

## TIIVISTELMÄRAPORTTI (SUMMARY REPORT)

---

### Suurteholaskenta-algoritmien hyödyntäminen suurten kohteiden tutkavasteen laskennassa

**Pasi Ylä-Oijala, Pasi Koivumäki ja Seppo Järvenpää**  
Radiotieteen ja –tekniikanlaitos Aalto-yliopisto, [pasi.yla-oijala@aalto.fi](mailto:pasi.yla-oijala@aalto.fi)

#### Tiivistelmä

Tutkimuksessa "Suurteholaskenta-algoritmien hyödyntäminen suurten kohteiden tutkavasteen laskennassa" kehitettiin tehokkaita ja tarkkoja laskentamenetelmiä sähköisesti suurten kohteiden tutkavasteen laskentaan. Menetelmät perustuivat fysikaaliseen optiikkaan (physical optics, PO), nopeaan monitasomultipolimenetelmään (multilevel fast multipole algorithm, MLFMA) sekä niiden yhdistelmään. MLFMA on momenttimenetelmään pohjautuva nopetusmenetelmä joka mahdollistaa useita kertaluokkia suurempien sähkömagneettikan sirontatehtävien tarkan ja tehokkaan ratkaisemisen kuin mikä olisi mahdollista perinteisellä momenttimenetelmällä. Käytetty MLMFA algoritmi oli kehitetty ennen projektin alkua Aalto-yliopiston Radiotieteen ja –tekniikan laitoksella. Projektin kuluessa kyseinen algoritmi yhdistettiin PO menetelmään ja laajennettiin impedanssipinnoille. Tarkan MLFMA:n käyttö mahdollisti PO ja hybridimenetelmän tarkkuuden tutkimisen suurille useiden kymmenien aallonpituuden kokoisille mielivaltaisen muotoisille kohteille. Menetelmiä sovellettiin mm. UAV:n tutkavasteen määrittämiseen.

Tutkimuksessa kartoitettiin PO menetelmän kriittisiä kohtia sekä sitä miten yhdistetty MLFMA-PO menetelmä tulisi toteuttaa jotta menetelmä olisi mahdollisimman tehokas ja luotettava. Tutkimuksen tuloksena havaittiin, että PO menetelmä tuottaa merkittävää virhettä varjo- ja valaistun alueen rajapinnalla, terävissä nurkissa ja särmissä, sekä erityisesti tilanteissa joissa esiintyy voimakasta kohteiden välistä vuorovaikutusta tai resonoivia rakenteita. MLFMA:n käyttö paransi oleellisesti tulosten tarkkuutta kyseisissä tilanteissa. Toisin kuten joissain aikaisemmissä tutkimuksissa, tässä tutkimuksessa kehitetyssä yhdistetyssä MLFMA-PO menetelmässä ei havaittu merkittävää virran epäjatkuvuutta menetelmien rajapinnalla.

PO, MLFMA ja hybridimenetelmä laajennettiin pintaimpedanssireunaehdolle ja niiden toimivuutta ja tarkkuutta tutkittiin useilla eri pintaimpedanssin arvoilla. Pintaimpedanssin käyttö mahdollistaa erilaisten pinnoitemateriaalien ja –maalien sähkömagneettisen mallintamisen. Näillä materiaaleilla on merkittävä rooli mm. häivetekniikassa. Tutkimuksessa havaittiin, että kaikkien menetelmien virhe kasvaa pintaimpedanssia kasvatettaessa.

Laskenta-algoritmit toteutettiin C++ ohjelmointikielellä Linux ympäristössä hyödyntäen moniprosessoririnnakkaislaskentaa.

---

#### 1. Johdanto

Tutka- ja häivetekniikassa annetun kohteen tutkavasteen eli tutkapoikkipinta-alan määrittäminen on eräs keskeisimmistä perustehtävistä. Tuntemalla kohteen tutkavaste voidaan sen avulla pyrkiä tunnistamaan havaittu kohde tai tekemään kohde mahdollisimman näkymättömäksi. Hyödyntämällä tehokkaita numeerisia simulointimenetelmiä voidaan tutkavaste varsin usein ennustaa luotettavasti ja tarkasti ilman että täytyy toteuttaa työläitä ja kalliita koejärjestelyjä ja mittauksia. Simulaatioilla voidaan myös tutkia erilaisten häiveteknisteratkaisujen ja materiaalien vaikutusta kohteen tutkavasteeseen. Kohteen koon kasvaessa sekä geometrian että materiaalin mutkikkouden lisääntyessä myös tehtävän laskennallinen haastavuus kasvaa merkit-

tävästi. Ilman tehokkaita skaalautuvia ja rinnakkaistuvia laskenta-algoritmeja, suurteholaskentaa (high-performance computing, HPC) tai hajautettua pilvilaskentaa (cloud computing), tehävän ratkaiseminen voi käytännössä olla hyvin haastavaa, usein jopa mahdotonta.

