

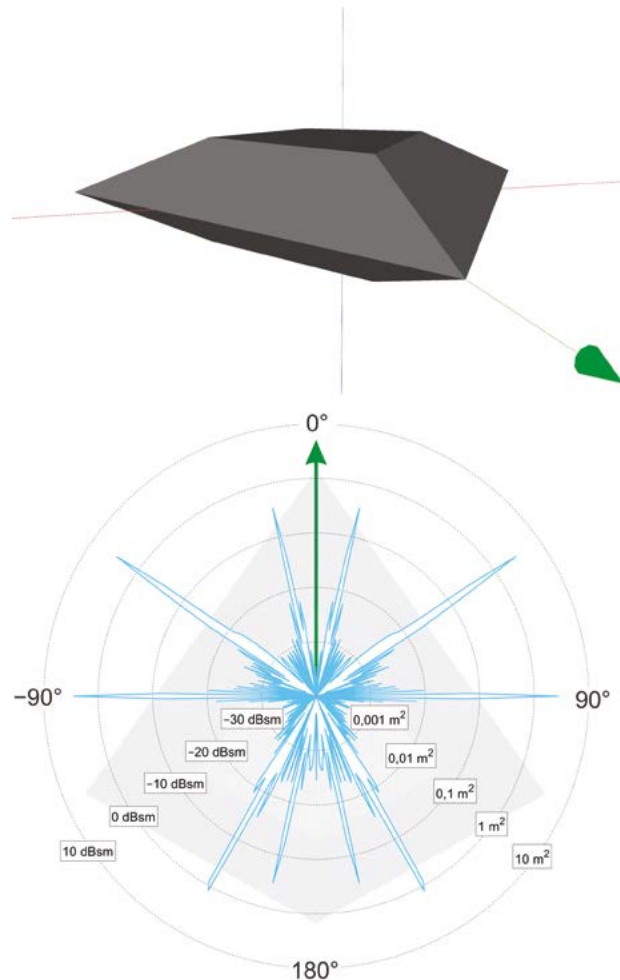
Tutkapoikkipinta-alojen käsittely ja visualisointi

Tutkapoikkipinta-ala (RCS, radar cross section)

Ensiötutka havainnoi kohteita ympäristöstään hyödyntämällä radiosäteilyä. Tutka käyttää antenniaan tutkasäteilyn lähetykseen ja kohteista heijastuneen säteilyn eli tutkavasteen vastaanottoon. RCS on kohteen ominaisuus ja kuvaa sen heijastavuutta tutkalle. Suure esitetään normalisoiduna siten, etteivät tutkan ominaisuudet (kuten lähetysteho tai herkkyys) tai mittaustilanteen ominaisuudet (kuten kohteen ja tutkan välinen etäisyys) vaikuta siihen. RCS:n yksikkö on neliometri, ja sitä on tapana ilmaista logaritmisella asteikolla (dBsm, decibel square meter). Kohteen RCS:n neliometrilukeman voi tulkita rinnastuksella sähköä täydellisesti johtavan pallon poikkileikkauksen alaan. Keskeisimpinä vaikuttajina RCS:n muodostumisessa ovat radiosäteilyn aallonpituus sekä kohteen koko, muoto, pintamateriaalit ja asento tutkaan nähden. Ne yhdessä määrittävät kohteesta eri suuntiin siroavan aallon voimakkuuden ja suuntaavuuden. Sironnan voimakkuuden määrää se, kuinka suurelle alalle tutkasäteily kohdistuu kohteen pinnalla. Suuntaavuus kuvaa, kuinka suurelta osin tutkan lähettämä säteily siroaa kohti tutkan vastaanotinantennia ja kuinka suurelta osin muihin suuntiin.

