

## TIIVISTELMÄRAPORTTI

### Mekaanisiin antenneihin perustuvat radioyhteydet

**Tommi Dufva**  
**Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy**  
**Tietotie 3, 02150 Espoo**  
**Sähköposti: etunimi.sukunimi@vtt.fi**

**Tiivistelmä:** Tutkimuksen aiheena on uudenlainen ULF- ja VLF-alueiden antenni- ja radioyhteydskonsepti. Konseptissa antennin toiminta perustuu mekaaniseen liikkeeseen: antennin säteilemä sähkömagneettinen kenttä saadaan aikaan joko sähkövarauksia tai magneetteja mekaanisesti liikuttamalla. Oletuksena on, että tällainen mekaaninen antenni on tavanomaiseen sähköiseen antenniin verrattuna merkittävästi pienempi. Tutkimuksen tavoitteita ovat luoda uudelle konseptille matemaattinen pohja ja esitystapa sekä selvittää sen teoreettiset mahdollisuudet ja rajoitukset.

#### 1. Johdanto

Tutkimuksen aiheena on uudenlainen ULF- ja VLF-alueiden antenni- ja radioyhteydskonsepti. Konseptissa antennin toiminta perustuu mekaaniseen liikkeeseen: antennin säteilemä sähkömagneettinen kenttä saadaan aikaan joko sähkövarauksia tai magneetteja mekaanisesti liikuttamalla. Oletuksena on, että tällainen mekaaninen antenni on tavanomaiseen sähköiseen antenniin verrattuna merkittävästi pienempi. Kuten tunnettua, matalilla taajuuksilla varsinkin lähettimissä käytettävät sähköiset antennit ovat väistämättä hyvin suuria.

Uusi konsepti saattaa mahdollistaa kommunikoinnin tilanteissa, joissa se tällä hetkellä ei ole mahdollista. Mahdollisia sovelluksia ovat radioyhteydet veden alla, radioyhteydet metallin, maan, kallion tai rakennuksen läpi, sekä ilmakehän ionosfääriä hyödyntävät, pitkän matkan radioyhteydet. Oletuksena on, että mekaanisen antennin avulla radiosta on mahdollista tehdä niin pieni, että se sopii yksittäisen taistelija tai sukeltajan selkään, miehittämättömään sukellusveneeseen, maanalaiseen robottiin, muuhun pienehköön ajoneuvoon jne. Pitkän matkan radioyhteyksille voisi olla käyttöä esimerkiksi yhteydenpidossa ulkomaille poikkeusolosuhteissa tai yhteydenpidossa kriisinhallintajoukkoihin. Luonnollisesti ULF- ja VLF-alueilla toimivien radioyhteyksien tiedonsiirtonopeudet ovat alhaisia.

Tutkimuksen ansiosta puolustusvoimilla on ehkä mahdollista tulevaisuudessa hyödyntää uusia radiovälineitä, joita vihollisella ei ole. Puolustusvoimilla on myös tietoa, millaisia uusia radiovälineitä vihollisella ehkä tulevaisuudessa on.

Yhdysvaltain asevoimien tutkimusorganisaatio DARPA:lla on käynnissä suuri tutkimushanke (A MEchanical Based Antenna) vastaavanlaisesta aiheesta. DARPA:n tutkimushankkeen tavoitteena on kehittää prototyyppi pienestä, esimerkiksi yhden miehen kannettavissa olevasta, alle 30 kHz taajuudella toimivasta lähettimestä.

#### 2. Tutkimuksen tavoite ja suunnitelma

Tutkimuksen tavoitteita ovat luoda uudelle konseptille matemaattinen pohja ja esitystapa sekä selvittää sen teoreettiset mahdollisuudet ja rajoitukset.

Tutkimussuunnitelman mukaiset tehtävät ovat:

1. Mekaanisen antennin toimintaperiaatteet
2. Mekaanisen antennin säteily
3. Tehon siirtyminen lähettimestä vastaanottimeen
4. Modulaatio ja tiedonsiirto
5. Häviöt ja hyötysuhde

Tutkimus pyrkii muodostamaan vankan teoreettisen pohjan mekaanisten antennien analyysiin sekä löytämään numeerisia arvioita tarkasteltujen mekaanisen antennin toimintamallien toimivuudesta annetuilla parametreilla. Tarkoitus on, että tutkimuksen tuloksia hyödyntämällä on myöhemmissä hankkeissa mahdollista miettiä ja suunnitella mekaanisten antennien käytännön toteutuksia.