Tutkavasteen laskentaan soveltuvat menetelmät voidaan periaatteessa jakaa kahteen ryhmään. Ensimmäisen ryhmän muodostavat asymptoottiset menetelmät kuten fysikaalinen optiikka (Physical Optics, PO) ja geometrinen diffraktioteoria (Geometrical Theory of Diffraction, GTD). Nämä menetelmät perustuvat yleensä oletukseen että kohde ja sen yksityiskohdat ovat hyvin suuria suhteessa herättävän sähkömagneettisen kentän aallonpituuteen. Menetelmät ovat hyvin nopeita, mutta niiden haasteena on laskentavirheen arviointi ja pienentäminen, erityisesti jos kohteessa on pieniä yksityiskohtia, onkaloita tai muita resonoivia kohteita.

Toisen ryhmän muodostavat kokoaaltoalueen menetelmät kuten momenttimenetelmä (Method of Moments, MoM), elementtimenetelmä (finite element method, FEM) ja aika-alueen differenssimenetelmä (finite difference time domain, FDTD). Kokoaaltoalueen menetelmät perustuvat fysikaalisiin yhtälöihin (Maxwellin yhtälöt) ja sähkömagneetiikan reunaehtoihin, ja siten ne mallintavat sähkömagneettiset sironta- ja diffraktioilmiöt oikein. Haasteena näissä laskentamenetelmissä on niiden vaatima suuri laskentakapasiteetti. Ilman erityisiä nopeita laskentamenetelmiä kokoaaltoalueen menetelmät ovat käytännössä käyttökelvottomia sähköisesti suurten kohteiden tutkavasteen laskennassa. MoM:in tapauksessa eräs tehokkaimmista ja käytetyimmistä menetelmistä on nopea monitasomultipolimenetelmä (Multilevel Fast Multipole Algorithm, MLFMA). MLFMA perustuu samoihin fysikaalisiin yhtälöihin kuin MoM ja se mahdollistaa useita kertaluokkia suurempien tehtävien tarkan ratkaisemisen kuin mikä on mahdollista perinteisillä MoM menetelmällä. MLFMA:sta onkin muodostunut tärkein numeerinen kokoaaltoalueen menetelmä suurten kohteiden tutkavasteen määrittämisessä simulaatioilla.

## 2. Tutkimuksen tavoite ja suunnitelma

Tutkimuksen tavoitteena oli kehittää tarkkoja ja nopeita laskenta- ja simulointimenetelmiä sähköisesti suurten kohteiden tutkavasteen määrittämiseen. Kohteen sähköisellä koolla tarkoitetaan sen fyysistä kokoa suhteessa herättävän sähkömagneettisen kentän aallonpituuteen. Kohteen sanotaan olevan sähköisesti suuri jos sen koko on kymmeniä tai satoja aallonpituuksia. Juuri kohteen koko teki tehtävästä hyvin haasteellisen.

Laadittavat menetelmät perustuivat PO, MLFMA ja erityisesti yhdistettyyn PO-MLFMA menetelmään siten, että molempien menetelmien parhaat ominaisuudet pyrittiin hyödyntämään mahdollisimman tehokkaasti. Tutkimuksessa kiinnitettiin erityistä huomiota siihen miten mallinnettavan kohteen jako PO ja MLFMA alueisiin tulisi suorittaa, jotta laskenta-aika ja muistin kulutus ovat mahdollisimman matalia ja että tulos on edelleen riittävän tarkka ja luotettava.

Projektissa tutkittiin myös yhdistetyn menetelmän soveltuvuutta erilaisten pinnoitemateriaalien ja komposiittirakenteiden mallinnuksessa. Tähän tarkoitukseen kehitettiin menetelmiä joissa kohteen pinnalla oletettiin olevan voimassa pintaimpedanssireunaehto. Valitsemalla pintaimpedanssi sopivasti voidaan erilaisia pinnoitemateriaaleja mallintaa ilman, että materiaalin sisäosaa tarvitsee mallintaa. Tämä tehostaa laskentaa merkittävästi.

## 3. Aineisto ja menetelmät

### 3.1 Fysikaalinen optiikka

Fysikaalissa optiikassa (PO) kohteen pinta jaetaan kahteen osaan: Varjoalueeseen johon ei induoidu pintavirtaa, ja valaistuun alueeseen mihin induoitava pintavirtatiheys määräytyy suoraan herättävästä kentästä. Menetelmä ei siten perusmuodossaan mallinna lainkaan vuorovaihtus- tai diffraktioilmiöitä, eikä moninkertaisia heijastuksia. Periaatteessa menetelmä perus-

tuu oletukselle, että kohteen pintaa approksimoidaan pinnan suuntaisilla äärettömän kokoisilla tasovevyillä. Menetelmä on kuitenkin varsin käyttökelpoinen kohteen ja sen yksityiskohtien ollessa riittävän suuria suhteessa herättävän kentän aallonpituuteen. Jos kohteessa on aallonpituuden kokoluokkaa olevia yksityiskohtia, teräviä särmiä tai nurkkia, tai resonoivia rakenteita, saattaa PO menetelmän tarkkuus heiketä huomattavasti. Menetelmän etuja ovat sen suuri nopeus, alhainen muistin tarve, sekä soveltuvuus rinnakkaislaskentaan.