RCS:n vaikutus tutkavasteeseen vertautuu antennin muotoilun ja suuntauksen vaikutukseen antennin tuottamaan suunnatun radioaallon tehoon. Kohteen RCS:n voi ajatella kuvaavan, kuinka hyvin kyseinen kohde on sovitettu toimimaan vastaaja-antennina siihen kohdistetulle tutkasäteilylle. Hyvä antenni suuntaa siihen keskitetyn sähkömagneettisen tehon mahdollisimman tehokkaasti kohti sitä osapuolta, jonka kanssa pyritään viestimään. Tämä mekanismi huomioidaan nykyisin ilma-alusten suunnittelussa. Häivetekninen lentokone pyritään suunnittelemaan mahdollisimman laajassa katselukulma-alueessa mahdollisimman huonosti toimivaksi vastaaja-antenniksi, jolla on vähintään siedettävät lento-ominaisuudet. Kuvassa 1 esitetään ideaalinen häivekoneen muotoilu ja RCS. Käytännössä häivekoneen muotoilu on kompromissi häiveominaisuuksien, lento-ominaisuuksien takaavan aerodynamiikan sekä hyötykuorman kantamiskyvyn välillä. Häivemuotoilu pyrkii keskittämään sironnan yksittäisiin kapeisiin suuntiin; muista suunnista lentokone havaitaan hyvin huonosti tai ei lainkaan. Kun lentokoneen RCS on alle $0,01 \text{ m}^2$, se on hyvin vaikeasti havaittavissa tutkalla.

Ilma-aluksen, ajoneuvon tai laivan tutkapoikkipinta-ala on merkittävä tekijä silloin, kun arvioidaan kyseisen kohteen havait-



Kuva 1. Häiveteknisesti ideaalinen lentokoneen muoto ja sen tarkastelu suunnasta riippuva RCS esitettynä 5-taajuusalueella (2–4 GHz). Yllä on esitetty lentokoneen kiilamainen muoto etuviistosta kuvattuna. Alla lentokoneen muoto on piirretty harmaalla ylhäältäpäin katsottuna ja sen päälle on piirretty lentokoneen RCS sinisellä polaarilla käyrällä. RCS on suurelta osin alle $0,01 \text{ m}^2$ vain kuudesta hyvin kapeasta tarkastelu suunnasta, kuten kylkien suunnista 90° ja -90° . Kummassakin kuvassa vihreä nuoli osoittaa lentokoneen keulan suunnan.

tavuutta tai tunnistettavuutta tutkalla. Kirjoittajien edustama tutkimustiimi on muutamien vuosien ajan tutkinut

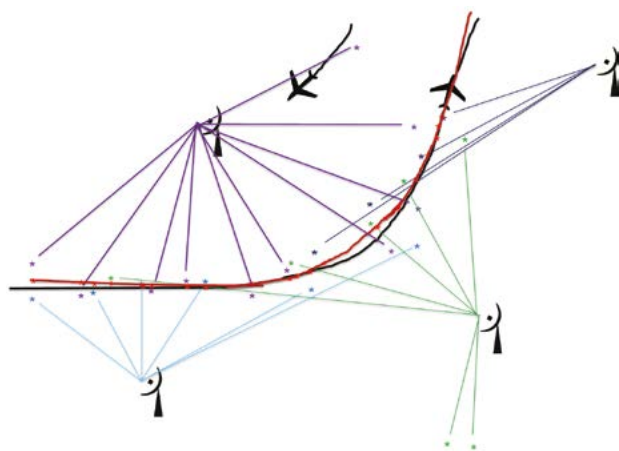
1. miten käytännön kohteiden RCS kannattaa mallintaa
2. minkälaiseen muotoon kohteiden RCS-tieto kannattaa taltioida
3. minkälaiset visualisoinnit ja työkalut ovat hyödyllisiä kohteista muodostuvan RCS-tiedon käsittelyssä.

Tutkimus ja kehitys on liittynyt tutkan ja tutkaseurannan suorituskykyanalyysiin sekä kohteiden automaattiseen tunnistamiseen. Suorituskykyanalyysi tarkoittaa tässä yhteydessä kohteen havaittavuuden ja seurattavuuden määrittämistä simulointeihin ja laskennallisiin malleihin perustuen. Kehitetty RCS:n malli sisältää oleellisen tiedon kohteesta mutta on silti mahdollisimman yksinkertainen, jotta sen muodostaminen ja käyttäminen ovat laskennallisesti tehokkaita ja ylipäättään mahdollisia.

