Tampereen yliopisto

Kimi Rinnekari

NESTEMETALLIANTENNIEN OMINAISUUDET JA KÄYTTÖKOHTEET

Kandidaatintyö
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Tarkastaja: Jari Kangas
Kesäkuu 2024

TIIVISTELMÄ

Kimi Rinnekari: Nestemetalliantennien ominaisuudet ja käyttökohteet
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Tieto- ja sähkötekniikan kandidaattiohjelma
Kesäkuu 2024

Langattoman tiedonsiirron määrä on kasvanut kiihtyvällä tahdilla viimeisten vuosien aikana 5G-verkkojen ja IoT-laitteiden (engl. Internet of Things) määrän kasvaessa. Laitteissa käytettävien antennien täytyy kehittyä, kun tiedonsiirron tarpeet muuttuvat ja monipuolistuvat. Esimerkiksi terveysteknologian puettavat ja implantoitavat laitteet ovat luoneet uusia vaatimuksia tiedonsiirrolle. Tällaiset laitteet voivat hyötyä antenneista, jotka mukautuvat kehon liikkeisiin sekä kestävät fyysistä rasitusta, kuten venytystä ja taivutusta. Nestemetalliantennit ovat yksi mahdollinen ratkaisu näiden vaatimusten toteuttamiseen.

Tässä kirjallisuuskatsauksessa perehdytään nestemetalliantennien ominaisuuksiin ja mahdollisiin käyttökohteisiin. Työssä esitellään antennien tärkeimpiä parametrejä, joiden avulla antennin toimintaa voidaan kuvata ja havainnollistaa. Lisäksi työssä perehdytään nestemetalliantennien erilaisiin valmistusmenetelmiin, mahdollisiin tulevaisuuden käyttökohteisiin sekä käytönaikaisiin säätömahdollisuuksiin.

Nestemetalliantennien valmistusmenetelmät voidaan jakaa kolmeen eri pääryhmään, joita ovat pehmeä- ja optinen litografia, 3D-tulostus ja ruiskutus. Näistä käytetyimpiä menetelmiä ovat pehmeä- ja optinen litografia. Tässä valmistusmenetelmässä luodaan muotti, jonka avulla antennin kuorena käytettävään materiaaliin muodostetaan uria tai onkaloita. Käytetyin materiaali antennin kuorena on polydimetyylisiloksaani (PDMS), joka on muun muassa lääketieteessä laajalti käytetty piipohjainen polymeeri. Antennin kuoren materiaali on merkittävässä roolissa määrittämässä esimerkiksi antennin fyysisen rasituksen sietokykyä. Antennin 3D-tulostus voidaan jakaa kahteen luokkaan, antennin kuoren tulostamiseen ja itse nestemetallin tulostamiseen. Nestemetalliantennien lupaavin käyttökohde on terveysteknologiassa hyödynnettävät puettavat ja implantoitavat laitteet. Näiden saralla on suoritettu eniten tutkimuksia ja tulokset ovat lupaavimpia. Yksi nestemetalliantennien houkuttelevista ominaisuuksista on käytönaikainen toiminnan säätö. Erilaisin menetelmin on mahdollista muun muassa säätää antennin toimintataajuutta sekä säteilykuviota. Toimintataajuuden säätöä voidaan hyödyntää esimerkiksi, kun halutaan korvata useampi antenni yhdellä antennilla. Säteilykuvion säätöä voidaan puolestaan hyödyntää esimerkiksi keilanohjauksessa.

Tämän kandidaatintyön perusteella nestemetalliantennit vaikuttavat todella lupaavalle teknologialle tietoliikenteen tulevaisuuden tarpeisiin. Nestemetalliantennit ovat kuitenkin vielä tutkimusvaiheessa eikä niillä siten ole kaupallisia sovellutuksia. Niiden käyttöönotto vaatii lisää tutkimustyötä, mutta yksinkertaisempia nestemetalliantenneja saatetaan nähdä kaupallisessa käytössä jo lähivuosien aikana.

Avainsanat: nestemetalliantenni, säädettävä antenni, antenni, langaton tekniikka

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. Johdanto 1
2. Antennit 3
2.1 Antennien parametrit 3
2.2 Nestemetalliantennit 6
3. Valmistusmenetelmät 8
3.1 Pehmeä- ja optinen litografia 8
3.2 3D-tulostus 9
3.3 Ruiskutus 11
4. Käyttökohteet 13
4.1 Terveysteknologia 13
4.2 Muu tietoliikenne 15
5. Säätöominaisuudet ja esimerkkiantennit 17
5.1 Taajuuden säätö 17
5.2 Säteilykuvion säätö 20
6. Yhteenveto 22
Lähteet 24

LYHENTEET JA MERKINNÄT

Ga	gallium
Hg	elohopea
IFA	eng. inverted-F antenna, käänteinen F-antenni
In	indium
IoT	Internet of Things
MIMO	Multiple-Input and Multiple-Output
O	happi
PDMS	Polydimetyylisiloksaani
RF	eng. radio frequency, radiotaajuus
RFID	eng. radio frequency identification, radiotaajuinen etätunnistus
Sn	tina

1. JOHDANTO

Langattomien laitteiden määrä ihmisten jokapäiväisessä elämässä on kasvanut merkittävästi viimeisten vuosien aikana ja niiden määrän uskotaan jatkavan kasvuaan tulevaisuudessa. Langattomien laitteiden määrän kasvu johtuu muun muassa IoT-laitteiden (engl. Internet of Things) yleistymisestä ja yhteiskunnan yleisestä sähköistymisestä. Langattomien laitteiden uudet ja muuttuvat käyttökohteet edellyttävät laitteiden ominaisuuksien kehittymistä. Yksi langattoman laitteen toiminnan perusedellytyksistä on siihen liitetty toimiva antenni, joka mahdollistaa langattoman tiedon- ja energiansiirron laitteeseen tai laitteesta.

Perinteisesti antennit valmistetaan jostakin hyvin sähköä johtavasta materiaalista, kuten esimerkiksi kuparista. Perinteisimmillä kiinteästä metallista valmistetuilla antenneilla on kuitenkin yksi merkittävä heikkous, joka voi tulla vastaan joidenkin mahdollisten käyttökohteiden yhteydessä. Kiinteästä metallista valmistetut antennit kestävät melko huonosti fyysistä rasitusta, kuten esimerkiksi taivuttamista ja venyttämistä. Tästä syystä nestemetalliantennien mahdollisuuksia on tutkittu jo 90-luvulta asti. [1]

Nestemetalliantenneista voidaan valmistaa joko jäykkiä tai taipuvia ja venyviä riippuen valmistuksessa käytettävästä taustamateriaalista. Yleisin versio nestemetalliantennista on sellainen, jossa käytettävään taustamateriaaliin muodostetaan eri menetelmiä käyttäen uomia tai onkaloita. Nämä uomat voidaan täyttää nestemetallilla. Nestemäinen metalli mukautuu uoman tai onkalon muotoon, jolloin taipuisaa materiaalia taivutettaessa nestemetalli mukautuu muuttuneeseen muotoon. Toinen vaihtoehto nestemetalliantennien valmistuksessa on antennin valmistaminen ilman kuorta ja siinä olevia uomia, esimerkiksi ruiskuttamalla tai 3D-tulostamalla nestemetallia taustamateriaalille. Valmistusmenetelmistä kerrotaan tarkemmin luvussa 3. Nestemetalliantennit ovat vielä tutkimusvaiheessa, eikä kaupallisia sovellutuksia vielä löydy. Työn luvuissa 3, 4 ja 5 käsitellään prototyyppiantenneja, jotka omaavat lupaavia ominaisuuksia.

Tässä kirjallisuuskatsauksessa perehdytään nestemetalliantennien ominaisuuksiin, valmistusmenetelmiin sekä mahdollisiin tulevaisuuden käyttökohteisiin. Tämä työ rajautuu käsittelemään antenneja, joiden säteilevä elementti koostuu osittain tai kokonaan nestemäisessä olomuodossa olevasta metallista tai metalliyhdisteestä. Työn ulkopuolelle rajautuvat siis muut nestemäiset antennit kuten vesi- ja öljypohjaiset nesteantennit.

Luvussa 2 käydään läpi antennien tärkeimmät parametrit, joilla antennien toimintaa voidaan kuvata ja havainnollistaa. Samassa luvussa käsitellään myös lyhyesti nestemetalliantennien eri vaihtoehtoisia metalliyhdisteitä. Luvussa 3 käsitellään nestemetalliantennien eri valmistusmenetelmiä ja luvussa 4 mahdollisia käyttökohteita. Luvussa 5 keskitytään erilaisiin säätömahdollisuuksiin, jotka antennin nestemäinen olomuoto mahdollistaa. Lopuksi luvussa 6 on yhteenveto, jossa aiheen kannalta olennaisimmat asiat kerrataan lyhyesti.

2. ANTENNIT

Langattomassa tiedonsiirrossa tarvitaan aina jonkinlainen antenni sekä lähettimessä että vastaanottimessa. Lähettävässä laitteessa antennin tehtävä on muuntaa lähetettävä signaali radioaalloiksi eli sähkömagneettisiksi aalloiksi, jotka etenevät radiokanavassa kohti vastaanotinta. Vastaanottavassa laitteessa antenni muuntaa antenniin osuvat sähkömagneettiset aallot signaaliksi, jota laite voi hyödyntää. Antennien ominaisuuksia ja toimintaa voidaan kuvata erilaisilla parametreilla. Näitä parametreja ovat muun muassa vahvistus, suuntaavuus, säteilykuvio, sisäänmenoimpedanssi sekä erilaiset hyötysuhteet. Tässä luvussa käydään läpi ensin antennien tärkeimpiä parametreja teorian ja esimerkkiantennin avulla. Luvun lopussa perehdytään itse nestemetalliantenneihin ja erityisesti niissä käytettäviin eri metalliyhdisteisiin.

