



SÄHKÖTEKNIIKAN KOULUTUSOHJELMA

KANDIDAATINTYÖ

TERAHERTSIKAISTAN DIFFRAKTIO- OMINAISUUKSIEN MITTAAMINEN

Tekijä

Perttu Rintanen

Valvoja

Joonas Kokkonen

Huhtikuu 2017

Rintanen P. (2016) Terahertsikaistan diffraktio-ominaisuuksien mittaaminen. Oulun yliopisto, Tieto- ja sähkötekniikan tiedekunta. Kandidaatintyö, 26.

TIIVISTELMÄ

Työ käsittelee diffraktiomittauksia terahertsitaajuuskaistalla (0.1 – 10 THz) ja niihin liittyvää analyysiä. Työtä varten suunniteltiin mittaukset veitsenterädiffraktiolle ja yhden ja kahden raon diffraktioille. Mittaukset tehtiin taajuksilla, jotka ylettyivät noin sadasta gigahertsistä kahteen terahertsiin. Mittauksissa tutkittiin diffraktoituneen signaalin vaimenemista kulman ja taajuuden funktiona. Mittauksista saatu data jälkikäsiteltiin Matlab-ohjelmistolla, jonka jälkeen mittausdataa verrattiin hyvin tunnettuihin diffraktioteorioihin. Mittaustulokset käyvät hyvin yhteen teorian kanssa, mikä tekee diffraktiosta vartenotettavan komponentin epäsuoran näköyhteyden kommunikaatiossa tulevaisuuden sovelluksissa terahertsitaajuuskaistalla.

Avainsanat: Diffraktio, rakodiffraktio, terahertsikaista, veitsenteräefekti.

Rintanen P. (2016) Measurements on Terahertz Band Diffraction Properties.
University of Oulu, Faculty of Information Technology and Electrical Engineering.
Bachelors Thesis, 26 p.

ABSTRACT

This thesis contains diffraction measurements in the terahertz band (0.1 – 10 THz) and related analysis. Measurement setups for measuring the knife-edge, slit, and double slit diffraction effects were designed. Measurements were conducted on frequencies ranging from approximately one hundred gigahertz up to two terahertz. In the measurements the propagation of diffracted signal was studied as a function of diffraction angle and frequency. The measurement data was then post-processed with Matlab software and compared to the well-known diffraction theories. The measurement results fit very well with the theory, which makes diffraction a potential non-line-of-sight component in wireless communication applications operating on the terahertz band.

Keywords: Diffraction, knife-edge effect, slit diffraction, terahertz band.

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

SISÄLLYSLUETTELO

ALKULAUSE

LYHENTEIDEN JA MERKKIEN SELITYKSET

1.	JOHDANTO	7
2.	TEORIA	8
	2.1. Vapaan tilaan vaimeneminen	8
	2.2. Molekyyliabsorptio.....	9
	2.3. Diffraktio	10
	2.3.1. Hyugensin periaate	10
	2.3.2. Veitsenterädiffraktio	11
	2.3.3. Rakodiffraktio.....	14
3.	MITTAUSTEN TOTEUTUS	17
	3.1. Mittauslaitteisto	17
	3.2. Veitsenterädiffraktio.....	18
	3.3. Rakodiffraktio.....	19
4.	MITTAUSTULOKSET	21
	4.1. Veitsenterädiffraktio.....	21
	4.2. Rakodiffraktio.....	22
	4.3. Pohdinta.....	24
5.	YHTEENVETO	25
6.	LÄHTEET.....	26

ALKULAUSE

Haluan kiittää erityisesti ohjaajaani Joonas Kokkoniemeä, joka on antanut työn aikana arvokkaita vinkkejä sekä opettavaisella tavalla auttanut minua ratkomaan tutkimuksessa eteen tulleita haasteita. Lisäksi haluan kiittää ystäviäni, perhettäni ja läheisiäni, jotka ovat kannustaneet ja tukeneet minua opiskelujeni aikana.

Oulussa 23.4.2017

Perttu Rintanen

LYHENTEIDEN JA MERKKIEN SELITYKSET

5G	Viidennen sukupolven matkaviestintäjärjestelmä
CWC	Centre for Wireless Communications
Gbps	Gigabittiä per sekunti
Hz	Hertsi
Wi-Fi	Wireless Fidelity
a	Rakojen leveys
c	Valonnopeus tyhjiössä
d	etäisyys
f	Taajuus
G_t	Lähetinantennin vahvistus
G_r	Vastaanotinantennin vahvistus
h	Suoran näköyhteyden ja signaalin kulkeman reitin väliin jäävä esteen varjostaman alueen pituus veitsenterädiffraktiossa
I	Vastaanotettu intensiteetti
I_0	Intensiteetti alussa
k_a	Absorptiokerroin
L	Vaimennus
P_t	Lähetetty teho
P_r	Vastaanotettu teho
r	Lähettimen- ja vastaanottimen välinen etäisyys
C ja S	Fresnellin integraalit
v	Fresnellin parametri
θ	Diffraktiokulma
λ	Aallonpituus
τ	Transmittanssi

1. JOHDANTO

Mobiilidatan käyttö kasvaa edelleen hurjaa vauhtia, mikä edellyttää uusien tietoliikenneteknologioiden kehittämistä. Koska radiotaajuudet ovat rajallinen luonnonvara, uudet langattomat sovellukset pyrkivät käyttämään yhä korkeampia taajuusalueita [1]. Korkeammat taajuusalueet tarjoavat paljon kaistanleveyttä, mutta tuovat samalla mukanaan ei toivottuja ominaisuuksia kuten voimakasta vaimenimista.

Tässä kandidaatin työssä tutkitaan terahertsialuetta. Terahertsialueesta puhuttaessa tarkoitetaan taajuusalueita, joka ulottuu 0.1:sta 10:een terahertsiin. Tämä tarkoittaa noin 10 000 GHz:n lisenssivapaata kaistaa. Terahertsialue mahdollistaisi siten todella laajakaistaisten langattomien verkkojen rakentamisen. Terahertsikaistan ominaisuudet ovat vielä huonosti tunnettuja. Tämän työn tarkoituksena on tutkia diffraktion ominaisuuksia monitie-etenemisen komponenttina, ensisijaisesti toteamalla sen olemassaolo ja tutkimalla sen voimakkuutta lyhyillä etäisyyksillä terahertsialueella. Työssä tehdyt mittaukset on toteutettu luomalla olosuhteet diffraktion tapahtumiselle laboratorio-olosuhteissa. Saatuja mittaustuloksia verrataan hyvin tunnettuun diffraktioteoriaan ja pohditaan niiden merkitystä tietoliikenteen sovelluksissa. Diffraktion olemassaoloa ja voimakkuutta terahertsikaistalla on tärkeä tutkia, jotta eri monitie-etenemisen komponentit tunnetaan paremmin myös erittäin korkeilla taajuusalueilla. Esimerkiksi sisätilakommunikaatiossa diffraktio voi vaikuttaa suoran näköyhteyden ulkopuolella signaalin voimakkuuteen.

Terahertsikaistan käyttö tietoliikenteen sovelluksissa on vielä tulevaisuuden teknologiaa mm. kehittymättömien radioiden ja materiaalitekniikan vuoksi. Käytännössä se tulee siis olemaan paljon 5G:n jälkeen käyttöön tulevaa teknologiaa. Terahertsialue soveltuu käyttöön lyhyen etäisyyden laajakaistaisiin järjestelmiin, joissa solukoot ovat todella pieniä, maksimissaan muutamia metrejä. Sotilaskäytössä terahertsialtoja voidaan hyödyntää esimerkiksi ultralaajakaistaisten tutkien tai vaarallisten aineiden etsimiseen ja tutkimiseen. Tämän lisäksi laaja taajuuskaista mahdollistaa todella nopean langattoman tiedonsiirtonopeuden lyhyillä etäisyyksillä, mikä tekee siitä houkuttelevan teknologian lyhyiden etäisyyksien langattomaan tiedonsiirtoon. [2]

Tämän kandidaatin työn mittaustuloksia on myös käytetty Oulun yliopiston langattoman tietoliikenteen keskuksen CWC:n tutkimuksessa, jonka pohjalta laadittu konferenssipaperi *Diffraction Effects in Terahertz Band- Measurements and Analysis* esiteltiin IEEE Globecom konferenssissa, Washington D.C:ssa, joulukuussa 2016.