### 3. Aineisto ja menetelmät

#### *3.1. Tutkimuksessa tarkastellut mekaanisen antennin toimintamallit*

Kuvassa 1 on esitetty tutkimuksessa tarkasteltuja mekaanisen antennin toimintamalleja.

Kuvan 1(a) toimintamallissa sähkövaraus kulkee janaa pitkin muuttuvalla nopeudella  $v = \frac{d}{2} \sin(\Omega t)$ , jossa  $d$  on janan pituus ja  $\Omega$  kulmataajuus. Aiheutuvan sähkömagneettisen kentän voimakkuus määräytyy varauksen suuruudesta ja liikkeen laajuudesta. Kentän värähtelytaajuus on yhtä kuin  $\Omega$ . Taajuusmodulaatio on mahdollinen muuttamalla kulmataajuutta  $\Omega$ .

Kuvan 1(b) toimintamallissa sähkövaraus kulkee ympyrän kehää pitkin kulmanopeudella  $\Omega$ . Aiheutuvan sähkömagneettisen kentän voimakkuus määräytyy varauksen suuruudesta ja ympyräliikkeen laajuudesta. Kentän värähtelytaajuus on yhtä kuin  $\Omega$ . Taajuusmodulaatio on mahdollinen muuttamalla kulmataajuutta  $\Omega$ .

Kuvan 1(c) toimintamallissa elektreetti (magneetin sähköinen vastine) pyöriin keskipisteensä ympäri kulmanopeudella  $\Omega$ . Aiheutuvan sähkömagneettisen kentän voimakkuus määräytyy materiaalin dipolimomenttitiheydestä ja kappaleen tilavuudesta. Kentän värähtelytaajuus on yhtä kuin  $\Omega$ . Taajuusmodulaatio on mahdollinen muuttamalla kulmataajuutta  $\Omega$ .

Kuvan 1(d) toimintamalli mukailee erään DARPA:n tutkimushankkeessa tarkastellun mekaanisen antennin oletettavaa toimintatapaa. Toimintamalli perustuu elastiseen materiaaliin, jonka magneettinen dipolimomentti on verrannollinen kappaleen paksuuteen  $d$ . Jos  $d$  saadaan värähtelemään harmonisesti, toimii kappale antennina.

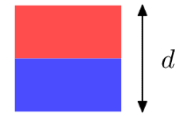
Kuvan 1(e) toimintamallissa on kela, jossa kulkee virta  $I$  ja joka pyörii kulmanopeudella  $\Omega$ . Aiheutuvan sähkömagneettisen kentän voimakkuus määräytyy virran voimakkuudesta, kelaan olevien johdinkierrosten lukumäärästä ja kelan pinta-alasta. Kentän värähtelytaajuus on yhtä kuin  $\Omega$ . Amplitudimodulaatio on mahdollinen muuttamalla virran voimakkuutta.

Kuvan 1(f) toimintamallissa magneetti pyöriin keskipisteensä ympäri kulmanopeudella  $\Omega$ . Aiheutuvan sähkömagneettisen kentän voimakkuus määräytyy materiaalin dipolimomenttitiheydestä ja kappaleen tilavuudesta. Kentän värähtelytaajuus on yhtä kuin  $\Omega$ . Taajuusmodulaatio on mahdollinen muuttamalla kulmataajuutta  $\Omega$ .

Todellisen mekaanisen antennin rakenteen voi olettaa olevan edellä esitettyjä toimintamalleja monimutkaisempi. Yksinkertaistettujen toimintamallien käyttö on kuitenkin tutkimuksen tässä vaiheessa perusteltua: analyysi on yksinkertaisempaa, mutta tulokset käsittävät edelleen eri toimintaperiaatteiden oleelliset ominaisuudet.