2.1 Antennien parametrit

Antennien perustavanlaatuisimpina ominaisuuksina voidaan pitää vahvistusta, säteilykuviota, eri hyötysuhteita sekä toimintataajuutta. Suuntaavuus kuvaa antennin kykyä suunnata säteilemänsä energia tiettyyn suuntaan. Sen suuruus lasketaan suhteuttamalla antennin tiettyyn suuntaan säteilemä teho isotrooppisen säteilijän tehoon. Suuntaavuuden suuruus ilmoitetaan yleensä desibeleinä. [2]

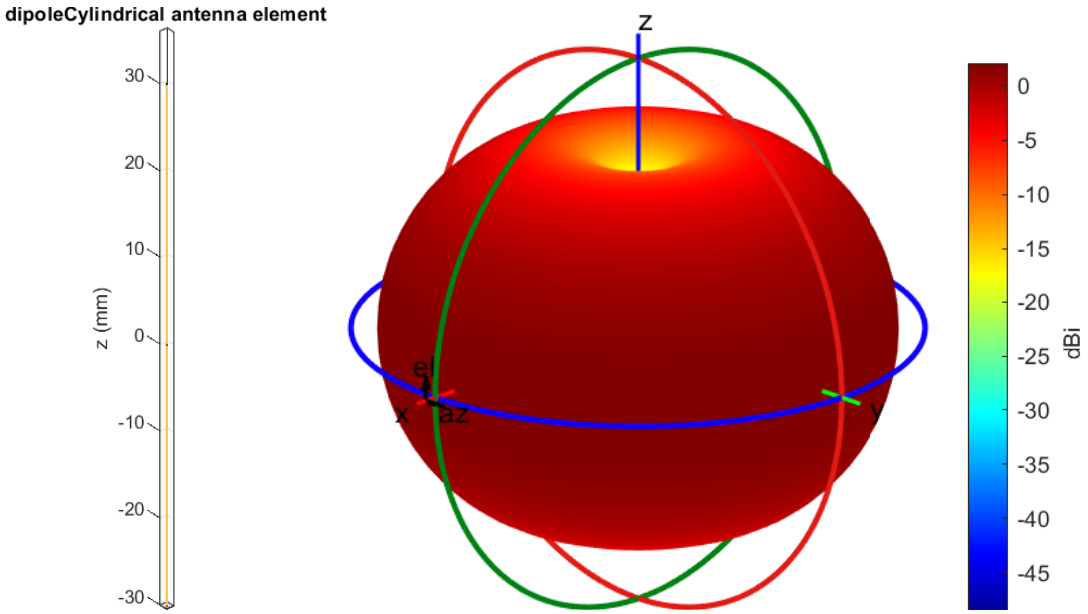
Antennivahvistus kuvaa antennin tehokkuutta säteillä ja vastaanottaa sähkömagneettista säteilyä. Vahvistuksen suuruus on riippuvainen antennin suuntaavuudesta, minkä johdosta vahvistuksen suuruus vaihtelee riippuen suunnasta. Antennin vahvistuksessa otetaan huomioon antennin suuntaavuuden lisäksi myös antennin häviöitä, kuten johtumis- ja dielektriset häviöt. Vahvistuksen suuruus tiettyyn suuntaan voidaan ilmoittaa antennin suuntaavuuden ja säteilyhyötysuhteen tulona. Vahvistus ilmoitetaan usein suuntaavuuden tapaan desibeli asteikolla. [2]

Säteilykuviolla tarkoitetaan 2- tai 3-ulotteista mallia, joka näyttää antennin vahvistuksen eri suuntiin pallokoordinaatistossa [2]. Säteilykuvio määräytyy pääosin antennin fyysisen muodon sekä materiaalin ominaisuuksien mukaan. Kuvissa 2.1 ja 2.2 on esitetty esimerkkikuvat 3- ja 2-ulotteisista säteilykuvioista.

Antennin kokonaishyötysuhteen avulla voidaan ottaa antennin suunnittelussa huomioon erilaiset antennin häviöt. Kokonaishyötysuhde muodostuu kolmen eri osahyötysuhteen tulosta. Näistä osahyötysuhteita ovat heijastushyötysuhde, johtumishyötysuhde sekä dielektrinen hyötysuhde. Heijastushyötysuhde ilmaisee, kuinka hyvin antennin sisäänmenoimpedanssi on sovitettu signaalin siirtolinjan referenssi-impedanssiin. Heijastus- ja dielektristen hyötysuhteiden määrittäminen laskennallisesti on usein hyvin haastavaa ja ne määritetäänkin usein kokeellisesti tai tietokoneavusteisesti. Johtumishyötysuhde ja dielektrinen hyötysuhde muodostavat antennin säteilyhyötysuhteen, jolla kuvataan kuinka tehokkaasti antenni muuntaa syötetyn signaalin lähetettäväksi sähkömagneettiseksi säteilyksi. [2]

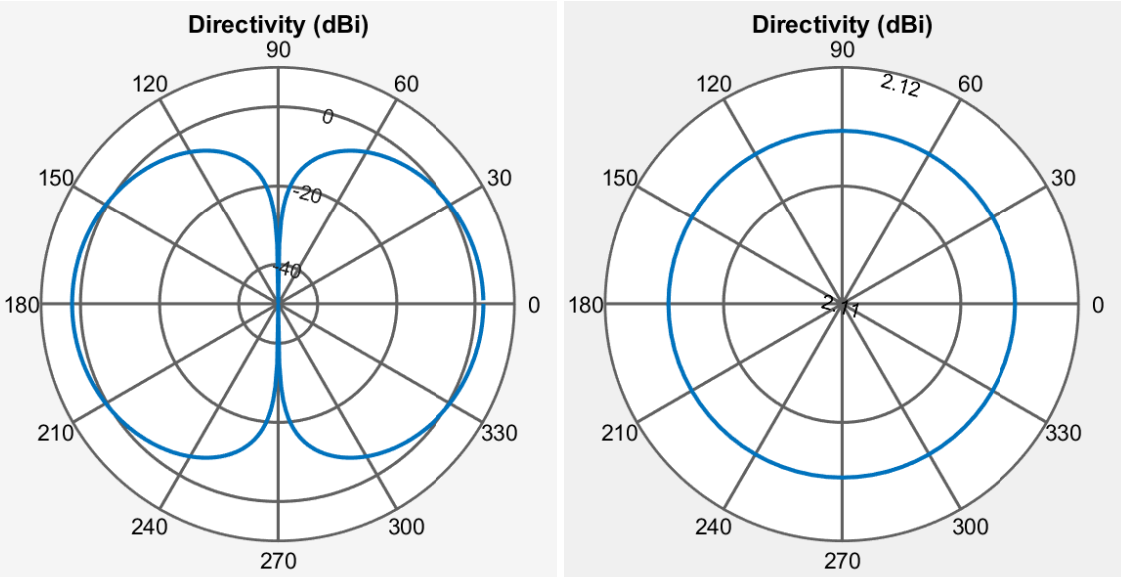
Antennin toimintataajuus on verrannollinen fyysiseen kokoon. Yleensä esimerkiksi dipoliantenni suunnitellaan siten, että antennin pituus on noin puolet halutun toimintataajuuden aallonpituudesta. Tästä seuraa se, että korkeammilla taajuuksilla käytetään yleensä fyysiseltä kooltaan pieniä antennia, kun taas matalammilla taajuuksilla antennit ovat suurempia. Esimerkiksi yleisesti käytetyllä 2,4 GHz:n taajuudella sähkömagneettisen aallon aallonpituus on noin 12,5 cm, jolloin kyseisellä taajuudella käytettävän dipoliantennin pituus voisi olla noin 6 cm.

Kuvassa 2.1 on MATLAB-ohjelmistolla simuloitu lankadipoliantenni. Simulointiin käytettiin MATLAB:in R2024a-versiota ja Antenna Toolbox:in DipoleCylindrical-funktiota [3]. Antennin pituudeksi asetettiin 6,0 cm ja säteeksi 0,1 mm. Kaikki muut funktion parametrit olivat funktion oletusarvoja. Säteilykuviot simuloitiin käyttäen yleisesti käytössä olevaa 2,4 GHz taajuutta.



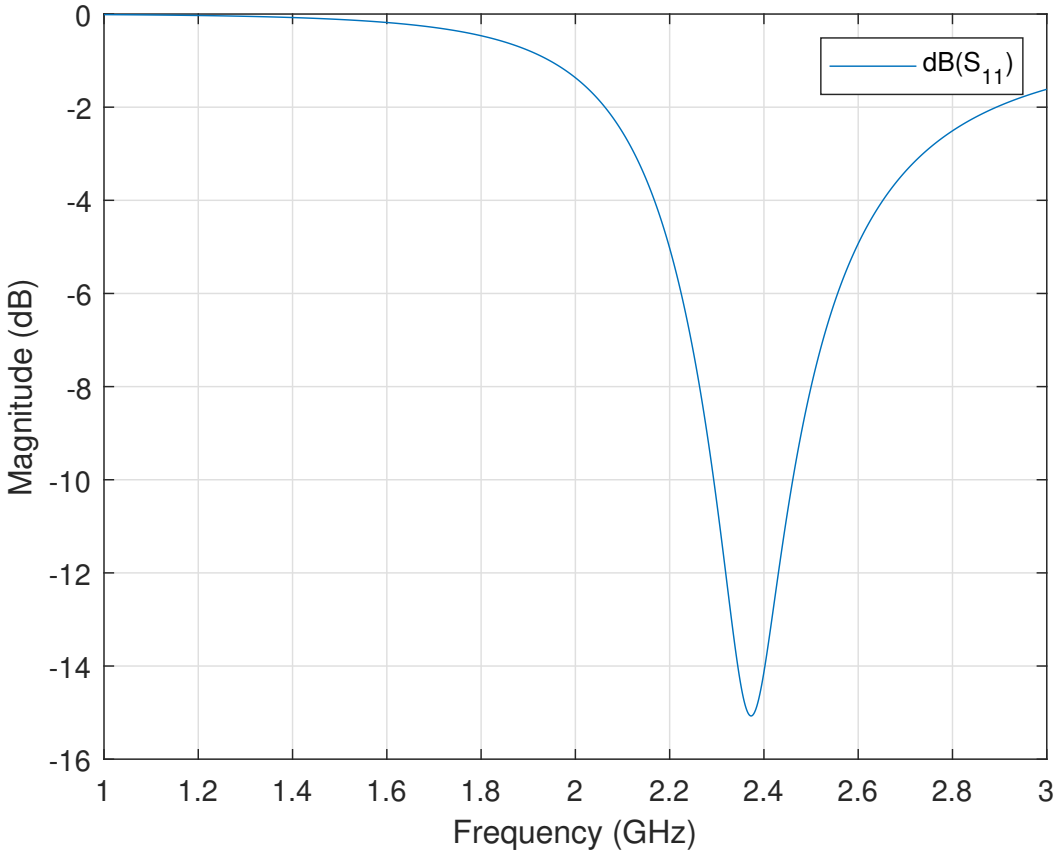
Kuva 2.1. *MATLAB-ohjelmistolla luotu lankadipoliantennimalli ja sen simuloitu säteilykuvio [3]. Kuvassa keskellä näkyvä säteilykuvio on piirretty siten, että antenni on z-akselin suuntainen.*

Kuten kuvasta 2.1 nähdään, on lankadipoliantennin säteilykuvio donitsin muotoinen eli se säteilee voimakkaasti antennin sivuille, mutta heikosti antennin suuntaisesti suoraan ylös- tai alaspäin. Kun kuvan 2.1 pallokoordinaatistossa esitetystä säteilykuviosta leikataan siivut vaaka- ja pystysuunnassa, saadaan kuvan 2.2 mukaiset 2-ulotteiset säteilykuviot. 2-ulotteiset säteilykuviot saadaan asettamalla yksi koordinaateista vakioarvoksi, esimerkiksi kuvan 2.2 tapauksessa xz-taso on saatu asettamalla y nollaksi.