2. TEORIA

Tässä kappaleessa käsitellään työn kannalta oleellisia terahertsialueen sekä diffraktion ominaisuuksia. Terahertsikaistan tuo mukanaan joitakin haitallisia ominaisuuksia, joita ei nykyisissä langattomissa järjestelmissä tarvitse huomioida. Esimerkiksi signaalin energia ja aallonpituus ovat niin pieniä, että tavanomaisen vaimenemisen lisäksi on otettava huomioon myös molekyyliabsorptio.

2.1. Vapaan tilaan vaimeneminen

Vapaan tilan vaimenemisella tarkoitetaan signaalin vaimenemista vapaassa tilassa, yleensä ilmassa, esteettömän näköyhteyden vallitessa lähettimeltä vastaanottimelle. Se aiheutuu fyysisesti elektromagneettisen energian leviämisestä siirtotiellä ja suurenee etäisyyden ja taajuuden kasvaessa. Vapaan tilan vaimeneminen ilmoitetaan yleisimmin desibeleinä.

THz -kaistalla vapaan tilan vaimenemista kuvaamaan käytetään tyypillisesti Friisin yhtälöä. Tässä mallissa vastaanottimeen saapuva teho saadaan kaavasta [3]

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r c^2}{(4\pi d f)^2}, \quad (1)$$

missä P_t on lähetetty teho, G_t ja G_r ovat lähetin- ja vastaanotinantennien vahvistukset, c on valonnopeus, d on lähettimen ja vastaanottimen välinen etäisyys metreinä ja f taajuus hertseinä. Friisin kaavalla siis voidaan määrittää antennin vastaanottama teho, kun antennien vahvistukset ja etäisyys ja toisen antennin lähetysteho ovat tiedossa. Näin ollen antenniapertuuri aiheuttaa valtavia häviöitä THz -kaistalla. Kaavan 1 mukaan erittäin korkeat taajudet vaativat suuria antennivahvistuksia kompensoimaan häviöitä [3]. Tämä aiheuttaa haasteita RF- tekniikan osalta, kun esimerkiksi päätelaitteiden tehonkäyttö kasvaa huomattavasti.

Suurimman vaimennuksen signaalille THz -kaistalla aiheuttaa antenniapertuuri. Tämän työn yhteydessä antennin apertuurilla tarkoitetaan antennin sähköistä kokoa. Tällä ei siis viitata antennin fyysiseen kokoon, vaan sen kykyyn vastaanottaa säteilyä tietyllä taajuudella. Tämä antennin sähköistä kokoa kuvaava apertuuritermi

$$A_{eff} = \frac{c^2}{4\pi f^2}, \quad (2)$$

sisältyy aiemmin kuvattuun Friisin yhtälöön. Näin ollen korkea taajuus vaikuttaa voimakkaasti antennin kykyyn vastaanottaa säteilyä. THz- taajuuksille on siis erittäin hankala valmistaa antenneja, mikä on yksi suurimmista teknologisista haasteista taajuuskaistan käytössä langattomissa sovelluksissa.

2.2. Molekyyliabsorptio

Tietoliikenteen sovelluksia ajatellen olennainen ero terahertsialueen ja alempien taajuusalueiden välillä on signaalin vaimenemista aiheuttava molekyyliabsorptio. Molekyyliabsorptiossa on kyse siitä, että osa säteilyn energiasta absorboituu ilmassa oleviin kaasumolekyyleihin jolloin signaali vaimenee.

Molekyyliabsorptiosta aiheutuva signaalin vaimeneminen voidaan esittää kaavalla [4]

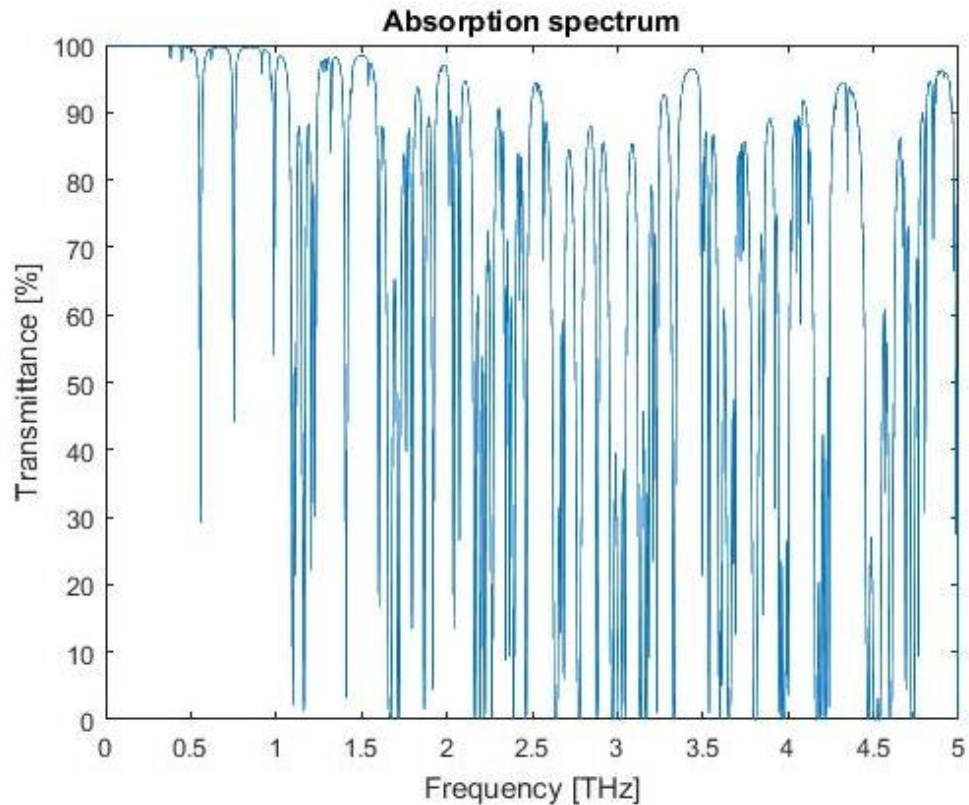
$$A(a, r) = \frac{1}{\tau(a, r)}, \quad (3)$$

missä τ on transmittanssi, eli läpi päässyt intensiteetti suhteessa alkuperäiseen intensiteettiin. Homogeenisesti jakautuneiden kaasumolekyyliä tapauksessa transmittanssi voidaan laskea yhtälön [5]

$$\tau(a, r) = e^{-k_a r} \quad (4)$$

avulla, jota kutsutaan Beer-Lambertin laiksi. Yhtälössä k_a on absorptiokerroin, joka on saatavilla taulukoiduista arvoista [5] ja r on lähettimen ja vastaanottimen välinen etäisyys metreinä.

Kuvassa 1 on esitettyä kaavan 1 avulla laskettu teoreettinen molekyyliabsorptio absorptiospektri. Kuvasta on huomattavissa selvästi molekyyliabsorptio vaikutus signaalin vaimenemiseen terahertsialueella. Kvanttimekaanisista ominaisuuksista johtuen ilmassa olevat vesimolekyylit aiheuttavat suurimman osan absorptiosta johtuvasta vaimenemisesta terahertsikaistalla.



Kuva 1. Teoreettinen molekyyliabsorption absorptiospektri

2.3. Diffraktio

Diffraktiolla tarkoitetaan ilmiötä, jossa aallon muoto muuttuu kun sen etenemiseen on vaikuttanut jokin este. Törmätessään esteeseen aalto taittuu esteen reunojen muodostamalle varjoalueelle. Diffraktion teoria perustuu Hyugensin periaatteeseen. Diffraktiota on itsessään tutkittu jo satoja vuosia ja sen teoria tunnetaan erittäin hyvin. Kuitenkin erittäin pienillä aallonpituuksilla on syytä tutkia tarkemmin diffraktion soveltuvuutta erityisesti epäsuoran näköyhteyden kommunikaation komponentiksi.

