Tampereen yliopisto

Ilari Vanhamäki

LANGATON TIEDONSIIRTO MILLIMETRIAALTOTAAJUUKSILLA

Kandidaatintyö
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Tarkastaja: Professori Mikko Valkama
Toukokuu 2020

TIIVISTELMÄ

Ilari Vanhamäki: Langaton tiedonsiirto millimetriaaltotaajuuksilla
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Tieto- ja sähkötekniikan kandidaatin tutkinto-ohjelma
Toukokuu 2020

Tiedonsiirtojärjestelmiltä vaaditaan jatkuvasti entistä korkeampia siirtonopeuksia ja suurempaa kapasiteettia. Seuraavan sukupolven mobiilitekniikka 5G pyrkii tyydyttämään nämä tarpeet. Tällä hetkellä 5G on Euroopassa saatavilla vain alle 6 GHz:n taajuuksilla, mutta Yhdysvalloissa ja Aasiassa myös yli 20 GHz:n taajuuksilla. Taajuuksia välillä 20—300 GHz kutsutaan millimetriaaltotaajuuksiksi. Tässä työssä tarkastellaan millimetriaaltotaajuuksia yleisesti, niiden käyttöä ja kuinka niillä tapahtuva langaton tiedonsiirto saadaan toimimaan laitteistotasolla ilman ongelmia. Lisäksi tutkitaan kahden antenniryhmälaitteen ominaisuuksia ja toiminnallisuutta.

Millimetriaaltotaajuuksilla on mahdollista käyttää suurempia kaistanleveyksiä, koska käytettävissä on huomattavasti suurempi taajuusalue. Näin ollen saavutetaan myös suuremmat siirtonopeudet. Millimetriaallot kärsivät kuitenkin enemmän esteiden aiheuttamasta vaimenemisesta, eivätkä ne etene ilmassa pitkälle. Tyypillinen tukiaseman toimintaetäisyys millimetriaaltotaajuuksilla on vain noin 100 metriä. 5G:lle suunnitellaan jatkuvasti uusien taajuusalueiden käyttöä, mutta ne voivat vaihdella maittain. Taajuuskaistat voidaan luokitella operaattorien lisensoituihin ja vapaasti käytettäviin lisensoimattomiin kaistoihin. 5G:n millimetriaaltotaajuuksilla tullaan käyttämään taajuusjakoisen dupleksoinnin (FDD) sijasta dynaamista aikajakoista dupleksointia (TDD).

Laitteistolla tulee vastaan omat ongelmansa langattomassa tiedonsiirrossa millimetriaaltotaajuuksilla. Vaimenemisen lieventämiseksi tarvitaan antenniryhmiä, niillä tapahtuvaa keilanmuodostusta ja keilan ohjaamista. Vahvistimelle täytyy valita sopivin toimintaratkaisu, joka riippuu siitä millä toiminta-alueella operoidaan. Millimetriaaltotaajuuksilla toimivan suodattimen integrointi on hankalaa, jonka lisäksi sen sijoitus lähetin- tai vastaanottoketjuun täytyy valita huolella hyvän toiminnallisuuden takaamiseksi. Paikallisoskillaattorin vaihekohinaan ja sen tuottaman signaalin alhaiseen amplituditasoon voidaan käyttää ratkaisuna esimerkiksi vaihelukittua silmukkaa. Suuret kaistanleveydet ja siirtonopeudet vaativat DA- ja AD-muuntimilta suuria prosessointinopeuksia, mikä tarkoittaa suoraan suurempaa tehonkulutusta. Monissa alan tutkimuksissa on todettu rinnakkain toimivien muuntimien olevan hyvä ratkaisu tähän ongelmaan.

Anokiwave AWMF-0129 ja SiversIMA EVK06002/00 ovat käytännön esimerkkejä millimetriaaltotaajuuksilla toimivista antenniryhmistä. Molemmat tukevat keilanmuodostusta ja -ohjausta, mutta ne toimivat eri taajuusalueilla. AWMF-0129 tuottaa korkeamman keilan säteilytehon, mutta EVK06002/00 tukee korkeampia siirtonopeuksia.

Työssä huomataan, että langaton tiedonsiirto millimetriaaltotaajuuksilla tuo mukanaan hyviä ja huonoja puolia. Hyvät puolet täyttävät kuitenkin ennalta asetetut vaatimukset ja tarpeet. Huonojen puolien ongelmat puolestaan ovat yleensä ratkaistavissa.

Avainsanat: Millimetriaallot, langaton tiedonsiirto, 5G, antenniryhmät

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ALKUSANAT

Tämä kandidaatintyö on tehty kevään lukukaudella 2020. Se kuvastaa mielenkiintoani tietoliikennetekniikkaan ja osaa kolmen vuoden aikana oppimistani asioista. Aiheen valintaa hankaloitti alussa mielenkiintoisten aiheiden määrä, mutta lopulta päädyin käsittelemään millimetriaalloilla tapahtuvaa tiedonsiirtoa. Aiheen mielenkiintoisuuden lisäksi se on erittäin ajankohtainen. Kirjoitushetkellä 5G on jo julkisessa käytössä, mutta hyvin rajallisesti. Mielenkiintoisemmat 5G:n edut tullaan näkemään, kun seuraavien standardien mukaiset ominaisuudet ja toiminnallisuudet, mukaan lukien millimetriaallot, ilmestyvät mukaan kuvaan.

Haluan kiittää ensinnäkin työni ohjaajaa, professori Mikko Valkamaa. Hän auttoi työn alkuun pääsemisessä ja tarjosi arvokasta tukea työni kirjoittamisen aikana. Toiseksi haluan kiittää perhettäni, joka on ollut tukenani koko opintojeni ajan, varsinkin silloin kun itselläni on ollut hankalaa.

Tampereella, 13.5.2020

Ilari Vanhamäki

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO 1
2. MILLIMETRIAALTOTAAJUUDET 2
2.1 Perusteet 2
2.2 Hyödyt ja haasteet 3
2.3 Käyttö 5G mobiiliradioverkossa 4
2.4 Vaikutukset linkkibudjettiin 5
3. LAITTEISTON HAASTEET JA RATKAISUT 9
3.1 Antenniryhmät ja keilanmuodostus 9
3.2 Vahvistimet 10
3.3 Suodattimet 11
3.4 Paikallisoskillaattorit 13
3.5 Digitaali- ja analogimuuntimet 15
4. ANTENNIRYHMÄLAITTEIDEN TARKASTELUA 16
4.1 Anokiwave AWMF-0129 (28 GHz) 16
4.2 SiversIMA EVK06002/00 (57—71 GHz) 18
5. YHTEENVETO 21
LÄHTEET 23

LYHENTEET JA MERKINNÄT

3GPP	*3rd generation partnership project*
5G	Viidennen sukupolven mobiiliradioverkko
CSI	*Channel state information*
EHF	*Extremely high frequency*, virallinen nimitys 30—300 gigahertsin taajuusalueelle
FCC	*Federal Communications Commission*, Yhdysvaltojen tietoliikennettä sääntelevä valtiovirasto
FDD	*Frequency division duplex*, taajuusjakoinen dupleksointi
GPS	*Global positioning system*
ICNIRP	*International Commission on Non-ionizing Radiation Protection*, ionisoimattoman säteilyn turvallisuuteen erikoistunut kansainvälinen toimikunta
IF	*Intermediate frequency*, välitaajuus
IL	*Insertion loss*, liitosvaimennus
ITU	*International Telecommunication Union*
ITU-R	*International Telecommunication Union Radiocommunication Sector*
LOS	L*ine-of-sight*, näköyhteydellinen väli
LTE	*Long Term Evolution* eli 4G, neljännen sukupolven mobiiliradioverkko
MIMO	*Multiple-input-multiple-output*
NLOS	*Non-line-of-sight*, näköyhteydetön väli
RF	*Radio frequency*, radiotaajuus
TDD	*Time division duplex*, aikajakoinen dupleksointi
UDN	*Ultra-dense network*

1. JOHDANTO

Millimetriaaltoja on tutkittu jo monen vuoden ajan, mutta niistä on tullut 5G:n julkaisun myötä ajankohtaisempi ja puhutumpi aihe. Tällä hetkellä julkisessa käytössä oleva 5G on *non-standalone* ja se toimii LTE:n rinnalla. Vaikka 5G tuokin nykyiseen LTE-verkkoon parannuksia alle 6 GHz:n taajuuksilla, potentiaaliset edut moninkertaistuvat millimetriaaltotaajuuksilla. Millimetriaaltotaajuuksilla toimivat mobiiliverkot eivät ole vielä saatavilla Euroopassa, mutta niitä valmistellaan ja testataan parhaillaan. Sen sijaan Yhdysvalloissa ja Aasiassa niitä on jo käytössä. Millimetriaaltotaajuuksien suosio perustuu suurempaan käytettävissä olevaan kaistanleveyteen ja korkeampaan datan siirtonopeuteen. Millimetriaalloista käytetään englannin kielessä lyhennettä *mmWave*.

Tässä työssä käsitellään millimetriaaltotaajuuksia mobiiliradioverkon sekä laitteiston näkökulmasta. Lisäksi käydään läpi millimetriaaltojen perusteet, hyödyt ja haitat. Millimetriaaltotaajuudet tuovat esiin omat etunsa ja ongelmansa, jotka vaativat omat ratkaisunsa laitesuunnittelussa. Potentiaalisia uusia ja parempia ratkaisuja tutkitaan jatkuvasti. Laitteiden suunnittelussa vaaditaan useiden asioiden huomioimista, jotta tiedonsiirto ja yhteydet toimisivat parhaimmalla mahdollisella tavalla. Millimetriaallot ovat yksi erittäin olennainen osa tulevaa 5G:n tiedonsiirtoverkkoa. Tässä työssä tutkitaan myös näiden kahden asian kytkeytymistä toisiinsa, sekä niihin liittyvien konkreettisten osien ja laitteiden toimintaa ja ominaisuuksia.

