, mutta yksittäisten antennien tehovahvistus ja suuntaavuus on heikko. THz-taajuuksilla käytetyt pienet antennit ovat myös haastavia valmistaa, sillä pienetkin epätäydellisyydet, kuten rosainen antennin pinta, voivat vaikuttaa negatiivisesti antennin toimintaan. Tämän takia antennien valmistukseen on löydettävä parempia menetelmiä ja tarkempaa koneistustarkkuutta. [11]

Korkea taajuiset signaalit ovat vaimenevat hyvin nopeasti edetessään vapaassa tilassa, minkä takia lähetinvastaanotin-antenneissa tarvitaan korkeaa tehovahvistusta kompensimaan tätä vaimennusta. Korkean tehovahvistuksen lisäksi THz-antenneilta vaaditaan leveää kaistaa ja korkeaa hyötysuhdetta säteilyn suhteen. [11] Näiden korkeiden vaatimusten saavuttaminen voi kuitenkin olla haastavaa, sillä antenneja pitäisi pystyä tuottamaan mahdollisimman edullisesti ilman korkeita valmistuskustannuksia.

3.1.2 Vahvistimet

Tehovahvistimen tehtävä on vahvistaa signaalin tehoa lähettimessä. Tehovahvistuksella kompensoidaan signaalin vaimentumista, jota signaali kokee lähetyksen aikana. Korkeilla taajuuksilla vahvistimilta toivotaan mahdollisimman hyvää energiatehokkuutta, koska korkeiden taajuuksien tuottaminen kuluttaa todella paljon virtaa. Energiatehokkuus on vahvistimissa erittäin tärkeää, koska niillä on tyypillisesti laitteiston suurin virrankulutus [12]. Energiatehokkuus on kuitenkin ristiriidassa lineaarisuuden kanssa, sillä lineaarisella alueella tehontuottaminen ei ole energiatehokasta [13]. Lineaarisuudella tarkoitetaan signaalin vahvistamista niin, että vain signaalin amplitudi kasvaa, ilman suuria vääristymiä. Lineaarisuus on tärkeää, koska epälineaarisuudesta syntyvät vääristymät häiritsevät kaistan sisäistä ja myös sivukaistojen tiedonsiirtoa [13]. Terahertz-taajuuksilla toimivien lähettimien tehovahvistimien toiminta tulee kuitenkin todennäköisesti olemaan epälineaarista, sillä energiatehokkuus on isompi ongelma näin korkeilla taajuuksilla.

Vastaanottimessa käytetään vähäkohinaista vahvistinta, jotta signaalia saataisiin vahvistettua mahdollisimman vähäisellä kohinalla [10]. Koska korkeilla taajuuksilla kantama on erittäin huono, on tärkeää, että vastaanotin pystyy vahvistamaan saapuvia signaaleja mahdollisimman lineaarisesti pienellä kohinalla, jotta signaalista saadaan luettua tarvittava tieto.

3.1.3 Suodattimet

Suodattimien avulla signaalia suodatetaan niin, että sen sisällöstä jää jäljelle vain haluttu osa. Signaalin luettavuuden kannalta on tärkeää, että siitä saadaan rajattua pois ei-relevantit osat ja haitallisten osien osuutta saadaan vaimennettua, kuten kohinaa ja muista signaaleista tulevia häiriöitä. Suodattaminen voidaan toteuttaa signaalille joko suoraan analogisesti esimerkiksi taajuusselektiivisen pinnan avulla [14] tai digitaalisesti muuttamalla signaali digitaaliseen muotoon, minkä jälkeen se syötetään prosessorille, jossa suodatuksen hoitaa siihen suunniteltu ohjelmisto. Suodattimet voidaan luokitella sen päästökaistan perusteella alipäästöiseksi, ylipäästöiseksi tai kaistanpäästöiseksi, jossa vain haluttu taajuuskaista pääsee suodattimen läpi. Haluttu taajuuskaista voidaan myös suodattaa pois kaistanestosuodattimen avulla. [15]

Sub-terahertz- ja terahertz-taajuuksilla myös suodattimien vaatimukset ja haasteet kasvavat. Terahertz-signaalien aggressiivisen vaimentumisen takia muiden signaalien tuomat häiriöt antenniin ovat vähäiset, mutta tämä myös tarkoittaa, että signaalia joudutaan vahvistamaan paljon lähettimen ja vastaanotin päässä. Sub-terahertz-taajuusalueelle siirryttäessä laitteiston kohinakertoimen kasvaminen tuo haasteita kohinan suodattamiseen

signaalista vastaanottimessa [10]. Tämän lisäksi yksi terahertz-suodattimien ongelmista on taajuusselektiivisyys, jonka takia suodattimien on vaikea rajata signaalista pois ei haluttuja osia [14]. Suodattimen integrointi toteuttaa myös haasteita terahertz-laitteistolle, koska suodattimet kasvattavat laitteiston kokoa huomattavasti [11]. Käytännöllisten suodattimien on myös oltava mahdollisimman yksinkertaisesti rakennettuja, jotta tuotantokustannukset pysyisivät alhaisina [14].

3.1.4 Paikallisoskillaattori

Tiedonsiirtolaitteistossa oskillaattori tuottaa alkuperäisen jaksollisen signaalin laitteiston kellotusta ja synkronointia varten. Paikallisoskillaattorin tuottamaa signaalia käytetään myös taajuusmuuntimessa muuttamaan signaalin taajuutta tarvittaessa. Isommissa laitteistoissa, kuten antenniryhmissä voidaan käyttää useampaa kuin yhtä oskillaattoria, joka tuo laitteistoon lisää monimutkaisuutta ja hankaloittaa synkronointia. Erityisesti hajautetuissa antennijärjestelmissä jokaisessa antenni prosessointiyksikössä (*antenna processing unit*, APU) on käytössä erillinen oskillaattori. Tämä aiheuttaa synkronointi haasteita järjestelmässä. [10]

Sub-terahertz-taajuuksille siirtyessä oskillaattorin toiminnasta syntyvä vaihekohina (*phase noise*, PN) kasvaa liian suureksi, vaikuttaen negatiivisesti sub-terahertz-järjestelmien suorituskykyyn. Tämän takia signaalin prosessointia on optimoitava fyysisen kerroksen algoritmeilla, jotta vaihekohinaa saadaan vähennettyä. [6] Vaihekohinaa voidaan myös vähentää vaihelukittua silmukkaa (*phased-locked-loop*, PLL) hyödyntämällä. Tämä kuitenkin kasvattaisi laitteiston tehonkulutusta, minkä takia se ei välttämättä sovellu terahertz-laitteistoille, joissa tehonkulutus on muutenkin suuri ongelma. [16]