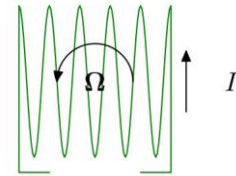
(a) Varaus värähtelyliikkeessä



(d) "Magnetoelastic"



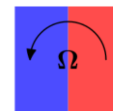
(b) Varaus ympyräliikkeessä



(e) Kela pyörimisliikkeessä



(c) Elektreetti pyörimisliikkeessä



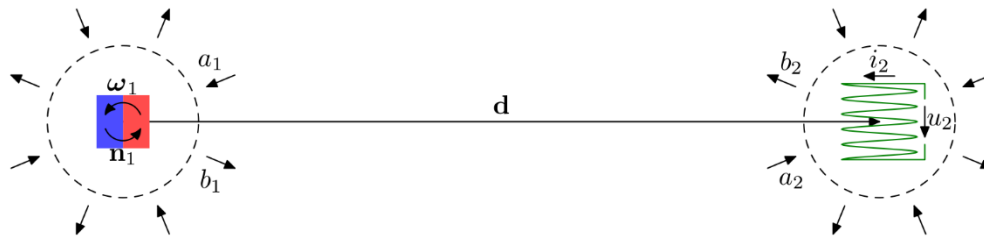
(f) Magneetti pyörimisliikkeessä

*Kuva 1: Mekaanisen antennin toimintamalleja*

### 3.2. Tutkimuksessa käytetty analyysimenetelmä

Tutkimuksessa käytetty analyysimenetelmä perustuu palloaaltofunktoihin ja antennien siirontaesityksiin. Vastaavanlaista menetelmää on käytetty VTT:llä menestyksekkäästi jo useasti aiemmin tavallisiin sähköisiin antenneihin perustuvien radioyhteyksien analyysissä. Tässä tutkimuksessa menetelmää on pyritty muokkaamaan siten, että myös mekaanisiin antenneihin perustuvan radioyhteyden analyysi on mahdollista.

Kuvassa 2 on esitetty mekaanisen antennin ja sähköisen antennin muodostama radioyhteys.



Kuva 2: Mekaanisen antennin ja sähköisen antennin muodostaman radioyhteyden matemaattinen esitys

Sähköisen antennin kaikki lähetys-, vastaanotto- ja sirontaominaisuudet on mahdollista kuvata lineaarisella yhtälöllä

$$\begin{pmatrix} i_2 \\ b_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_2 & r_2^* \\ t_2 & \Sigma_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_2 \\ a_2 \end{pmatrix},$$

jossa  $u_2$  ja  $i_2$  ovat jännite ja virta antenniportissa, vektorit  $a_2$  ja  $b_2$  sisältävät antenniin kohdistuvaa ja antennin säteilemää/sirottamaa kenttää kuvaavia kertoimia,  $y_2$  on admittanssi antenniportissa, vektorit  $t_2$  ja  $r_2$  sisältävät antennin lähetys ja vastaanotto-ominaisuuksia kuvaavia kertoimia ja matriisi  $\Sigma_2$  sisältää antennin sirontaominaisuuksia kuvaavia kertoimia.

Oletuksena on, että mekaanisen antennin kaikki lähetys-, vastaanotto- ja sirontaominaisuudet on mahdollista kuvata vastaavanlaisella yhtälöllä

$$\begin{pmatrix} n_1 \\ b_1 \end{pmatrix} = S_1 \begin{pmatrix} \omega_1 \\ a_1 \end{pmatrix},$$

jossa  $\Omega_1$  on mekaanisen antennin pyörimisliikkeen kulmanopeus ja  $n_1$  pyörimisliikkeeseen vaadittava väntömomentti, vektorit  $a_1$  ja  $b_1$  sisältävät antenniin kohdistuvaa ja antennin säteilemää/sirottamaa kenttää kuvaavia kertoimia. Osoittautuu, että toisin kuin sähköisellä antennilla, edellä mainittujen suureiden välisiä riippuvuuksia ei ole mahdollista kuvata lineaarisella yhtälöryhmällä, vaan operaattori  $S_1$  on epälineaarinen.