Menetelmälle on kehitetty erilaisia korjaustermejä joilla pyritään parantamaan perusversion tarkkuutta. Menetelmän tarkkuutta voidaan parantaa myös ottamalla huomioon moninkertaisia heijastuksia. Näitä parannuksia ei kuitenkaan toteutettu tässä tutkimuksessa.

### 3.2 Momenttimenetelmä

Momenttimenetelmässä (MoM) kohteen pinnalle indusoituva pintavirtatiheys määrätään siten, että Maxwellin yhtälöt ja sähkömagneettiset reunaehdot toteutuvat. Menetelmä kykenee siten mallintamaan mutkikkaat diffraktoilmiöt ja moninkertaiset heijastukset. Menetelmän suuri etu verrattuna muihin kokoaaltoalueen menetelmiin (esim. elementti- ja differenssimenetelmät) on se että siinä riittää mallintaa kohteen pinta, esim. kolmioverkkolla, ja tyhjän avaruuden (ilman) diskretointi kohteen ulkopuolella voidaan siten kokonaan välttää. Tämä mahdollistaa kohteen geometrian hyvinkin tarkan mallintamisen. Toinen MoM:in suuri etu verrattuna elementti- ja differenssimenetelmiin on se, että säteilyehto äärettömyydessä toteutuu automaattisesti.

Käytännössä käytettävissä oleva tietokonekapasiteetti määrää sen kuinka suuri MoM:illa mallinnettava kohde voi olla. Käytettävän pintaelementtiverkon tulee olla riittävän tiheä suhteessa herättävän kentän aallopituuteen. Taajuuden tai kohteen koon kasvaessa laskentatehtävän koko kasvaa hyvin nopeasti. Kun tähän vielä yhdistetään MoM:in vaatima suuri tietokonekapasiteetti, eli se että tehtävän ratkaisemiseen tarvittava muistin koko ja laskenta-aika skaalautuvat tuntemattomien lukumäärän nelionä ja kuutiona, tulevat perinteisen MoM menetelmän rajat hyvin pian vastaan. Nykyisissä pöytätietokoneissa joissa on 16-32 GB muistia, MoM:illa voidaan ratkaista tehtäviä joissa tuntemattomien lukumäärä on muutamia kymmeniä tuhansia.

Tässä projektissa käytetty MoM ideaalijohteille perustuu artikkeleihin [1] ja [2]. Näissä artikkeleissa kuvataan MoM matriisialkioiden sisältävien singulaaristen integraalien numeerisesti tehokas laskenta ja menetelmän peruseriaatteen ideaalijohtaville rakenteille, homogeenisille ja isotrooppisille eristeille sekä niiden yhdistelmille. Menetelmän yleistys pintaimpedanssiehdolle ei ole aivan suoraviivaista ja on vaatinut uusien menetelmien ja ratkaisujen kehittämistä ja hyödyntämistä [3,4].

### 3.3 Nopea monitasomultipolimenetelmä

Viimeisen kahden vuosikymmenen aikana ns. nopeiden integraaliyhtälömenetelmien kehitys on merkittävästi kasvattanut tehtävien kokoa jotka kyetään ratkaisemaan MoM:iin pohjautuvilla kokoaaltoalueen menetelmillä. Nopea monitasomultipolimenetelmä (MLFMA) on eräs tehokkaimmista ja käytetyimmistä nopeutusmenetelmistä. Menetelmässä lähteet jaetaan hierakaisesti ryhmiin ja lasketaan mahdollisimman suurten ryhmien vuorovaikutuksia sen sijaan, että laskettaisiin yksittäisten lähteiden keskinäiset vuorovaikutukset kuten perinteisessä MoM menetelmässä. Suorittamalla laskenta hyödyntäen puumaista (oct-tree) tietorakennetta ja diagonaalista siirtofunktiota, yhtälöryhmän ratkaisuun kuluva aika ja muistin tarve skaalautuvat kuten  $N \log N$  missä  $N$  on ratkaistavassa yhtälöryhmässä olevien tuntemattomien lukumäärä. Saavutettava nopeutus on huomattava, ja MLFMA mahdollistaakin tehtävien joissa on useista sadoista tuhansista aina muutama miljoonaan tuntematonta tehokkaan ja tarkan ratkaisemisen tavallisessa pöytätietokoneessa (ilman suurteholaskentaa).



Käytetty MLFMA ratkaisija hyödyntää tarkkoja globaaleja interpolaattoreita jotka perustuvat trigonometriisiin polynomeihin [3]. Menetelmää on aikaisemmin sovellettu myös homogeenisten isotrooppisten [4] ja epähomogeenisten anisotrooppisten dielektristen [5] kohteiden mallinnuksessa, sekä akustiikassa [6].