Luvussa 2 käsitellään millimetriaaltotaajuuksia yleisesti. Esille tuodaan niiden hyödyt ja haitat, joiden lisäksi tarkastellaan niiden roolia 5G:n mobiiliradioverkossa ja vaikutusta linkkibudjettiin. Luvussa 3 tarkastellaan millimetriaaltotaajuuksien lähetin-vastaanotinjärjestelmään tuomia ongelmia ja niiden mahdollisia ratkaisutapoja. Yksi suuri laitteistokokonaisuus on jaettu pienempiin toiminnallisiin lohkoihin, omiin alalukuihinsa. Osa läpi käytävistä ongelmista ja ratkaisuista pätee niin millimetriaaltotaajuuksilla kuin myös alhaisimmilla taajuuksilla toimiviin järjestelmiin. Luvussa 4 tarkastellaan käytännön antenniryhmälaitteiston ominaisuuksia ja toimintaa. Antenniryhmät ovat erittäin olennaisia millimetriaaltotaajuuksilla toimivissa järjestelmissä sekä 5G:ssä. Luvussa 5 esitellään työn tärkeimmät johtopäätökset ja tulokset.

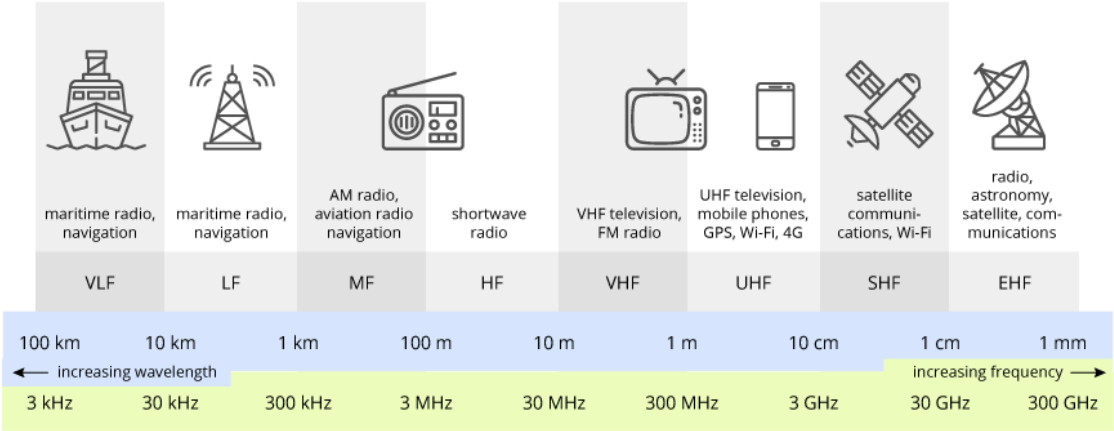
2. MILLIMETRIAALTOTAAJUUDET

2.1 Perusteet

Kaikki langaton tiedonsiirto tapahtuu aina sähkömagneettisen säteilyn avulla. Minkä tahansa signaalin aallonpituus on muotoa

$$\lambda = \frac{c}{f} \ , \tag{1}$$

jossa λ on aallonpituus, *f* on taajuus ja *c* on valon nopeus ilmassa. Millimetriaallon aallonpituus on siis millimetriluokkaa. Kun puhutaan yleisesti millimetriaaltotaajuuksista, tarkoitetaan taajuusväliä 30—300 GHz. Tätä väliä kutsutaan myös *extremely high frequency* (EHF) -alueeksi, jolla signaalin aallonpituus on 1—10 millimetriä. Muita taajuusalueita ja niiden nimien lyhenteitä näkyy kuvassa 1. Nämä määritelmät ovat *International Telecommunication Union* (ITU) -nimisen organisaation määritelmien mukaisia.



Kuva 1. *Taajuuskaistojen nimitykset ja niiden käyttökohteita.* [14]

Kuten muutkin langattomat signaalit, myös millimetriaallot noudattavat vapaan tilan vaimennusmallia, joka on muotoa

$$L[\mathrm{dB}] = 10\log_{10}\left(\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2\right) = 10\log_{10}\left(\left(\frac{4\pi d f}{c}\right)^2\right) \ , \tag{2}$$

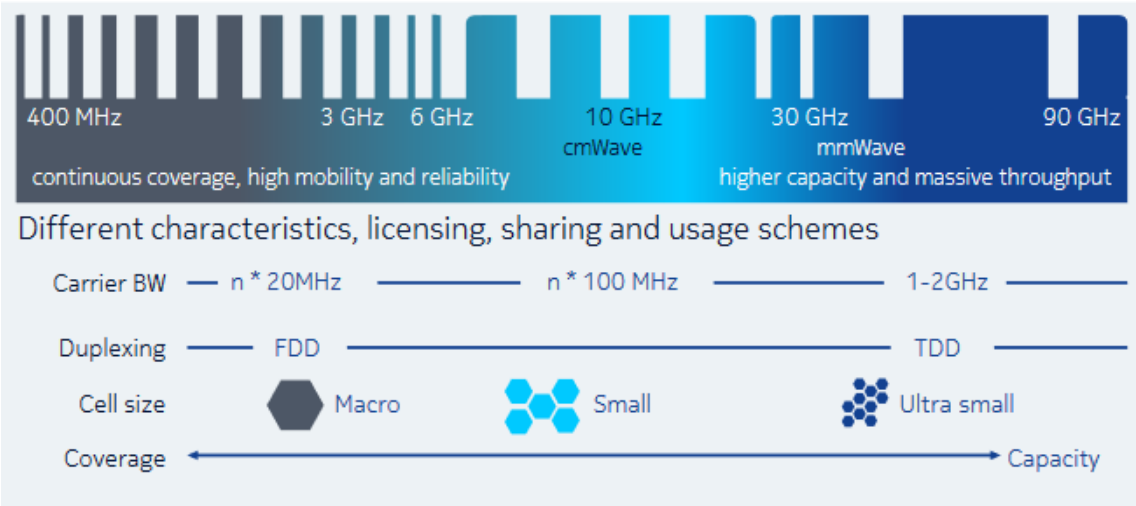
jossa *d* on lähetin- ja vastaanotinantennin välinen etäisyys, ja *L* on vaimennus desibeleinä. Tämän etenemisvaimennusmallin etuna muihin verrattuna on sen yksinkertaisuus. Muitakin malleja, kuten empiirisiä malleja, voidaan käyttää, mutta on tärkeää varmentaa, että ympäristö ja olosuhteet sopivat valittuun malliin.

2.2 Hyödyt ja haasteet

Millimetriaaltojen taajuusalueväli on paljon suurempi kuin aiemmin käytetyillä taajuuksilla. Tietoliikennejärjestelmät voivat käyttää näin ollen suurempaa kaistanleveyttä tiedonsiirrossa. Tämä mahdollistaa tietoverkon suuremman kapasiteetin ja korkeammat siirtonopeudet. Lyhyellä aallonpituudella voidaan lisätä antennivahvistusta. Kun aallonpituutta pienennetään, eli taajuutta kasvatetaan, antennien kokoa voidaan pienentää. [2] Näin ollen päätelaitteeseen tai tukiasemaan saadaan sijoitettua enemmän antenneja, jonka johdosta yhteyden luotettavuutta ja siirtonopeutta voidaan parantaa.

Korkeampien taajuuksien signaalit kuitenkin vaimenevat nopeammin etäisyyden funktiona. Lisävaimentumista tapahtuu, jos yhteys on *non-line-of-sight* (NLOS), eli lähettimen ja vastaanottimen välillä ei ole näköyhteyttä. Fyysiset esteet, kuten ikkunat, seinät ja eristeet, lisäävät entisestään signaalin vaimentumista. Lisäksi sade aiheuttaa signaalin vaimentumista, kuten myös happi 60 GHz:n taajuudella. Tukiasemat käyttävät millimetriaaltotaajuuksilla alhaisempaa lähetystehoa, alle 10 wattia. [2] Tämä johtuu siitä, että *International Commission on Non-ionizing Radiation Protection* (ICNIRP) ja *Federal Communications Commission* (FCC) ovat määritelleet hyvin tarkasti kuinka suurelle määrälle säteilyä ihminen saa altistua. Näiden säädösten on tarkoitus estää ihmisen solukudoksen liiallinen lämpeneminen, joka aiheutuu liiasta sähkömagneettiselle säteilylle altistumisesta. [1]

Edellä mainittujen asioiden johdosta millimetriaaltotaajuuksilla toimivan tukiaseman kantama on hyvin pieni, tyypillisesti 100 metriä. Jos oletetaan tyypillisen alle 6 GHz:n taajuudella toimivan tukiaseman kantamaksi yli 1 kilometri ja maksimilähetystehoksi 200W, niin eron voidaan todeta olevan huomattava. [2]



Kuva 2. *Eri taajuusalueiden tiedonsiirron ominaisuuksia.* [15]

Näin ollen millimetriaaltoja ei voida käyttää laajan aluepeiton takaamiseksi, vaan ainoastaan lähialueen kapasiteetin lisäämiseen tai lyhyen kantaman tietoliikenneverkon muodostamiseen. Tilannetta on havainnollistettu kuvassa 2. Käytännössä nämä vaihtoehdot tarkoittavat sitä, että solualue voidaan muodostaa pelkillä millimetriaaltotaajuuksilla, tai niitä voidaan käyttää olemassa olevan matalammalla taajuudella operoivan solun, esimerkiksi LTE-verkon solun, siirtonopeuksien ja yhteyden laadun parantamiseen. Tiheästä usean solun rykelmästä käytetään englannin kielessä nimitystä *ultra-dense network* (UDN).