Tutkan kohteen havaittavuus

Seuraava esimerkki havainnollistaa ilma-aluksen havaittavuutta ja RCS:n vaikutusta siihen. Kuvassa 2 on usean tutkan muodostama ilmavalvontatutkaverkko, joka etsii ja seuraa ilma-aluksia. Ilma-aluksen havaittavuutta analysoidessa pyritään arvioimaan, millä todennäköisyydellä yksittäinen tutka tekee ilma-aluksesta havainnon lentoradan eri vaiheissa. Tällöin keskeiseen asemaan nousee ilma-aluksen asento suhteessa kuhunkin tutkaverkon tutkaan. Käytännössä tietoa ilma-aluksen täsmällisestä asennosta ei kuitenkaan ole saatavilla, mikä tekee kohteen RCS:n tarkasta ennustamisesta haastavaa yksittäisen havainnon tapauksessa. Tutkaseurannan muodostumisessa ja ylläpitämisessä yksittäisen havainnon merkitys vähenee havaintomäärän kasvaessa. Seuranta perustuu kuitenkin jatkuvaan sarjaan havaintoja, joten tutkahavaintoja kuvaava suorituskyky vaikuttaa voimakkaasti myös seurantakyvyn muodostumiseen.

Havaintotodennäköisyys ja -tarkkuus ovat tärkeimmät tutkan suorituskykyanalyysin mittarit, joilla on myös suora vaikutus seurantakykyyn. Havaintotodennäköisyyden laskennassa tärkein suure on tutkavasteen voimakkuus, joka on taas suoraan verrannollinen RCS:n voimakkuuteen. Vasteen voimakkuus vaikuttaa myös tutkahavainnon tarkkuuteen eli tutkan mitaattaman sijainnin poikkeamaan kohteen todellisesta sijainnista. Näistä syistä RCS:lla on suuri rooli suorituskykyanalyyseissä.



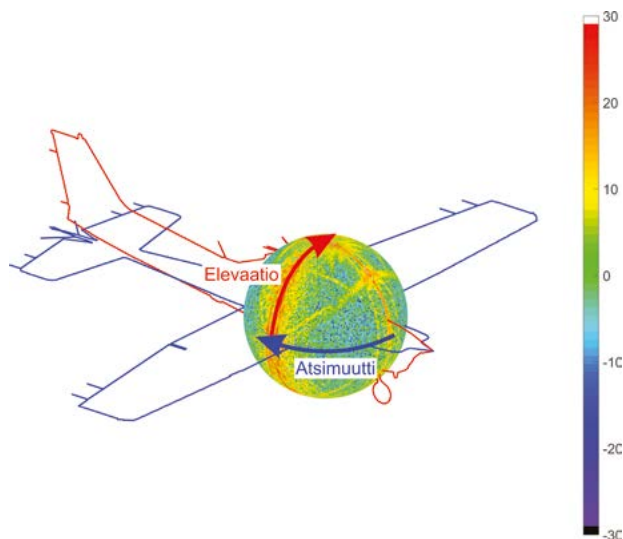
Kuva 2. Kuva havainnollistaa ilmavalvontatutkien muodostaman tutkaverkon tuottamia havaintoja ja tutkaseurantaa sekä niiden tarkkuutta todelliseen lentorataan nähden. Punainen käyrä edustaa seurannan määrittämää rataa ja musta käyrä kohteen todellista lentorataa. Eriväriset viivat yhdistävät tähdillä merkatut tutkahavaintojen sijainnit havainnot tehneisiin tutkiin.