Kuva 2.2. *2-ulotteiset leikkaukset kuvan 2.1 säteilykuviosta xz-tasossa (vasemmalla) ja xy-tasossa (oikealla).*

Antennin heijastuskertoimella kuvataan, kuinka suurella teholla antennin sisääntuloon saapuva signaali heijastuu takaisin siirtolinjaan. Antenniin voidaan syöttää signaalia tehokkaimmin taajuuskaistoilla, joilla heijastuskerroin on pieni. Tällöin suurin mahdollinen osa signaalista saadaan antennin kautta muutettua sähkömagneettiseksi säteilyksi. Taajuusalueita, joilla antenni toimii parhaiten, kutsutaan toimintataajuuksiksi. Heijastuskerroin ilmoitetaan usein desibeliasteikolla ja se piirretään kuvaajissa taajuuden funktiona. Kuvassa 2.3 on esitetty esimerkkikuva dipoliantennin mahdollisista heijastuskertoimen arvoista eri taajuuksilla.



Kuva 2.3. *Kuvan 2.1 antennin simuloitu heijastuskerroin desibeleinä taajuusalueella 1-3 GHz.*

Kuvasta 2.3 nähdään, että simuloidun antennin heijastuskertoimen arvo on desibeliasteikolla alle -10 dB noin 2,4 GHz taajuuden ympäristössä. Antennia voidaan siis syöttää tehokkaimmin taajuuskaistalla, joka on 2,4 GHz:n ympäristössä. Kyseinen esimerkkiantenni toimii siis hyvin tällä taajuuskaistalla ja signaali heijastuu mahdollisimman pienellä teholla takaisin siirtolinjaan.

2.2 Nestemetalliantennit

Nestemetalliantennit kuuluvat nesteantenneihin. Nesteantennit ovat antenneja, joissa säteilevä elementti on muodostettu käyttölämpötilassaan nestemäisessä muodossa olevasta aineesta. Nesteantennit jaetaan metallipohjaisiin ja ei-metallipohjaisiin antenneihin. Ei-metallipohjaiset nesteantennit jaetaan vielä vesipohjaisiin ja ei-vesipohjaisiin nesteantenneihin. Ei-metallipohjaisia nesteitä käytetään usein dielektrisissä resonaattoriantenneissa, koska silloin saavutetaan niiden maksimaalinen säteilyhyötysuhde [1]. Tässä työssä keskitytään kuitenkin käsittelemään nestemetalliantenneja, eikä muita nesteantenneja käsitellä sen syvällisemmin.

Nestemetalliantennissa säteilevä osa koostuu nimensä mukaisesti nestemäisestä metallista tai metalliyhdisteestä. Tunnetuin nestemäinen metalli on elohopea (Hg). Elohopea on kuitenkin myrkyllistä, mikä rajoittaa sen käyttöä varsinkin terveysteknologian saralla. Tämän takia nestemetalliantenneissa käytetäänkin usein erilaisia galliumia (Ga) sisältäviä metalliyhdisteitä. Muita nestemetalliyhdisteissä usein esiintyviä metalleja ovat esimerkiksi indium (In) ja tina (Sn). [4] Nestemetalliantenneissa käytetyimmät metalliyhdisteet on esitelty taulukossa 2.1.

Taulukko 2.1. *Yleisimmin käytetyt metalliyhdisteet nestemetalliantenneissa ja niiden ominaisuuksia [4].*

Materiaali	Koostumus	Sulamispiste (°C)	Sähkönjohtavuus (10^6 S/m)
Elohopea	100 % Hg	-38,87	1
EGaIn	75 % Ga, 25 % In	16	3,4
Galinstaani	68,5 % Ga; 21,5 % In, 10 % Sn	-19	3,4
GaIn10	90 % Ga, 10 % In, 0,026 m-% O	16	2,9

Metalliyhdisteiden ominaisuudet rajoittavat muun muassa niiden mahdollisia käyttökohteita. Kaikkien taulukossa 2.1 mainittujen yhdisteiden sulamispiste on alhaisempi kuin normaali ihmisen ruumiinlämpötila. Tämä tarkoittaa, että niitä voidaan mahdollisesti hyödyntää muun muassa ihmiseen implantoitavissa järjestelmissä ilman, että on olemassa riski antennin kiinteäksi muuttumiselle.

Kaikki taulukossa 2.1 esiteltyjen metalliyhdisteiden sähkönjohtavuus on suuruusluokkaa 10^6. Kuparin sähkönjohtavuus on noin yhtä suuruusluokkaa isompi (10^7), mutta ero ei kuitenkaan ole kovin merkittävä antennien tehokkuutta ajatellen. Nestemetalliantenneissa antennin kuorella tai taustamateriaalilla on usein häviöiden kautta suurempi vaikutus lopullisen antennin säteilytehokkuuteen. [4]

Yksi nestemetalliantennien suurimmista hyödyistä on se, että niiden avulla on mahdollista luoda antenneja, jotka kestävät venytystä, kiertoa sekä taivutusta ilman, että niiden ominaisuudet kärsivät merkittävästi. Myös perinteisimmistä materiaaleista, esimerkiksi kuparista, on mahdollista valmistaa taipuvia antenneja, mutta niiden ominaisuudet muuttuvat peruuttamattomasti, jos antennin rasitus on liian suuri (plastinen alue). Rasituksen kestämisen lisäksi nestemetalliantenneilla on toinen merkittävä etu verrattuna perinteisimpiin antenneihin. Nestemetalliantenni on mahdollista rakentaa siten, että sen ominaisuuksia voidaan muokata kesken käytön erilaisin menetelmin. Tyypillisesti muokattaviin ominaisuuksiin kuuluvat muun muassa antennin toimintataajuus ja säteilykuvio. Nestemetalliantenneja voidaan käyttää hyvin laajalla taajuusalueella aina satojen kilohertsien taajuudelta usean gigahertsin taajuudelle. Käyttöalue kattaa siis valtaosan langattomaan tiedonsiirtoon käytetyistä taajuuksista. [4]

3. VALMISTUSMENETELMÄT

Nestemetalliantennien sekä perinteisempien kupariantennien valmistuksessa voidaan hyödyntää osittain samoja tekniikoita kuten esimerkiksi 3D-tulostusta. Nestemetalliantennit vaativat usein ympärilleen kuoren, mikä saattaa monimutkaistaa valmistusprosessia verrattuna perinteisempiin antenneihin. Valmistuksessa on myös mahdollista yhdistää useita eri valmistusmenetelmiä, jotta halutut ominaisuudet voidaan saavuttaa. Nestemetalliantennien valmistusmenetelmät voidaan jakaa karkeasti kolmeen eri luokkaan, joita ovat pehmeä- ja optinen litografia, 3D-tulostus sekä ruiskutus. [4]

Tässä luvussa käydään läpi tärkeimmät nestemetalliantennien valmistusmenetelmät ja niiden väliset eroavaisuudet. Eri valmistusmenetelmillä valmistetuista antenneista esitellään havainnollistavat esimerkkiantennit.

3.1 Pehmeä- ja optinen litografia

Pehmeä- ja optinen litografia ovat laajimmin käytettyjä menetelmiä joustavien antennien muottien valmistuksessa. Muottien avulla joustaviin materiaaleihin, kuten polydimetyylisiloksaaniin (PDMS), voidaan luoda mikrofluidisia kanavia, jotka täytetään nestemetallilla. Litografiaa käyttäen voidaan valmistaa antenneja hyvin yksinkertaisista dipoliantenneista monimutkaisempiin antennirakenteisiin. Pehmeää litografiaa voidaan hyödyntää myös taipumattomien antennien valmistuksessa. Tällöin antenni valmistetaan edellä mainittuun tapaan, mutta antenni kiinnitetään johonkin jäykkään rakenteeseen. [4]

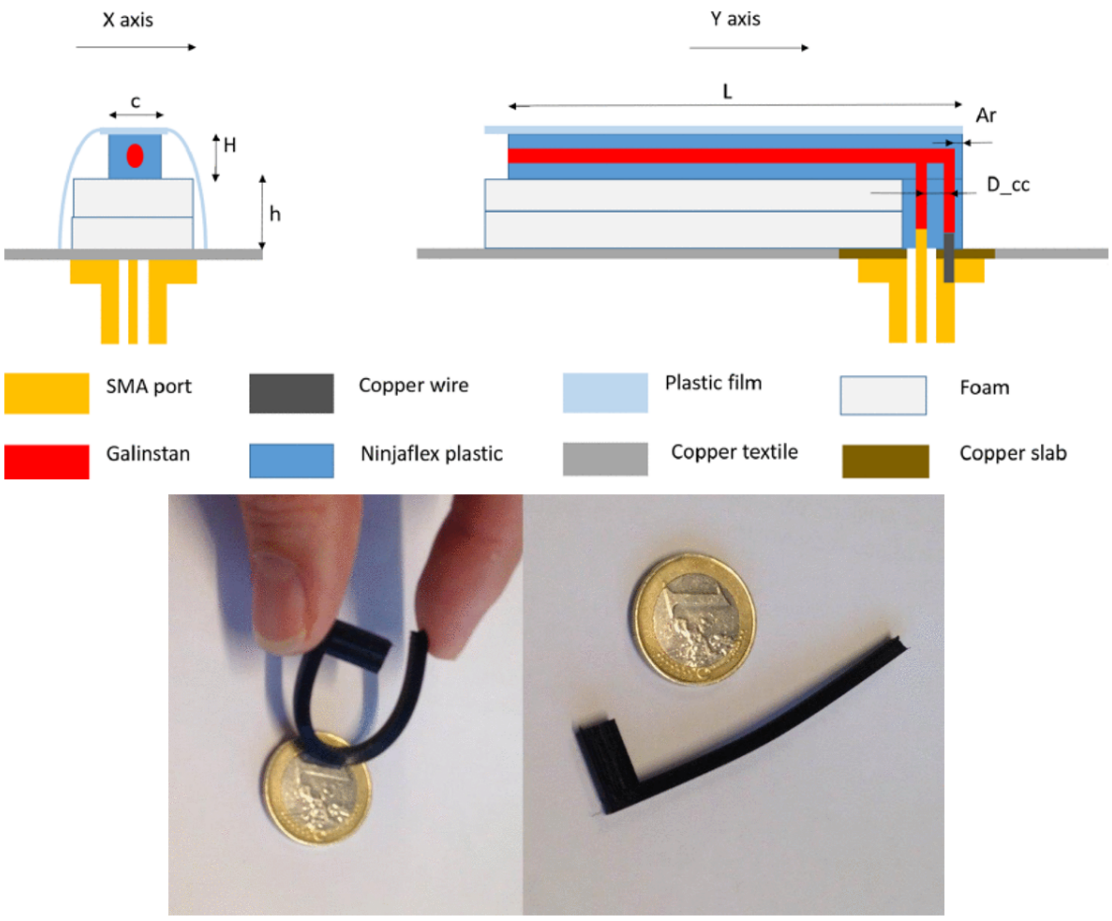
Yleensä nestemetalli injektoidaan valmiiseen antenniin, mutta se ei ole aina mahdollista. Tämä saattaa johtua esimerkiksi siitä, että antennin kanavat ovat liian pieniä tai kanavan toinen pääty on umpinainen. Umpinaisesta kanavasta ilma ei pääse karkaamaan, jolloin kanavan päätyyn jää ilmatasku. Tämä ei ole toivottavaa, koska ilmatasku muuttaa antennin ominaisuuksia, kuten toimintataajuutta. Tämä ongelma voidaan ratkaista kahdella tavalla. Yksinkertaisin tapa on tehdä kanavan päätyyn reikä, josta ilma pääsee ulos. Toinen tapa on käyttää tyhjiötä hyödyntävää tekniikkaa [5]. Tässä tavassa antenni asetetaan ensin tyhjiösäiliöön, jolloin ilma poistuu antennin kanavista. Kun antennirakennelma palautetaan normaaliin ilmanpaineeseen, imeytyy kanavan sisäänmenoon asetettu nestemetalli kanavan sisään ilmanpaineen takia. Paremman täyttöasteen lisäksi tyhjiötekniikan hyödyntäminen mahdollistaa ohuempien kanavien käytön antenneissa. Pienimmillään kana-

van leveys voi olla vain muutaman mikrometrin. [4]