3.1.5 Muuntimet

Digitaali-analogi (DA) ja analogi-digitaali (AD) -muuntimet toimivat tärkeänä osana tiedonsiirtolaitteistoa. DA-Muuntimen avulla digitaalinen signaali voidaan muuttaa analogiseksi ja AD-muuntimella päinvastoin. Terahertz-taajuuksien suuri kaistanleveys ja tiedonsiirtonopeus kasvattavat muuntimien vaatimuksia. Kuten aikaisemminkin tiedonsiirtolaitteiston komponenteilla on tehonkulutus keskeinen ongelma myös muuntimien toiminnalle. Suurilla kaistanleveyksillä muuntimilta vaaditaan suurempaa resoluutiota ja näytteenottotaajuutta, jotka tekevät muuntimen rakenteesta monimutkaisemman ja kalliimman [4]. Myös modulaation kompleksisuus kasvattaa tarvittavaa resoluutiota [16]. Monimutkaisuuden ja kustannusten vähentämiseksi tarvitaan modulaatiotekniikoita, joiden avulla muuntimien toimintaa voidaan optimoida niin, että muuntimien kapasiteetti ja

resoluutio ovat suvaittavia, mutta kustannustehokkaita [4]. Lähetin-vastaanottimien arkkitehtuurissa joudutaankin todennäköisesti hyödyntämään rinnakkaisuutta lieventämään korkean näytteenottotaajuuden rajoitteita [6].

3.2 Tiedonsiirtotekniikat

Laitteiston lisäksi erilaisten tiedonsiirtotekniikoiden hyödyntäminen on erittäin tärkeää langattoman tiedonsiirron onnistumisen kannalta. Laitteisto toimii myös suurena rajoittavana tekijänä, sillä monimutkaiset modulaatiotekniikat nostavat laitteiston vaatimuksia ja täten niiden tehonkulutusta ja valmistuskustannuksia. Tämän takia ensimmäisessä sub-terahertz-standardissa (IEEE 802.15.3d) keskitytään myös yksinkertaisempien modulaatiotekniikoiden käyttöön helpottamaan laitteiston suunnittelu vaatimuksia [5]. Laitteiston koon pienentyminen ja integrointi tuovat myös mukanaan uusia mahdollisuuksia moniantennitekniikkojen käyttöön [4]. Seuraavissa alaluvuissa tutkitaan tiedonsiirtotekniikoita, joita voitaisiin hyödyntää langattomassa tiedonsiirrossa terahertz-taajuuksilla.

3.2.1 Moniantennitekniikat

Etenemisvaimennuksen lievittämiseksi antenneja voidaan yhdistää isommaksi antenni kokonaisuudeksi, jolloin järjestelmän tehovahvistus kasvaa [16]. Ultramassiiviset MIMO (*ultra-massive multiple-input-multiple-output*)-järjestelmät ovat yksi tällaisista antennikokonaisuuksista. Näiden antenniryhmien käyttö on ollut yksi tärkeimmistä ominaisuuksista 5G järjestelmien toimivuudelle. Tällaisten antenniryhmien käyttö tulee todennäköisesti jatkumaan 6G järjestelmissä, joissa antennien määrät tulevat skaalautumaan suuremmaksi, kun taajuudet alkavat kasvamaan sub-terahertz tasolle. [4] Terahertz-taajuuksien pienen signaali-kohinasuhteen (*signal-to-noise ratio*, SNR) parantamiseksi voidaan hyödyntää keilanmuodostusta (*Beamforming*), jossa antenniryhmän avulla voidaan luoda vahva keila, joka voidaan suunnata vastaanotinta päin. Signaali-kohinasuhteen kasvaminen on suoraan verrannollinen antenniryhmän antennien määrän kasvuun, antennien lisääminen myös lisää suuntaavuutta ja tekee keilasta suppeamman. [16]

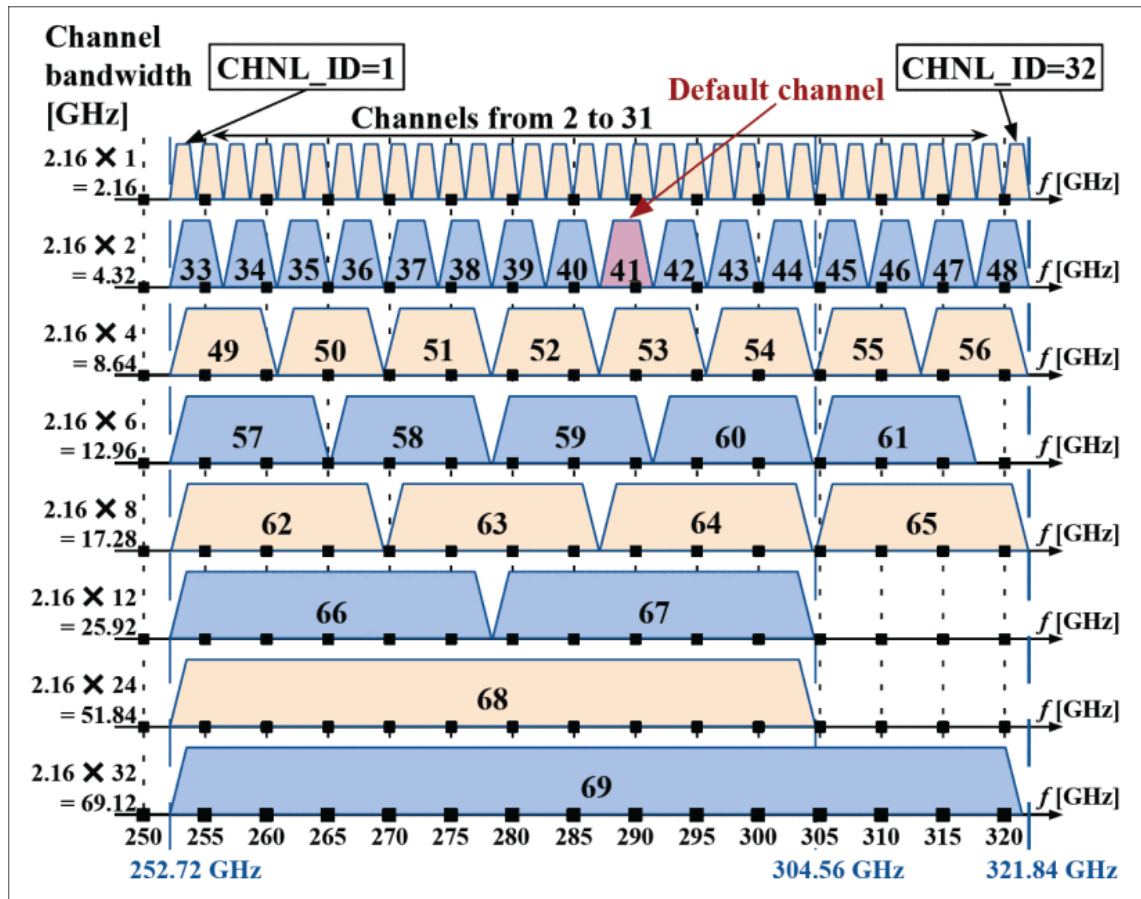
Soluton massiivinen MIMO (*cell-free massive MIMO*) on moniantennitekniikka, joka perustuu massiiviseen MIMO:on, mutta keskitetyn antenniryhmän sijasta antennit levitetään suuremmalle alueelle, mistä ne voivat palvella käyttäjälaitteita (*user equipment*, UE). Käyttäjälaitteet saavat palvelua niiden lähimmiltä antenneilta, eikä käyttäjälaitteiden näkökulmasta järjestelmässä ole jäykkiä solurajoja. Koska terahertz-signaalit vaimenevat aggressiivisesti ilmassa, eivätkä ne tunkeudu hyvin fyysisten kappaleiden läpi, hajautetut antennit voisivat tarjota parempaa tiedonsiirtoa käyttäjälaitteille. Tämä kuitenkin