Diffraktio luo tietoliikenteen sovelluksia varten yhden huomioon otettavan monitie-etenemisen muodon. Kaupunkimaisissa ympäristöissä on paljon esteitä, jotka aiheuttavat signaalin diffraktiota edellä mainitulla tavalla. Näissä mittauksissa käsiteltiin kahta eri diffraktion muotoa: veitsenterädiffraktiota ja rakodiffraktiota. Sekä veitsenterä, että rakodiffraktio perustuvat Hyugensin periaatteeseen ja ovat hyvin samankaltaisia fysikaalisia ilmiöitä.

2.3.1. Hyugensin periaate

Diffraktio on ilmiönä helpoin hahmottaa Hyugensin periaatteen avulla. Sen mukaan jokainen aaltorintaman piste synnyttää värähdellessään uuden aallon ja toimii näin

sekundäärisen aallon lähteenä. Yksittäinen aalto on siis aallon jo läpäisemän väliaineen pisteestä lähteineiden alkeisaaltojen summa. Näin ollen aaltojen interferenssi eli yhdistyminen luo uusia aaltoja. Interferenssi jaetaan joko konstruktiiiviseen tai destruktiiviseen interferenssiin sen mukaan, vahvistavatko vai heikentävätkö summa-aallot toisiaan. [5, 6]

Toiseksi aaltorintaman positio koska tahansa myöhemmin on näiden sekundääristen aaltolähteiden verhoikäyrä. Nämä näkökulmat auttavat ymmärtämään useita aaltoliikkeen ilmiöitä kuten diffraktiota, taittumista ja heijastumista [6]. Alla olevassa kuvassa 2 nähdään kuinka alkuperäisen aaltolähteen synnyttämä ensimmäinen aaltorintama koostuu sekundäärisistä aaltolähteistä, jotka myöhemmin aiheuttavat kukin oman aaltorintamansa.

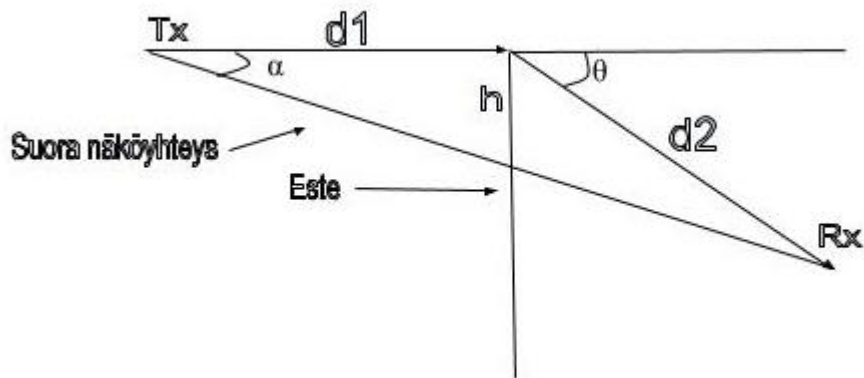


Kuva 2. Hyugensin periaate pallomuotoiselle aaltolähteelle.

2.3.2. Veitsenterädiffraktio

Veitsenteräefekti (eng. knife-edge effect) tapahtuu kun este, ja erityisesti sen reuna toimii lähteenä sekundääriselle aaltorintamalle. Esteestä diffraktoitunut aalto voi nyt heijastua esteen luomalle varjoalueelle. [7]

Arkipäivän esimerkkinä ilmiöstä mainittakoon tilanne, jossa rakennuksen reuna varjostaa etenevää aaltorintamaa. Tällöin vaikkapa matkapuhelinsignaali siirtyy tukiaseman suorasta näköyhteydestä rakennuksen reunan katveeseen. Katveessa signaali vaimenee reunan jälkeisen sekundäärisen aaltorintaman taipuessa, kun reunan takana syntyy alkeisaaltojen interferenssi [7]. Kuva 3 havainnollistaa veitsenteräefektin geometriaa.



Kuva 3. Veitsenteräefekti

Veitsenterädiffraktiossa tapahtuvaa vaimenemista kuvaa yhtälö [8,9,10]

$$L(\theta) = \frac{(1 - C(v) - S(v))^2 + (C(v) - S(v))^2}{4}, \quad (5)$$

missä θ on diffraktiokulma kuvan 2 mukaisesti. $C(v)$ ja $S(v)$ ovat Fresnellin integraalit:

$$C(v) = \int_0^v \cos\left(\frac{\pi s^2}{2}\right) ds, \quad (6)$$

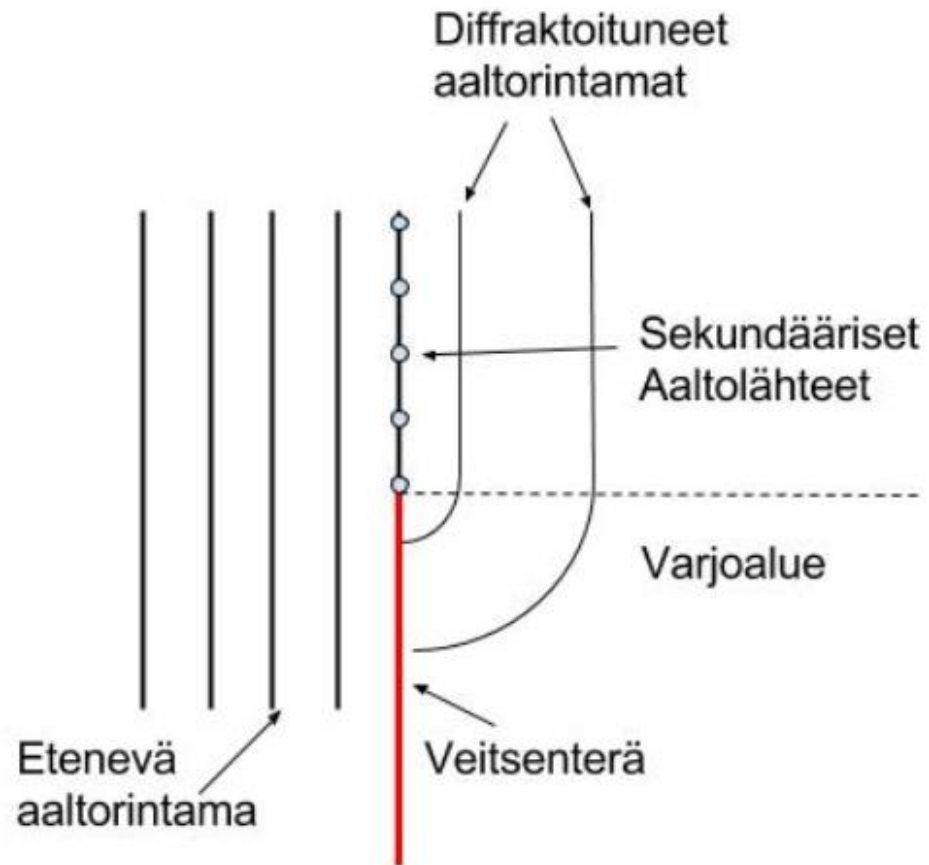
$$S(v) = \int_0^v \sin\left(\frac{\pi s^2}{2}\right) ds, \quad (7)$$

joissa v on fresnellin parametri

$$v = h \sqrt{\frac{2}{\lambda} \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)}, \quad (8)$$

missä h on kuvan 2 mukaisesti suoran näköyhteyden ja signaalin kulkeman reitin väliin jäävä esteen varjostaman alueen pituus ja λ on aallonpituus. [8]

kuvassa 4 on havainnollistetuna veitsenteräefektin tapahtuminen. Etenevä aaltorintama diffraktoituu törmätessään veitsenterään ja muodostaa uusia alkeisaaltoja. Nämä esteen reunasta syntyvät alkeisaallot taittuvat esineen muodostamalle varjoalueelle, aivan kuten aiemmassa esimerkissä, jossa matkapuhelinsignaali siirtyi rakennuksen reunan katveeseen.