Tavanomaisen ilma-aluksen ja S-taajuusalueen (2–4 GHz) valvontatutkan tapauksessa alle yhden asteen muutos ilma-aluksen suunnassa voi muuttaa RCS:n voimakkuutta huomattavasti, jopa 40 dB. Vertailukohdaksi mainittakoon, että tämä vastaa tutkan tehon kertomista tai jakamista luvulla 10 000 tai kohteen etäisyyden kymmenkertaistamista tutkaan nähden. Tämä RCS:n häilyntä aiheuttaa ilma-aluksen havaittavuudessa suurta vaihtelua lentoradan varrella. Ilmiön huomioiminen onkin hyvin keskeinen osa RCS:n mallintamista käytännössä.

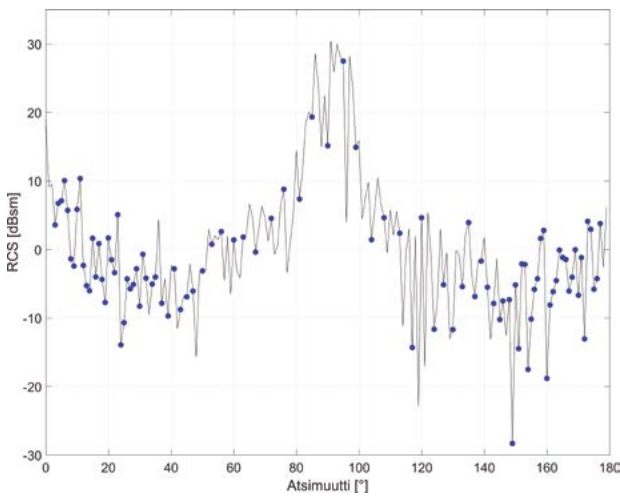
Tutkapoikkipinta-alan häilyntä (fluctuation)

Ilma-aluksen eri osista tutkaa kohti heijastuva sähkömagneettinen aalto summautuu tiettyihin suuntiin vahvistuen ja toisiin vaimentuen interferenssi-ilmiön seurauksena. Tästä syystä suurikokoinenkin ilma-alus jää joissakin lentoratansa kohdissa havaitsematta. Kun ilma-alus etenee lentoradallaan, sen lentosuunta voi säilyä samana, mutta sen atsimuuttisuunta (jota on havainnollistettu nuolella kuvassa 3) muuttuu jatkuvasti. Tällöin muuttuu myös sen RCS, ja tuloksena on niin sanottu häilyntäilmiö.

Kuvassa 3 on esitetty tapa visualisoida RCS atsimuutin ja elevaation funktiona. RCS:n voimakas häilyntä ilma-aluksen asennon funktiona johtuu siitä, että tyypillinen ilma-alus on hyvin monimuotoinen ja suurikokoinen verrattuna S-taajuusalueen tutkan aallonpituuteen, joka on suuruusluokaltaan 10 cm. Tällöin RCS:n voimakkuuden vaihtelu on tyypillisesti kymmeniä desibelejä muutaman asteen sisällä. Tätä vaihtelua on havainnollistettu esimerkillä kuvassa 4.



Kuva 3. Cessna 172 -lentokoneelle simuloitu tutkapoikkipinta-ala esitettyä ilma-aluksen sidotun atsimuutti- ja elevaatiokulman funktiona. Pallomaisessa visualisoinnissa pallon kulma-akselit ovat vaakasuunnassa atsimuutti ja pystysuunnassa elevaatio. Pallon orientaatio on sidottu kuvassa ääri viivoilla esitetyn Cessnan orientaatioon. Pallon väriarvot edustavat RCS-arvoja desibeleinä (dBsm). Esimerkiksi kyljen suunnassa hyvin voimakas RCS piiryy punaisella värillä. RCS vaihtelee hyvin nopeasti useiden kymmenien desibelien dynamiikalla atsimuutti- tai elevaatiokulmassa siirryttäessä.