### 3.4 Hybridimenetelmä eli yhdistetty MLFMA-PO

Kohteen koon ollessa hyvin suuri, kymmeniä tai jopa satoja aallonpituuksia, tulee MLFMA menetelmän rajat vääjäämättä vastaan eikä tehtävää enää kyetä ratkaisemaan nykyisillä tietokoneilla. Yhdistämällä tarkka MLFMA laskenta nopeaan PO laskentaan voidaan simuloitavan kohteen kokoa edelleen merkittävästi kasvattaa ilman että ratkaisun tarkkuudesta täytyy oleellisesti tinkiä. Tässä ns. hybridimenetelmässä kohteen pinta jaetaan kahteen osaan, osaan joka mallinnetaan PO menetelmällä, ja osaan joka mallinnetaan MLFMA:lla. Lisäksi PO alue jaetaan edelleen varjo- ja valaistuun osaan kuten edellä todettiin. Jako PO ja MLFMA alueisiin pyritään tekemään siten, että kohteen osat joita PO menetelmä ei kykene mallintamaan tarkasti sisällytetään MLFMA:lla mallinnettavaan osaan.

## 4 Tulokset ja pohdinta

Kehitetyt menetelmät eli PO, MLFMA ja niiden yhdistelmä, testattiin ensin kanonisille kohteille (pallo, levy, kuutio). Tämän jälkeen menetelmiä sovellettiin UAV:n (Unmanned Aerial Vehicle) tuttavasteen laskentaan. Tehtävien koot on valittu siten, että ne voidaan edelleen ratkaista tarkasti MLFMA:lla. Tällöin MLFMA ratkaisua voidaan käyttää verifioimaan PO ja hybridimenetelmän tuloksia.

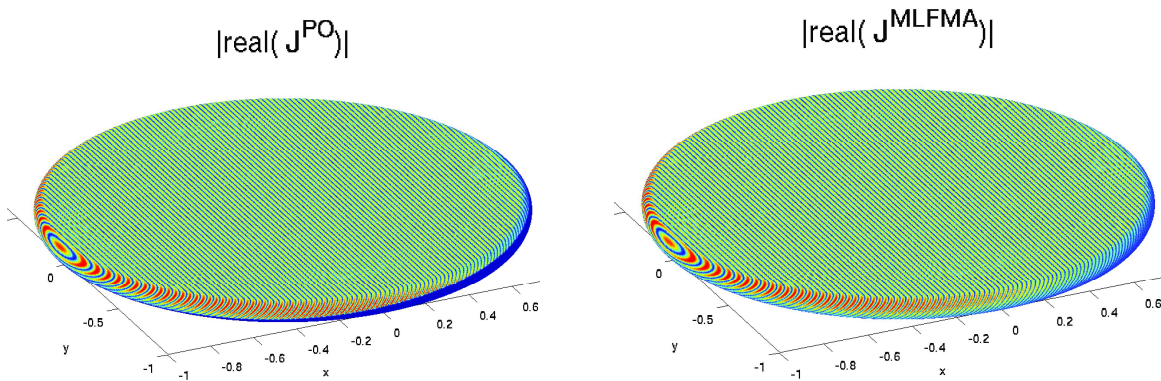
### 4.1 Ideaalijohtavat kohteet

Ensimmäisenä tulosten oikeellisuus todennettiin pallolle tekemällä vertailuja analyttiseen ratkaisuun. Testitapauksessa pallon halkaisija oli yksi metri ja herättävän sähkömagneettisen tasoallon taajuus oli 10 GHz. Pallon halkaisija oli siten 33 aallonpituutta. Pallon pinta on jaettu kolmioelementteihin siten, että keskimääräinen särmänpituus on n. kymmenesosa herättävän kentän aallonpituudesta. Laskentaverkossa oli n. miljoona kolmiota ja tuntemattomia ratkaistavassa yhtälöryhmässä oli n. 1,5 miljoonaa. Tehtävän ratkaiseminen perinteisellä MoM menetelmällä olisi ollut mahdotonta nykyisillä tietokoneilla. Käytettäessä MLFMA:ta tehtävä kyettiin ratkaisemaan 20 minuutissa tietokoneessa jossa oli 32 GB muistia. Riippuen PO ja MLFMA aluejaosta, hybridimenetelmän laskenta-aika oli parista minuutista hieman alle 10 minuuttiin. Mitä suurempi MLFMA alue oli sitä tarkempi oli myös tulos, mutta sitä korkeampi oli laskenta-aika.