vaatisi uudenlaista lähestymistapaa verkoston suunnitteluun, sillä APU:t tulisi levittää jokaiseen mahdolliseen paikkaan. Jokaisen APU:n tulisi myös olla mahdollisimman helpposti asennettavissa ja mahdollisimman halpoja rakentaa, sillä niiden lukumäärä kasvaisi erittäin suureksi toimivan verkoston luomiseksi. [10] Soluton massiivinen MIMO voisi siis tarjota toimivan järjestelmän, jossa sub-terahertz-taajuuksia voitaisiin potentiaalisesti hyödyntää ilman suuria propagaatio ongelmia. Tosin tekniikkaa tullaan todennäköisesti käyttämään aluksi alle 6 GHz taajuuksilla [4].

3.2.2 Modulaatiomenetelmät

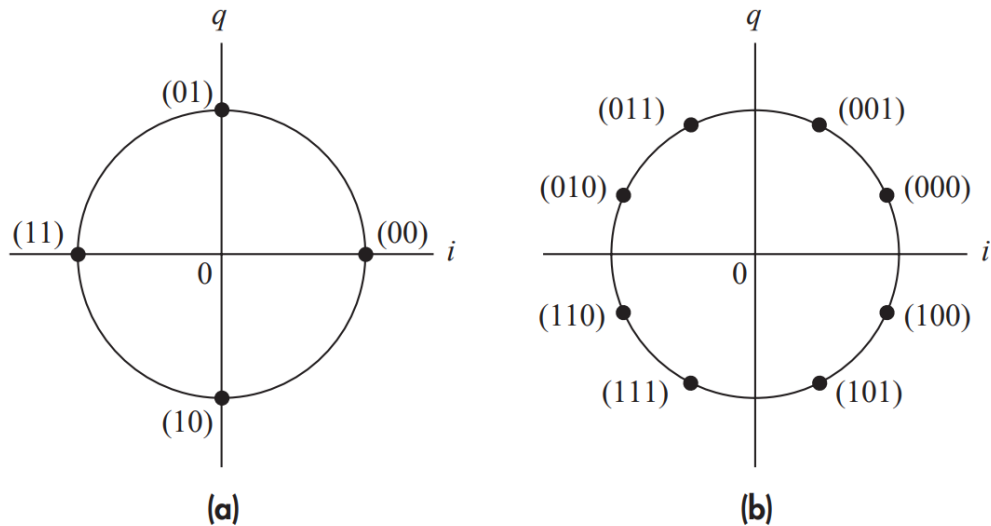
Modulaatiolla tarkoitetaan kantoaaltosignaalin muokkaamista modulointisignaalilla, joka pitää sisällään lähetettävän tiedon. Kantoaaltoa muokataan systemaattisesti modulaatiosignaalin vaihtelun mukaan. Vastaanottimessa signaali demoduloidaan, jotta signaalin sisältämä tieto saadaan vastaanotettua. Signaalin eri osa-alueita hyödynnetään eri modulaatio menetelmien avulla. Nämä menetelmät ovat amplitudimodulaatio (*amplitude modulation*, AM), taajuusmodulaatio (*frequency modulation*, FM) ja vaihemodulaatio (*phase modulation*, PM). Modulaatio voidaan myös toteuttaa pulssiampitudimodulaatiolla (*pulse amplitude modulation*, PAM), jossa kantoaaltona on säännöllinen jono lyhyitä pulsseja. [2] Modulointimenetelmiä voidaan myös yhdistää, jolloin useampaa signaalin osa-alueita hyödynnetään modulaatiossa. Esimerkiksi *quadrature amplitude modulation* (QAM) -modulointitekniikassa hyödynnetään signaalien amplitudia ja vaihetta. Modulaatiotekniikoiden monimutkaisuudella parannetaan spektritehokkuutta ja täten parannetaan tiedonsiirto nopeutta [16], mutta tämä lisää myös laitteiston vaatimuksia, minkä takia monimutkaisten modulaatiotekniikoiden käyttäminen ei ole itsestäänselvyys sub-terahertz-taajuuksilla [10].