2.3 Käyttö 5G mobiiliradioverkossa

30–300 GHz:n alueelta löytyy vapaita käyttämättömiä taajuusalueita. Tämän lisäksi samaiselta alueelta on vapautettu taajuuskaistoja käytettäväksi. Nämä voivat vaihdella maanosasta ja valtiosta riippuen. 5G:tä on suunniteltu siten, että aiemmin käytössä olevien taajuusalueiden lisäksi myös näitä vapaita korkeamman taajuuden, eli yli 6 GHz:n, kaistoja käytetään verkkojen tiedonsiirrossa hyväksi. *International Telecommunication Union Radiocommunication Sector* (ITU-R) etsii ja *3rd Generation Partnership Project* (3GPP) määrittelee jatkuvasti uusia käytettäviä taajuuskaistoja 5G:lle [1].

Taajuuskaistat, joita 5G pyrkii hyödyntämään, sijoittuvat välille 400 MHz – 90 GHz. Huomion arvoista on se, että 5G:stä puhuttaessa myös taajuusväliä 24—30 GHz pidetään millimetriaaltotaajuusalueen osana. Varsinkin millimetriaaltotaajuudet 20 GHz:n yläpuolella ovat olennaisia tyydyttämään nykyajan suuremman kapasiteetin ja korkeamman siirtonopeuden tarpeet. Käytännössä operaattorikohtainen kaistanleveys on 800 MHz alle 40 GHz:n taajuuksilla ja jopa 2000 MHz yli 50 GHz:n taajuuksilla. Nämä voivat kuitenkin vielä muuttua tulevaisuudessa. [2]

Taajuuskaistat ovat yleisesti lisensoituja tai lisensoimattomia. Lisensoitu taajuuskaista on yksinomaan operaattorien käytössä ja lisensoimaton taajuuskaista on vapaasti kaikkien käytettävissä. Lisensoimattomalla kaistalla on kuitenkin määritelty yläraja signaalin lähetysteholle. 5G:n millimetritaajuusalue muodostuu lisensoiduista taajuuskaistoista. Nämä taajuuskaistat ovat:

- *24,25—27,5 GHz*: Standardin mukaiselta nimeltään *n258*. Käytetään Euroopassa ja Kiinassa.
- *26,5—29,5 GHz*: Standardin mukaiselta nimeltään *n257*. Käytetään muun muassa Etelä-Koreassa ja Japanissa.

- *27,5—28,35 GHz*: Standardin mukaiselta nimeltään *n261*. Käytetään Yhdysvalloissa. [1]
- *37—40 GHz*: Standardin mukaiselta nimeltään *n260*. Kaistan käyttöä on suunniteltu monissa maissa. [3]

Lisensoimattomat 5G:n taajuusalueet ovat olleet myös puheen aiheena. Seuraavat taajuusalueet ovat lisensoimattomia [2]:

- *57—64 GHz*: Kutsutaan V-kaistaksi (*V-band*) tai 60 GHz:n kaistaksi. Kuten luvussa 2.2 mainittiin, tällä kaistalla happi vaimentaa signaalin tehokkuutta. Tämä kaista voisi potentiaalisesti toimia paikallisten 5G-verkkojen tarjoamiseen, ja muun muassa mikro-operaattorien toimintaan.
- *71—76 GHz* ja *81—86 GHz*: Nämä kaksi kaistaa muodostavat yhdessä E-kaistan. Sade aiheuttaa tällä kaistalla signaalin vaimentumista ja esimerkiksi satelliitit ja tutkat aiheuttavat mahdollista häiriötä.
- *92—95 GHz*: Kutsutaan W-kaistaksi (*W-band*) tai 90 GHz:n kaistaksi. Tämä kaista on tarkoitettu sisäkäyttöön, sekä tarkoin määriteltyyn ja rajattuun ulkokäyttöön.

Mobiiliverkoissa voidaan käyttää aikajakoista dupleksointia (*time-division duplexing*) eli TDD:tä, joka tarkoittaa että ylä- ja alalinkki ovat samalla taajuudella, mutta sijoitettu eri aikaväleihin. TDD:tä käytettäessä ylä- ja alalinkin taajuuskaistat eivät sijaitse taajuusakselilla vierekkäin. Ylä- ja alalinkin välillä on tärkeää olla riittävän pitkä suoja-aika, jotta ne eivät häiritse toisiaan. Tukiasemalla ja päätelaitteella täytyy olla tarpeeksi aikaa vaihtaa ylälinkistä alalinkkiin ja päinvastoin. 5G käyttää varsinkin millimetriaaltotaajuuksilla dynaamista TDD:tä, joka tarkoittaa, että määrättyjä aikavälejä voidaan allokoida uudelleen ajoituspäätösten mukaisesti. [1]

2.4 Vaikutukset linkkibudjettiin

Linkkibudjetti on hyödyllinen työkalu, jolla voidaan ratkaista esimerkiksi vaadittava lähetysteho tai sallitun vaimenemistehon yläraja. Linkkibudjettiin vaikuttavat teho, antennivahvistukset, häviöt ja kohina.

Lähettimen lähetysteho voidaan ilmaista efektiivisen isotrooppisen säteilytehon eli EIRP:n (*effective isotropically radiated power*) avulla. Usein desibeleissä ilmaistavan EIRP:n laskukaava on yleisesti muotoa

$$EIRP[\mathrm{dB}] = P_T + G_a - L_T \ , \tag{3}$$

jossa P_T on lähetysteho, G_a on lähetinantennin vahvistus ja L_T kuvaa lähettimen kaapelihäviöitä. Kuten luvussa 2.2 mainittiin, millimetriaallot mahdollistavat kuitenkin suuremman antennimäärän eli antenniryhmät. Antenniryhmien tapauksessa lähettimen keilanmuodostusvahvistus on muotoa

$$G_{BF}[\mathrm{dB}] = 10\log_{10}(M)\ , \tag{4}$$

jossa M on antennielementtien lukumäärä. Keilanmuodostusvahvistus summataan lähettimen elementtikohtaiseen antennivahvistukseen G_n, jolloin saadaan

$$G_a[\mathrm{dB}] = G_n + G_{BF}\ . \tag{5}$$

EIRP:n kaavan muodoksi tulee nyt antenniryhmien tapauksessa

$$EIRP[\mathrm{dB}] = \left(G_{BF} + P_{T,n}\right) + G_a - L_T\ , \tag{6}$$

jossa $P_{T,n}$ on antennielementtikohtainen lähetysteho.

Kanavassa signaalin tehoon vaikuttaa vaimennus ja kohina. Kohinan spektritiheyden kaava on muotoa

$$N_0[\mathrm{dBm}] = 10\log_{10}\left(\frac{kT}{1{,}0\mathrm{mW}}\right)\ , \tag{7}$$

jossa k on Boltzmannin vakio ja T on lämpötila kelvineinä. Huoneen lämpötilassa (21°C) kohinan spektritiheys on noin -174 dBm. Käytössä olevan taajuuskaistan kohinatehon kaava on muotoa

$$N[\mathrm{dBm}] = N_0 + 10\log_{10}(B)\ , \tag{8}$$

jossa B on kaistanleveys hertseinä. Vastaanottimen tehokynnys vastaanotetulle signaalille on

$$P_R[\mathrm{dBm}] = N + NF + SNR\ , \tag{9}$$

jossa NF on kohinaluku ja SNR on saavutettu tai tavoiteltu signaali—kohinasuhde. Nykyisissä mobiiliverkoissa vastaanottimen signaaliprosessointi on liitetty aivan antennin juureen, jolloin kaapelihäviöiden vaikutus on käytännössä olematon. Kun lähettimen tehokynnys, kanavan kohina ja lähetysteho on ratkaistu, voidaan sallittu etenemisvaimennuksen maksimi laskea kaavasta

$$L[\mathrm{dB}] = EIRP + G_R - P_R\ , \tag{10}$$

jossa G_R on vastaanottimen antennin vahvistusteho. Kaavalla 8 saatu etenemisvaimennuksen tulos voidaan sijoittaa kaavaan 2, jolloin saadaan ratkaistua lähettimen ja vastaanottimen sallittu maksimietäisyys, jolla tiedonsiirto vielä onnistuu valitulla taajuudella. Kaavan 2 ja 8 yhteydestä huomataan myös, miten

millimetriaaltotaajuudet rajoittavat linkkietäisyyttä enemmän kuin alemmat, esimerkiksi LTE:n, taajuudet.

Levasen et al. julkaiseman tutkimuksen laskentatyökalun [11] avulla on tarkasteltu antenniryhmien vaikutusta linkkibudjettiin millimetriaaltotaajuuksilla. Laskuissa on keskitytty antennielementtien lukumäärien muutosten vaikutuksiin. Kuten luvussa 2.2 mainittiin, happimolekyylit aiheuttavat lisävaimennusta 60 GHz:n taajuudella. Tätä ei ole otettu laskuissa huomioon. Tulokset on kirjattu taulukkoon 1, jossa maksimietäisyydet on laskettu 3GPP:n *Urban Micro* (UMi) -etenemisvaimennusmallin avulla.