Jos unohtetaan radiokanavan muut ominaisuudet kuin väliaine, joka oletetaan siis homogeeniseksi, kertoimien  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b_1$  ja  $b_2$  välinen riippuvuus on

$$\begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & R_1^* T_{1,2} R_2 \\ R_2^* T_{2,1} R_1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix},$$

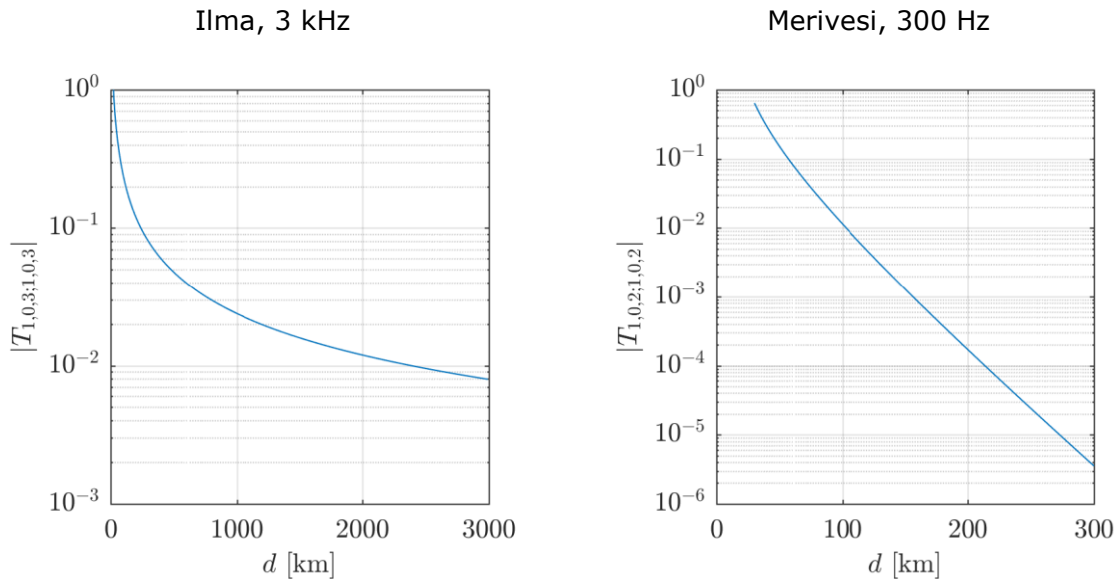
jossa  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $T_1$  ja  $T_2$  ovat palloaaltofunktioiden kierto- ja siirtomatriiseja.

Eliminoimalla  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b_1$  ja  $b_2$  saadaan

$$\begin{pmatrix} n_1 \\ i_2 \end{pmatrix} = H \begin{pmatrix} \omega_1 \\ u_2 \end{pmatrix}.$$

Yhtälössä  $H$  on epälineaarinen operaattori, joka sisältää kaikki radiokanavaan liittyvät ominaisuudet. Siihen on jatkotutkimuksissa mahdollista sisällyttää ympäristötekijöiden vaikutuksia.

Tässä hankkeessa on tarkasteltu radioyhteyksiä kolmessa eri väliaineessa: ilmassa, kuivassa maassa ja merivedessä. Kuvassa 3 on esitetty siirtomatriisin  $T$  yhden komponentin itseisarvo etäisyyden funktiona, kun väliaineena on ilma ja taajuus on 3 kHz, sekä kun väliaineena on merivesi ja taajuus on 300 Hz. Siirtomatriisin komponenttiarvo määrittää radiokanavan voimakkuuden.



Kuva 3: Siirtomatriisin  $T$  yhden komponentin itseisarvo etäisyyden funktiona, kun väliaineena on ilma tai merivesi

## 4. Tulokset ja pohdinta

### 4.1. Mekaanisen antennin toimintaperiaatteet

Kuvassa 1 esitetyistä mekaanisen antennin toimintamalleista "elektreetti pyörimisliikkeessä" ja "magneetti pyörimisliikkeessä" vaikuttavat lupaavimmilta toimintamalleilta. Näyttää siltä, että näillä toimintamalleilla on mahdollista saada aikaan voimakas sähkömagneettinen kenttä.