IEEE 802.15.3d -standardi pitää sisällään 2 käytäntöä fyysisen kerroksen toimintaan. Toimintatavoista käytetään nimityksiä THz single carrier mode (THz-SC PHY) ja THz on-off keying mode (THz-OOK PHY). Standardi tukee näiden toimintatapojen käyttöä 252,72–321,84 GHz välisellä taajuuskaistalla, joka pitää sisällään 69 päällekkäistä kanavaa, joista kanava 41 toimii oletuskanavana. Standardin kanavasuunnitelmaa on havainnollistettu kuvassa 3. [5] [8]



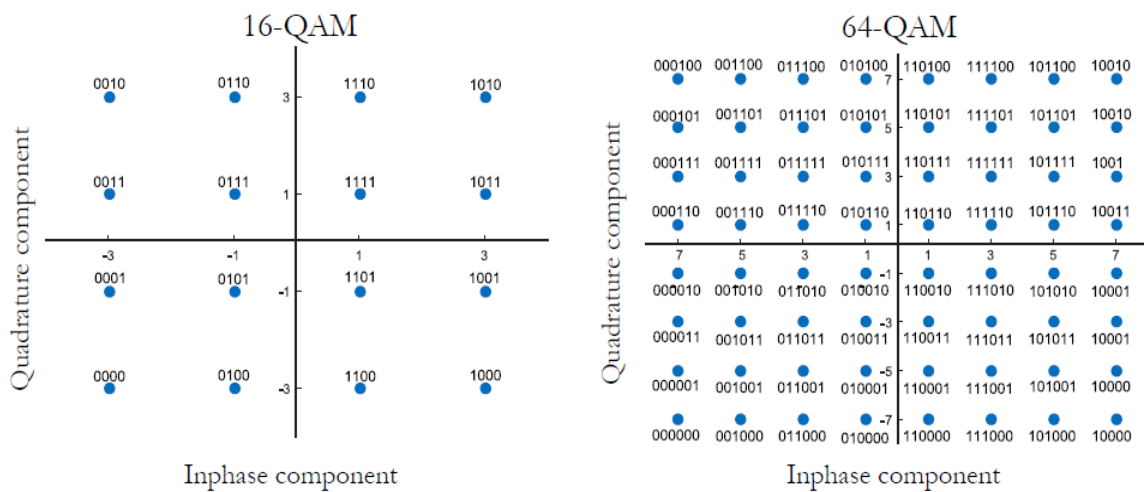
Kuva 3. IEEE 802.15.3d kanavointisuunnitelma. [5]

THz-SC PHY on tarkoitettu mahdollisimman suurelle tiedonsiirrolle, jossa kaistan spektriä yritetään hyödyntää mahdollisimman tehokkaasti. Tällaista tiedonsiirtoa voitaisiin hyödyntää esimerkiksi tukiaseman (*baseband unit*, BBU) ja etäradioyksiköiden (*remote radio unit*, RRU) välisessä tiedonsiirrossa, jossa nykyisin turvaudutaan langalliseen tiedonsiirtoon tarpeellisten tiedonsiirtonopeuksien saavuttamiseksi. THz-SC PHY tukee 6 eri modulaatiotekniikkaa, joista 4 on eri vaihemodulaatio (*phase shift keying*, PSK) tekniikoita. [5] [8] PSK-moduloinnissa modulointisignaali muuttaa kanta-aallon vaihetta ja hetkellinen muutos vaiheessa kertoo sanoman binääriarvon. BPSK (*binary phase shift keying*) on yksinkertaisin vaihemodulaatio tekniikka, jossa hyödynnetään kahta vaihetta, jotka ovat 180 astetta erossa toisistaan. BPSK kuitenkin lähettää vain yhden bitin jokaista symbolia kohden. QPSK (*quadrature phase shift keying*) on hieman monimutkaisempi ja lähettää 2 bittiä jokaista symbolia kohden, joka on havainnollistettu kuvassa 4, sillä tekniikassa hyödynnetään neljää eri kanta-aallon vaihearvoa. [2] Muut vaihemodulaatio tekniikat, joita voidaan tarvittaessa hyödyntää ovat 8-PSK ja 8-APSK [5], jotka ovat korkeamman tason modulaatio tekniikoista, joissa hyödynnetään kahdeksaa eri vaihearvoa [2]. Ero näiden korkeampien tekniikoiden konstellaatioissa voidaan nähdä kuvasta 4.



Kuva 4. PSK signaali konstellaatio diagrammeja a) QPSK ja b) 8-PSK. [2]

Näiden modulaatiotekniikoiden lisäksi THz-SC PHY tukee 16-QAM ja 64-QAM modulointitekniikoita [5] [8]. QAM-modulointitekniikassa kahden toisistaan riippumattomaan kanta-aallon, jotka ovat 90-astetta erossa toisistaan, amplitudia moduloidaan, minkä jälkeen kanta-aallot summataan yhdeksi kanta-aalloksi lähetystä varten. 16-QAM modulointitekniikalla voidaan lähettää 4 bittisiä symboleita ja 64-QAM tekniikalla voidaan lähettää 6 bittisiä symboleita. [2] 16-QAM ja 64-QAM konstellaatio diagrammit ovat esitettynä kuvassa 5. QAM modulointitekniikat ovat siis parempia tiedonsiirron nopeuden kannalta, mutta kasvattavat myös laitteiston vaatimuksia. BPSK ja QPSK modulaatiotekniikat ovat pakollisia THz-SC PHY:n toiminnalle ja muita modulaatiotekniikoita voidaan hyödyntää tarvittaessa [5] [8].