Taulukko 1. *Antenniryhmien käytön vaikutus linkkibudjettiin.*

Lähettimen antennielementit	8	8	16	16
Lähettimen antennivahvistus (dB)	5	5	5	5
Elementtikohtainen lähetysteho (dBm)	10,9	10,9	10,9	10,9
Lähettimen kaapelihäviöt (dB)	6	6	6	6
Kantoaaltotaajuus f_c (GHz)	60	60	60	60
Kohinaluku *NF* (dB)	9	9	9	9
Tavoiteltu SNR (dB)	7	7	7	7
Vastaanottimen antennielementit	128	64	128	64
Vastaanottimen antennivahvistus (dB)	5	5	5	5
Maksimietäisyys, LOS (m)	595	428	1152	828
Maksimietäisyys, NLOS (m)	74	61	109	90

Lukuarvoista nähdään kuinka lähettimen antennielementtien lukumäärä vaikuttaa maksimietäisyyteen huomattavasti enemmän kuin vastaanottimen antennielementtien lukumäärä. Lähettimen elementtien kaksinkertaistaminen kasvattaa näköyhteydellistä maksimietäisyyttä likimain kaksinkertaiseksi. Vastaanottimen elementtien kaksinkertaistaminen vaikuttaa sen sijaan maksimietäisyyteen huomattavasti

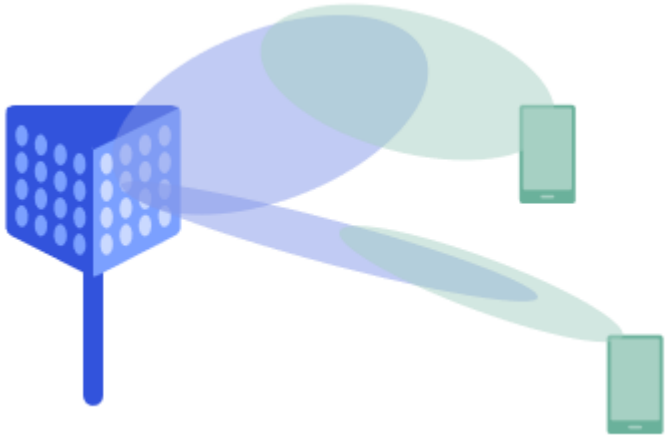
vähemmän. Huomataan myös selvästi, kuinka millimetriaallot eivät kulje pitkälle ilman näköyhteyttä.

3. LAITTEISTON HAASTEET JA RATKAISUT

3.1 Antenniryhmät ja keilanmuodostus

Antenniryhmät ovat erittäin tärkeitä varsinkin millimetriaaltotaajuuksilla, koska solun laajan aluepeiton saavuttaminen ja etenemisvaimennuksen lieventäminen on haasteellista. Spektritehokkuus ei ole olennaisinta, sillä taajuuskaistaa on käytettävissä enemmän. Antenniryhmää voidaan hyödyntää vaimenemisen lieventämisessä, sillä jokainen antennielementteihin saapuvista signaaleista eroaa muista jonkin verran. Tämä johtuu siitä, että alkuperäisen signaalin kopiot kulkevat erilaisten kanavien läpi ja näin ollen niillä on erilaiset etenemisviiveet. Kanavien erot tulevat esimerkiksi antennielementtien sijainti- ja polaariteettieroista tai eri heijastusteistä.

Lähettimen puolella voidaan säätää jokaisen antennielementin vaihetta ja amplitudia paremman suuntaavuuden saavuttamiseksi. Paremmalla suuntaavuudella vastaanottimen kokema signaalin teho ja siirtonopeus saadaan suuremmaksi. Parempaa suuntaavuutta voidaan hyödyntää myös vastaanottimessa, jolloin vastaanottosuunta on tarkemmin määritelty ja ulkopuolisia muista suunnista saapuvia signaaleja saadaan vaimennettua enemmän. [1] Tätä tekniikkaa kutsutaan keilanmuodostukseksi ja sitä on havainnollistettu kuvassa 3.



Kuva 3. *Tukiasema palvelee käyttäjiä suunnattujen keilojen avulla.* [16]

Keilanmuodostuksessa suuntaavuus saadaan aikaiseksi lisäämällä antennielementteihin progressiivista viivettä, jolloin elementtien signaalien summalle saadaan tarkempi suunta eli keila. Tätä keilaa voidaan ohjata eri suuntiin kontrolloimalla elementtien progressiivista viivettä. Näin keilat pystyvät seuraamaan liikkeessä olevia

laitteita. Kapeakaistaisessa järjestelmässä viivettä voidaan arvioida vaihe-eron avulla. Antennielementtien signaaleja kerrotaan kompleksisilla painoarvoilla, joiden vaihe määrää keilan suunnan. Tämän ratkaisun edut ovat kuitenkin rajalliset, sillä näköyhteyttä lähettimen ja vastaanottimen välillä ei aina ole. Keilanmuodostus on toimiva ratkaisu, jos yksi signaalin etenemisteistä on selvästi muita parempi, esimerkiksi LOS tai vahva heijastus. Riittävän aluepeiton takaamiseksi millimetriaaltotaajuuksilla data-, hallinta- ja yleislähetyssignaalit lähetetään keilanmuodostuksen avulla.

Laitteistorajoitusten vuoksi keilanmuodostus toteutetaan yleensä analogisena, koska myös käyttäjälaitteiden (*user equipment*, UE) täytyy tukea keilanmuodostusta. [7] Vapaa tila uusille antenneille puhelimissa on erittäin vähissä, joten millimetriaaltoja tukevat antennit täytyy sijoittaa niin, että ne vievät mahdollisimman vähän tilaa. Puhelimen kehysrunkoa, jossa antennit sijaitsevat, hyödyntävät jo entuudestaan esimerkiksi LTE, WiFi ja GPS. Edellä mainitut käyttävät myös huomattavasti alhaisempia taajuuksia verrattuna millimetriaaltotaajuudella toimivaan antenniin. [5] Millimetriaaltoantennien pienen koon ansiosta tilan löytyminen jää kuitenkin pieneksi ongelmaksi.

3.2 Vahvistimet

Vahvistimen tehtävänä on kasvattaa lähetystehoa, jotta lähettimen ja vastaanottimen välillä tapahtuva vaimentuminen saadaan kumottua [6]. Ideaalisen vahvistimen ulostulosignaalina on sisääntulosignaali, jonka amplitudia on kerrottu skalaarilla. Kyseinen vahvistin täyttää lineaarisuuden ehdot. Mikään vahvistin ei ole kuitenkaan täysin lineaarinen. Vahvistimella on käytännössä kaksi toiminta-aluetta: lineaarinen alue ja saturaatioalue. Lineaarisella alueella vahvistin noudattaa lineaarisuuden ehtoa, mutta sen tehokkuus ei ole silti hyvä. Kun tehoa kasvatetaan, vahvistimen toiminta-alue siirtyy jossain vaiheessa saturaatioalueelle. Saturaatiossa vahvistimella on hyvä tehokkuus, mutta epälineaarisuuksia alkaa ilmetä. Epälineaarisuus aiheuttaa signaalin amplitudin ja vaiheen vääristymistä. [6] Käytännön vahvistin onkin yleensä lähettimen epälineaarisin komponentti, mikä tekee standardien noudattamisesta haastavampaa [7]. Lisäksi vahvistin vaatii lähettimen komponenteista eniten tehoa [4].

Minkä tahansa vahvistimen epälineaarisuuksia voidaan välttää esimerkiksi seuraavilla tavoilla:

- Ulostulon tasovaraa (*output backoff,* OBO) käytettäessä vahvistin toimii lineaarisella alueella, mutta lähetysteho heikkenee. Varsinkin millimetriaaltoja käytettäessä vahvistimen tehokkuus laskee.

- Digitaalisessa esisärötyksessä (*digital pre-distortion,* DPD) signaalia käsitellään digitaalisessa muodossa etukäteen niin, että vahvistimen epälineaariset ominaisuudet saadaan kumottua. Signaalin käsittelystä tulee kuitenkin sitä hankalampaa, mitä enemmän antenneja ja taajuuskaistaa lähettimessä on käytössä. [6]
- Verhokäyrän seurannassa (*envelope tracking*) teholähteen jännitettä muutellaan sisääntulosignaalin mukaisesti niin, että vahvistin pysyy lähellä saturaatiota. Tällä metodilla on mahdollista saavuttaa lineaarinen vahvistus usean epälineaarisen vahvistimen avulla. Kuten aiemmin on mainittu, saturaatiossa toimivan epälineaarisen vahvistimen tehokkuus on parempi kuin lineaarisella alueella toimivan.
- Itsebiasoinnissa (*self-biasing*) teholähde- ja biasointijännitettä muutellaan transistorin optimaalisen jännitteenmuutoksen saavuttamiseksi. Tämä ratkaisu sopii korkeille tehovaatimuksille ja takaa parannetun tehokkuuden.

Myös erilaisia vahvistinkonfiguraatioita on kehitelty hyvän lineaarisuuden saavuttamiseksi. Nykyaikana tunnetuin ja käytetyin on Dohertyn konfiguraatio. Dohertyn konfiguraatiossa signaali jaetaan kahteen osaan ja kumpaakin vahvistetaan erilaisella vahvistimella. Vahvistimet ovat eri toimintapisteissä. Vahvistusten jälkeen signaalit yhdistetään takaisin. Dohertyn konfiguraatiolla on hyvä tehokkuus, mutta signaalin osien tehoarvojen erottaminen ja yhdistäminen on hankalaa. [4]

3.3 Suodattimet

Suodatin rajoittaa signaalin taajuussisältöä halutulla tavalla ja vaimentaa ei-haluttuja tekijöitä, kuten kohinaa, harmonisia taajuuksia ja keskinäismodulaatiota. Vastaanottimessa suodattimen täytyy vaimentaa muiden taajuuksien ja lähettimen aiheuttamia häiriöitä. [1] Tyypillisimpiä suodatintyyppejä ovat esimerkiksi alipäästö- ja kaistanpäästösuodatin. Suodatus voi tapahtua analogiselle tai digitaaliselle signaalille. Nykyään suodattimet voivat olla joko kiinteitä tai ohjattuja. Tämä tarkoittaa sitä, että suodatin voi olla suunniteltu toimimaan vain yhdellä kaistalla, tai niin että sen kaistaa ja muita parametreja voidaan muuttaa halutessa. Korkealaatuisen suodattimen toteutus millimetriaaltotaajuuksille on monimutkainen teknologinen ongelma [8], sillä kookkaiden millimetriaaltotaajuuksilla toimivien suodattimien sijoitus integroituihin kokonaisuuksiin on haastavaa [1].