Myös "kela pyörimisliikkeessä" saattaa tulla kyseeseen, jos on tarvetta muutella pyörivän dipolimomentin suuruutta esimerkiksi amplitudimodulaation aikaansaamiseksi. Kelalla on kuitenkin vaikea muodostaa yhtä voimakas dipolimomentti kuin kestopagneetilla. Käyttämällä kelan sisällä ferriittisydäntä olisi ehkä mahdollista saada aikaan voimakkaampi, muunneltava dipolimomentti.

"Varaus värähtelyliikkeessä" ja "varaus ympyräliikkeessä" ovat teoreettisempia toimintamalleja. Johdekappaleeseen varastoitavissa olevan sähkövarauksen suuruutta on hankala arvioida.

"Magnetoelastic" on muualla esitetty toimintamalli, josta ei ole saatavissa tarkempaa tietoa.



#### 4.2. Mekaanisen antennin säteily

Taulukossa 1 on lueteltu neljä esimerkkiä antennin toimintamalleista parametriarvoineen, joilla saadaan toisiinsa verrattuna yhtä suuri säteilyteho ilmassa. Esimerkeistä kaksi ensimmäistä on mekaanisia antennia ja kaksi jälkimmäistä sähköisiä antennia.

*Taulukko 1: Esimerkkejä antenneista parametriarvoineen, joilla saadaan aikaan yhtä suuri säteilyteho ilmassa*

Antennin toimintamalli	Parametriarvot, joilla saadaan yhtä suuri säteilyteho ilmassa
Elektreetti pyörimisliikkeessä	$\text{SiO}_2$ , $P = 10^{-3} \text{ C/m}^2$ , $V = (15 \text{ cm})^3$
Magneetti pyörimisliikkeessä	$\text{NdFeB}$ , $M = 10^6 \text{ A/m}$ , $V = (10 \text{ cm})^3$
Dipoliantenni	$U = 1 \text{ kV}$ , $d = 40 \text{ m}$
Silmukka-antenni	$NI = 100 \text{ A}$ , $d = 4 \text{ m}$

Ensimmäinen esimerkki on "elektreetti pyörimisliikkeessä". Esimerkin elektreetti on piidioksidi, jonka dipolitiheydeksi arvioidaan  $10^{-3} \frac{\text{C}}{\text{m}^2}$ . Kappaleen tilavuus on  $(15 \text{ cm})^3$ .

Toinen esimerkki on "magneetti pyörimisliikkeessä". Esimerkin magneetti on neodyymi magneetti, jonka dipolitiheys on noin  $10^6 \text{ A/m}$ . Jos magneetin tilavuus on  $(10 \text{ cm})^3$ , saadaan yhtä suuri säteilyteho kuin edellä esitetyllä elektreetillä.

Kolmas esimerkki on tavallinen sähköinen dipoliantenni. Aallonpituuteen verrattuna pienen dipoliantennin säteilytehoa rajoittaa suurin mahdollinen jännite antenniportissa. Jos tämä on  $1 \text{ kV}$ , tulee antennin pituuden olla  $40 \text{ m}$ , jotta saadaan yhtä suuri säteilyteho kuin ensimmäisten esimerkkien mekaanisilla antenneilla.

Neljäs esimerkki on sähköinen silmukka-antenni. Aallonpituuteen verrattuna pienen silmukka-antennin säteilytehoa rajoittaa suurin mahdollinen johtimessa kulkeva virta. Jos silmukassa on esimerkiksi  $10$  kierrosta ja johtimeen on mahdollista saada aikaan  $10 \text{ A}$ :n virta, tulee antennin halkaisijan olla  $4 \text{ m}$ , jotta saadaan yhtä suuri säteilyteho kuin aiemmillä esimerkeillä.

Esitettyjen tulosten perusteella näyttää siltä, että mekaanisesta antennista on todellakin mahdollista tehdä merkittävästi pienempi kuin sähköisestä antennista.

Taulukossa 1 esitetyt tulokset pätevät, kun väliaineena on ilma. Jos väliaine on johtavaa, esimerkiksi merivettä, elektreettiin perustuvan antennin suorituskyky romahtaa ja ainoastaan magneettiin perustuva antenni on käyttökelpoinen.