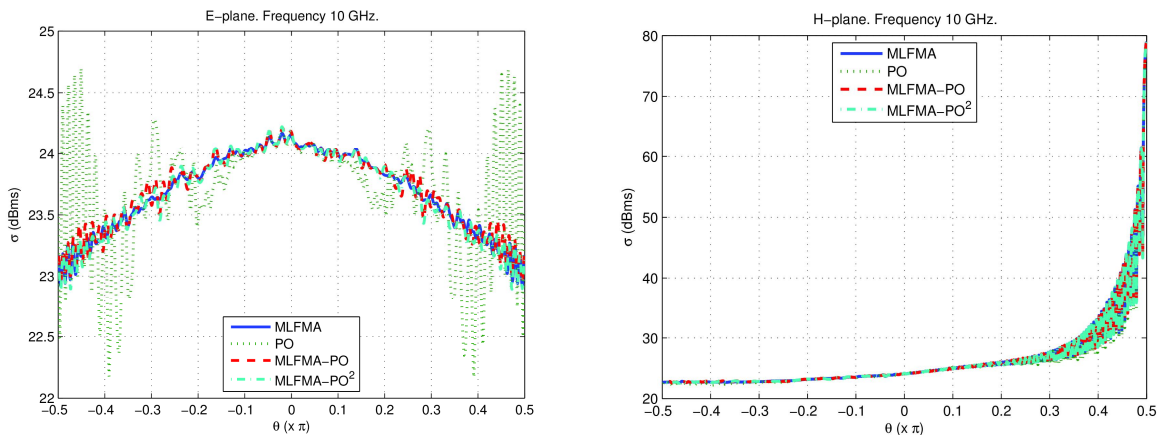
Pallon tapauksessa havaittiin että PO menetelmä tuottaa suurimman virheen valaistun ja varjoalueen rajapinnalle, sillä varjoalueessa virta on nolla. Toteuttamalla hybridimenetelmässä aluejako siten, että MLFMA:ta käytetään tällä rajapinnalla saadaan PO:sta aiheutuvaa virhettä pienennettyä. Varjoalueesta aiheutuvan laskentavirheen merkitys on sitä suurempi mitä matalampi taajuus on.

Seuraava esimerkki oli ympyrälevy jonka halkaisija oli 2 metriä ja taajuus oli 10 GHz. Levyn halkaisija oli siten 66 aallonpituutta. Herättävä tasoalto tuli 45 asteen kulmassa suhteessa levyn pintaan. Vaatimalla että verkossa on n. 10 elementtiä aallonpituudella, tuli verkkoon n. 1,2 miljoonaa kolmiota ja tuntemattomien lukumäärä oli n. 1,8 miljoonaa. Hybridimenetelmässä MLFMA:ta käytettiin levyn reunoilla ja PO:ta sen keskellä. Kuvassa 1 on esitetty levyn pin-

nalle indusoitunut pintavirtatiheys laskettuna PO:lla ja MLFMA:lla. Tässä tapauksessa PO näyttäisi mallintavan virran varsin tarkasti. Kuvassa 2 on esitetty tutkapaikkipinta (Radar Cross Section, RCS) kulman funktiona E- ja H-tasoissa. E-tason määrää tulevan kentän etenemissuunta ja sähkökenttä. H-tason määrää tulevan kentän etenemissuunta ja magneettikenttä. Hybridimenetelmä toteutettiin käyttäen MLFMA:ta 5cm (Kuvassa 2 MLFMA-PO) ja 10cm (Kuvassa 2 MLFMA-PO 2) levyisillä alueilla levyn reunoilla. Kuvan 2 tuloksista voidaan päätellä, että hybridimenetelmä paransi PO tuloksen tarkkuutta erityisesti sivusuunnassa.



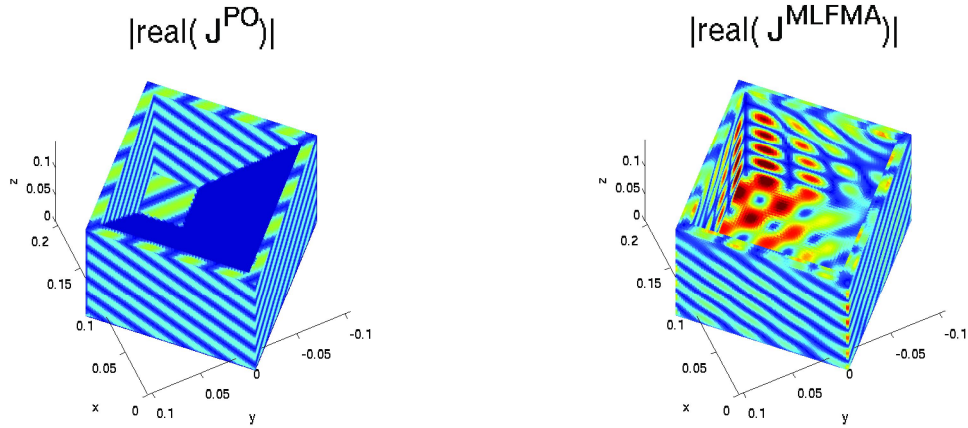
Kuva 1: Ympyrälevyn pinnalle indusoitunut pintavirtatiheys laskettua PO:lla (vasemmalla) ja MLFMA:lla (oikealla).