Kuva 4. Veitsenteräefekti Hyugensin periaatteen mukaisesti.

Veitsenteräefekti lienee tietoliikenteen sovelluksissa kaikista läsnäolevin diffraktion muoto. Tyypillinen esimerkki siitä on aiemmin mainittu tilanne, jossa matkapuhelin siirtyy rakennuksen katveeseen jolloin signaali diffraktoituu rakennuksen reunaan osuessaan. Tämän lisäksi puhelimen vastaanottama signaali koostuu luonnollisesti myös seinän läpäisevästä osasta sekä heijastumisista ja lukuisista muista monitie-etenemisen komponenteista. [7]

Veitsenterädiffraktiota tapahtuu myös muualla luonnossa. Alla oleva kuva 5 havainnollistaa hyvin, kuinka mereltä tuleva aalto taittuu ja muodostaa uusia sekundäärisiä alkeisaaltoja osuessaan niemen kärkeen. [7]



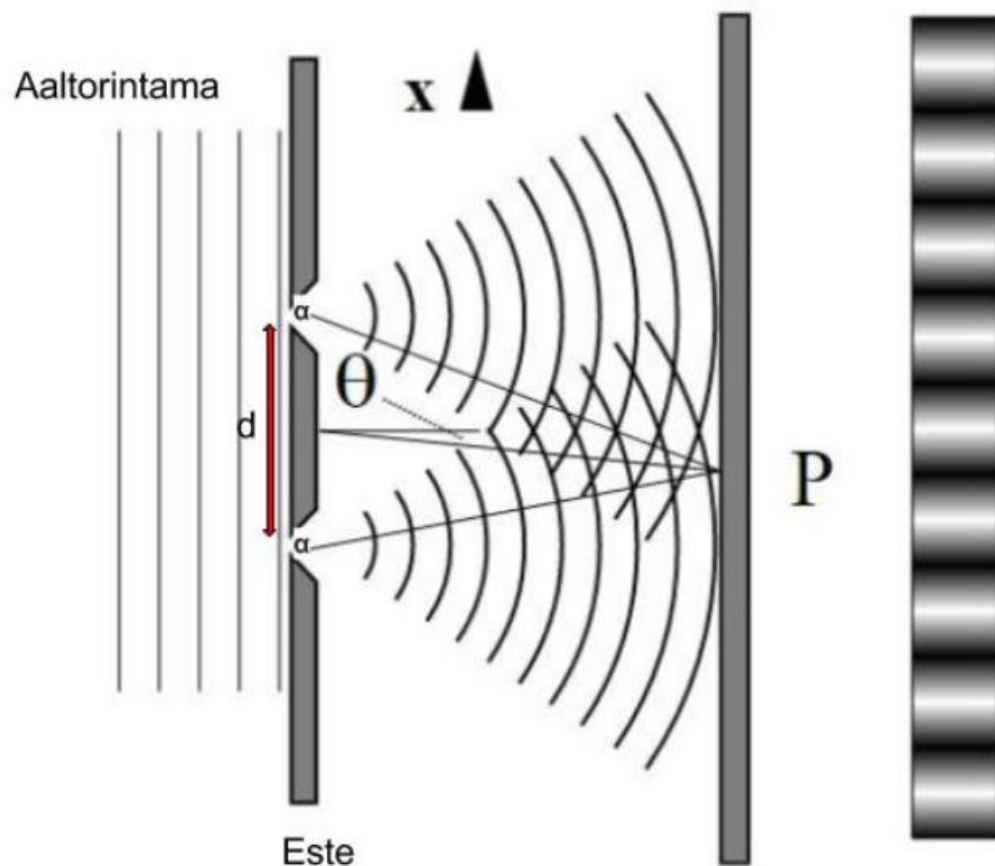
Kuva 5. Veitsenterädiffraktio merenpinnan aalloille. [7]

2.3.3. Rakodiffraktio

Kun etenevä aaltorintama kohtaa yhden tai useamman reiän sen muoto muuttuu hyvin samalla tavalla kuin veitsenteräefektin tapauksessa. Ilmiössä aallon kohtaama rako toimii sekundäärisenä aaltolähteenä ja diffraktiokuvion aiheuttajana, vastaavalla tavalla kuin nk. veitsenterä aiemassa kappaleessa.

Kun rakoja, ja siten myös aaltolähteitä on useampia, saadaan voimakkaampi diffraktiokuvio. Tässä työssä mittaukset tehtiin yhden ja kahden raon skenaarioilla.

Monitie-etenemisen esimerkki rakodiffraktiosta voisi olla vaikkapa oven jättämän kapean raon läpi kulkeva Wi-Fi-signaali kotona. Myös kahden raon diffraktiota tutkittiin näissä mittauksissa, vaikka se ei olekaan todennäköinen monitie-etenemisen komponentti käytännön tietoliikennesovelluksissa. Tämä tehtiin paitsi yleisen tieteellisen mielenkiinnon kannalta, myös siksi että mittaukset oli helppo laajentaa myös useamman raon diffraktion tutkimiseen. Kuvassa 6 nähdään Huygensin periaatteen mukaisesti kuinka etenevä aaltorintama synnyttää uusia alkeisaaltoja esteen rakojen kohdalla.



Kuva 6. Kahden raon diffraktio. (Kuva wikipediasta: https://en.wikipedia.org/wiki/Double-slit_experiment)

Yhden raon tapauksessa signaalin vaimenemista kuvaa yhtälö [8,12]

$$\frac{I}{I_0} = \left(\frac{\sin(\beta/2)}{\beta/2} \right)^2, \quad (9)$$

missä I on vastaanotettu intensiteetti ja I_0 intensiteetti alussa ja

$$\beta = \frac{2\pi a}{\lambda} \sin(\theta), \quad (10)$$

missä a on rakojen leveys ja θ diffraktiokulma samalla tavalla kuin kuvassa 2.

Kahden raon tapauksessa vaimenemista kuvaa hyvin samanlainen yhtälö [8,12]

$$\frac{I}{I_0} = \cos \left[\left(\frac{\phi}{2} \right)^2 \left(\frac{\sin(\beta/2)}{\beta/2} \right) \right], \quad (11)$$

missä

$$\phi = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin(\theta), \quad (12)$$

missä d on rakojen välinen etäisyys ja λ aallonpituus.

3. MITTAUSTEN TOTEUTUS

Tässä kappaleessa esitellään mittauksissa käytetty laitteisto ja itse mittausten toteutusperiaatteet. Veitsenterädiffraaktion sekä rakodiffraaktion mittauseriaatteet eivät eronneet toisistaan paljoakaan. Molemmissa tapauksissa vastaanottimen ja lähettimen kulmaa muutettiin toisiinsa nähden ja eri kulmista vastaanotetun energian määrää verrattiin suoralla näköyhteydellä tehtyihin referenssitasomittauksiin. Vastaanottimen ja lähettimen etäisyys diffraktioesteeseen säilytettiin vakiona ja vastaanotetun intensiteetin vaimenemista taajuuden ja kulman funktiona pyrittiin mittamaan.