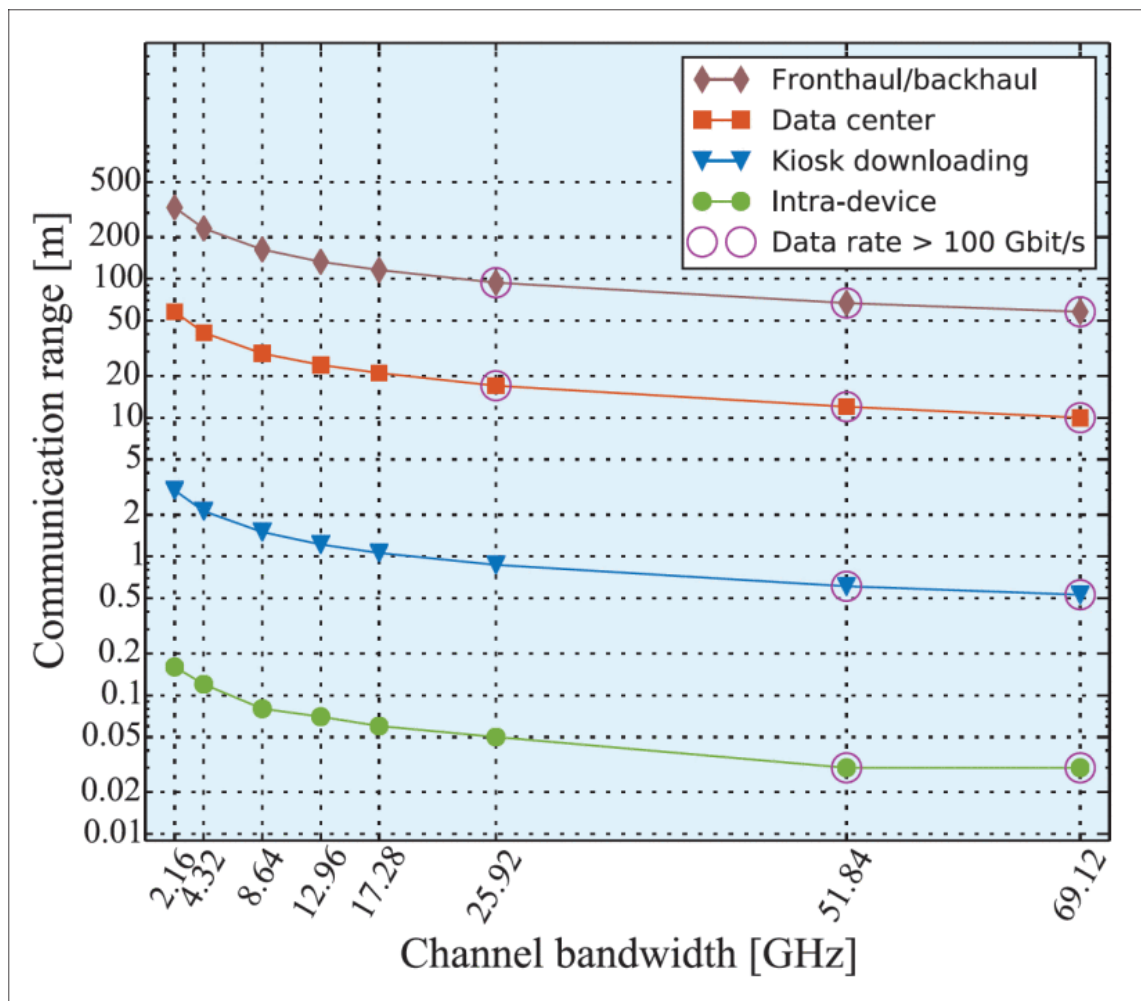


Kuva 5. 16-QAM ja 64-QAM konstellaatio diagrammit. [17]

THz-OOK PHY ottaa puolestaan huomioon laitteiden yksinkertaistamisen ja täten keskittyy mahdollisimman yksinkertaiseen tiedonsiirtomenetelmään. THz-OOK PHY toimintaa voitaisiin hyödyntää esimerkiksi laitteiden sisäisessä tiedonsiirrossa (*intra-device communications*) tai datakioski latauspisteellä (*kiosk downloading*), sillä signaalin kantavuus on maksimissaan vain pari metriä. THz-OOK PHY hyödyntää vain *on-off keying* (OOK) -modulaatiotekniikkaa, joka yksinkertaisin amplitudimodulaation muoto. [5] [8] OOK-modulaatiossa data välitetään kantoaallon olomassaololla tai sen olemassaolottomuudella. Yksinkertaisimmassa muodossa kantoaallon läsnäolo tarkoittaa binääriarvoa 1 ja sen puuttuminen tarkoittaa binääriarvoa 0. Kehittyneemmässä järjestelmässä myös kantoaallon kestoajoilla voidaan antaa enemmän tietoa. OOK-modulaatio on helppo toteuttaa laitteistossa ja se on energiatehokasta, sillä 0 arvolle ei tarvitse luoda kantoaaltoa. [2]

4. MAHDOLLISUUDET JA SOVELLUKSET

Terahertz- ja sub-terahertz-taajuuksien ominaisuuksien takia ne voivat toimia mahdollistavana tekijänä useiden erilaisten sovellusten toimintaan. IEEE 802.15.3d -standardissa annetaan konkreettisia käyttötarkoituksia sub-terahertz-taajuuksille, jotka olisivat mahdollisia toteuttaa laitteiston rajoitukset huomioon ottaen [5] [8]. Kuvassa 6 on havainnollistettu IEEE 802.15.3d -standardin esittämien mahdollisten käyttötarkoitusten eri tiedonsiirto kantamia eri taajuuskaistoilla. Alaluvuissa tarkastellaan näitä käyttötarkoituksia sekä muita potentiaalisia sovelluksia hieman tarkemmin.



Kuva 6. Tiedonsiirto kantavuudet ja 100 Gbit/s ylittävät nopeudet eri kanavilla IEEE 802.15.3d kohdekäyttötapaüksissa. [5]

4.1 Langaton fronthaul ja backhaul

Fronthaul tarkoittaa tukiaseman (BBU) ja etäradiopäiden (RRU) välistä yhteyttä ja *backhaul* tarkoittaa väliliinkkiä ydinverkon (*core network*) ja verkon reunoilla olevien aliverkkojen (*subnetwork*) välillä. Molempien tehtävänä on siis yhdistää käyttäjälaite (UE) isompaan verkkoon, eri kohdissa verkon toimintaa. Yksi tulevaisuuden haasteista on luotettavan ja nopean *backhaul* yhteyden luominen matkapuhelinverkkojen (*cellular network*) solujen ja ydinverkon välille [5], kun taajuudet ja tiedonsiirto nopeudet kasvavat ja solujen koot pienenevät.

Fronthaul ja *backhaul* on toteutettu yleisesti toteutettu langallisesti esimerkiksi valokuidulla, koska se tarjoaa vaadittua nopeaa ja luotettavaa tiedonsiirtoa. Langattomia terahertz-yhteyksiä voidaan mahdollisesti hyödyntää valokuidun rinnalla tai niiden sijasta sellaisissa paikoissa, joissa sen käyttö ei ole järkevää tai mahdollista [1]. Langattomien terahertz-yhteyksien hyödyntäminen valokuidun rinnalla voi mahdollisesti olla myös ekologisesti parempi ratkaisu, sillä laajojen verkostojen luominen valokuidulla on erittäin työlästä ja kallista [5]. Langatonta *backhaul* yhteyttä ei kuitenkaan todennäköisesti voida käyttää luotettavasti kaikilla alueilla epävarmojen ympäristöolosuhteiden takia, koska terahertz-taajuudet ovat niin herkkiä sääolosuhteille ja ne vaativat suoran näköyhteyden (LOS) lähettimen ja vastaanottimen välille [18].