#### 4.3. Tehon siirtyminen lähettimestä vastaanottimeen

Lähettimestä vastaanottimeen siirtyvä teho on verrannollinen palloaaltofunktioiden siirtomatriisin  $T$  komponentin neliöön. Esimerkkejä siirtomatriisin komponenttien itsearvoista etäisyyden funktiona on esitetty kuvassa 3.

Siirtyvää tehoa ei ole mielekästä tarkastella absoluuttisena arvona. Radioyhteyden käyttö-

kelpoisuus määräytyy siirtyvän tehon suuruudesta verrattuna ympäristön häiriöiden aiheuttamaan tehoon. Ympäristön häiriöitä ei kuitenkaan tarkasteltu tässä tutkimuksessa.

#### 4.4. Modulaatio ja tiedonsiirto

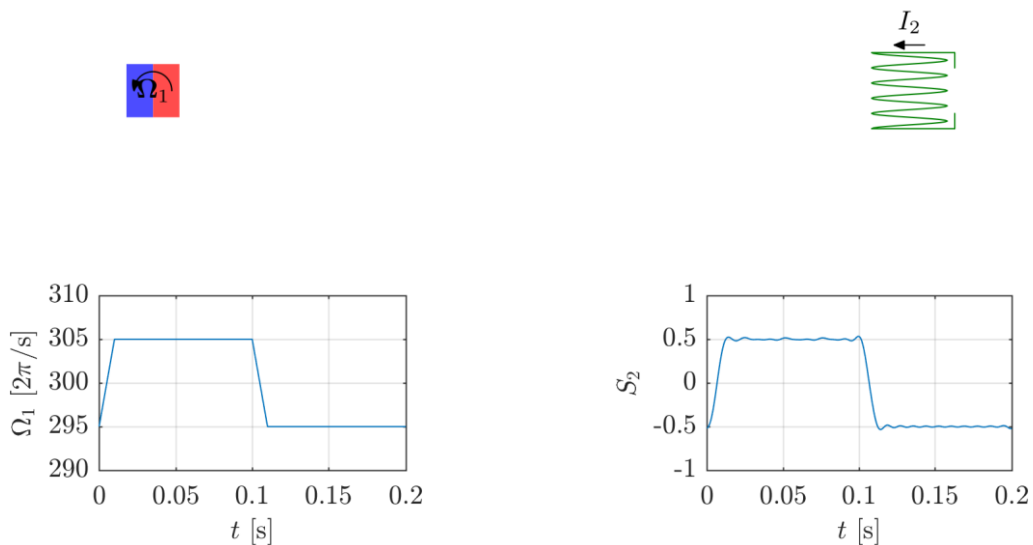
Kuvassa 4 on esitetty esimerkki FSK-moduloidusta tiedonsiirrosta.

Lähettimenä on "magneetti pyörimisliikkeessä". Magneetti on neodyymi magneetti ja sen tilavuus on  $(10 \text{ cm})^3$ . Modulaatio on toteutettu vaihtelemalla kappaleen pyörimisliikkeen kulmanopeutta  $\Omega_1$  kuvan mukaisesti välillä 295-305 kierrosta sekunnissa.

Vastaanotin koostuu silmukka-antennista, demodulaattorista ja suodattimesta. Silmukka-antennin pinta-ala on  $\pi \cdot (7,5 \text{ cm})^2$  ja siinä on 100 kierrosta. Demodulaattori ja suodatin ovat matemaattisia. Kuvassa on esitetty vastaanotettu signaali  $S_2$  demoduloinnin ja suodatuksen jälkeen.

Väliaineena esimerkissä on merivesi.

Tiedonsiirtonopeus on 10 bps.



Kuva 4: Esimerkki FSK-moduloidusta tiedonsiirrosta

Kuvassa 5 on esitetty esimerkki ASK-moduloidusta tiedonsiirrosta.