3.2 3D-tulostus

Toinen käytetty tapa nestemetalliantennien valmistuksessa on 3D-tulostuksen hyödyntäminen. 3D-tulostusteknologia on kehittynyt viime vuosina paljon ja sen käyttö eri teknologioiden ja teollisuuden aloilla on laajentunut merkittävästi. Nestemetalliantennien valmistus 3D-tulostuksen avulla voidaan jakaa kahteen ryhmään. Ensimmäisessä ryhmässä 3D-tulostimella tulostetaan antennin kuori, jonka kanavat täytetään nestemetallilla. Toisessa ryhmässä taas 3D-tulostinta käytetään suoraan nestemetallin tulostamiseen. [4]

Antennin kuorien tulostamiseen voidaan käyttää sekä jäykkiä että joustavia materiaaleja. 3D-tulostus mahdollistaa monimutkaisempien 3-ulotteisten antennirakennelmien rakentamisen litografiaan verrattuna. Kuvassa 3.1 on esitetty esimerkkinä toimiva käänteinen F-antenni (eng. IFA, inverted-F antenna), jonka kuori on 3D-tulostettu käyttäen joustavaa materiaalia ja joka on täytetty galinstaani-nestemetalliyhdisteellä. Kuvassa vasemmalla näkyy antennin rakenne ja oikealla kuva valmiista prototyypistä. Prototyyppiantennin kokonaishyötysuhteeksi mitattiin 70 % sen toimintataajuudella 885 MHz. [6]



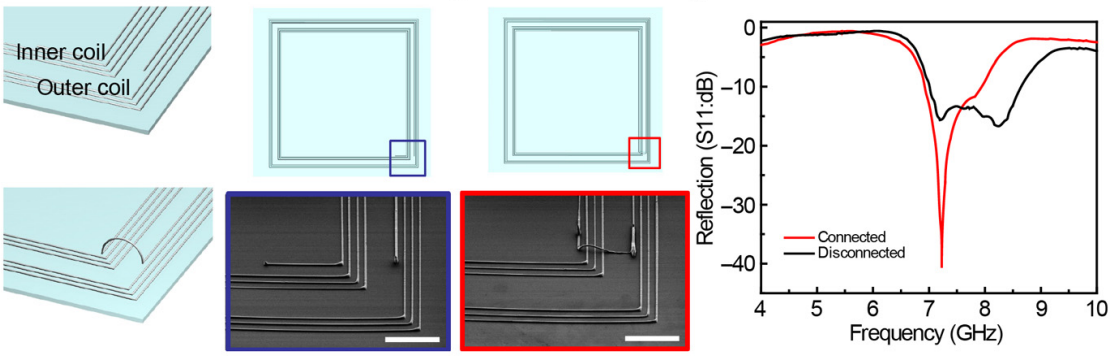
Kuva 3.1. *Esimerkkiantenni, joka on 3D-tulostettu käyttäen joustavaa Ninjaflex muovia. [6]*

Tutkimuksessa [6] perehdyttiin myös antennin taivuttamisen vaikutuksia sen ominaisuuksiin. Mittauksissa todettiin, että antennin toimintataajuus ei muutu merkittävästi, vaikka antenni taivutettiin eri asentoihin. Sen sijaan taivuttamisella oli hieman vaikutusta antennin säteilykuvioon. Taivuttamisen johdosta antenni säteilyteho suoraan eteenpäin laski, mutta säteily sivusuuntaan voimistui. Suurin antennivahvistuksen arvo 3,6 dBi mitattiin antennin ollessa suorana ilman taivutusta. Tutkimuksessa tutkittiin myös ihmiskehon mahdollista vaikutusta antennin toimintaan, mutta merkittäviä muutoksia toiminnassa ei havaittu. Antennin ominaisuuksien muuttumattomuus rasituksen tai ihmiskehon vaikutuksesta ovat hyviä ominaisuuksia, jos antennia halutaan hyödyntää erilaisissa puettavissa laitteissa. [6]

Antennien 3D-tulostuksessa voi kuitenkin tulla vastaan myös haasteita usean GHz:n taajuuksia tavoiteltaessa, riippuen muun muassa antennin mallista ja valmistustavasta. Mitä korkeammalla taajuudella antennin halutaan toimivan, sitä tarkempi ja vaativampi sen valmistusprosessi on. Esimerkiksi tapauksessa [5] antenninvalmistusprosessiin kuuluu vaihe, jossa 3D-tulostetun kuoren kanavat huuhdellaan puhtaaksi niiden luomiseen käytetystä vahasta. Tämä vaihe valmistusprosessissa ei kuitenkaan onnistu, jos kanavien leveys oli alle 500 µm. Valmistusprosessin ongelmat rajoittivat antennin toimivuutta yli 8 GHz:n taajuuksilla.

Antennin kuoren tulostamisen lisäksi on mahdollista, että itse antenni tulostetaan suoraan levylle. Tällä tulostusmenetelmällä on mahdollista valmistaa esimerkiksi RF-käämejä sekä tasoantenneja. Antenneja voidaan tulostaa monelle eri materiaaleille riippuen niiden tyypistä ja käyttökohteesta. Mahdollisia tulostusalustoja ovat muun muassa lasi, tekstiilit ja erilaiset muoviyhdisteet. [4]

Kuvassa 3.2 on esimerkki RF-silmukka-antennista, joka on valmistettu 3D-tulostamalla EGaIn-metalliyhdistettä suoraan lasilevylle. Kuvassa näkyy antennin rakenne sekä antennin sisä- ja ulkosilmukan yhdistämisen vaikutus taajuuskaistaan, jolla antenni toimii. Osat yhdistämällä saavutetaan kapeampi toimintataajuusalue, mutta antenni toimii kyseisellä alueella optimaalisemmin.



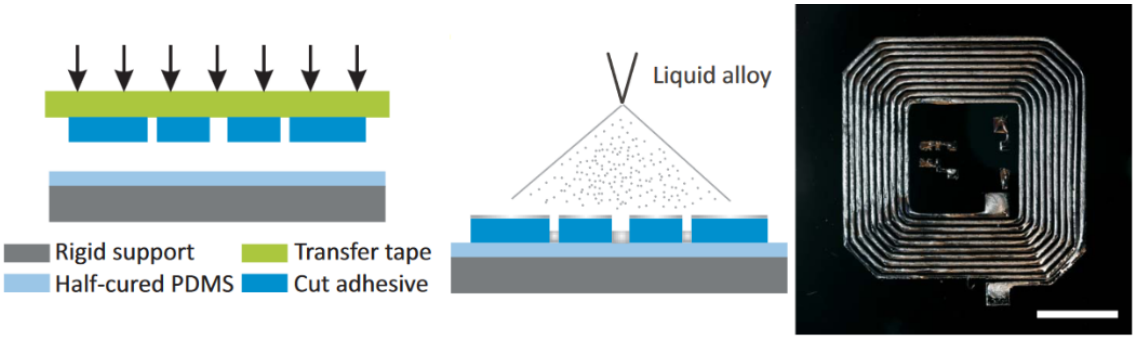
Kuva 3.2. *Esimerkkiantenni, joka on valmistettu tulostamalla nestemetalliyhdistettä. [7]*

Yksi nestemetalliantennien tulostamisen haasteista on se, että antennin rasituksenkesto riippuu tällöin vahvasti antennin pintaan muodostuvan hapettuneen kerroksen ominaisuuksista. Näitä ominaisuuksia voidaan muokata esimerkiksi lisäämällä nestemetalliseokseen toisia aineita. Esimerkiksi tapauksessa [8] metalliyhdisteeseen lisättiin hiilinanoputkia, mikä lisäsi yhdisteen sähkönjohtavuutta sekä mekaanisen rasituksen kestävyyttä. Antenni on myös mahdollista päällystää jollain suojaavalla aineella tulostuksen jälkeen, mikä parantaa sen kestävyyttä [7].

3.3 Ruiskutus

Nestemetalliantenneja voidaan valmistaa myös ruiskuttamalla nestemetalliyhdistettä taustamateriaalin pinnalle [4]. Haluttu alue voidaan rajata esimerkiksi liimasta valmistetulla muotilla, jolloin johtavia alueita muodostuu ainoastaan haluttuihin kohtiin ja antenni saa suunnitellun muotonsa. Ruiskuttamista voidaan käyttää monien erilaisten kaksiulotteisten antennirakenteiden valmistamiseen. Tällaisia ovat esimerkiksi erilaiset RF-käämit, dipoli-, monopoli- ja tasoantennit.

Esimerkki RF-käämin valmistusprosessista ja valmiista antennista näkyy kuvassa 3.3. Kyseinen antenni on valmistettu siirtämällä haluttuun muotoon leikattu liimakerros PDMS alustalle teippiä käyttäen. Teipin irrottamisen jälkeen nestemetallia ruiskutettiin liimakerroksen päälle. Liiman poistamisen jälkeen jäljelle jää halutun muotoinen nestemetallikuvio. Kyseisen antennin huomattiin mittausten perusteella olevan energiatehokkuudeltaan (eng. power efficiency) lähes vastaavan kupariantennin tasolla. Prototyyppiantennin energiatehokkuudeksi mitattiin 10 %, kun vastaavalla kupariantennilla se oli 13 %. Nestemetalliantennilla saavutetaan kuitenkin parempi rasituksen ja taipuvuuden sieto, mikä voi olla suuri etu joissain käyttökohteissa. Prototyyppiantennin energianhyötysuhde käyttäytyi taajuuden muuttuessa lähes identtisesti referenssinä toimineen kuparikäämin kanssa. [9] Vaikka edellä esitelty prototyyppiantenni onkin energiansiirtotehokkuudeltaan huonompi referenssikäämiin verrattuna, ovat sen fyysisten ominaisuuksien edut huomattavia. Nestemetallikäämin energiatehokkuutta on myös mahdollista parantaa tulevaisuudessa testaamalla esimerkiksi eri nestemetalliyhdisteitä.