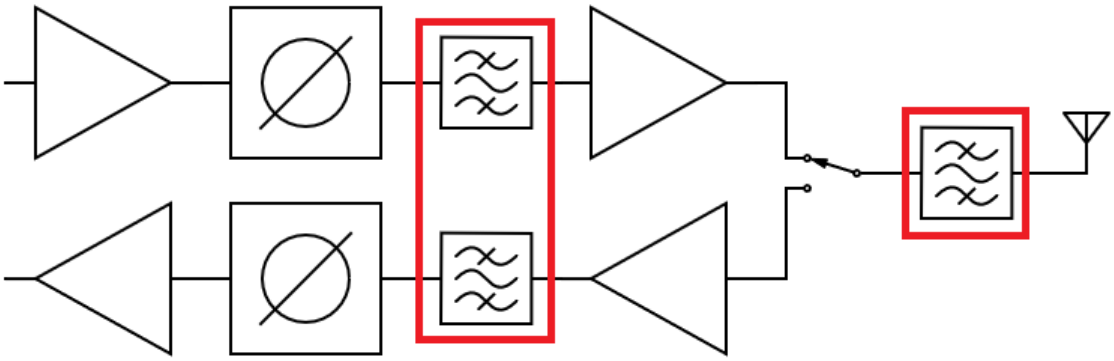
Analogisen suodattimen toteutukseen löytyy monia erilaisia ratkaisuja. Tarkastellaan seuraavaksi lyhyesti kahta mahdollista tapaa. Ensimmäinen tapa on suodattimen

yhtenäinen integrointi CMOS-sirun, jolla on sisäänrakennettu vahvistin ja taajuusmuunnin, kanssa. Tämän tavan etuna on sen edullinen toteutus. Haittapuolena on rajoitetut mahdollisuudet korkean suorituskyvyn suodattimilla, koska suoraan sirulle sijoitetun suodattimen resonaattorin hyvyysluku, eli Q-arvo, jää huonoksi. Toinen vaihtoehto on suodattimen epäyhtenäinen integrointi edellisen tavan mukaisen CMOS-sirun kanssa. Tämä vaihtoehto takaa paremman suorituskyvyn ja ulkoisia suodattimia on helppo lisätä enemmänkin. Toisaalta järjestelmän kompleksisuus, koko ja tehonkulutus kasvavat. [1]

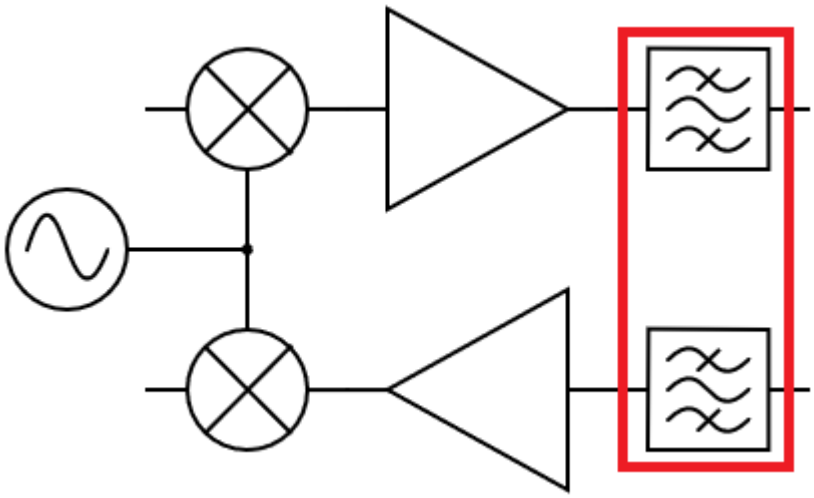
Yleisesti ottaen suodattimia voidaan sijoittaa ainakin kolmeen eri sijaintiin lähettimessä tai vastaanottimessa [1]:

- Antennin taakse, jolloin suodatin vaimentaa päästökaistan ulkopuolista häiriötä ja kohinaa. Tämä sijoitus helpottaa muiden toimintalohkojen suunnittelua. Liitosvaimennuksen täytyy kuitenkin olla alhainen, ja jokainen antenniryhmän elementti tarvitsee oman suodattimensa.
- Ensimmäisten vahvistimien takana (antennista katsottuna), jolloin suodattimet vaimentavat muun muassa paikallisoskillaattori-, kohina- ja harhasäteilyä, sekä muita häiriösignaaleja. Korkeampi vaimennus ja tarkoittamattomat päästökaistat eivät haittaa. Lisäksi taajuustarkkuus on parempi.
- Sillä puolella sekoittimia, jolla signaalin taajuus on korkeampi. Tämä suodattaa samoja tekijöitä kuin vahvistimen takana oleva suodatin, mutta järjestelmän IF- eli välitaajuudella (*intermediate frequency*). Tähän sijaintiin riittää vain yksi suodatin, jos käytetään analogista keilanmuodostusta. Tämä mahdollistaa alhaisemmat koko- ja hintavaatimukset, tarkemman suodatuksen ja korkeamman Q-arvon resonaattoreissa.

Näitä kolmea vaihtoehtoa on havainnollistettu kuvissa 4 ja 5.



Kuva 4. *Suodattimien sijoitus ensimmäisten vahvistimien tai antennin taakse.*



Kuva 5. *Suodattimien sijoitus piirin suurtaajuisemmalle puolelle.*

Liian kapean päästökaistan suodatukset antenniryhmän elementeissä aiheuttavat liiallista häviötä millimetriaaltotaajuuksilla. Jotta liitosvaimennus saadaan tarpeeksi alhaiseksi, suodattimen päästökaistaa voidaan leventää huomattavasti signaalin varsinaista taajuuskaistaa suuremmaksi. Tämä aiheuttaa kuitenkin sen, että enemmän ei-haluttuja signaaleja ja häiriötekijöitä pääsee suodattimen läpi. Lopullinen ratkaisu riippuu järjestelmän suunnittelijasta, mutta seuraavat asiat täytyy huomioida: kaistanleveyden ja hyvyysluvun kasvattaminen pienentävät liitosvaimennusta, mutta kantoaaltotaajuuden ja antennielementtien määrän nostaminen kasvattaa liitosvaimennusta. [1] Liitosvaimennuksen IL (*insertion loss*) laskukaava on muotoa

$$IL[\mathrm{dB}] = -20\log_{10}|S_{21}| \ , \tag{11}$$

jossa S_{21} on yksi S-parametreista, joka kuvaa lineaarisen sähköisen järjestelmän kompleksista lineaarista vahvistusta [9].

3.4 Paikallisoskillaattorit

Oskillaattorit tuottavat kellosignaalin ajoitusta ja synkronointia varten, sekä kantoaaltotaajuuden sekoittimille signaalin taajuussiirtoa varten. Antenniryhmissä voidaan käyttää yhtä oskillaattoria kaikille elementeille tai omaa oskillaattoria jokaiselle, riippuen tilanteesta ja vaatimuksista. Oskillaattorin tuottaman signaalin vaihetta häiritsevät monet tekijät, kuten vaihevärinä (*phase jitter*) referenssioskillaattorista, lämpökohina vaihelukitusta silmukkapiiristä (*phase-locked-loop circuit*), raekohina (*shot noise*) ja häiriösignaalit teholähteestä. [6] [7] Näiden seurauksena epäideaalisessa oskillaattorissa on yleensä kahdenlaista vääristymää: häiriösignaaleja (*spurious tones*) ja vaihekohinaa (*phase noise*).

Häiriösignaalit erottuvat taajuusspektrissä selvästi yhdestä tai useammasta signaalista. Häiriösignaalit eivät kuitenkaan vaikuta järjestelmän suorituskykyyn merkittävästi, sillä ne muuttuvat erittäin hitaasti. [6] Tämä tekee niiden huomioimisesta ja käsittelystä helpompaa.

Vaihekohina kasvaa aina 6 desibelillä, kun taajuus kaksinkertaistuu. Se summautuu ensiksi oskillaattorin tuottamaan kantoaaltoon, jonka avulla se kulkee aina vastaanottimen kantataajuuskaistalle asti. Tämän seurauksena signaali-kohinasuhde (*signal-to-noise ratio*) eli SNR heikkenee ja käytetty modulaatioindeksi ilmenee usein liian suureksi. Verrattuna alle 6 GHz:n taajuuksiin, millimetriaaltotaajuuksilla kanavan koherenssiaika tulee vielä rajoitetummaksi ja pilottisymboleiden avulla määritellyn kanavaestimaatin korruptoituminen on todennäköisempää. Tämän takia hyvät vaihekohinaa lieventävät algoritmit ovat tärkeitä. [6] Lisäksi vaihekohinaa voidaan lieventää esimerkiksi vaihelukitulla silmukalla tai lisäämällä resonaattoriin kulkevaa virtaa. Näilläkin ratkaisuilla on haittapuolensa, kuten suurempi tehonkulutus ja kohinan kasvaminen muilla taajuuksilla. [7] Vaihekohinaa käytetään yleisenä oskillaattorin laatua kuvaavana parametrina. Se kertoo signaalin stabiilisuudesta taajuustasossa. Vaihekohinan yksikkö on dBc/Hz ja se kuvaa oskillointitaajuuden muutoksen todennäköisyyttä. [1] D.B. Leeson johti vuonna 1966 kaavan vaihekohinan tehon spektritiheydelle, joka on muotoa

$$L(f_m) = 10\log_{10}\left[\frac{1}{2}\left(\left(\frac{f_0}{2Q_l f_m}\right)^2 + 1\right)\left(\frac{f_c}{f_m} + 1\right)\left(\frac{FkT}{P_s}\right)\right], \tag{12}$$

jossa L on vaihekohinateho desibeleinä, f_0 oskillaattorin toimintataajuus, Q_l oskillaattorin Q-arvo eli hyvyysluku, f_m vaihekohinan ilmenemistaajuus, f_c rajataajuus, F puskurivahvistimen kohinakerroin, k Boltzmannin vakio, T lämpötila kelvineinä ja P_s oskillaattorin ulostulon teho [10]. Tätä kaavaa kutsutaan Leesonin kaavaksi ja se on edelleen yleisesti käytössä vaihekohinan analysoimisessa. Kaavasta nähdään, että oskillaattorin Q-arvo ja teho täytyy maksimoida, jotta sen vaihekohina minimoituisi.