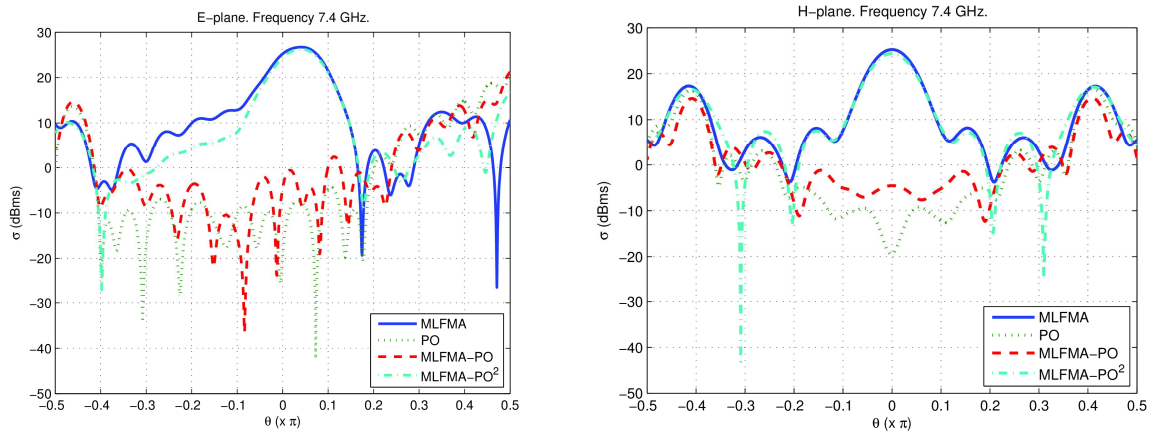
Kuva 2: Ympyrälevyn tutkapaikkipinta tarkastelukulman funktiona E-tasossa (vasemmalla) ja H-tasossa (oikealla). Kulma nolla vastaa takaisinsirontaa.

Kolmas esimerkki oli avoin kuutio. Kuution sivun pituus oli 17 cm ja taajuus oli 7.4 GHz. Kuvassa 3 on esitetty PO:lla ja MLFMA:lla lasketut kuution indusoituneet pintavirtatiheydet kun herätteenä on tasoaalto joka osuu kuutioon 45 asteen kulmassa. Selvästi nähdään ettei PO kykene mallintamaan laatikkoon syntyvää voimakasta resonanssia. Tästä johtuen myös PO:n enustama RCS saattaa olla useita kymmeniä desibelejä väärin, kuten kuvasta 4 voidaan havaita. Huomionarvoista on että hybridimentelmässä ei riitä että MLFMA:ta on kätetty kuution reu-

noilla (Kuvassa 4 MLFMA-PO). Jotta ratkaisu on riittävän tarkka ja luotettava on tärkeää mallintaa MLFMA:lla kohteen sisäpinnat (Kuvassa 4 MLFMA-PO 2).

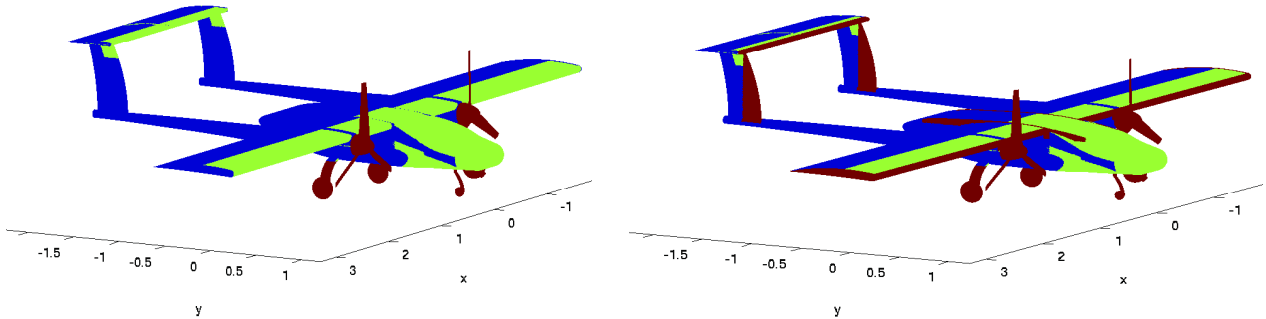


Kuva 3: Avoimeen laatikkoon idusoitunut pintavirtatiheys PO:lla laskettu (vasemmalla) ja MLFMA:lla laskettu (oikealla).

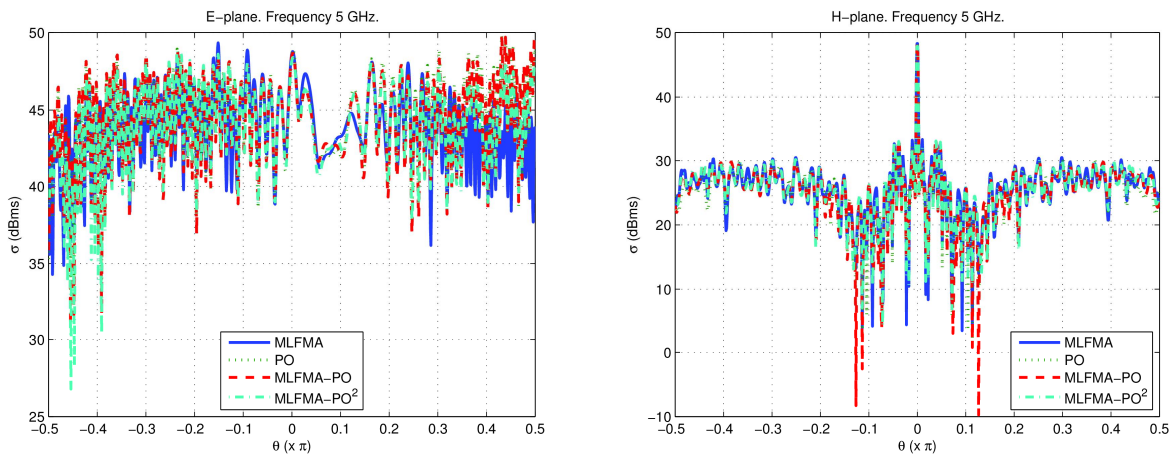


Kuva 4: Avoimen laatikon tutkapoikkipinta tarkastelukulman funktiona E-tasossa (vasemmalla) ja H-tasossa (oikealla).