4.2 Langaton tiedonsiirto datakeskuksissa

Nykyisissä datakeskuksissa joudutaan ensisijaisesti turvautumaan ethernet-valokuitukaapeleiden käyttöön, koska valokuitukaapeleiden hyödyntäminen on tällä hetkellä paras tapa saada tarvittavat tiedonsiirtonopeudet datakeskuksissa. Useiden kaapeliyhteyksien tarpeen takia datakeskusten kaapeli-infrastruktuuri on kuitenkin monimutkainen ja uudelleenkonfigurointi haastavaa. Kaapelit voivat myös vaikeuttaa jäähdytysjärjestelmiä, sillä ne voivat tukkia ilmavirtoja. [5]

IEEE 802.15.3d -standardin sisältäviä tekniikoita voitaisiin myös mahdollisesti soveltaa niin, että langattomilla *point-to-point*-yhteyksillä olisi mahdollista korvata kaapeliyhteyksiä palvelintelineiden välillä datakeskusten sisällä. Yksi langattoman tiedonsiirron pullonkaloista olisi kuitenkin tuottaa tarpeeksi tehokasta tiedonsiirtoa laskenta ja tallennussolujen välillä. [5] Langatonta tiedonsiirtoa terahertz-taajuuksilla rajoittaa myös sen lyhyet etäisyydet ja tiedonsiirto tukosten sietäminen, mikä johtaisi tehokkuuden heikkenemiseen datakeskuksessa [1]. Langattomat yhteydet ovat silti houkutteleva vaihtoehto, sillä langaton lähestymistapa mahdollistaisi joustavamman suunnittelun ja yksinkertaistaisi

kaapeli-infrastruktuuria datakeskuksissa [5]. Langattomien yhteyksien heikkouksien takia on kuitenkin epätodennäköistä, että kaikki kaapeliyhteydet voitaisiin vaihtaa langattomiin. Terahertz-teknologiaa voitaisiinkin siis hyödyntää kaapeleiden rinnalla, minkä avulla voitaisiin mahdollisesti parantaa datakeskusten suorituskykyä tai ainakin vähentää kaapeleiden kustannuksia ilman suorituskyvyn heikkenemistä. [1]

4.3 Datakioski

Terahertz- ja sub-terahertz-taajuuksien lyhyet etäisyydet rajoittavat niiden käyttömahdollisuuksia mobiilikäyttäjille, mutta taajuuskaistaa voidaan silti potentiaalisesti hyödyntää myös mobiilikäyttäjille nopeita tiedonsiirto nopeuksia tarjoavien datakioskien kautta [18]. Tällaiset datakioskit voisivat toimia eräänlaisena *hotspot* -alueena, jossa käyttäjät saisivat datakioskin läheisyydessä huomattavasti nopeampia tiedonsiirto nopeuksia mobiililaitteilleen. Esimerkiksi elokuvan lataaminen, voisi sub-terahertz datakioskin avulla kestää vain 0,1 sekuntia [5]. Nykyaikaisille käyttäjälaitteille datan prosessoiminen näin nopeasti voisi kuitenkin olla haastavaa.

Datakioskin toiminnassa haastavaa voi olla pienet liikkeet käyttäjälaiteiden puolelta esimerkiksi laitetta pitävän käden liike voi tuottaa haasteita viestintälinkin ylläpitämiselle [18], minkä takia laitteiden asettaminen jonkinlaiseen pitimeen voi olla tarvittava ratkaisu kioskeilla. Kioskeille olisi varmasti paljon kysyntää erityisesti maissa, joissa langattomat mobiiliyhteydet ovat heikompia tai puhelinliittymissä on kuukausittainen tiedonsiirtoraja.

4.4 Laitteiden sisäinen langaton tiedonsiirto

Laitteiden välisen kommunikoinnin lisäksi IEEE 802.15.3d -standardia voitaisiin potentiaalisesti myös hyödyntää laitteiden sisäisten elektronisten komponenttien kommunikointiin (*intra-device communications*) langattomasti [5]. Nykyaikaisissa tietokoneissa komponentit ovat yhdistettynä toisiinsa langallisesti, mutta tietokoneiden kasvavat tiedonsiirto vaatimukset lisäävät haasteita niiden suunnitteluun [5] ja langallisten yhteyksien tiedonsiirtokapasiteetista alkaa muodostumaan pullonkauloja, kun tiedonsiirtonopeudet kasvavat [4]. IEEE 802.15.3d -standardi voisi mahdollisesti tarjota vaihtoehdoisen tavan nopeiden datayhteyksien luomiseen tietokoneen sisäisten komponenttien välille ja samalla yksinkertaistaa tietokoneiden sisäistä suunnittelua [5]. Tällaisessa tilanteessa terahertz-taajuuksien lyhyt kantavuus ei tuottaisi ongelmia, mutta tarvittavan laitteiston pitäisi olla helposti integroitava, energiatehokas ja kustannustehokas, jotta sitä voitaisiin oikeasti hyödyntää. Tietokoneiden lisäksi terahertz-taajuuksia voitaisiin mahdollisesti

myös hyödyntää muissa laitteistoissa, joissa laitteiston eri komponentit joutuvat kommunikoidaan keskenään.

4.5 Muita mahdollisia käyttökohteita

Ilmatukiasemat (*aerial base station*, ABS) ovat uusi konsepti, jossa droneja käytetään tukiasemina tarjoamaan langatonta yhteyttä käyttäjille. ABS mahdollistaa langattoman tiedonsiirron hyödyntämisen katastrofialueilla tai auttaa ruuhkan hallinnassa alueilla, joissa suuri ihmisjoukko yrittää käyttää internetiä mobiililaitteilla. Korkealla ilmassa alhaisissa lämpötiloissa ja alhaisessa kosteudessa dronet voivat tehokkaasti hyödyntää terahertz-spektriä ja muodostaa lentäviä *ad-hoc*-verkkoja (FANET). Terahertz-taajuuksia hyödyntäviä droneja käytetään jo spektroskooppisiin tarkoituksiin ilmakehän tutkimisessa, mutta niiden käyttöä voitaisiin suhteellisen helposti hyödyntää myös tiedonsiirto tarkoituksissa. Mobiliteetti voi kuitenkin tuoda haasteita myös drone verkoille, jotka on ratkaistava ennen kuin niitä voidaan realistisesti käyttää tiedonsiirtovälineinä. [18]

Terahertz-taajuuksia voitaisiin lisäksi hyödyntää junissa fiksojen rautateiden luomisessa (*smart railways*), jossa junan kriittisiä tietoja sekä matkustajien tiedonsiirtoa voitaisiin toteuttaa nopeilla terahertz-yhteyksillä. Junien liikkuvuus voi tuoda haasteita keilamuodostuksessa ja täten tiedonsiirto yhteyden luotettavuudelle, mutta koska junat matkustavat rautateillä lähes aina tietyllä vakionopeudella on niiden liikkuvuutta helpompi ennustaa ja keiloja on helpompi kohdistaa ennusteiden perusteella. [4] Terahertz-taajuuksilla voitaisiin siis parantaa junan toimintaan vaadittavan tiedonsiirron lisäksi myös matkustajien yhteyttä internetiin.