Oskillaattorin signaali heikkenee vahvuudeltaan millimetriaaltotaajuuksilla. Tämä johtuu siitä, että vaadittavien puolijohdekomponenttien läpilyöntijännite alenee niiden koon pienentyessä. Näin ollen oskillaattorin teho pienenee taajuuden kasvaessa. Ratkaisuna tähän ongelmaan on tuottaa alemman taajuuden vaihelukittu silmukka, jonka jälkeen signaali siirretään korkeammalle taajuudelle. Tämä metodi on hyvin laajassa käytössä millimetriaaltotaajuuksien paikallisoskillaattoreissa. [1]

3.5 Digitaali- ja analogimuuntimet

Digitaali-analogi (DA) -muuntimet muuttavat diskreettiaikaisen signaalin jatkuva-aikaiseksi. Analogi-digitaali (AD) -muuntimet tekevät puolestaan päinvastaisen operaation. Suurena haasteena on millimetriaaltotaajuuksilla käytettävä kaistanleveys ja siirtonopeus, jotka vaativat AD- ja DA-muuntimilta erittäin suuria prosessointinopeuksia. Lisäksi nämä muuntimet ovat yleensä suuremmilla kaistanleveyksillä digitaalisen tiedonsiirtojärjestelmän pullonkauloja [7]. Näin ollen järjestelmän ja algoritmien suunnittelu on haasteellista. AD-muuntimet sisältävät yleensä iteratiivisia prosesseja, mutta DA-muuntimet eivät. DA-muuntimet ovatkin yleensä AD-muuntimia yksinkertaisempia toteutukseltaan ja toiminnaltaan. Tästä syystä AD-muuntimet ovat paljon mielenkiintoisempia ja suositumpia tutkimuksen kohteita. [1] Samasta syystä seuraavaksi keskitytään vain AD-muuntimiin.

Millimetriaaltotaajuuksilla toimivien järjestelmien suuri ongelma on yleisesti niiden korkea tehonkulutus. AD-muunnin on eniten tehoa kuluttava osa tiedonsiirtojärjestelmässä. AD-muuntimen tehonkulutus on suoraan verrannollinen sen resoluutioon ja näytteistystaajuuteen, joka on kieltämättä suuri millimetriaaltotaajuuksilla käytettävillä kaistanleveyksillä. Jos oltaisiin valmiita uhraamaan osa suorituskyvystä, järjestelmän tehonkulutusta voitaisiin alentaa ainakin kahdella eri tavalla. Yksi tapa on korvata AD-muunnin useilla rinnakkain toimivilla AD-muuntimilla, joilla on pienempi nopeus mutta korkeampi resoluutio. Toinen tapa on korvata AD-muunnin useilla rinnakkain toimivilla AD-muuntimilla, joilla on korkeampi nopeus mutta alhaisempi resoluutio. [12] Alhaisen resoluution AD-muuntimia tutkitaan enemmän ratkaisuna millimetriaaltotaajuuksien tietoliikennejärjestelmille.

Toinen AD-muuntimien ongelma on kvantisointikohina, joka aiheuttaa epälineaarisuuksia. Kvantisointikohinalla viitataan AD-muuntimen tekemiin kvantisointivirheisiin, kun se muuttaa analogista signaalia digitaaliseksi. Kvantisointikohina ja sen vähentäminen ovat suuria tutkimuksen kohteita. Pollok et al. saivat tutkimuksessaan parannettua SNR:ää jopa 2,04 dB käyttämällä kahta rinnakkain toimivaa korkearesoluutioista AD-muunninta ja *maximal-ratio combining* (MRC) -metodia [13]. Kvantisointikohinaa voidaan myös vähentää käyttämällä sekaresoluutioista järjestelmää, jossa AD-muuntimilla on keskenään eri resoluutiot. Kvantisointikohinan lisäksi tämä ratkaisu vähentää järjestelmän kapasiteettihäviöitä. [12]

4. ANTENNIRYHMÄLAITTEIDEN TARKASTELUA

4.1 Anokiwave AWMF-0129 (28 GHz)

Yhdysvaltalainen Anokiwave julkaisi huhtikuussa 2017 vaiheistettujen aktiiviantenniryhmien tuoteperheensä. Vaiheistettu tarkoittaa antenniteoriassa sitä, että antenniryhmän keilan suuntaa voidaan ohjata sähköisesti muuttamalla elementtien vaihekertoimia.

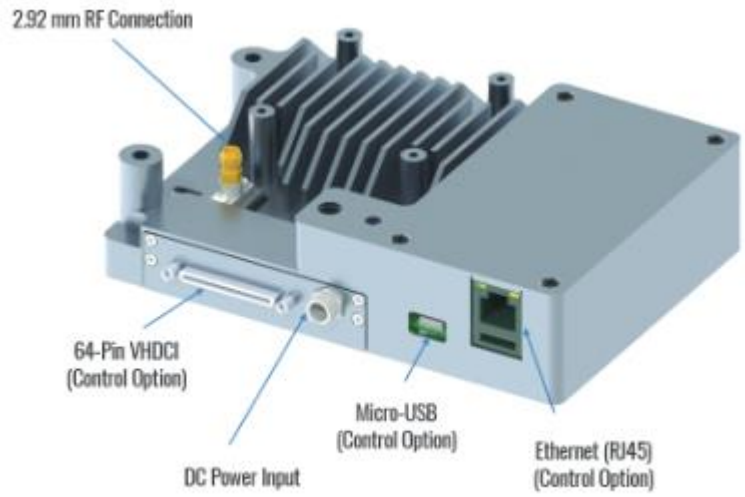
Yksi edellä mainittuun tuoteperheeseen kuuluva laite on AWMF-0129, joka on 28 GHz:n taajuudella toimiva antenniryhmälaite. Kuvassa 6 näkyvä AWMF-0129 on tarkoitettu varsinkin langattoman millimetriaaltotaajuuksilla tapahtuvan 5G:n kommunikaation sovellusten testaamiseen ja kehittämiseen. Laitetta voidaan käyttää sekä lähettimenä että vastaanottimena.

Kuva 6. *AWMF-0129 5G 28 GHz Active Antenna Innovator's Kit.* [17]

Laitteen tarkempi toimintataajuusalue on 27,5—30 GHz. Sen planaarinen, eli tasomainen, antenniryhmä koostuu 64:stä elementistä. Elementit on sijoitettu 8x8-ruudukon mukaisella tavalla. AWMF-0129 sisältää integroidun kontrollerin, joka voi ohjata antenniryhmän muodostamaa keilaa haluttuun suuntaan vähäisellä latenssilla ja järjestelmän herkkyydellä. Sähköinen kaksiulotteinen keilanohjaus tapahtuu käyttäen analogista RF-keilanmuodostusta. Vaihetta ja tehovahvistusta voidaan kontrolloida

itsenäisesti. Millimetriaaltojen keilanohjauksen etuja ovat vähäisempi häiriö sekä parempi SNR, tiedonsiirtonopeus, kapasiteetti ja tehokkuus. [17]

Keilan leveyttä voidaan myös muokata. Leveä keila tukee kanavatilainformaation (*channel state information*, CSI) mittaamista, hakutiloja ja yleislähetyskanavia. Pienillä keiloilla on mahdollista vähentää häiriöitä, optimoida SNR:ää, maksimoida EIRP ja pidentää kantamaa. Useampaa kapeampaa keilaa voidaan käyttää keilan akvisitioon. [19] AWMF-0129 ilman kotelointia ja antenneja näkyy kuvassa 7.



Kuva 7. *AWMF-0129:n liitännät.* [17]

AWMF-0129:n pinta-asennettu antennikortti käyttää kontrollerina AWMF-0108 IC:tä, joka on silikoninen neliytiminen integroitu piiri. [17] AWMF-0108 tukee puolidupleksointia sekä 5 bittistä vaiheen ja tehovahvistuksen kontrollointia. Yksittäinen AWMF-0108 tukee neljää säteilevää antennielementtiä, joten AWMF-0129:n 64-elementtistä antenniryhmää varten tarvitaan 16 AWMF-0108:aa. [18] AWMF-0108 on esitetty kuvassa 8.

Kuva 8. *AWMF-0108 28 GHz Silicon 5G Tx/Rx Quad Core IC.* [18]

Käyttämällä AWMF-0108:aa antenniryhmä pystyy tuottamaan +50 dBmi:n, eli 100 watin, ulostulotehon, kun radiotaajuuspiiri kuluttaa 12 wattia DC-tehoa. Anokiwaven mukaan tällä tavalla on saavutettu gigatavujen luokkaa (Gt/s) vastaavat siirtonopeudet.