Kuva 3.3. *RF-käämi, joka on valmistettu ruiskuttamalla nestemetallia PDMS pinnalle. [9]*

Ruiskutusmenetelmän yksi heikkous on se, että antennirakenteiden valmistustarkkuus ei ole aivan esimerkiksi nestemetallin 3D-tulostuksen tasolla. Ruiskutusmenetelmällä valmistettujen antennien johtavan osan leveys on usein muutamasta kymmenestä µm:stä muutamaan sataan µm:iin. Kuvassa 3.3 esitellyn antennin johtavan kuvion viivan leveys on 200 µm. Vastaavasti pehmeää litografiaa ja 3D-tulostusta käyttäen voidaan parhaimmillaan valmistaa antenneja, joiden johtavien osien leveys on 10 µm:n luokkaa. [4]

4. KÄYTTÖKOHTEET

Nestemetalliantenneilla on lukuisia mahdollisia käyttökohteita, joiden määrä todennäköisesti kasvaa tulevaisuudessa, kun nestemetalliantennien ominaisuuksista hyötyvät teknologiat yleistyvät ja antennien valmistusmenetelmät kehittyvät. Tällä hetkellä tutkituimpia nestemetalliantennien käyttökohteista ovat eri terveysteknologian sovelluskohteet, mutta myös muiden mahdollisten käyttökohteiden mahdollisuuksia on selvitetty. Eri käyttökohteet hyödyntävät usein yhtä tai useampaa nestemetalliantenneille tyypillistä ominaisuutta. Näitä ominaisuuksia ovat muun muassa fyysisen rasituksen kuten venytyksen ja puristuksen sieto sekä antennien laajat säätömahdollisuudet.

Tässä luvussa perehdytään ensin nestemetalliantennien käyttöön terveysteknologian eri käyttökohteiden yhteydessä. Lopuksi käydään läpi vielä muutama mahdollinen käyttökohde, joissa nestemetalliantennin käytön mahdollisuuksia on tutkittu.

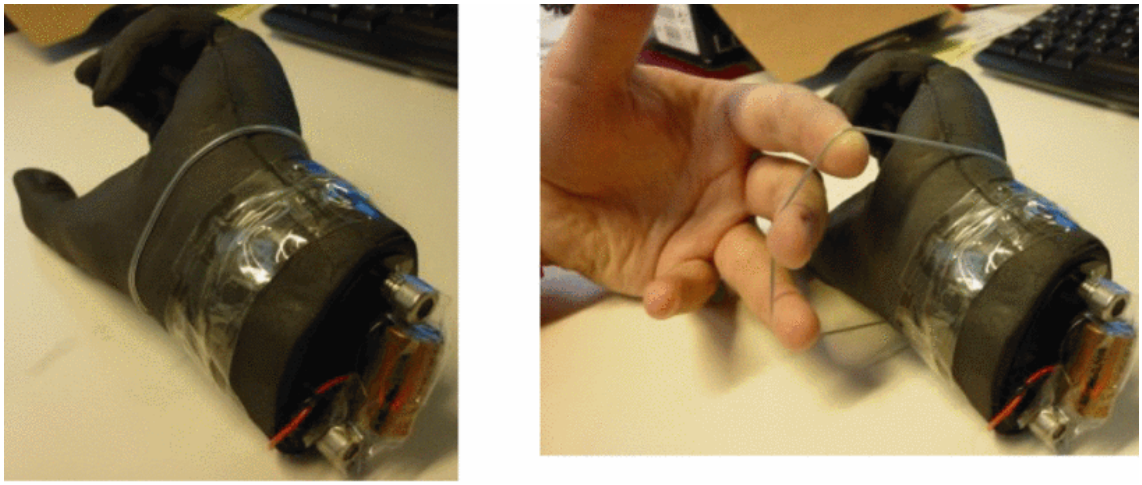
4.1 Terveysteknologia

Terveysteknologian saralla on viimevuosina otettu suuria harppauksia eteenpäin. Uudet innovaatiot ja teknologiat mahdollistavat uusien käyttökohteiden löytämisen ja olemassa olevien ratkaisujen kehittämisen. Nestemetalliantennien käyttöä on tutkittu erityisesti erilaisten puettavien laitteiden antennien sekä kehon sisään implantoitavien antennien osalta. Molemmat käyttökohteet hyötyvät erityisesti nestemetalliantennien joustavista fyysistä ominaisuuksista. [4]

Puettavilla antenneilla tarkoitetaan kehon ulkopuolelle joko suoraan ihoon kiinnitettäviä antennielementtejä tai vaihtoehtoisesti erilliseen vaatteeseen tai muuhun puettavaan esineeseen integroituja antenneja. Puettavien antennien erityisvaatimuksiin kuuluu usein taivutuksen ja venytyksen kesto. Puettavia antenneja voidaan valmistaa myös perinteisimmistä antennimateriaaleista esimerkiksi lisäämällä vaatteen kankaaseen metallisäikeitä tai liittämällä ohuen kupariantennin taipuvaan muovilevyyn. Näiden ratkaisujen haasteena tulevat vastaa materiaalien ominaisuudet. Esimerkiksi ohuet kupariantennit kestävät hieman taivutusta, mutta usean taivutuskerran jälkeen niiden tehokkuus heikkenee. Kupariantenni läpikäy plastisen deformaation jo noin 2 %:n venymisen jälkeen. Tämä tarkoittaa, että antenni ei palaudu enää alkuperäiseen muotoonsa ja sen ominaisuudet kuten säteilykuvio ja toimintataajuus voivat muuttua. Nestemetalliantennit kestävät fyysistä ra-

situsta kuten venytystä ja puristusta paremmin, jolloin vastaavanlaiset antennien ominaisuuksien pysyvät muutokset vaativat huomattavasti suuremman fyysisen rasitteen. Monet joustavaa materiaalia hyödyntäen valmistetut nestemetalliantennit kestävät jopa 15–50 %:in venytyksen. [4]

Yksi esimerkki hyvin venytystä kestävästä antenniprototyypistä on kuvassa 4.1. Kyseinen prototyyppi on valmistettu täyttämällä 1,5 mm halkaisijaltaan oleva silikoniputki galinstaani-nestemetalliyhdisteellä. Prototyyppi altistettiin monenlaiselle eri rasituksille, joista merkittävämpänä toimi venytys 150 %:iin lähtötilanteesta. Antennissa ei tapahtunut pysyviä muutoksia rasituksen jälkeen. [10]



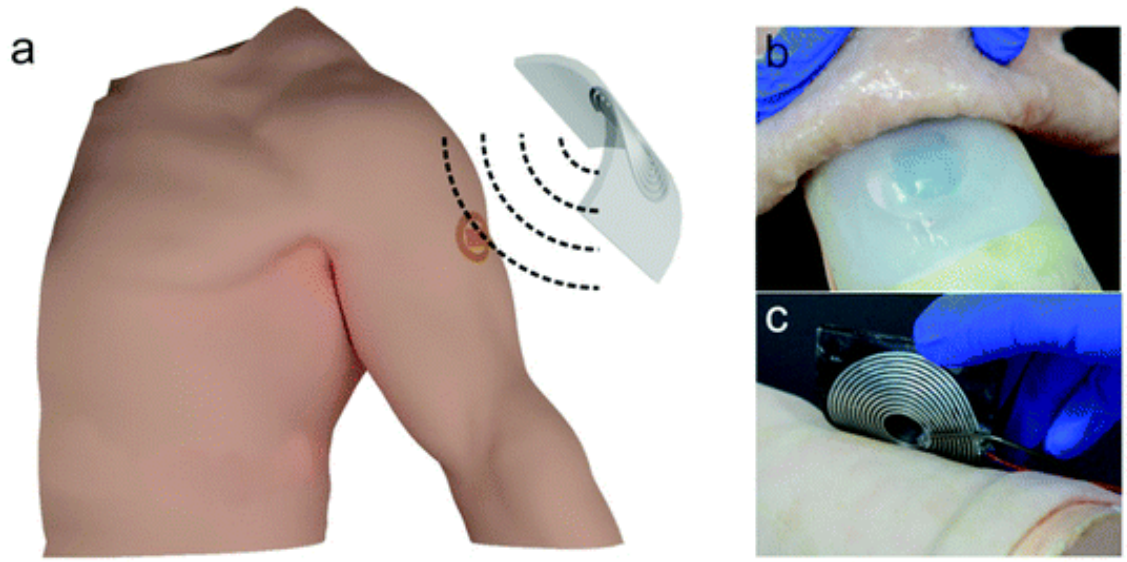
Kuva 4.1. *Venytystä hyvin kestävän antennin prototyyppi. Kuvassa vasemmalla antenni normaalitilassa kiinni tekokädessä ja oikealla on kuvattu antennin venyvyysominaisuuksia. [10]*

Kuvan 4.1 antennin toimintataajuudeksi määritettiin 868 MHz, jolla antennin heijastuskertoimen arvo oli -20 dB. Tutkimuksessa todettiin, että voidaan säätää toimimaan myös muilla yleisesti käytössä olevilla taajuuskaistoilla, kuten 1,8 GHz:n ja 2,4 GHz:n taajuuksilla. Mittauksissa todettiin antennin olevan lähes ympärisäteilevä eli se säteilee kaikkiin suuntiin lähes yhtä tehokkaasti, mikä tekee siitä hyvän vaihtoehdon useaan eri sovelluskohteeseen. Antennin vahvistus oli kuitenkin heikolla -5 dBi tasolla, mikä johtui muun muassa mittauksissa käytetyn tekokäden aiheuttamista häviöistä. [10]

Toinen sovelluskohde terveysteknologian saralla ovat kehoon implantoitavat nestemetalliantennit. Monet implantoitavat lääkinnälliset laitteet vaativat toimiakseen antenneja. Tyypillisimpiä tarpeita ovat langaton tiedon- ja virransiirto kehon sisällä olevan implantin ja kehon ulkopuolisen laitteen välillä. Monet antenneissa käytetyistä nestemetalliyhdisteistä, kuten galinstaani, ovat myrkyttömiä, minkä takia ne soveltuvat myös implantoitaviin antenneihin. Nestemetalliantennien suurin etu myös implantoitavien antennien tapauksessa on niiden venytyksen ja puristuksen sieto. Venyvän materiaalin, kuten PDMS:n, käyttö mahdollistaa kehon liikkeisiin paremmin mukautuvan antennin valmistuksen. Täl-

laisen antennin käyttö voi nostaa laitteen käyttömukavuutta verrattuna perinteisempään jäykempään antennirakenteeseen. [4]