5. YHTEENVETO

Tämä työ toimi katsauksena terahertz-taajuuskaistaan ja sen mahdolliseen hyödyntämiseen langattomassa tiedonsiirrossa. Työssä tutkittiin, millaisessa langattomassa tiedonsiirrossa terahertz-taajuuskaistaa voitaisiin parhaiten hyödyntää taajuuskaistan rajoitteet huomioon ottaen. Lisäksi terahertz-taajuuksia tutkittiin laitteiston ja sen komponenttien näkökulmasta, keskittyen haasteisiin, joita laitteistotasolla on selvitettävä ennen kuin taajuuskaistaa voidaan käyttää laajemmassa mittakaavassa kuluttajatasolla. Työssä käytiin myös läpi ensimmäisen sub-terahertz-standardin tarjoamia tiedonsiirtomenetelmä vaihtoehtoja, joidenka avulla sub-terahertz-taajuuksilla voidaan realistisesti hyödyntää laitteiston rajoitukset huomioon ottaen. Lopuksi käytiin läpi käyttötarkoituksia, joita terahertz- ja sub-terahertz-taajuuksilla voitaisiin mahdollisesti toteuttaa.

Langatonta tiedonsiirtoa hyödyntävien laitteiden määrä ja vaatimukset ovat kasvaneet räjähdysmäisesti viimeisen vuosikymmenenäikana huomattavasti, minkä takia uusien ratkaisujen löytäminen vaatimusten täyttämiseen on entistäkin tärkeämpää. Yksi mahdollinen ratkaisu erityisen suurien tiedonsiirtonopeuksien vaativalle sovellukselle voisi olla terahertz-taajuusalue. Taajuusalueen määrittely ei ole vakiintunut, sillä ITU:n määritelmässä terahertz-kaista on 300–3000 GHz, mutta yleisesti ottaen terahertz-taajuusalue voidaan myös määritellä 100–10000 GHz:n väliseksi kaistaksi. Taajuusalueelta spektriä on säännöstelty vasta 275 GHz:iin asti, mutta tulevaisuudessa spektriä tullaan säännöstelemään myös korkeammilta taajuusalueilta, kun suurempia taajuusalueita halutaan alkaa hyödyntämään eri käyttötarkoituksissa. Ensimmäisen sub-THz-standardin (IEEE Std. 802.15.3d-2017) tehtävä oli näyttää, että sub-terahertz-taajuuksia voitaisiin hyödyntää langattomissa *point-to-point* yhteyksissä, sillä ne tarjoavat suurempaa kaistanleveyttä, korkeampaa tiedonsiirtonopeutta ja minimaalista viivettä, jotka voisivat mahdollistaa monien sovellusten toiminnan.

Standardoinnissa keskityttiin yksinkertaisempiin modulaatiomenetelmiin, koska laitteisto toimii isona rajoittavana tekijänä terahertz-taajuusalueen käyttöönotolle kuluttajatasolla, sillä laitteiston tulee toiminnallisuuden lisäksi olla kustannustehokasta tuottaa. Laitteistotasolla terahertz- ja sub-terahertz-taajuudet tuovat mukanaan paljon haasteita lähettimien ja vastaanottimien suunnittelussa. Isoin näistä haasteista on energiatehokkuus, sillä korkeiden taajuuksien tuottaminen ja näistä koostuvien signaalien prosessointi ovat hyvin virtaa kuluttavia toimintoja. Tehonkulutus ongelman ratkaisemiseksi laitteistotasolla joudutaan siis ainakin aluksi käyttämään yksinkertaisempia modulointitekniikoita,

mikä vähentää spektritehokkuutta. Teknologian kehittyessä voidaan kuitenkin alkaa harjitsemaan monimutkaisempia tekniikoita ja korkeampia taajuuksia terahertz-taajuusalueelta.

Paremmen tiedonsiirtoetäisyyden saamiseksi voidaan hyödyntää moniantennitekniikoita, joidenka tuottaman keilanmuodostuksen (*beamforming*) avulla saadaan parannettua signaalin signaali-kohinasuhdetta ja lisäksi signaalin kantavuutta jopa satoihin metreihin. Antennien pienen koon ansiosta antenniryhmissä voidaan mahdollisesti hyödyntää isompia antennimääriä, jolla voidaan luoda ultramassiivisia MIMO (*ultra-massive multiple-input-multiple-output*) -järjestelmiä. Suuret antennikokonaisuudet eivät silti välttämättä ole paras tapa terahertz-yhteyksien luomiselle ja sen sijaan on mahdollista, että pienempiä antennikokonaisuuksia voitaisiin hajauttaa suuremmalle alueelle, jossa käyttäjälaitetta (UE) palvelisi lähin antenniryhmä ilman solurajoja. Soluttoman massiivisen MIMO (*cell-free massive MIMO*) -verkoston luominen vaatisi kuitenkin erilaista lähestymistapaa ja verkostoja tullaan todennäköisesti testaamaan ensin pienemmillä taajuuksilla. IEEE Std. 802.15.3d -standardissa annettiin kaksi erilaista toimintatapaa, joista ensimmäisen (THz-SC PHY) tehtävänä oli tarjota mahdollisimman korkeita tiedonsiirtonopeuksia, hyödyntäen silti suhteellisen yksinkertaisia modulaatiomenetelmiä, jotta ne voitaisiin realistisesti toteuttaa laitteistotasolla. Toisessa toimintatavassa (THz-OOK PHY) keskityttiin yksinkertaistamaan laitteistoa mahdollisimman paljon, minkä takia siinä hyödynnetään vain yksinkertaista *on-off-keying*-modulaatiotekniikkaa.