Seuraavaksi menetelmiä sovellettiin UAV:n (Unmanned Aerial Vehicle) tutkavasteen määrittämiseen. Kuvassa 5 on esitetty kaksi vaihtoehtoista tapaa toteuttaa PO ja MLFMA aluejako. Kuvassa 6 on esitetty vastaavat tutkapoikkipinnat kulman funktiona E- ja H-tasossa. Herätteenä on tasoaalto 5 GHz taajuudella joka tulee suoraan kohti kohteen nokkaa (Kuvassa 5 oikealta pitkin y akselia). Mallintamalla myös UAV:n siipien ja peräsimen terävät särivät MLFMA:lla (Kuva 5 oikealla) parantaa jossain määrin ratkaisun tulosta (Kuvassa 6 MLFMA-PO 2).



Kuva 5: Punainen = MLFMA alue, vihreä = PO valaistu alue ja sininen = PO varjoalue.



Kuva 6: UAV:n tutkapoikkipinta tarkastelukulman funktiona E-tasossa (vasemmalla) ja H-tasossa (oikealla).

### 4.3 Impedanssireunaehto

Kaikki edellä esitetyt tulokset perustuivat oletukseen, että kohteen pinta on ideaalijohtavaa metallia (Perfect Electric Conductor, PEC). Seuraavaksi menetelmät laajennettiin pintaimpedanssiehdolle. Tällöin kohteen pinnalla sähkökentän pinnan suuntainen komponentti ei ole nol-la, kuten PEC oletuksessa, vaan se määräytyy pinnan materiaalia kuvaavasta pintaimpedanssista.

PO menetelmän ongelmatilanteet näyttivät olevan samat kuin PEC tilanteessa. Erityisesti resonoivat rakenteet olivat haastavia PO:ille. Tutkittaessa menetelmien tarkkuutta pintaimpedanssin suhteen pallon tapauksessa havaittiin, että kaikkien numeeristen menetelmien virhe kasvoi pintaimpedanssia kasvatettaessa.

Lisäksi havaittiin, että tutkapoikkipinta pienenee pintaimpedanssia kasvatettaessa. Erityisen selvästi näin näyttäisi tapahtuvan resonoivan laatikon tapauksessa. Sähkömagneettisen reuna-



ehdon muuttuessa laatikon pinnalla, ei valittu taajuus enää välttämättä ole kohteen resonanssitaajuus. Ts. kohde ei resonoi kun impedanssi on suuri ja tämän takia myös tutkavaste pienee.

## 5 Loppupäätelmät

Käytössä ollut tehokas ja tarkka MLFMA ratkaisija mahdollisti PO ja hybridimenetelmien tarkkuuden tarkastelun mielivaltaisen muotoisille sähköisesti riittävän suurille kohteille. Testaamalla menetelmät ja tutkimalla niiden tarkkuutta kanonisille kohteille saatiin varsin kattava käsitys siitä mihin PO menetelmä kykenee ja miten sen tarkkuutta voidaan parantaa käyttämällä yhdistettyä menetelmää. Ts. mitkä osat kohteesta tulisi mallintaa MLFMA:lla. Perusperiaate näyttäisi olevan, että PO on käyttökelpoinen riittävän korkeilla taajuuksilla suurilla ja sileillä pinnoilla. Jos halutaan tarkka tulos on MLFMA:ta käytettävä nurkissa, särmissä ja muissa pienissä yksityiskohdissa, sekä mahdollisesti myös PO alueen valoisan ja varjoalueen rajapinnalla. Jos taajuus on liian matala pääsee sähkömagneettinen aalto "ryömimään" varjoalueelle jolloin varjoalueelle indusoituva pintavirtatiheys voi olla merkittävä.

Menetelmien toimivuutta tutkittiin myös asettamalla kaksi kohdetta toistensa lähelle siten että toinen niistä varjosti toista. Koska PO menetelmä ei mallinna varjoalueelle syntyvää pintavirtaa on menetelmän antama virhe sitä suurempi mitä merkittävämpi varjoalueelle indusoituvan virtatiheyden vaikutus on tutkapaikkipintaan. Käyttämällä MLFMA:ta varjoalueella parani ratkaisun tarkkuus merkittävästi verrattuna PO:n antamaan tulokseen. Jos kohteiden vuorovaikutus on merkittävä ei tämä välttämättä kuitenkaan riitä, vaan toisiaan lähellä kohteet on mallinnettava kokonaan MLFMA:lla.