Kuvassa 4.2 näkyy yksi prototyyppiversio galinstaanista ja PDMS:stä valmistetusta implantoitavasta antennista. Kyseistä prototyyppiä käytettiin akkukäyttöisen implantoitavan laitteen akun lataamiseen. Mittauksissa ihmiskehon vaikutusta tehonsiirtoon simuloitiin peittämällä laite siannahalla. Latauksen aikana saavutettiin tasainen 9 W latausteho, jolla laitteen 120 mAh akkua ladattiin 18 minuutin jaksoissa. Testeissä antennilla saavutettiin 60 % energiansiirtotehokkuus. Tyypillisesti vastaavien antennien tehokkuus on usein välillä 60–80 %. Energiansiirtotehokkuus säilyi 50 %:ssa vaikka antennia taivutettiin. [11]



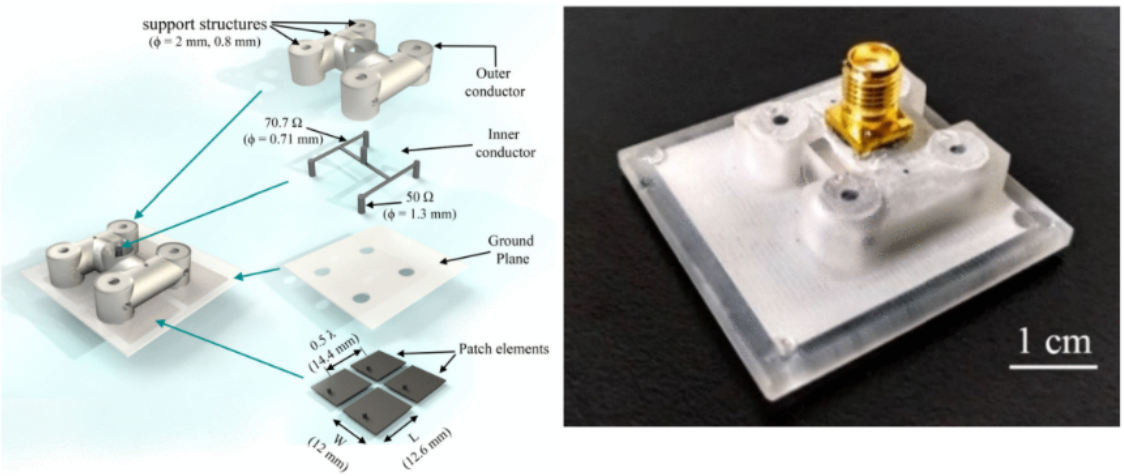
Kuva 4.2. *a) Havainnollistava kuva antennin mahdollisesta käyttökohteesta. b) Vastaanotinantennin protyyppi, joka sijoitettu siannahan alle. c) Lataukseen käytetyn käämin valmis prototyyppi. [11]*

Tutkimuksessa [11] kyseistä antennia testattiin implantoitavien laitteiden lisäksi myös puettavien laitteiden sovelluskohteissa. Kyseinen prototyyppiantenni vaikuttaakin monipuoliselle ja toimivalle ratkaisulle erilaisiin langattoman energiansiirron tarpeisiin. Terveysteknologian kehittyessä tarve erilaisille nestemetalliantennien ominaisuuksia hyödyntäville antenneille kasvaa todennäköisesti puettavien- ja implantoitavien antennien lisäksi myös muiden sovelluskohteiden kautta.

4.2 Muu tietoliikenne

Nestemetalliantenneilla on terveysteknologian lisäksi myös muita mahdollisia sovelluskohteita. Tietoliikenteen kannalta tärkeimpiä ominaisuuksia nestemetalliantenneissa ovat mahdollisuus säätää toimintataajuutta sekä säteilykuviota. Antennin toimintataajuuden säätämisellä mahdollistetaan esimerkiksi useamman antennin korvaaminen vain yhdellä antennilla. Nestemetalliantennien säätöominaisuuksista puhutaan lisää luvussa 5.

Nestemetalliantennien käyttöä on tutkittu ja testattu esimerkiksi erilaisten antenniryhmien muodostamisessa. Nestemetallin käyttäminen antenniryhmien valmistukseen mahdollistaa uudenlaisia valmistusmenetelmiä. Esimerkiksi kuvan 4.3 antenniryhmä valmistettiin 3D-tulostamalla antennin kuori ja täyttämällä se tyhjiötä hyödyntäen galliumpohjaisella nestemetalliyhdisteellä. Tällä tavalla sekä varsinaiset tasoantennit että niitä yhdistävät johtimet saatiin valmistettua kaikki yhdellä kertaa, mikä tekee valmistusprosessista suoraviivaisemman verrattuna perinteisempiin antenniryhmiin. [12]



Kuva 4.3. *Prototyyppiantennin rakenne ja valmis prototyypi. [12]*

Nestemetalliantennien mahdollisuuksia on testattu myös esimerkiksi mobiililaitteen MIMO-antennin (Multiple-Input and Multiple-Output) toimintataajuuden säätämisessä. Laitteessa oleva MIMO-antenni koostui yhdestä monopoliantennista ja yhdestä muokatusta käänteisestä F-antennista, jonka toimintataajuutta säädettiin muuttamalla nestemetallin määrää kanavassa. [13] Nestemetalliantennien käyttöä on tutkittu myös RFID-tunnisteiden yhteydessä [4].

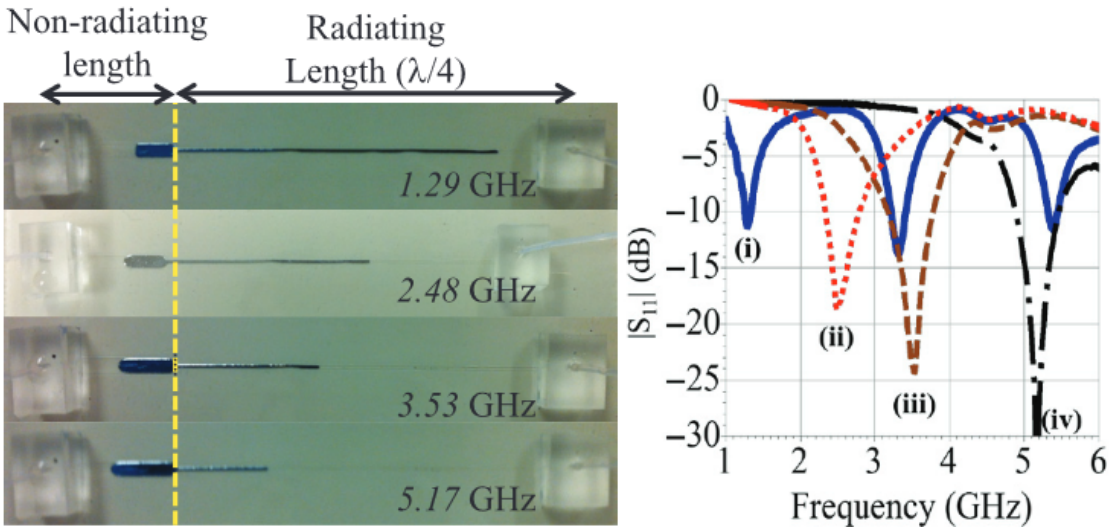
5. SÄÄTÖOMINAISUUDET JA ESIMERKKIANTENNIT

Nestemetalliantennit mahdollistavat antennin säätämisen kesken sen käytön tavoilla, jotka eivät ole mahdollisia perinteisillä antenneilla. Antennin ominaisuuksia säätämällä antenni saadaan toimimaan halutulla tavalla esimerkiksi olosuhteiden muuttuessa. Nestemetalliantennien ominaisuuksien säädettävyys kesken käytön on toinen sen tärkeimmistä ominaisuuksista rasituksenkestävyyden lisäksi. Tässä luvussa käsitellään olennaisimpia antennien toiminnan säätömahdollisuuksia ja niiden toteutustapoja, jotka ovat nestemetalliantenneille tyypillisiä. Luvun aikana esitellään myös muutama erilainen antenni, jotka havainnollistavat eri säätömahdollisuuksia.

5.1 Taajuuden säätö

Antennin toimintataajuus riippuu pääosin siitä, kuinka suuri antenni on. Tästä johtuen antennin toimintataajuuteen voidaan vaikuttaa muuttamalla antennin fyysisiä mittoja kuten pituutta. Antennin pituuden muuttaminen voidaan suorittaa muutamalla eri tavalla. Yksi tapa tämän toimenpiteen suorittamiseen on mikropumppujen hyödyntäminen. Mikropumppujen avulla nestemetallia voidaan siirtää säiliöstä nestemetallille tehtyyn uomaan, jonka avulla antenni muodostetaan. [4]

Kuvassa 5.1 on esitetty esimerkki antennista, jonka toimintataajuutta voidaan säätää. Kuvassa vasemmalla on esitetty miltä antenni näyttää eri toimintataajuuksilla. Antennin säteilevän osan pituus on 1/4 aallonpituudesta. Kuvassa oikealla on esitetty antennin heijastuskertoimen mittaustulokset säteilevän osan neljällä eri pituudella. Heijastuskerroin on selvästi pienempi tietyillä taajuusalueilla. Kuten luvun 2 esimerkkiantennin tapauksessa, näistä alueista voidaan päätellä toimintataajuus antennin eri pituuksilla. Kyseisen antennin säteilyhyötysuhteeksi mitattiin noin 85 % lähes koko mittausalueella. Antennin antennivahvistukseksi mitattiin taajuusalueen alapäässä (1–2 GHz) noin 1,5 dB ja taajuusalueen yläpäässä (3–5 GHz) noin 2,5 dB. [14]



Kuva 5.1. *Esimerkki monopoliantennista, jonka toimintataajuutta voidaan säätää mikropumpulla. Heijastuskerrointen kuvaajassa (i) on pisin antennin säteilevä osa, (ii) toiseksi pisin, (iii) kolmanneksi pisin ja (iv) lyhin. [14]*