Terahertz- ja sub-terahertz-taajuuksia hyödyntämällä langattomilla *point-to-point* yhteyksillä voitaisiin mahdollisesti korvata joitain langallisia yhteyksiä. Korkean tiedonsiirtonopeuden ansiosta sub-terahertz-yhteyksillä voitaisiin jopa luoda valokuituja korvaavia langattomia yhteyksiä, joita voitaisiin hyödyntää datakeskuksissa tai tukiaseman ja ydinverkon eri yhteyksissä. Tällaiset langattoman yhteydet voisivat yksinkertaistaa infrastruktuuria ja vähentää valokuiduista syntyviä kustannuksia. Langattomia yhteyksiä voitaisiin myös luoda laitteiden sisäisten komponenttien välille, mikä voisi mahdollisesti yksinkertaistaa laitteiden suunnittelua. Nopeilla terahertz-yhteyksillä voitaisiin myös luoda kioskeja, joidenka avulla käyttäjät saisivat hetkellisesti käyttöönsä korkeamman tiedonsiirtoyhteyden esimerkiksi elokuvan tai pelin lataamista varten.

Terahertz- ja sub-terahertz-taajuudet olisivat siis varteenotettava vaihtoehto langattomassa tiedonsiirrossa. Tämä kuitenkin vaatii, että laitteistotason ongelmat saadaan ratkaistua ja laitteiston tuottamiskustannukset saadaan tarpeeksi alhaisiksi.

LÄHTEET

- [1] H. Elayan, O. Amin, B. Shihada, R. M. Shubair and M. -S. Alouini, Terahertz Band: The Last Piece of RF Spectrum Puzzle for Communication Systems, in IEEE Open Journal of the Communications Society, vol.1, Nov 2020, pp. 1-32, doi: 10.1109/OJCOMS.2019.2953633.
- [2] A. B. Carlson, P. B. Crilly, Communication systems: an introduction to signals and noise in electrical communication (5. ed.; internat. ed.) Boston: McGraw-Hill, 2010. pp. 6-8, pp. 302, pp. 649-654.
- [3] S. Anandamurugan, PS. Nandhini, Wireless networks. New York: Nova Science Publishers, New York, 2016, pp. 2-4.
- [4] H. Tataria, M. Shafi, A. F. Molisch, M. Dohler, H. Sjöland and F. Tufvesson, 6G Wireless Systems: Vision, Requirements, Challenges, Insights, and Opportunities, in Proceedings of the IEEE, vol.109, no.7, Jul 2021, pp. 1166-1199, doi: 10.1109/JPROC.2021.3061701.
- [5] V. Petrov, T. Kurner and I. Hosako, IEEE 802.15.3d: First Standardization Efforts for Sub-Terahertz Band Communications toward 6G, in IEEE Communications Magazine, vol.58, no.11, Nov 2020, pp. 28-33, doi: 10.1109/MCOM.001.2000273.
- [6] S. Bicaïš, JB. Doré, M. Saad, M. Alawieh, F. Bader, J. Palicot, et al. Wireless Connectivity in the Sub-THz Spectrum: A Path to 6G, Cornell University Library, Nov 2021, pp. 1-9.
- [7] BRAVE research project | International Radio Regulation. Saatavissa (viitattu 01.03.2023): <http://www.brave-beyond5g.com/index.php/radio-regulation/>
- [8] IEEE Standard for High Data Rate Wireless Multi-Media Networks--Amendment 2: 100 Gb/s Wireless Switched Point-to-Point Physical Layer, in IEEE Std 802.15.3d-2017 (Amendment to IEEE Std 802.15.3-2016 as amended by IEEE Std 802.15.3e-2017), vol., no., Oct 2017, pp.1-55, doi: 10.1109/IEEE-ESTD.2017.8066476.
- [9] O. Tervo, T. Levanen, K. Pajukoski, J. Hulkkonen, P. Wainio, M. Valkama, 5G New Radio Evolution Towards Sub-THz Communications, 2020 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT), Levi, Finland, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/6GSUMMIT49458.2020.9083807.
- [10] U. Gustavsson, P. Freger, C. Fager, T. Eriksson, et al. Implementation Challenges and Opportunities in Beyond-5G and 6G Communication, in IEEE Journal of Microwaves, vol.1, no.1, Jan 2021, pp. 86-100, doi: 10.1109/JMW.2020.3034648.
- [11] Y. He, Y. Chen, L. Zhang, S. -W. Wong and Z. N. Chen, An overview of terahertz antennas, in China Communications, vol.17, no.7, Jul 2020, pp. 124-165, doi: 10.23919/J.CC.2020.07.011.

- [12] S. Moghadami, F. JalaiBidgoli and S. Ardalan, A systematic methodology to design high power terahertz and submillimeter-wave amplifiers, 2014 27th IEEE International System-on-Chip Conference (SOCC), Las Vegas, NV, USA, 2014, pp. 92-97, doi: 10.1109/SOCC.2014.6948906.
- [13] P. M. Lavrador, T. R. Cunha, P. M. Cabral, J. Pedro, The Linearity-Efficiency Compromise, in IEEE Microwave Magazine, vol.11, no.5, Aug 2010, pp. 44-58, doi: 10.1109/MMM.2010.937100.
- [14] D. Zhai, Y. Yang, Z. Geng, B. Cui, R. Zhao, A High-Selectivity THz Filter Based on a Flexible Polyimide Film, in IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, vol.8, no.6, Nov 2018, pp. 719-724, doi: 10.1109/TTHZ.2018.2872414.
- [15] S. Winder, S. Winder, Analog and digital filter design (2nd ed.). Newnes, Amsterdam, 2002. pp. 23-39.
- [16] P. Heydari, Terahertz Integrated Circuits and Systems for High-Speed Wireless Communications: Challenges and Design Perspectives, in IEEE Open Journal of the Solid-State Circuits Society, vol.1, Sep 2021, pp. 18-36, doi: 10.1109/OJSSCS.2021.3110748.
- [17] V. Mathuranathan, QAM modulation: simulate in Matlab & Python, Gaussianwaves, 2012, päivitetty 10.10.2012. Saatavissa (viitattu 22.4.2023): <https://www.gaussianwaves.com/2012/10/qam-modulation-simulation-matlab-python/>
- [18] R. Singh and D. Sicker, Reliable THz Communications for Outdoor based Applications- Use Cases and Methods, 2020 IEEE 17th Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC), Las Vegas, NV, USA, 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/CCNC46108.2020.9045670.