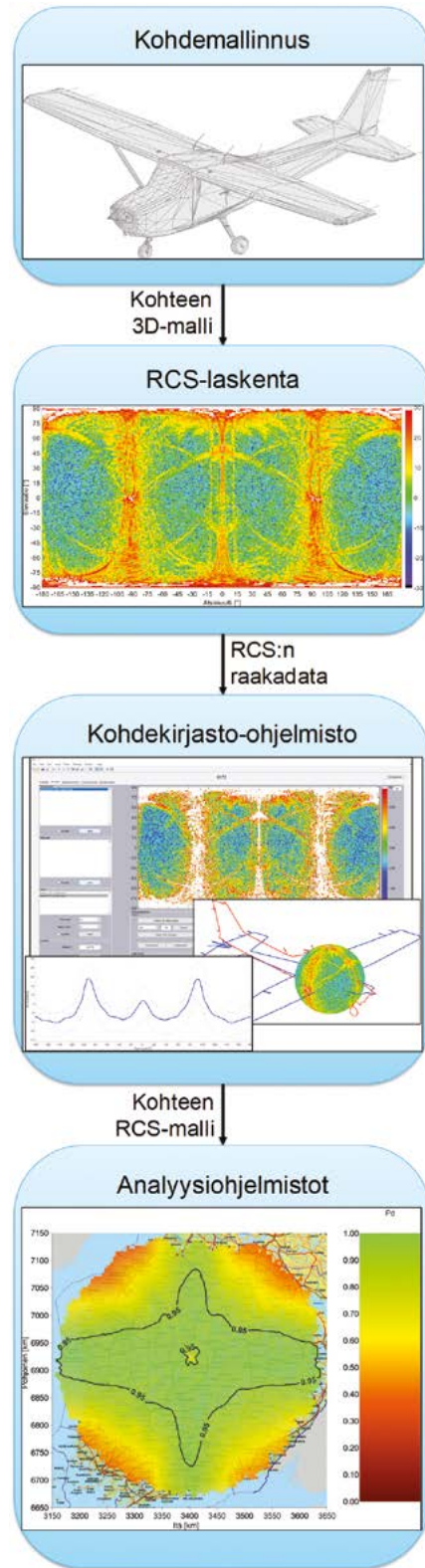
Kuva 4. Cessna 172 -lentokoneen RCS vaakatasossa (eli elevaatiokulmassa 0°) on esitetty mustalla viivalla. Tämän käyrän päälle on merkitty sinisillä ympyröillä kuvitteellisen tutkan havainnoimat RCS-arvot lentokoneen ohittaessa tutkan 10 km:n etäisyydellä nopeudella 300 km/h. Vaaka-akselilla perättäisten sinisten ympyröiden välinen ero RCS-arvossa on suurimmillaan useita kymmeniä desibeilejä.

Tutkan kohteiden analyysiprosessi ja kehitetyt menetelmät

Kohteita, joiden havaitsemiseen tutkia käytetään, on tyyppillisesti paljon, ja monet niistä ovat RCS:ltaan keskenään hyvin erilaisia. Kohteiden ominaisuudet määrittävät suuren osan tutkilla aikaansaataavasta havainto- ja seurantakyvystä. Kyky vaihtelee kohteesta toiseen ja tarkastelusuunnan mukaan. Kohteiden simulointi ja mittaukset tuottavan suuren määrän dataa, ja sen hallitsemiseksi on perusteltua luoda hyvä prosessi.

Kuvassa 5 on esitetty lohkokaaeviona kohteiden RCS-mallinnusprosessi. Tässä yhteydessä termiä kohdekirjasto käytetään tietovarastosta, jonne koostetaan kohteiden mallinnuksen kannalta hyödylliset simulaatiot ja mittauksien tulokset. Ensimmäisistä kohteista simuloitetaan laskennallinen RCS kaikkiin keskeisiin atsimuutti- ja elevaatio-suuntiin kohteiden 3D-malleihin perustuen. Simuloitu RCS-raakadata ja myös kohteista tarjolla olevat mittauksien tulokset vietään kirjoittajien edustaman tutkimustiimin kehittämään kohdekirjasto-ohjelmistoon. Ohjelmisto tarjoaa rajapinnan ja analyysityökalut datan saattamiseen varsinaiseen käyttöön, kuten operatiiviseen suunnitteluun tai tehtäväsuunnitteluun.