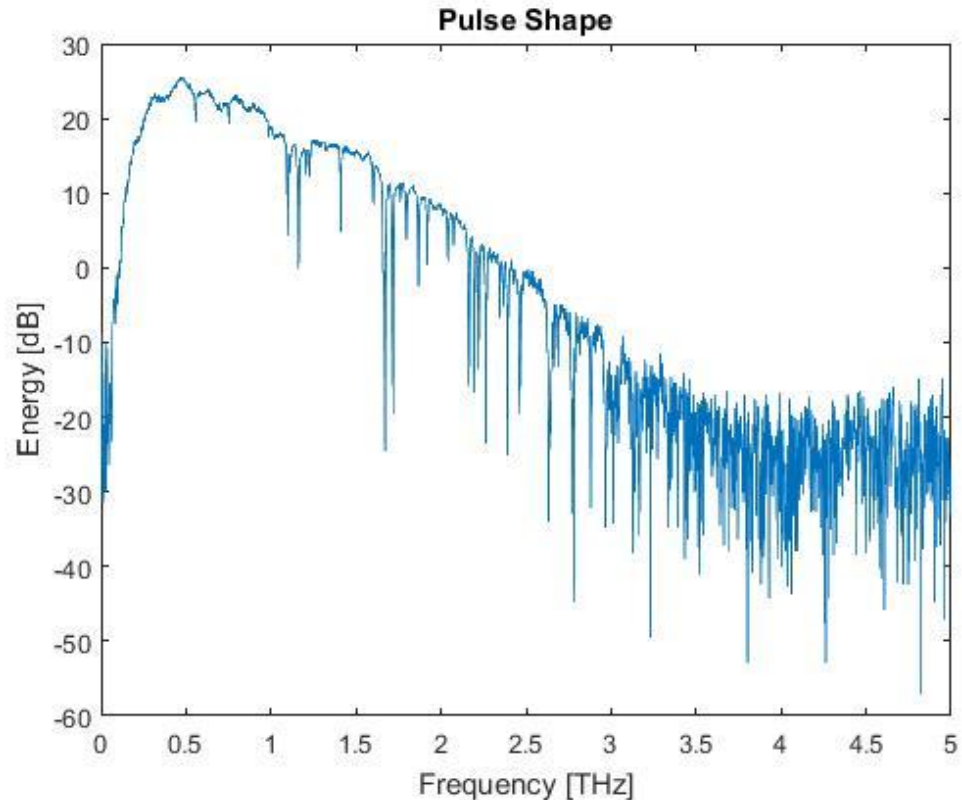
3.1. Mittauslaitteisto

Kandidaatin työtä varten tehdyt mittaukset tehtiin TeraViewin valmistamalla terahertsispektroskopiaan tarkoitettulla TeraPulse 4000 - mittauslaitteistolla. Laitteistoon kuuluu keskusyksikkö, sekä lähetin ja vastaanotin. Laitteen antamat mittaustulokset voidaan analysoida tietokoneella. Laitteisto mahdollistaa mittaukset jopa 4 THz:iin asti.

TeraPulse 4000 laitteisto tekee mittauksia aikatasossa, keräten näytteitä yhdestä ajanhetkestä kerrallaan. Jokaista tutkittavaa ajanhetkeä varten laite lähettää uuden pulssin, joten kokonaista analysoitavaa pulssia varten lähetetään laitteen asetuksissa määritelty kokonaismäärä pulsseja. Tärkeimmät mittauksia varten määriteltävät asetukset ovat juuri aikatason näytteiden, eli pulssien lukumäärä ja aikaresoluutio. Mittauksia varten on mielekästä käsitellä taajuustason informaatiota, mikä voidaan määrittää diskreetillä Fourier-muunnoksella aikatason tiedosta. Taajuustason informaatiosta on myös mahdollista selvittää pulssien lukumäärä laskemalla yhden pulssin pituus taajuusresoluution käänteislukuna.

Mittalaitteistoon kuuluu keskusyksikön lisäksi myös lähetin- ja vastaanotinyksikkö, jotka koostuvat antenniosasta ja peileistä. Peilien avulla säteily ohjataan noin 2 cm leveäksi kohtisuoraksi säteilyksi näytteen kohdalle lähetin- ja vastaanotinyksiköiden väliin. Vastaanottimessa peilit vastaavasti keräävät ja ohjaavat signaalin antennille. Näin signaalin leviämisestä aiheutuvaa tehohäviötä voidaan tehokkaasti vähentää peilien avulla.

Seuraavalla sivulla oleva kuva 7 esittää lähettimen vastaanottamaa energiaa taajuuden funktiona. Pulssin kuva on saatu ottamalla referenssimittaus lyhyellä etäisyydellä ja esteettömällä näköyhteydellä. Otettaessa näytteitä spektristä laite toistaa saman mittauksen asetetulla taajuusalueella. Pulssin muodosta havaitaan kuinka vastaanotettu signaali vaimenee kohinaksi 3 THz:n jälkeen. Korkeilla taajuuksilla mittaustulokset ovat epäluotettavia, koska signaali-kohinasuhde pienenee kuvan mukaisesti. Mittaustulosten luotettavuus on varmistettu pienentämällä mittauskaista 0 – 2:een THz:iin. Tällä taajuusalueella signaali-kohinasuhde on riittävän korkea luotettavien mittaustulosten saamiseksi.

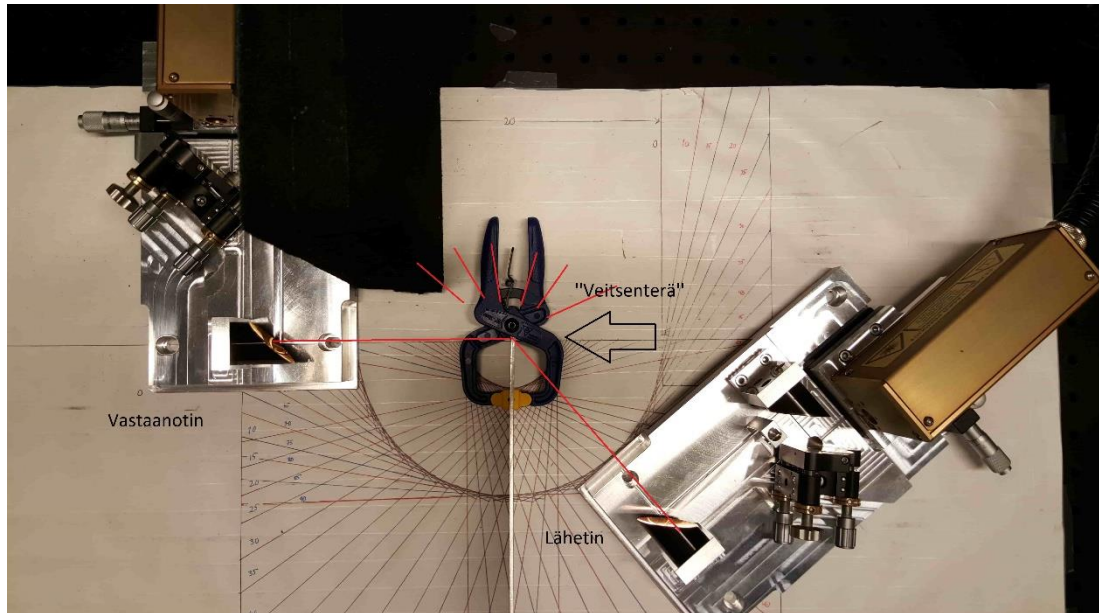


Kuva 7. TeraPulse 4000 -laitteiston pulssi.

3.2. Veitsenterädiffraکتio

Mittauksissa Veitsenteräefektiiä tarkasteltiin ohjaamalla lähettimestä THz- säteilyä kuvan 8 mukaisesti metallisen kappaleen reunaan, joka toimii ns. veitsenteränä. Veitsenterä toimii näennäisenä aaltolähteenä sekundäärisille aaltorintamille. Mittauksissa lähettimen kulmaa kasvatettiin viiden asteen välein 0:sta 70:een asteeseen asti ja mitattiin vastaanottimeen tuleva teho. Esimerkiksi kuvan 8 tilanteessa lähetin on 50° kulmassa esteeseen nähden.