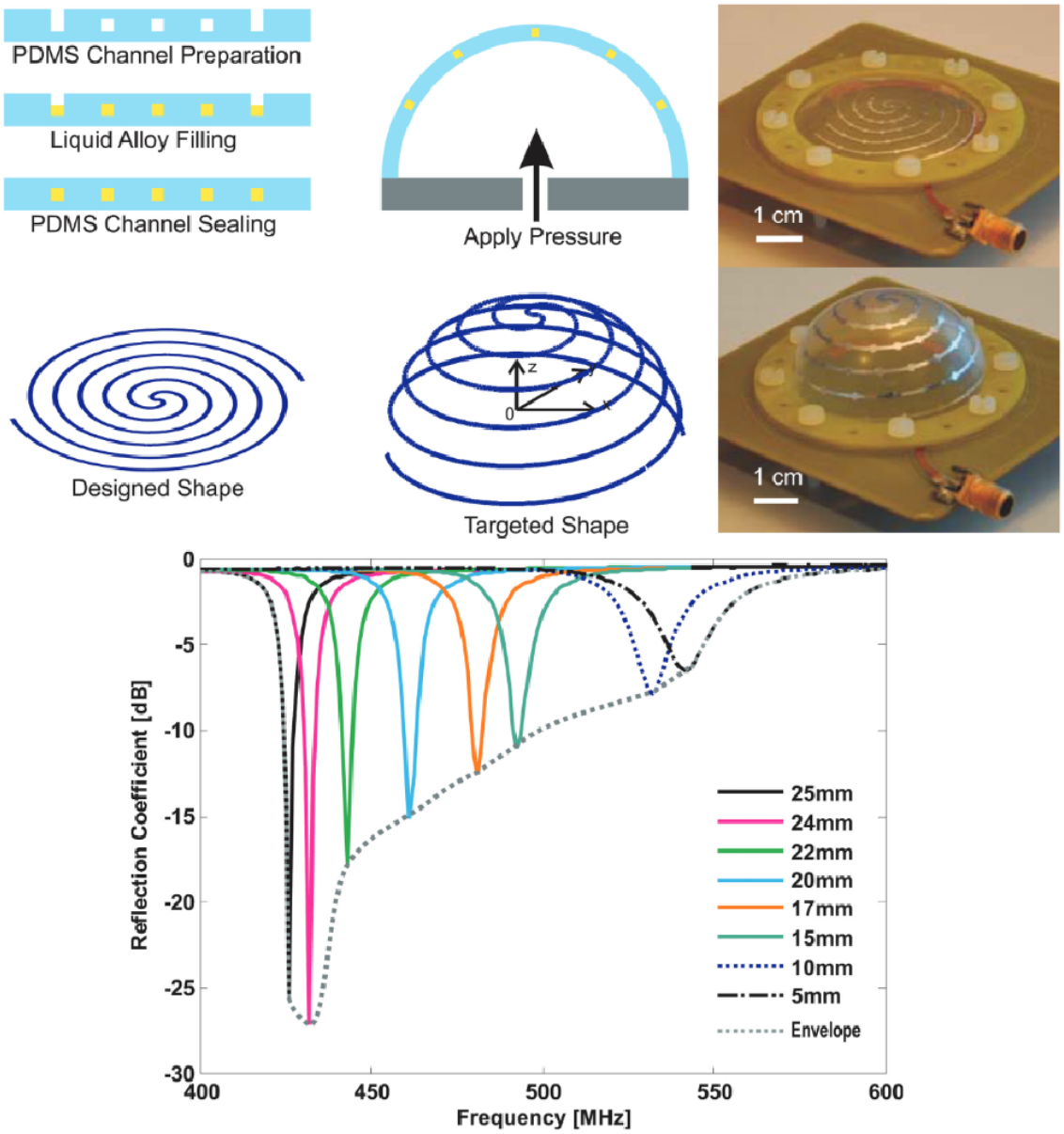
Kuvan 5.1 prototyyppiantennissa käytettiin elohopeaa, mikä rajoittaa prototyyppiantennin mahdollisia sovelluskohteita. Antennin toimivuutta testattiin myös käyttämällä myrkytöntä galinstaani-metalliyhdistettä. Galinstaani on kuitenkin nopeasti hapettuva metalliyhdiste, jonka takia antenni ei toiminut kunnolla, ellei antennin ympäristön olosuhteita, kuten happitasoa ja ilmankosteutta, säädelty tarkasti. [14]

Toinen mahdollinen tapa muuttaa antennin toimintataajuutta on ohjata antennin pituutta hyödyntäen jänniteohjattua kapillaari-ilmiötä. Tässä ohjausmenetelmässä voidaan jännitteen avulla muuttaa nestemetalliyhdisteen pintajännitystä muokkaamalla aineen pinnan hapettumista. Aineen pintajännitteen suuruus vaikuttaa kapillaari-ilmiön voimakkuuteen eli siihen laskeeko vai nouseeko neste kanavassa. Tällä tavalla voidaan saavuttaa lähes samat säätömahdollisuudet kuin mikropumpuilla, mutta erillisiä pumppuja ei tarvita. Tällaisen antennin rakentaminen on yksinkertaisempaa, koska liikkuvia osia on vähemmän. [15]

Antennin taajuuden säätö käyttäen edellä mainittuja tapoja on helpointa yksinkertaisille antennirakenteille, kuten monopoli-, dipoli- ja käänteisille F-antenneille. Näissä antenneissa taajuuden säätö on melko yksinkertaista antennien suoraviivaisen rakenteen takia. Monopoliantennissa säteilevänä elementtinä toimii yksittäinen suora johdin, joka on usein kohtisuorassa maatasoon nähden. Tämä yksinkertainen antennityyppi sopii hyvin käyttötarkoituksiin, joissa toiminta ei vaadi monimutkaista antennia.

Antennien ominaisuuksia voidaan muuttaa myös muilla keinoin kuin muuttamalla nestemetallin määrää antennirakenteessa. Ominaisuuksien muutoksia voidaan luoda muun muassa muuttamalla antennin fyysistä muotoa esimerkiksi altistamalla se rasitukselle. Tämä voi olla toimiva keino esimerkiksi silloin, kun antenni on rakennettu hyödyntäen

rasitusta kestäviä materiaaleja. [16] Kuvassa 5.2 näkyy esimerkki tällaisesta antennista.



Kuva 5.2. *Esimerkki antennista, jonka toimintataajuutta ohjataan rasittamalla materiaalia, jonka sisään antenni on rakennettu. Alemmassa kuvassa kuvattuna eri väreillä, kuinka antennin toimintataajuus muuttuu antennin kuvun korkeuden kasvaessa. [16]*

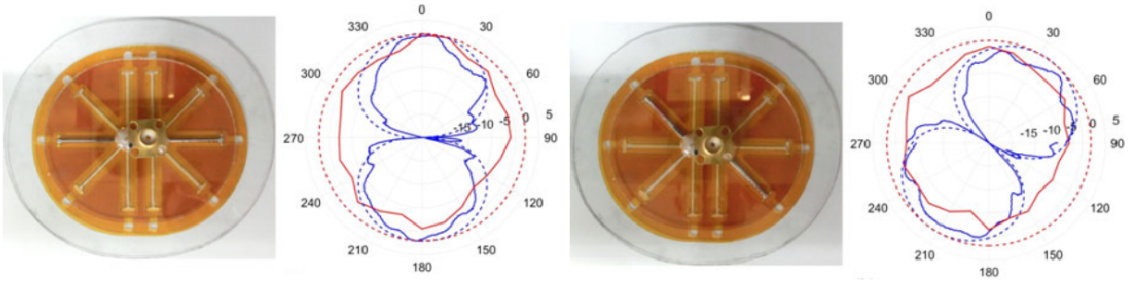
Kuvasta 5.2 nähdään esimerkkiantennin rakenne sekä se, kuinka antennin toimintataajuus muuttuu, kun antennia rasitetaan. Rasituksen myötä antenni muodostaa kuvun, jonka korkeus kasvaa suuremman rasituksen myötä. Antennin heijastuskertoimen mittaustuloksista nähdään, kuinka antennin toimintataajuus laskee antennin muuttaessa muotoaan alkutilasta. On kuitenkin huomattava, että kyseisen antennin matalimman ja korkeimman toimintataajuuden ero on melko pieni, eli antennia ei voida käyttää yhtä laajalla taajuusalueella kuin esimerkiksi kuvassa 5.1 esiteltyä antennia. Antennin taajuudensäätö saattaa kuitenkin olla tarkempaa, mikä voi olla haluttu ominaisuus joissakin käyttökohteissa. Antennin muodon muuttaminen toteutettiin pumppaamalla ilmaa antennirakenteen si-

sään. Pumpun käyttäminen tekee antennista alttiimman rikkoutumiselle siinä olevien liikkuvien osien takia. Lisäksi pumppu pitää saada mahdutettua käytettävään laitteeseen, mikä saattaa rajata mahdollisia käyttökohteita. Antennin säätäminen pumpun avulla on sen lisäksi melko hidasta. Antennin korkeuden säätö eri korkeuksien välillä kestää useita sekunteja. [16]

Tutkimuksessa [17] vastaavanlaista antennia säädettiin pumpun sijaan hyödyntämällä nesteen höyrystymistä. Antennirakenteeseen upotettiin alkoholisäiliö ja keraaminen vastus, jonka avulla alkoholin lämpötilaa säädeltiin. Kun alkoholin lämpötilaa nostettiin tarpeeksi, alkoi se höyrystyä ja paine antennin sisällä kasvaa. Säätelemällä alkoholin lämpötilaa ja antennin sisällä olevaa painetta, saatiin antennin kuvun korkeus säädettyä halutuksi. Antennin korkeuden säätäminen ei kuitenkaan ole nopea prosessi. Antennin kuvun korkeuden muuttaminen lähtötilanteesta maksimikorkeuteen kestää kymmeniä sekunteja, minkä takia antennin säätäminen nopeasti ei ole mahdollista.

5.2 Säteilykuvion säätö

Nestemetalliantennit mahdollistavat myös antennin säteilykuvion muokkaamisen kesken antennin käytön. Säteilykuvion muokkaamista voidaan hyödyntää esimerkiksi keilanohjauksessa, joka toteutetaan muuttamalla antennin säteilysuuntaa kesken antennin käytön. Tällöin on esimerkiksi mahdollista varmistaa vahvin yhteys vastaanottimen ja lähettimen välillä, jos niiden sijainti muuttuu toisiinsa nähden. Säteilykuvion muokkaaminen voidaan toteuttaa melko samanlaisilla toimenpiteillä kuin taajuuden muuntaminen. Mikropumppujen tai sähköisesti ohjatun kapillaari-ilmiön avulla voidaan ohjata nestemetalli haluttuihin uriin ja estää sen kulkeminen muihin uriin. Tällöin voidaan esimerkiksi vaihtaa suuntaa, johon antenni säteilee kuten tapauksessa [18], joka on esitelty kuvassa 5.3.



Kuva 5.3. *Esimerkki dipoliantennista, jonka säteilyn suuntaa voidaan säätää ohjaamalla nestemetalli haluttuihin haaroihin. [18]*

Kuvan 5.3 antennissa on 8 eri suuntaan osoittavaa kanavaa, joista 2 toisiaan vastakkain olevaa kanavaa täytetään nestemetalliyhdisteellä käyttäen tasajänniteohjattua kapillaari-ilmiötä. Ohjaamalla nestemetalli eri kanaviin antennirakennelmassa, voidaan antennin säteilysuuntaa muuttaa. Antennin säteilysuunnan muuttaminen suunnasta toiseen kesti 1–2 sekuntia. Tämän esimerkkiantennin säteilykuviota voidaan säätää ainoastaan yhdessä

tasossa. Antennin säätömahdollisuuksia voitaisiin tarkentaa esimerkiksi lisäämällä haaroja eri suuntiin. Tämä tekisi kuitenkin antennin rakenteesta monimutkaisemman, mikä saattaa vaikuttaa negatiivisesti sekä antennin toimintaan että valmistusprosessiin. Esimerkkiantenni on lähes lankamainen dipoliantenni, joten sen säteilykuvio muistuttaa paljon kuvan 2.1 antennin säteilykuviota.