Kohdekirjasto-ohjelmiston yksi tärkeimmistä ominaisuuksista on RCS-mallin tallentaminen soveliaassa muodossa niin, että otetaan huomioon kohteiden asentotiedon epävarmuus ja RCS:n häilyntyminen. Epävarmuudet määritetään erikseen ilma-aluksen kääntymiskulmalle (yaw), nyökkäyskulmalle (pitch) ja kallistuskulmalle (roll) normaalijakauma-oletusta käyttäen. Ensimmäisessä määritetään lentoradan perusteella, mihin suuntaan ilma-aluksen keula todennäköisimmin osoittaa



Kuva 5. RCS-mallinnusprosessin tyyppiset vaiheet, kun kohteiden 3D-mallista tuotetaan erilaisten analyysiohjelmien vaatimat RCS-mallit. Kohdekirjasto-ohjelmistoon voidaan syöttää simulaatiotulosten lisäksi myös kohteista tehtyjen mittauksien tuloksia. Kohdekirjasto-ohjelmisto tuottaa ohjelmiston käyttäjälle muun muassa lohkokossansa näkyviä RCS:n visualisointeja.

kussakin lentoradan pisteessä. Tähän voidaan käyttää karkeita oletuksia lentokoneen kinematiikasta: kone lentää tyypillisesti keula edellä, kallistaa tyypillisillä kallistuskulmilla kaartaessaan tietyllä jyrkkyydellä ja nyökkäyskulma muuttuu, kun ilma-alus alkaa nostaa korkeutta keula edellä. Näin saadaan tuotettua niin sanottu asentoestimaatti, joka kertoo ilma-aluksen todennäköisimmän asennon. Tämän asentoestimaatin ympärille mallinnetaan normaalijakautunut epävarmuus. Lopuksi tehtäväksi jää tämän epävarmuuden huomioiminen, kun RCS-raakadatasta muodostetaan RCS-jakauma. Simulaation tai mittausten perusteella tiedetään, minkälainen RCS-raakadata ilma-aluksesta muodostuu. Raakadatasissa on RCS-näyte kuhunkin valaisukulmaan atsimuutissa ja elevaatioissa, kuten kuvassa 5 esitettiin. Muodostettu RCS-jakauma – tai siitä poimitut parametrit – on RCS-malli, jota käytetään analyysissa.

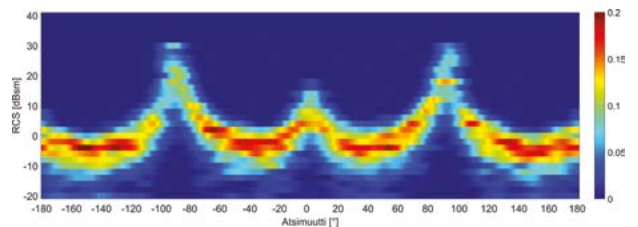
Kuvassa 6 on Cessna 172 -lentokoneelle laskettu RCS:n jakauma atsimuutin funktiona lentokoneen vaakatasossa (eli elevaatiokulmassa 0°). Kohdekirjasto-ohjelmisto pystyy tuottamaan kuvassa esitetyn RCS-mallin sekä simuloituista tuloksista että mittaustuloksista. Mittaustulosten tapauksessa on tyypillistä, että mittaukset kattavat vain hyvin pienen osan atsimuutti- ja elevaatioavaruutta, mutta kehitetyillä menetelmillä on silti mahdollista tuottaa mittaustuloksista käytökelpoinen RCS-malli. Kuvasta 6 nähdään, minkälaisista on RCS:n tilastollinen vaihtelu ja siten tutkavasteen tehon vaihtelu, kun Cessnaa tarkastellaan eri atsimuutisuunnista. Tutkan ja kohteen välinen etäisyys on useimmiten hyvin suuri, joten kuvassa 6 kohteen elevaatio suunnasta nolla astetta muodostettu jakauma voi olla riittävä yleisiin tarkasteluihin. Vastaavia RCS-jakaumia voidaan tuottaa myös erikseen eri elevaatio suuntiin. RCS-jakaumalle ei tässä käsittelyssä tarvitse olettaa mitään jakaumatyyppiä. Sitä voi käsitellä histogrammina tai siihen voi sovittaa haluamansa jakaumamuodon, kuten normaalijakauman tai Weibull-jakauman. Kun tällaista RCS-mallia käytetään analyysissa, saadaan RCS:n ja ilma-aluksen asennon riippuvuus – häilyntä mukaan lukien – huomioitua hyvin kätevästi ilman laskennallisesti raskasta toistokoetta.