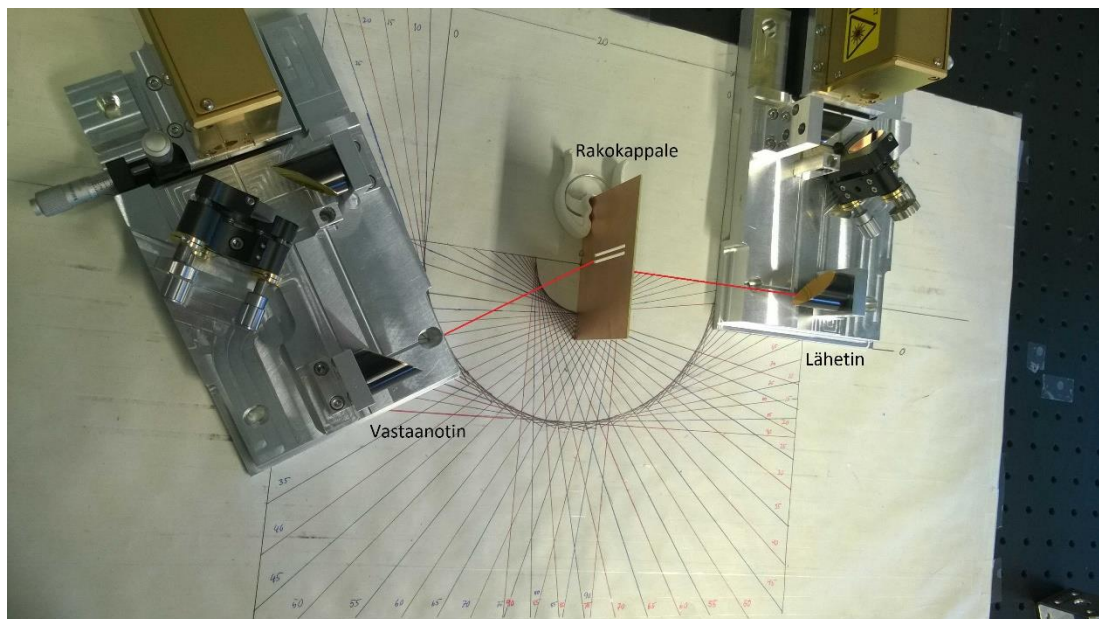
Kuten Edellisessä kappaleessa mainittiin, terahertsikaistalla signaalin vaimeneminen on hyvin voimakasta. Täten pienikin etäisyyden muuttuminen vaikuttaa vapaantilan vaimenemisen määrään. Siksi on erityisen tärkeää että mittauskulmasta riippumatta lähettimen ja vastaanottimen etäisyys veitsenterään pysyy muuttumattomana. Lähetin ja vastaanotin sijatsevat molemmat 10 cm etäisyydellä veitsenterästä mittauskulmasta riippumatta. Tämä on varmistettu piirtämällä mittausostasolle kuvassa näkyvien viivojen avulla oikea paikka kullekin mittauskulmalle.



Kuva 8. Veitsenterädiffraktion mittausasetelma.

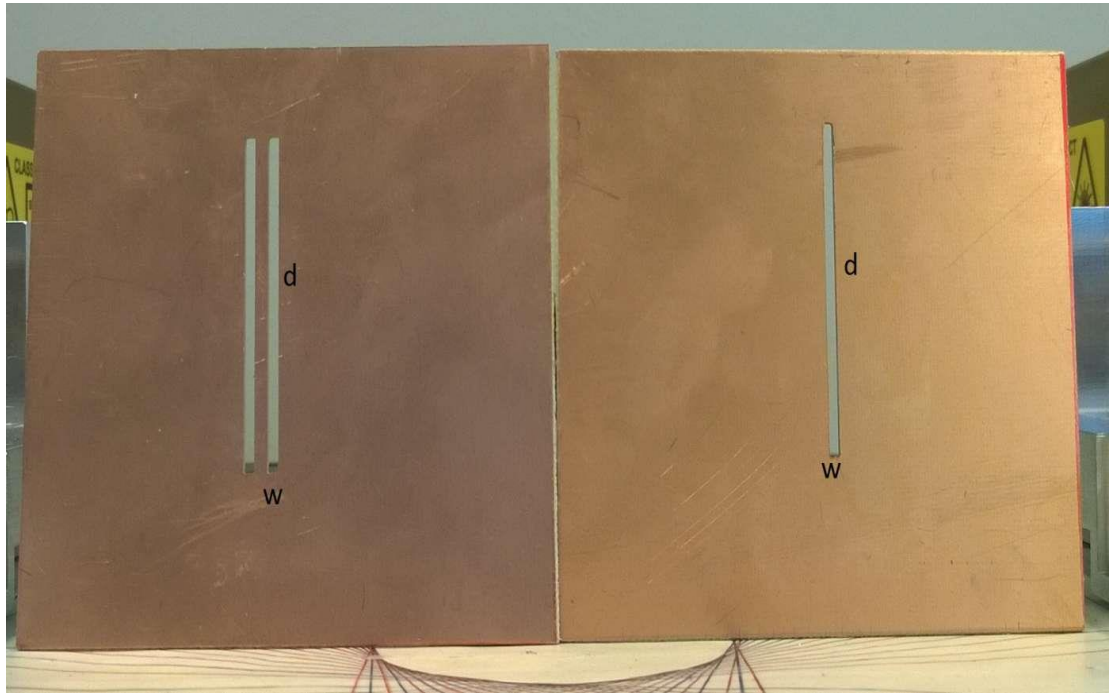
3.3. Rakodiffraktio

Rakodiffraktiomittaukset toteutettiin kuvan 9 tavalla. Lähettimen kulma suhteessa kuvassa näkyvään rakokappaleeseen säilytettiin vakiona ja vastaanottimen kulmaa rakokappaleeseen nähden kasvatettiin viiden asteen välein 0:sta 70:een asteeseen asti. Yhden ja kahden raon mittaukset toteutettiin identtisellä tavalla, ainoastaan välissä oleva rakokappale vaihdettiin. Mittausgeometria on sama kuin veitsenterädiffraktion mittauksissa. Lähetin ja vastaanotin sijaitsevat 10 cm:n etäisyydellä esteestä, mittauskulmasta riippumatta.



Kuva 9. Rakodiffraktion mittausasetelma kahden raon tapauksessa.

Mittauksia varten valmistettiin kaksi kuvan 10 tapaista kuparipäällysteistä rakokappaletta. Rakojen pituus d on 80 millimetriä ja leveys w 2 millimetriä. Rakokappale toimii samalla tavalla näennäisenä aaltolähteenä sekundaarisille aaltorintamille kuten metallinen veitsenterä veitsenterädiffraktion mittauksissa. Kuparipäällyste estää säteilyn etenemisen vastaanottimelle muuten kuin rakojen kautta.



Kuva 10. Mittauksissa käytetyt rakokappaleet.

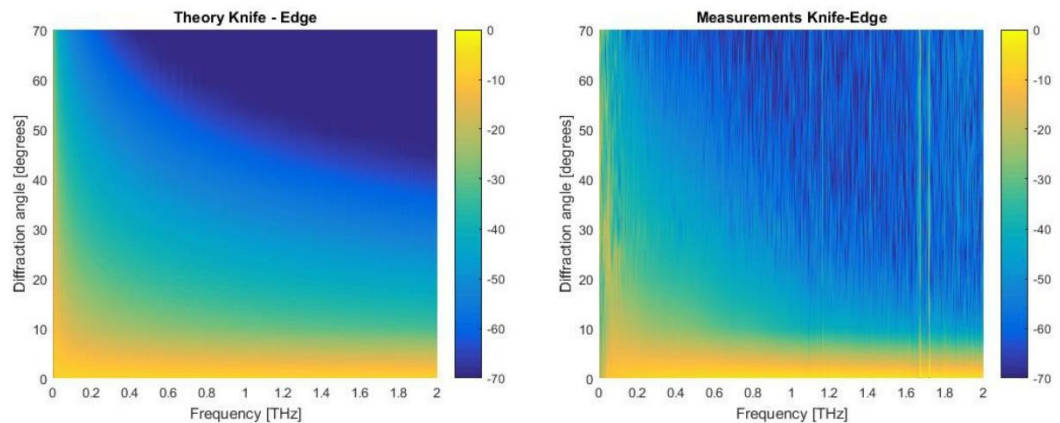
4. MITTAUSTULOKSET

Tässä kappaleessa esitellään mittaustulokset sekä pohditaan hieman niiden merkitystä. Vahvistukset on saatu vertaamalla mittaustuloksia esteettömällä näköyhteydellä tehtyihin referenssitasonmittauksiin.

Mittauskuvissa on esitettyä teoreettinen ja mitattu vaimennus diffraktiokulman ja taajuuden funktiona. Teoreettiset käyrät on laskettu tunnettujen fysikaalisten kaavojen avulla. Vahvistus on esitetty desibeleinä ja värin lämpö kertoo vahvistuksen määrän kuvien reunassa olevan mittarin mukaisesti.