Resonoivat rakenteet todettiin olevan erityisen haastavia PO menetelmälle. Jos kohteessa on onkaloita, reikiä tai muita kohteita joihin syntyi voimakas resonanssi voi PO menetelmän ennustama tutkavaste olla täysin väärin. Simulaatioiden luotettavuuden ja tarkkuuden kannalta on hyvin oleellista, että resonoivat kohteet mallinnetaan kokonaan MLFMA:lla.

Mutkikkaampien kohteiden tapauksessa PO menetelmän virhelähteiden paikallistaminen oli haastavampaa.

Menetelmien kehittäminen pintaimpedanssille laajensi merkittävästi niiden käytettävyyttä käytännön simulointitehtävissä. Pintaimpedanssin tapauksessa havaittiin sekä PO että MoM menetelmien virheen kasvavan kun impedanssin arvoa kasvatettiin. Syy tähän oli se, että laskentaverkon tiheys oli valittu siten, että se PEC tilanteessa, eli kun pintaimpedanssi on nolla, on riittävä jotta MoM ratkaisu on tarkka (pallon tapauksessa RCS:n virhe oli alle yksi prosentti). Kun pintaimpedanssi kasvaa ja lähestyy arvoa yksi (käytössä oli tyhjiön aaltoimpedanssilla normalisoitu pintaimpedanssi) muuttuu fysikaalinen tilanne merkittävästi eikä käytetty laskentaverkko välttämättä enää ole riittävän tiheä jotta ratkaisu olisi yhtä tarkka kuin PEC tilanteessa. PO menetelmän ongelmatilanteet näyttäisivät olevan samat kuin PEC reunaehdolle ja erityisesti resonoivat kohteet tuottivat suurta virhettä myös impedanssireunaehdon tapauksessa.

Menetelmien toteutuksessa havaittiin myös joitain käytännön haasteita. Ensinnäkin laskentaverkon muodostaminen mutkikkaille kohteille (UAV) osoittautui yllättävän haastavaksi. Useissa tilanteissa käytetty verkongenerointiohjelma ei kyennyt muodostamaan vaadittavaa verkkoa. Toinen käytännön haaste liittyi PO ja MLFMA aluejakoon. Idea tuntuu suoraviivaiselta toteuttaa, mutta alueajaon automatisointi osoittautui käytännön toteutuksessa varsin haastavaksi tehtäväksi.





Simuloitavan kohteen kokoa voidaan edelleen kasvattaa hyödyntämällä hajautettua rinnakaislaskentaa. Pitämällä MLFMA alueet riittävän pieninä jotta ne voidaan ratkaista yksittäisessä laskentanoodissa vältettäisiin työläs ja mutkikas MLFMA:n rinnakkaistus. Rinnakkaistaminen voidaan toteuttaa PO alueella, mikä on varsin suoraviivainen tehtävä.

## 6 Tutkimuksen tuottamat tieteelliset julkaisut ja muut mahdolliset raportit

Tutkimuksen tuloksista ideaalijohteille on valmistunut Aalto-yliopiston Radiotieteen ja -tekniikan laitoksella erikoistyö: Pasi Koivumäki, Efficient radar cross section computation of large structures, pp. 1-45, 9/2015.

Tuloksista on tekeillä myös tieteellinen artikkeli "Hybrid multilevel fast multipole algorithm and physical optics for impedance boundary condition". Artikkelissa kuvataan hybridi MLFMA-PO menetelmän toteutus pintaimpedanssireunaehdolle ja tarkastellaan menetelmän toimivuutta ja solveltuvuutta eri pintaimpedanssin arvoilla.

## Viitteet

- [1] S. Järvenpää, M. Taskinen and P. Ylä-Oijala: Singularity subtraction technique for high-order polynomial vector basis functions on planar triangles, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 54(1), 42-49, 2006.
- [2] P. Ylä-Oijala, M. Taskinen and J. Sarvas, Surface integral equation method for general composite metallic and dielectric structures with junctions, *Progress in Electromagnetic Research, PIER* 52, 81-108, 2005.
- [3] P. Ylä-Oijala, S. P. Kiminki and S. Järvenpää, Solving IBC-CFIE with dual basis functions, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 58(12), 3997-4004, 2010.
- [4] S. Yan and J.-M. Jin, Self-dual integral equations for electromagnetic scattering from IBC objects, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 61(11), 5533-5546, 2013.
- [5] S. Järvenpää and P. Ylä-Oijala, A global interpolator with low sample rate for multilevel fast multipole algorithm, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 61(3), 1291-1300, 2013.
- [6] H. Wallen, S. Järvenpää and P. Ylä-Oijala: Broadband multilevel fast multipole algorithm for acoustic scattering problems, *Journal of Computational Acoustics*, 14(4), 507-526, 2006.
- [7] H. Wallen, S. Järvenpää, P. Ylä-Oijala, and J. Sarvas, Broadband Müller-MLFMA for electromagnetic scattering by dielectric objects, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 55(5), 1423-1430, 2007.
- [8] S. Järvenpää, J. Markkanen, and P. Ylä-Oijala, Broadband multilevel fast multipole algorithm for electric-magnetic current volume integral equation, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 61(8), 4393-4397, 2013.