Lisäksi AWMF-0129 tukee lineaarista polarisaatiota ja lämpötilojen monitorointia. Laitetta voidaan käyttää yksinään tai se voidaan yhdistää ja synkronoida muiden antenniryhmien kanssa. Tällöin voidaan hyödyntää hybridikeilanmuodostusta, jossa käytetään sekä analogista että digitaalista keilanmuodostusta, ja *multiple-input-multiple-output* (MIMO) -toimintoja. [17]

4.2 SiversIMA EVK06002/00 (57—71 GHz)

SiversIMA on ruotsalainen puolijohdekomponentteja kehittävä yritys, joka on erikoistunut mikroaaltoihin, millimetriaaltoihin ja optisiin puolijohteisiin. SiversIMA:n evaluaatiotuotesarjat eli EVK:t on tarkoitettu varsinkin 5G millimetriaaltojärjestelmien testaamiseen ja kehittämiseen, mutta myös WiGig-järjestelmiä voidaan tutkia. EVK:ta voidaan käyttää esimerkiksi apuna *Vehicle-to-everything* (V2X) -kommunikaatiossa, jossa ajoneuvo ja ympäristö vaihtavat informaatiota ja muuta dataa keskenään.

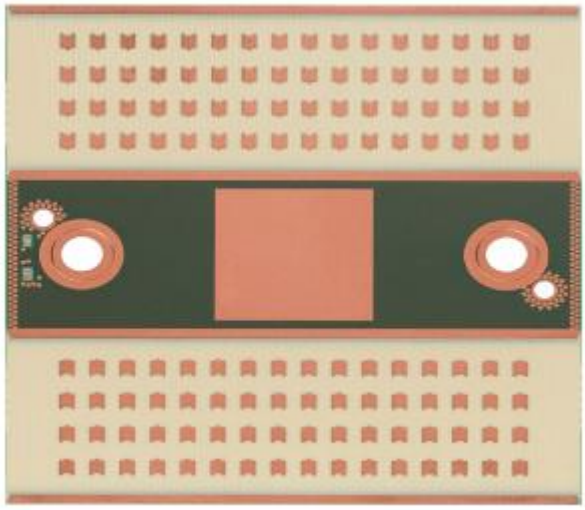
Kuvassa 9 näkyvä EVK06002/00 toimii millimetriaaltotaajuusalueella välillä 57—71 GHz. Se koostuu emolevystä, radiotaajuus- eli RF-moduulista ja graafisesta käyttöliittymästä.

Kuva 9. *SiversIMA:n EVK06002/00-evaluaatiotarvikesarja.* [20]

Antenniryhmän muodostamaa säteilykeilaa on mahdollista ohjata. Integroidun syntetisaattorin avulla voidaan tukea 64 QAM-modulaatiota. Sekä lähetin että vastaanotin sisältävät kontrollit paikallisoskillaattorin taajuuden säätämiselle. Lisäksi EVK06002/00 tukee IEEE802.11ad-standardin mukaisesti kuutta RF-kanavaa. [20]

EVK06002/00:n käyttää RF-moduulinaan BFM6010/00:aa. Kyseinen moduuli on IEEE802.11ad-standardin mukainen ja se on suunniteltu kantataajuisille modeemeille. BFM6010/00 on suunnattu lukuisille infrastruktuurin tietoliikenneratkaisuille. Se koostuu kaiken kaikkiaan antenniryhmistä, silmukkasuodattimesta, alhaisen häipymän regulaattorista (*low-dropout regulator*, LDO) ja lähetin-vastaanotin (*transceiver*) IC:stä.

Moduulissa on Samtecin 100-pinninen liitin, jolla se saadaan yhdistettyä EVK06002/00:n emolevyyn. Kuten kuvasta 10 nähdään, moduulin antenniryhmä koostuu 128:sta elementistä. Moduuli tukee 128 QAM-modulaatiota täydellä kanavalla ja 256 QAM-modulaatiota puolikkaalla kanavalla. Puolikkaan kanavan lisäksi moduulissa on tuki neljännesosan kanavakaistalle.

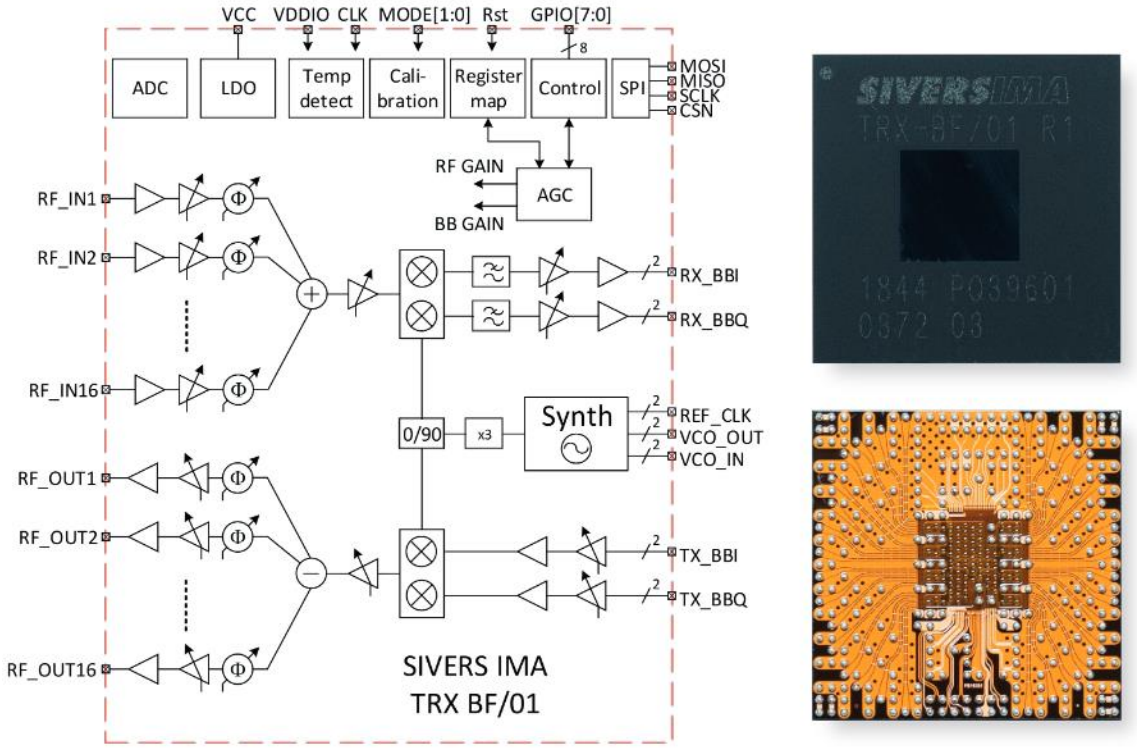


Kuva 10. *SiversIMA BFM6010/00 RF-moduuli.* [21]

Sekä vastaanotto- että lähetystilassa käytetään suoraa konversiota, joka sisältää analogisen kanavasuodatuksen taajuuskaistan ulkopuolisten häiriöiden vaimentamiseksi. Tästä on hyötyä jos taajuusympäristössä on paljon häiriötä ja kohinaa. Vastaanottotehoa säädellään täysin autonomisella automaattisella tehovahvistuksen kontrollilla (*automatic gain control*, AGC). BFM6010/00 käyttää keilanmuodostusta ja keiloja on mahdollistaa poikkeuttaa nollakulmastaan 45 astetta kumpaan tahansa suuntaan. Käytettävissä on 16 keilanmuodostuskanavaa sekä vastaanottamiseen että lähetykseen. Suurin mahdollinen tuettu kaistanleveys on 2 GHz ja antenniryhmän ulostuloteho eli EIRP on +40 dBm. Erillisen AD-muuntimen avulla moduulilla voidaan mitata lämpötiloja, samoin kuten luvun 4.1 Anokiwaven antenniryhmän IC:llä. [21]

BFM6010/00:n lähetin-vastaanotin IC-moduuli on TRX BF/01. Monet BFM6010/00:n ja sitä kautta EVK06002/00:n ominaisuudet tulevat suoraan tämän IC:n kautta. Näitä ovat esimerkiksi jo aiemminkin mainitut 57—71 GHz:n taajuusalue, IEEE 802.11ad-standardin mukaisuus ja 64 QAM-modulaatio. Lisäksi TRX BF/01:ssä on 16 elementin vastaanotto- ja lähetysantenniryhmät, eli yhteensä 32 antennielementtiä. Dupleksointiin käytetään TDD:tä ja lisäksi kahdella lähetin-vastaanotinparilla voidaan käyttää FDD:tä. Välitaajuudella (IF) voidaan käyttää 1,2 GHz:n kaistanleveyttä. TRX BF/01:n kohinaluku

on 7 dB, yhdistetty ulostuloteho 25 dBm ja ilmoitettu saavutettavissa oleva tiedonsiirtonopeus 7 Gb/s.



Kuva 11. *TRX BF/01 IC molemmin puolin ja sen lohkokaavio.* [22]

Kuten kuvasta 11 nähdään, TRX BF/01 sisältää tavallisimpien toimintalohkojen, kuten vahvistimien ja suodattimien, lisäksi AD-muuntimen, LDO:n, lämpötilan seuraimen, kalibraattorin, kontrollerin ja AGC:n. SiversIMA:n mukaan TRX BF/01 toimii hyvin ulko-olosuhteiden infrastruktuurin sovelluksissa ja se tukee kaikkia IEEE 802.11ay:tä edeltäviä standardeja. [22]

5. YHTEENVETO

Tässä työssä tarkasteltiin millimetriaaltotaajuuksilla tapahtuvaa langatonta tiedonsiirtoa, painottuen enemmän laitteiston puoleen. Ensiksi käytiin läpi millimetriaaltotaajuuksien määritelmää sekä hyötyjä ja haittoja, jonka jälkeen tarkasteltiin niitä 5G mobiiliradioverkon ja linkkibudjetin konteksteissa. Seuraavaksi käytiin läpi tiedonsiirtojärjestelmän toiminnallisia osia millimetriaaltotaajuuksien näkökulmasta, jossa keskityttiin mahdollisiin ongelmiin ja niiden ratkaisutapoihin. Lopuksi tarkasteltiin kahden eri valmistajan antenniryhmiä: Anokiwave AWMF-0129 ja SiversIMA EVK06002/00.