Mittauksissa antennin vahvistuksen todettiin olevan parhaimmillaan noin 2 dB säteilyhyötysuhteen maksimiarvoksi mitattiin 97 % [18]. Mittausten edetessä antennin vahvistus ja säteilyhyötysuhde alkoivat kuitenkin heiketä merkittävästi, minkä pääteltiin johtuvan monista erinäisistä suunnitteluvirheistä antennissa. Ongelmista huolimatta tutkimuksessa rakennettiin onnistuneesti yksi versio nestemetalliantennista, jonka säteilykuviota voidaan säätää kesken käytön.

6. YHTEENVETO

Nestemetalliantennit mahdollistavat monipuolisilla ominaisuuksillaan uudenlaisten käyttökohteiden löytämisen sekä vanhojen käyttökohteiden kehittämisen. Tässä työssä perehdyttiin nestemetalliantennien ominaisuuksiin ja erilaisiin valmistustapoihin. Lisäksi työssä kerrottiin nestemetalliantennien mahdollisista käyttökohteista ja tulevaisuuden mahdollisuuksista.

Nestemetalliantennit koostuvat yleensä eri gallium-yhdisteistä, joiden avulla antennin säteilevä elementti muodostetaan joko jonkin ympäröivän aineen sisään tai jonkin tasaisen pinnan päälle. Antennin taustan tai kuoren materiaalivalinnan avulla voidaan vaikuttaa siihen, tuleeko antennista joustava ja taipuisa vai jäykkä. Joustavia materiaaleja käytetään yleensä, kun käyttökohteet vaativat antennilta fyysisen rasituksen kestoa. Jäykkiä antennirakennelmia käytetään puolestaan useimmin, kun halutaan mahdollistaa antennin toimintataajuuden tai säteilykuvion säädettävyys. Antennin joustavuuden ja säädettävyyden yhdistäminenkin on mahdollista joissakin antennimalleissa.

Nestemetalliantennien valmistusmenetelmät voidaan jakaa kolmeen eri pääryhmään, joita ovat pehmeä tai optinen litografia, 3D-tulostus sekä ruiskutus. Pehmeä tai optinen litografia on näistä valmistustavoista käytetyin, kun halutaan valmistaa joustavia ja taipuisia nestemetalliantenneja. Yleisimmin käytetty pohjamateriaali on PDMS, joka on muun muassa lääketieteessä yleisesti käytetty myrkytön piipohjainen polymeeri. Optisen litografian avulla valmistetaan muotteja, joita käytetään varsinaisen pohjamateriaalin muotoiluun. Toinen yleisistä nestemetalliantennin valmistusmenetelmistä on 3D-tulostaminen. 3D-tulostusta voidaan hyödyntää joko antennin kuoren tulostamisessa tai suoraan nestemetalliyhdisteen tulostamisessa. Kolmas yleinen valmistusmenetelmä on nestemetalliyhdisteen ruiskuttaminen rajatulle alueelle. Tätä menetelmää voidaan esimerkiksi hyödyntää, kun antenni halutaan valmistaa käyttäen kangasta taustamateriaalina.

Nestemetalliantennit mahdollistavat antennien ominaisuuksien käytönaikaisen säädön tavoilla, jotka eivät ole mahdollisia perinteisillä antenneilla. Olennaisimmat säädettävät ominaisuudet ovat antennin toimintataajuus sekä säteilykuvio. Antennin toimintataajuutta voidaan säätää esimerkiksi muuttamalla nestemetallin määrää antennirakenteeseen kuuluvassa uomassa mikropumpun avulla. Antennin säteilykuvion säätö voidaan toteuttaa esimerkiksi samoin keinoin kuin taajuuden säätäminen, mutta nestemetallin määrän sijasta

säädellään mihin osiin antennirakennetta nestemetalli kulkeutuu.

Lupaavin käyttökohde nestemetalliantenneille vaikuttaa olevan terveysteknologian saralla erilaiset puettavat ja implantoitavat laitteet, koska niissä voidaan hyödyntää nestemetalliantennien uniikkeja ominaisuuksia kuten fyysisen rasituksen kestoa. Nestemetalliantennien mahdollisuuksia on tutkittu myös muiden käyttökohteiden tapauksissa, kuten RFID-tunnisteiden ja erilaisten säädettävien antennien ja antenniryhmien tapauksessa. Ensimmäiset nestemetalliantennit saatetaan nähdä käytössä terveysteknologian saralla jo lähitulevaisuudessa. Nestemetalliantennit eivät kuitenkaan tule todennäköisesti koskaan korvaamaan perinteisempiä antenneja kaikissa käyttökohteissa. Nestemetalliantennien kehittyminen kuitenkin mahdollistaa uudenlaiset antenniratkaisut, joita tarvitaan alati kehittyvässä ja tietoliikennepainotteisemmassa yhteiskunnassa.

LÄHTEET

[1] Yi Huang ym. ”Liquid Antennas: Past, Present and Future”. *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation* 2 (2021). Publisher: IEEE, s. 473–487. ISSN: 2637-6431. DOI: 10.1109/OJAP.2021.3069325.

[2] Constantine A. Balanis. *Antenna theory: analysis and design.* 3rd ed. Hoboken (NJ): Wiley, 2005. ISBN: 978-0-471-66782-7.

[3] *Create cylindrical dipole antenna - MATLAB - MathWorks Nordic*. URL: https://se.mathworks.com/help/antenna/ref/dipolecylindrical.html (viitattu 21. 05. 2024).

[4] Kashif Nisar Paracha ym. ”Liquid Metal Antennas: Materials, Fabrication and Applications”. *Sensors (Basel, Switzerland)* 20.1 (2019). Place: Switzerland Publisher: MDPI AG, s. 177–. ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s20010177.

[5] Vivek Bharambe ym. ”Vacuum-filling of liquid metals for 3D printed RF antennas”. *Additive manufacturing* 18 (2017). Publisher: Elsevier B.V, s. 221–227. ISSN: 2214-8604. DOI: 10.1016/j.addma.2017.10.012.

[6] Mathieu Cosker ym. ”Realization of 3-D Flexible Antennas Using Liquid Metal and Additive Printing Technologies”. *IEEE antennas and wireless propagation letters* 16 (2017). Publisher: IEEE, s. 971–974. ISSN: 1536-1225. DOI: 10.1109/LAWP.2016.2615568. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/7585094 (viitattu 05. 04. 2024).

[7] Young-Geun Park ym. ”High-resolution, reconfigurable printing of liquid metals with three-dimensional structures”. *Science advances* 5.6 (2019). Place: United States Publisher: American Association for the Advancement of Science, eaaw2844–eaaw2844. ISSN: 2375-2548. DOI: 10.1126/sciadv.aaw2844.

[8] B. Aïssa ym. ”Fluidic patch antenna based on liquid metal alloy/single-wall carbon-nanotubes operating at the S-band frequency”. *Applied physics letters* 103.6 (2013). ISSN: 0003-6951. DOI: 10.1063/1.4817861.

[9] Seung Hee Jeong, Klas Hjort ja Zhigang Wu. ”Tape transfer atomization patterning of liquid alloys for microfluidic stretchable wireless power transfer”. *Scientific reports* 5.1 (2015). Place: England Publisher: Nature Publishing Group, s. 8419–8419. ISSN: 2045-2322. DOI: 10.1038/srep08419.

[10] A. Vorobyov, C. Henemann ja Ph Dallemagne. ”Liquid Metal based antenna for wearable electronic”. Teoksessa: Book Title: 2016 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). European Association of Antennas ja Propagation, 2016, s. 1–3. ISBN: 978-88-907018-6-3. DOI: 10.1109/EuCAP.2016.7481418.

[11] Long Teng ym. ”Robust, multiscale liquid-metal patterning enabled by a sacrificial sealing layer for flexible and wearable wireless powering”. *Journal of materials chemistry. C, Materials for optical and electronic devices* 7.48 (2019). Place: Cambridge Publisher: Royal Society of Chemistry, s. 15243–15251. ISSN: 2050-7526. DOI: 10.1039/c9tc04876f.

[12] Vivek Bharambe ym. ”Liquid-Metal-Filled 3-D Antenna Array Structure With an Integrated Feeding Network”. *IEEE antennas and wireless propagation letters* 17.5 (2018). Publisher: IEEE, s. 739–742. ISSN: 1536-1225. DOI: 10.1109/LAWP.2018.2813309. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/8309335 (viitattu 18. 04. 2024).

[13] Haiqiang Gao ym. ”A reconfigurable MIMO handset antenna employing liquid metal”. *IEICE Electronics Express* 16.20 (2019), s. 20190485–20190485. ISSN: 1349-2543. DOI: 10.1587/elex.16.20190485.

[14] Abhishek Dey, Rasim Guldiken ja Gokhan Mumcu. ”Microfluidically Reconfigured Wideband Frequency-Tunable Liquid-Metal Monopole Antenna”. *IEEE transactions on antennas and propagation* 64.6 (2016). Place: New York Publisher: IEEE, s. 2572–2576. ISSN: 0018-926X. DOI: 10.1109/TAP.2016.2551358. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/7448413 (viitattu 04. 04. 2024).

[15] M. Wang ym. ”A reconfigurable liquid metal antenna driven by electrochemically controlled capillarity”. *Journal of applied physics* 117.19 (2015). Place: Melville Publisher: American Institute of Physics, s. 194901–. ISSN: 0021-8979. DOI: 10.1063/1.4919605.

[16] Magnus Jobs ym. ”A Tunable Spherical Cap Microfluidic Electrically Small Antenna”. *Small (Weinheim an der Bergstrasse, Germany)* 9.19 (2013). Place: Weinheim Publisher: WILEY-VCH Verlag, s. 3230–3234. ISSN: 1613-6810. DOI: 10.1002/smll.201300070.

[17] Yafei Yin, Yanan Yu ja Yuhang Li. ”Directivity-reconfigurable antenna actuated by liquid-gas phase transition”. *Mechanics of advanced materials and structures* 29.25 (2022). Place: Abingdon Publisher: Taylor & Francis, s. 3903–3910. ISSN: 1537-6494. DOI: 10.1080/15376494.2021.1913268.

[18] George B. Zhang ym. ”A Liquid-Metal Polarization-Pattern-Reconfigurable Dipole Antenna”. *IEEE antennas and wireless propagation letters* 17.1 (2018). Publisher: IEEE, s. 50–53. ISSN: 1536-1225. DOI: 10.1109/LAWP.2017.2773076. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/8106792 (viitattu 04. 04. 2024).