4.1. Veitsenterädiffraktio

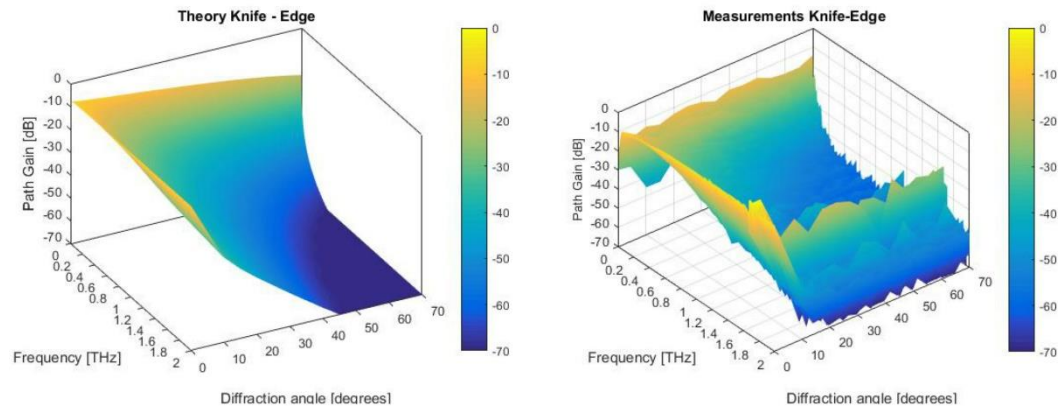
Kuvissa 11 ja 12 on esitettyä signaalin teoreettinen ja mitattu vaimeneminen desibeleinä veitsenterädiffraktion tapauksessa. Värin lämpö kuvaa signaalin voimakkuutta kuvassa olevan asteikon mukaisesti.



Kuva 11. Teoreettinen ja Mitattu vaimeneminen taajuuden ja kulman funktiona.

Kuvasta 11 nähdään kuinka matalilla taajuuksilla vahvistus laskee vain hieman -10 dB:stä vaikka diffraktiokulmaa kasvatetaan 0:sta asteesta 70:een asteeseen. Korkeammilla taajuuksilla vahvistus pienenee nopeasti kohinasolle diffraktiokulman kasvaessa.

Kun signaali-kohinasuhde on matala on mittausdata luonnollisesti hyvin kohinaista. Tämä on havaittavissa kuvista 11 ja 12, missä mitattauskuva on teoriakuvaan verrattuna hyvin repaleinen siellä missä signaali on heikko. Tämä osoittaa että monitieteen komponenttina veitsenterädiffraktio edellyttää pientä diffraktiokulmaa. Esimerkiksi jos toivotaan että vahvistus on minimissään -30 desibeliä 1 THz:n taajuudella, niin se asettaa vaatimuksen että diffraktiokulma on suurimmillaan vain noin 10 astetta.



Kuva 12. kuvan 11 tilanne kolmiulotteisena havainnollistavuuden vuoksi.

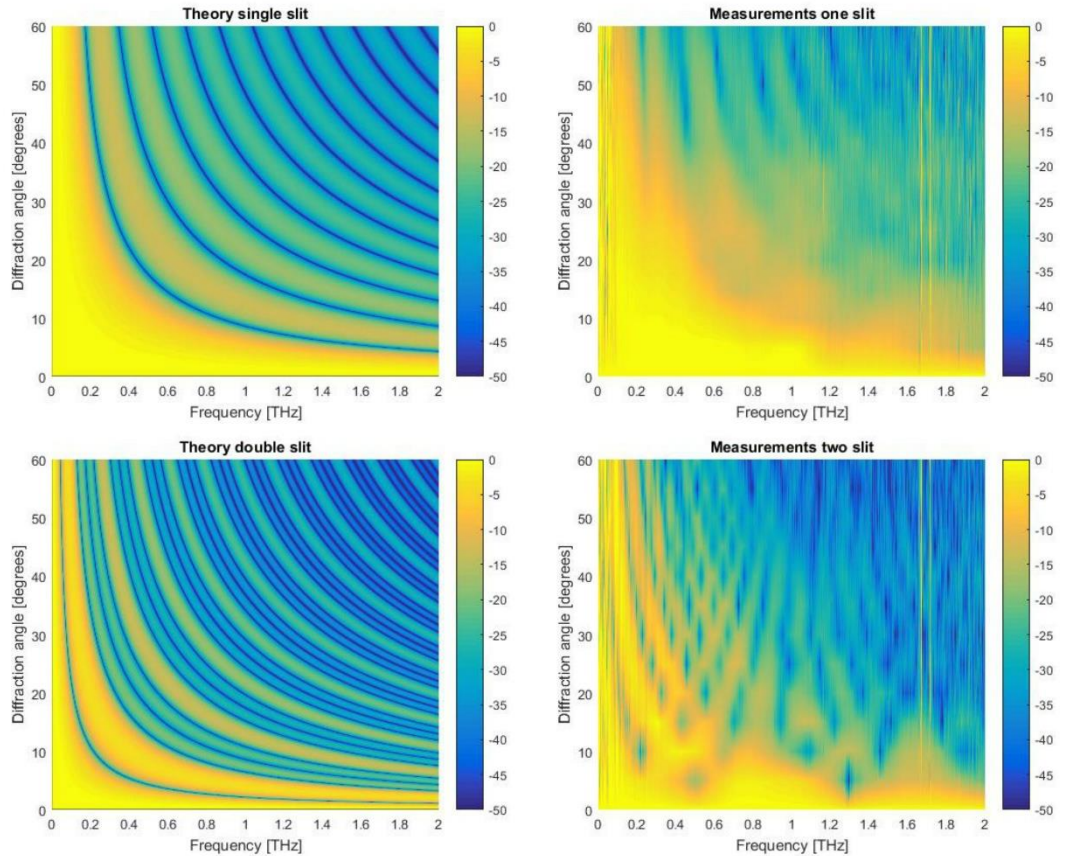
Kuvista 11 ja 12 nähdään, että mittaustulokset vastaavat hyvin veitsenterädiffraaktion teoriaa. Kolmiulotteisesta kuvasta paremmin erottuvat kaksi piikkiä 1.6 - ja 1.8 THz:n välissä johtuvat molekyyliabsorptiosta. Vaikka kanava on käytännössä sama kaikille mitattaville taajuuksille, se ei ole sitä kuitenkaan aivan täysin. Näin ollen piikit molekyyliabsorptiossa, erityisesti siellä missä absorptio on suurta, aiheuttaa piikkejä mittaustuloksiin.

4.2. Rakodiffraktio

Myös yhden raon diffraaktion mittaustulokset vastaavat hyvin teoriaa. Maksimit ovat oikeilla kohdilla ja vastaavat tarkasti teoreettisia arvoja heitellen vain noin ± 3 dB:n verran. Yhden raon tapauksessa vahvistus ei heikkene yhtä nopeasti kuin veitsenterädiffraaktion tapauksessa. Vastaavasti -30 desibelin vahvistukseen päästään 1 THz:n taajuudella vaikka diffraktiokulma on 60 astetta.