Millimetriaaltojen standardin mukainen taajuusalue on 30—300 GHz, mutta 5G:n kontekstissa millimetriaaltotaajuuksiin oletetaan kuuluvan myös taajuudet 20—30 GHz. 5G:lle määritellään jatkuvasti uusia sekä lisensoituja että lisensoimattomia taajuusalueita. Tällä hetkellä kaikki käyttöön suunnitellut alueet sijaitsevat välillä 20—100 GHz. Millimetriaaltotaajuudet mahdollistavat leveämmillä taajuuskaistoillaan korkeammat datansiirtonopeudet ja korkeammat alueelliset kapasiteetit, joita yhteiskuntamme nykypäivänä hartaasti kaipaa. Toisaalta millimetriaallot ovat herkempiä signaalin voimakkuuden vaimenemiselle. Fyysiset näköesteet ovat erittäin haitallisia millimetriaaltojen etenemiselle ja niiden maksimietenemisetäisyys on usein vain 100 metrin luokkaa. Nämä asiat täytyy ottaa huomioon solun suunnittelussa ja linkkibudjetin laskennassa. 5G-verkoissakin pyritään näin ollen parantamaan kapasiteettia useiden tukiasemien avulla, eli toisin sanoen mikrosoluilla.

Langaton tiedonsiirto millimetriaaltotaajuuksilla tuo mukanaan haasteita ja ongelmia käytännön laitteistosuunnitteluun. Edellä mainittua signaalin voimakkuuden etenemisvaimenemista on pyritty lieventämään antenniryhmien ja keilanmuodostuksen avulla. Ideana on suunnata antenniryhmän elementtien säteilemää energiaa kohdistetummin yhteen suuntaan. Ratkaisun jatkeena on ohjattava keila, joka pystyy seuraamaan liikkeessä olevaa päätelaitetta. Vahvistimien ongelmana on vaihtokauppa tehokkuuden ja lineaarisuuden välillä. Kehiteltyjä ratkaisuja on useita, joista osassa hyödynnetään vahvistimen saturaatioaluetta ja osassa lineaarista aluetta. Suodattimien toteutus ja sijoitus sopivalla tavalla on myös olennaista. Liitosvaimennus on kaistanleveyteen ja hyvyyslukuun vaikuttava tekijä. Suodattimen yhtenäinen integrointi CMOS-sirulle on edullista, mutta hyvyysluku jää tällöin huonoksi. Sen sijaan epäyhtenäinen integrointi on kalliimpaa, mutta suorituskyky on parempi. Lopuksi täytyy päättää, mihin kohtaan järjestelmäkokonaisuutta suodatin sijoitetaan. Päätökseen

vaikuttavia tekijöitä ovat kohina, liitosvaimennus, taajuustarkkuus, sekä koko- ja hintavaatimukset. Paikallisoskillaattorien olennaisin ongelma on erilaisista häiriöistä ja kohinoista muodostuva vaihekohina, joka suurenee taajuuden kasvaessa. Yleisin ratkaisu on vaihelukitun silmukan käyttäminen. AD- ja DA-muuntimien täytyy toimia suurilla prosessointinopeuksilla millimetriaaltotaajuuksien kaistanleveyden ja siirtonopeuksien vuoksi. Yleisimmät ratkaisut soveltavat useita rinnakkain toimivia muuntimia paremman lopputuloksen saavuttamiseksi.

5G:n käyttötarkoituksiin on useita millimetriaaltotaajuuksilla toimivia antenniryhmiä. 64-elementtinen Anokiwave AWMF-0129 -antenniryhmä toimii taajuusalueella 27,5—30 GHz. Se tukee keilanmuodostusta ja keilan ohjaamista. Saavutettavissa olevat siirtonopeudet ovat gigabittien luokkaa. SiversIMA:n EVK06002/00 -antenniryhmä sisältää puolestaan 128 elementtiä ja se toimii taajuusalueella 57—71 GHz. Sillä voidaan käyttää jopa 2 GHz:n kaistanleveyttä ja saavuttaa 7 Gb/s:n siirtonopeus. Molemmat antenniryhmät ovat suunnattu enemmän avuksi 5G:n käyttökohteiden sovelluskehitykseen.

Työssä huomataan, että millimetriaaltotaajuudet tuovat huomattavia parannuksia langattomaan tiedonsiirtoon. Ne tuovat kuitenkin myös omat haasteensa laitesuunnitteluun. Ratkaisuja näihin haasteisin ja ongelmiin on olemassa, ja parempia tutkitaan jatkuvasti. Näin ollen langattoman tiedonsiirron millimetriaaltotaajuuksilla pitäisi onnistua ilman suurempia ongelmia ja tulevaisuudessa ratkaisuja tullaan hiomaan varmasti entistä paremmiksi. 5G:n millimetriaaltotaajuudet tulevat käyttöön lähivuosina, jolloin tullaan näkemään niiden todellinen suorituskyky mobiiliverkoissa. On myös mielenkiintoista nähdä kuinka nopeasti millimetriaaltotaajuuksilla toimivat UDN-verkot alkavat ilmestymään katukuvaan ympäri maailmaa ja kuinka hyvin käytännön viiveet vastaavat teoreettisia.

LÄHTEET

[1] Dahlman E, Parkvall S, Sköld J. 5G NR: the next generation wireless access technology. London: Academic Press; 2018.

[2] Holma H. 5G Technology 3GPP New Radio. John Wiley & Sons; 2020.

[3] 5G/NR – FR/Operating Bandwidth, ShareTechnote. Saatavissa (viitattu 15.2.2020): http://www.sharetechnote.com/html/5G/5G_FR_Bandwidth.html

[4] du Preez J, Sinha S. Millimeter-Wave Antennas: Configurations and Applications. 1st ed. 2016. Cham: Springer International Publishing; 2016.

[5] Viikari V, Ala-Laurinaho J, Kurvinen J, Kahkonen H, Lehtovuori A, Leino M, et al. Millimeter-Wave Antennas for Mobile Devices and Networks. In: 2019 12th Global Symposium on Millimeter Waves (GSMM). IEEE; 2019. p. 10–2.

[6] Yang X, Matthaiou M, Yang J, Wen C-K, Gao F, Jin S. Hardware-Constrained Millimeter-Wave Systems for 5G: Challenges, Opportunities, and Solutions. IEEE Communications Magazine. 2019 Jan;57(1):44–50

[7] Zaidi A, Athley F, Medbo J, Gustavsson U, Durisi G, Chen X. 5G physical layer: principles, models and technology components / Ali Zaidi, Fredrik Athley, Jonas Medbo, Ulf Gustavsson, Giuseppe Durisi, Xiaoming Chen. London: Academic Press; 2018.

[8] Belov LA (Leonid A, Smolskiy SM, Kochemasov VN. Handbook of RF, microwave, and millimeter-wave components. Boston: Artech House; 2012.

[9] Pozar DM. Microwave engineering. 4th ed. Hoboken, NJ: Wiley; 2012.

[10] Leeson D.B. A simple model of feedback oscillator noise spectrum. Proceedings of the IEEE. 1966 Feb;54(2):329–30.

[11] Levanen T, Tervo O, Pajukoski K, Renfors M, Valkama M. Mobile Communications Beyond 52.6 GHz: Waveforms, Numerology, and Phase Noise Challenge: Beyond50GHzLinkBudgetTool. tut.fi [Internet]. 6.11.2019; Saatavissa (viitattu 5.3.2020): http://www.tut.fi/5G/WCM2019B50GHz/

[12] Jiayi Zhang, Linglong Dai, Xu Li, Ying Liu, Hanzo L. On Low-Resolution ADCs in Practical 5G Millimeter-Wave Massive MIMO Systems. IEEE Communications Magazine. 2018 Jul;56(7):205–11.

[13] Pollok A, Ying Chen, Haley D, Davis LM. Quantization Noise Mitigation via Parallel ADCs. IEEE Signal Processing Letters. 2014 Dec;21(12):1491–5.

[14] Radio Frequency Bands | Terasense. Saatavissa: (viitattu 9.4.2020): http://terasense.pl/radio-frequency-bands/

[15] 5G masterplan – five keys to create the new communications era, Nokia Networks. Saatavissa (viitattu 9.4.2020): http://www.hit.bme.hu/~jakab/edu/litr/5G/nokia_5g_masterplan_white_paper.pdf

[16] 5G NR mmWave Deployment Strategy Presentation | Qualcomm, 12.6.2019. Saatavissa (viitattu 10.4.2020): https://www.qualcomm.com/documents/5g-nr-mmwave-deployment-strategy-presentation

[17] 5G Active Antenna Innovator's Kit AWMF-0129-IK Product Overview, Anokiwave. Saatavissa (viitattu: 17.4.2020): https://www.rellpower.com/wp/wp-content/uploads/2018/03/AWMF-0129_PO_V7P_print_RP.pdf

[18] AWMF-0108 | 28 GHz Quad Core IC, Anokiwave. Saatavissa (viitattu 17.4.2020): https://www.anokiwave.com/products/awmf-0108/index.html

[19] World's First Commercially Available 5G Phased Array Active Antenna for the 28 GHz Band, everythingRF, 18.4.2017. Saatavissa (viitattu 17.4.2020): https://www.everythingrf.com/News/details/3973-World-s-First-Commercially-Available-5G-Phased-Array-Active-Antenna-for-the-28-GHz-Band

[20] EVK-06002/00 | SiversIMA. Saatavissa (viitattu 18.4.2020): https://www.siversima.com/product/evk-06002-00/

[21] BFM 06010 | SiversIMA. Saatavissa (viitattu 18.4.2020): https://www.siversima.com/product/bfm-06010/

[22] TRX BF/01 | SiversIMA. Saatavissa (viitattu 19.4.2020): https://www.siversima.com/product/trx-bf-01/