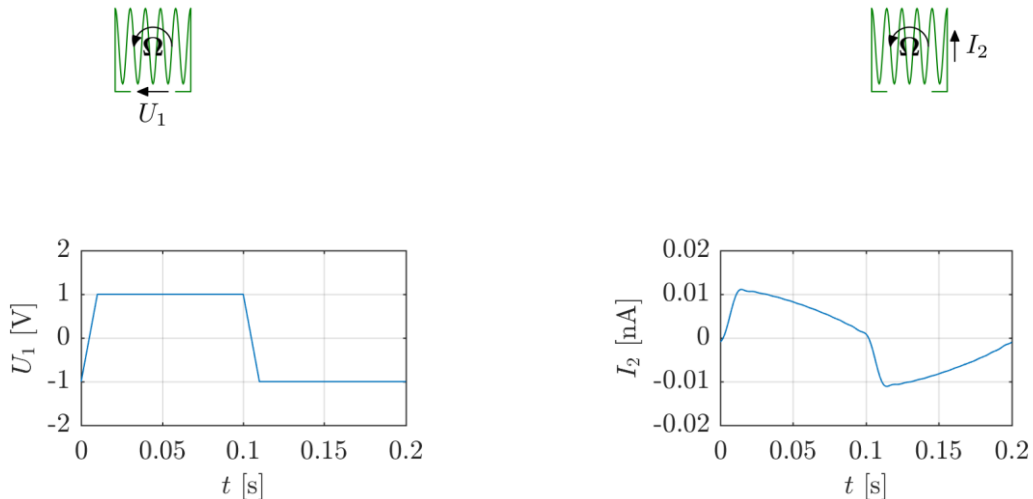
Lähettimenä on "kela pyörimisliikkeessä". Kelan pinta-ala on  $\pi \cdot (7,5 \text{ cm})^2$  ja siinä on 100 kierrosta. Kela pyörii 300 kierrosta sekunnissa. Kelassa kulkevaa virtaa ohjataan jännitteellä  $U_1$ . Jännite on suoraan lähettimen aiheuttavaa sähkömagneettista kenttää moduloiva signaali.

Vastaanotin on samanlainen kuin lähetin. Nyt pyörimisliike toimii demodulaattorina. Sen lisäksi vastaanottimessa ei ole muuta kuin suodatin. Kuvassa on esitetty vastaanottimessa havaittu virta  $I_2$ .

Väliaineena esimerkissä on merivesi.

Tiedonsiirtonopeus on 10 bps.

Vastaanotettu signaali näyttää erilaiselta kuin lähetetty signaali. Sen muotoon vaikuttavat lähettimessä ja vastaanottimessa käytettyjen kelojen sähköiset ominaisuudet, lähettimen ja vastaanottimen välinen etäisyys sekä väliaine. Joka tapauksessa, vastaanotetusta signaalista on mahdollista lukea lähetetty informaatio.



Kuva 5: Esimerkki ASK-moduloidusta tiedonsiirrosta

Kuvissa 4 ja 5 esitetyillä esimerkeillä on kaksi pääasiallista tarkoitusta. Ensinnäkin, esimerkit demonstroivat tutkimuksessa käytetyn analyysimenetelmän kykyä analysoida mekaanisten ja/tai sähköisten antennien muodostamia radioyhteyksiä analyttisesti ja tarkasti. Toiseksi, esimerkit osoittavat, että mekaanisilla antennilla on mahdollista lähettää ja mahdollisesti myös vastaanottaa eri tavoin moduloitua signaalia.

Kuvien esimerkeistä ei voi tehdä johtopäätöksiä todellisuudessa saavutettavista yhteysväleistä tai tiedonsiirtonopeuksista. Tämä johtuu ensinnäkin siitä, että esimerkeissä käytetyt modulaatiomenetelmät ja -mekanismit ovat ainoastaan esimerkinomaisia. Toiseksi, analyysimenetelmä ei vielä tutkimuksen tässä vaiheessa kykene ottamaan huomioon kaikkia tarvittavia radiokanavan ominaisuuksia, kuten väliaineiden rajapintoja ja ympäristön aiheuttamaa kohinaa.

#### 4.5. Häviöt ja hyötysuhde

Seuraavassa pohditaan pyörimisliikkeeseen perustuvan mekaanisen antennin häviölähteitä ja hyötysuhdetta.