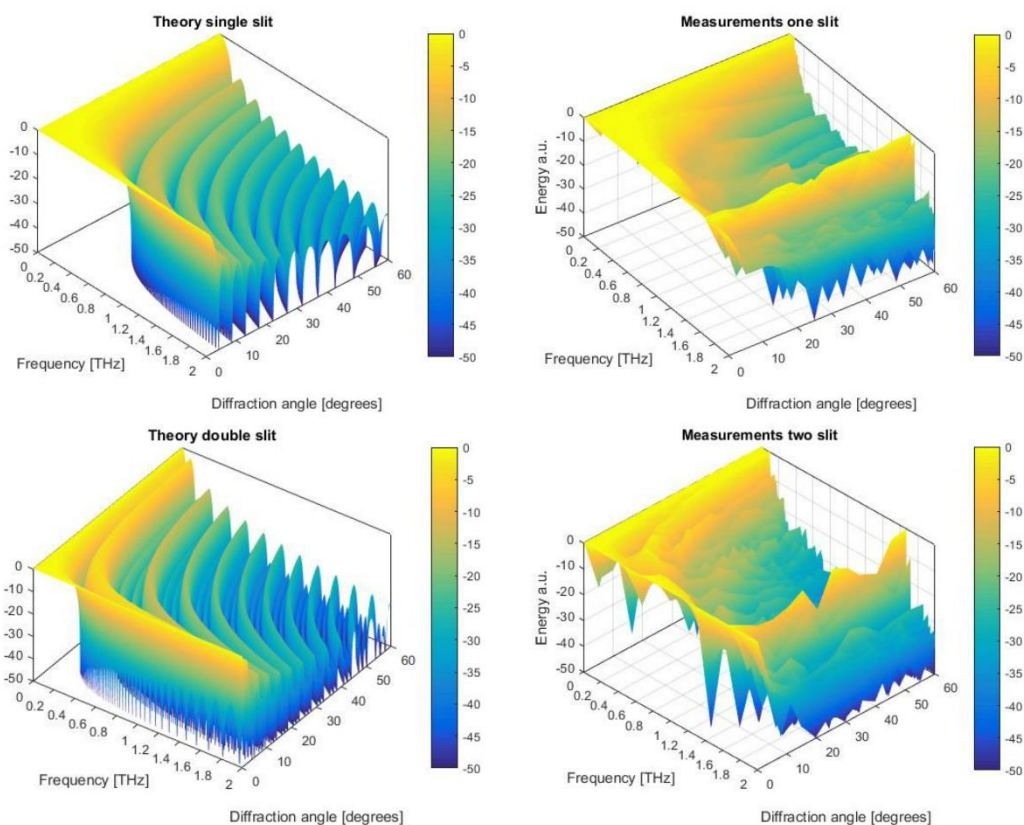
Kahden raon tapauksessa mittaustulokset eivät vastaa yhtä tarkasti teoriaa kuin veitsenterädiffraaktion tai yhden raon diffraaktion tapauksissa. Maksimit ovat oikeilla kohdilla, mutta niiden arvot laskevat tasaisemmin taajuuden ja kulman funktiona kuin teoriakuvassa.

Kuvassa 13 on esillä mittaustuloksista tehdyt kuvat, jotka esittävät signaalin vaimenemisen kulman ja taajuuden funktiona.



Kuva 13. Teoreettinen ja mitattu vaimeneminen yhden ja kahden raon diffraktiossa.

Mittausdata on veitsenterädiffraktioon verrattuna paljon kohinaisempaa mm. aukkojen aiheuttaman kohinan ja mittausasetelmien epäideaalisuuksien vuoksi. Suuntaavien peilien vaikutuksesta mitattava pulssi on n. 2 cm:n levyinen. Pulssi on siis paljon leveämpi rakokappaleeseen nähden, mikä aiheuttaa kulmaresoluution huonontumisen. Yksi kulma näkee siis useampia kulmia kerrallaan. Kahden raon diffraktiossa näiden vaikutus on suurempi, mikä myös osaltaan selittää mittaustulosten suurempaa eroa teoriaan. Mittaustuloksissa voidaan havaita samat molekyyliabsorptiosta aiheutuvat piikit 1.6 – ja 1.8:n THz:n välissä.



Kuva 14. Vastaava kuva kolmiulotteisena.

4.3. Pohdinta

Mittaustulokset osoittavat, että diffraktio mahdollistaa kommunikaation suoran näköyhteyden ulkopuolella, kohtuullisella signaalin vaimenemisella. Kuitenkin huomattiin, että diffraktiokulman kasvaessa signaali vaimenee hyvin nopeasti lähelle kohinasoa. Näiden havaintojen perusteella voidaan päätellä, että käytännössä monitie-etenemisen komponenttina diffraktio tulee huomioida vain hyvin lyhyillä etäisyyksillä ja pienillä diffraktiokulmilla, kun vastaanotin on miltein suoraan esteen takana.

Tietoliikenteen sovellusten kannalta veitsenterädiffraktio on yleisempi ja mielenkiintoisempi kuin rakodiffraktio. Varsinkaan kahden raon diffraktio ei ole tosielämässä todennäköistä tietoliikenteen sovelluksissa. Tulokset kuitenkin pakottavat miettimään diffraktion roolia muiden, jo tutkittujen monitie-etenemisen komponenttien rinnalla terahertsikaistan sovelluksissa.

5. YHTEENVETO

Työssä selvitettiin veitsenterädiffraaktion ja rakodiffraaktion ominaisuuksia terahertsikaistalla. Diffraktiolla tarkoitetaan ilmiötä jossa aallon muoto muuttuu, kun sen etenemiseen vaikuttaa jokin este. Diffraktio perustuu ns. Huygensin periaatteeseen, jonka mukaan aaltoa voidaan pitää jokaisesta aallon jo läpäisemästä väliaineen pisteestä lähteneiden alkeisaaltojen summana. Veitsenteräefekti tapahtuu kun este, ja erityisesti sen reuna toimii lähteenä sekundääriselle aaltorintamalle. Rakodiffraktio tapahtuu etenevä aaltorintama muuttaa muotoaan törmättyään yhteen tai useampaan reikään.

Veitsenteräefektin mittaukset toteutettiin ohjaamalla vastaanottimen säteily alumiinista valmistetun ohuen esteen kärkeen. Esteeseen törmätessään osa säteilystä diffraktoitui vastaanottimeen. Rakodiffraktiomittauksia varten valmistettiin kuparipäällysteisestä muovista kaksi rakokappaletta, joista toisessa oli yksi ja toisessa kaksi rakoja. Näihin rakoihin ohjattiin vastaanottimesta säteilyä, josta osa diffraktoitui vastaanottimeen. Molemmat mittaukset tehtiin kaistalla 0 – 2 THz kulmaa kasvattaen 0:sta asteesta 70:een asteeseen.

Saatuja mittaustuloksia verrattiin kummankin diffraaktion hyvin tunnettuun teoriaan. Tulokset vastasivat hyvin tarkasti teoriaa. Mittaukset osoittivat, että diffraktiota on pidettävä vartenotettavana monitie-etenemisen komponenttina terahertsikaistan sovelluksissa.

6. LÄHTEET

- [1] T. S. Rappaport et al., Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: It will work!, *IEEE Access*, no. 1, s. 335–349, 2013.
- [2] I. Akyildiz, J. Jornet, C. Han, *Terahertz Band: Next Frontier for Wireless Communications*, Elsevier B.V, s. 16-32.
- [3] Derivation of the Friis Equation (luettu 1.4.2017) URL: <http://www.antenna-theory.com/basics/friis.php>.
- [4] J. Jornet ja I. Akyildiz, Channel modeling and capacity analysis for electromagnetic nanonetworks in the terahertz band, *IEEE Trans. Wireless Commun.*, no. 10, s. 3211–3221, 2011.
- [5] L. S. Rothman et al., The HITRAN 2012 molecular spectroscopic database, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 2013, no. 130, s. 4-50.
- [6] Saunders S. (1999) *Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems* (1. painos) John Wiley & Sons, 409s.
- [7] Kari Kärkkäinen, 521357A Tietoliikennetekniikka I, luentokalvo osa 6.
- [8] J. Kokkonen, P. Rintanen, J. Lehtomäki ja M. Juntti, *Diffraction Effects in Terahertz Band - Measurements and Analysis*, Globecom 2016, Washington DC, Yhdysvallat.
- [9] S. Priebe, C. Jastrow, M. Jacob, T. Kleine-Ostmann, T. Schrader, ja T. Kürner, Channel and propagation measurements at 300 GHz, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, no. 5, s. 1688–1698, 2011.
- [10] Recommendation ITU-R P.526-13: Propagation by diffraction, Kansainvälinen Televiestintäliitto, Radioviestinnän Osasto (ITU-R).
- [11] Young two slit experiment (luettu 12.4.2016) URL: http://abyss.uoregon.edu/~js/21st_century_science/lectures/lec13.html.
- [12] H. Young ja R. Freedman, *Sears and Zemansky's University Physics: with Modern Physics* (11. painos), A. Black, Ed. Addison Wesley, 2003.