Kun sähkövarausta, sähkövirtaa, sähköistä polarisaatiota tai magneettista polarisaatiota sisältävä kappale pyörii, muodostuu sähkömagneettinen kenttä. Tähän kuluu energia

$$\Delta E_{sm} = \int_0^T \mathbf{N}_{sm} \cdot \boldsymbol{\Omega} dt,$$

jossa  $\boldsymbol{\Omega}$  on pyörimisliikkeen kulmanopeus ja

$$\mathbf{N}_{sm} = F\boldsymbol{\Omega},$$



jossa  $F$  on epälineaarinen operaattori.

Massan kiihdyttämiseen ja jarruttamiseen liittyvä energiamuutos on

$$\Delta E_{\text{mek}} = \int_0^T \mathbf{N}_{\text{mek}} \cdot \boldsymbol{\Omega} dt,$$

jossa

$$\mathbf{N}_{\text{mek}} = \frac{d}{dt} (\bar{\mathbf{I}} \cdot \boldsymbol{\Omega}),$$

jossa  $\bar{\mathbf{I}}$  on kappaleen hitausmomentti.

Lisäksi kitkaan kuuluu energia  $\Delta E_{\text{kitka}}$ .

Antennin hyötysuhde on

$$\eta = \frac{\Delta E_{\text{sm}}}{\Delta E_{\text{kok}}},$$

jossa  $\Delta E_{\text{kok}}$  on edellä mainittujen häviöiden summa lisättynä mahdolliset muut energia-muutokset.

Huomioitavaa on, että kantoaalto pysyy yllä tasaisella pyörimisliikkeellä, jolloin  $\Delta E_{\text{mek}} = 0$ . Modulaatio tulee pyrkiä toteuttamaan siten, että systeemin kokonaisenergian muutos  $\Delta E_{\text{kok}}$  pysyy mahdollisimman muuttumattomana.

## 5. Loppupäätelmät

Tutkimustulosten perusteella näyttää siltä, että mekaanisesta antennista on todellakin mahdollista tehdä merkittävästi pienempi kuin sähköisestä antennista. Käsitellyistä mekaanisen antennin toimintamalleista "elektreetti pyörimisliikkeessä" ja "magneetti pyörimisliikkeessä" vaikuttavat lupaavimmilta toimintamalleilta. Jos väliaine on johtavaa, esimerkiksi merivettä, elektreettiin perustuvan antennin suorituskyky romahtaa ja ainoastaan magneettiin perustuva antenni on käyttökelpoinen.

Tutkimus myös osoittaa, että mekaanisella antennilla on mahdollista synnyttää useilla tavanomaisilla modulaatiomenetelmillä moduloituja signaaleja. Tutkimus ei kuitenkaan pohjinnut modulaatiomenetelmiä tämän pidemmälle. Saattaakin olla, että myöhemmissä tutkimuksissa löydetään mekaaniselle antennille vielä sopivampia moduloitimenetelmiä, jotka ehkä poikkeavat sähköisillä antenneilla käytetyistä moduloitimenetelmistä.

Mekaanisen antennin häviöiden osalta huomion arvoista on, että pelkän kantoaallon ylläpitäminen pyörimisliikkeellä kuluttaa vain vähän energiaa. Sen sijaan, modulaation toteutus on mietittävä tarkkaan, jotta energiankulutus saadaan pidettyä kohtuullisena.

Tutkimuksessa ei huomioitu muita radiokanavan ominaisuuksia kuin väliaine. Jotta saavutettavissa olevia radioyhteyden pituuksia ja tiedonsiirtonopeuksia kyetään arvioimaan, jatkotutkimuksissa on otettava huomioon ympäristötekijät. Näitä ovat muun muassa ilmakan aiheuttama kohina ja ihmisen aiheuttama kohina sekä väliaineiden rajapinnat, kuten vesi/ilma, vesi/maa, ilma/maa, ilma/ionosfääri.

## 6. Tutkimuksen tuottamat tieteelliset julkaisut ja muut mahdolliset raportit

Tutkimuksesta ei ole vielä syntynyt tieteellisiä julkaisuja tai muita raportteja.