Kuvassa 5 esitetyn kaavion alin lohko havainnollistaa edellä kuvatun RCS-mallinnuksen käyttöä tutkan havaintokyvyn analysoinnissa; kuvassa esitetty liukuväriyksellä piirretty havaintotodennäköisyys antaa kokonaiskuvan siitä, missä kyseinen ilma-alus on mahdollista havaita ja missä ei, kun sen lentosuunta on asetettu kohti pohjoista kaikissa tarkastelusijainneissa kartan päällä. Tutka on kuvassa keskellä, ja havaintotodennäköisyys on laskettu tietyille tarkastelukorkeudelle. Todennäköisyys 0,95 on piirretty kuvaan mustalla tasa-arvokäyrällä. Kuvasta nähdään myös suoraviivaisella tavalla, mikä merkitys RCS:lla on suuntariippuvasti. Esimerkin Cessna havaitaan edestä hieman pidemmältä etäisyydeltä kuin takaa. Nykyaikaisten häivemuotoilua sisältävien ilma-alusten tapauksessa tarkastelusuunnan huomioiva

RCS-mallinnus on erityisen hyödyllinen, koska niiden RCS vaihtelee erityisen suuresti tarkastelusuunnan funktiona.

Yhteenveto

Tässä artikkelissa esitetyt kuvat käsittelevät monostaattista S-taajuusalueen tutkaa, mutta käsitellyt menetelmät ovat yleisesti soveltuvia ja hyödynnettävissä kaikilla taajuusalueilla, myös monipaikkatutkan tapauksessa. Kohteiden kirjastointiin suunniteltu ohjelmisto helpottaa laajamittaisen analyysityön tekemistä eri analyysityökaluilla, kun RCS-tieto erilaisista kohteista tallennetaan yhtenäisessä ja laskennallisesti mielekkäässä muodossa tietokantaan. Visualisoinneilla tuetaan ohjelmiston käyttäjän suorittamaa RCS-tiedon hallintaa. Kohdekirjasto-ohjelmisto tukee tiedon hallintaa ja tarjoaa sujuvan menettelyn RCS-mallin tuottamiseen eri analyysiohjelmistoille. Esitetty laskennallisesti elegantti tilastollinen RCS-mallinnus soveltuu tutkan ja tutkaverkon suorituskykyanalyysiin ja tutkapaikkopinta-alaan perustuvaan tutkan kohteen tunnistamiseen, jossa keskeisenä haasteena on yhteistyökyvyttömän kohteen tuntemattoman asennon estimoiminen ja estimaatin epävarmuuden hallinta. Suorituskykyanalyysia tarvitaan muun muassa operatiivisessa suunnittelussa, tehtäväsuunnittelussa ja häivetekniikan hyötyjen analysoinnissa.



Kuva 6. Cessna 172 -lentokoneelle mallinnettu tutkapaikkopinta-ala jakauma atsimuutin funktiona elevaatiokulmasta 0°. Kustakin atsimuutisuunnasta asteen välein esitettyjen histogrammien alkioit ovat kuvan pystyakselilla. Kukin alkio edustaa tiettyä RCS:n arvoväliä, jonka todennäköisyys kullekin atsimuutisuunnalle on esitetty värerein. Värejä vastaavat todennäköisyysarvot on esitetty kuvan oikeassa laidassa. Kohteen asennon epävarmuus on mallinnettu normaalijakaumalla, jonka keskijointa atsimuutti- ja elevaatio suunnassa on 5°.

Kirjoittaja:

Juha Jylhä toimii projektipäällikkönä ja tutkimusprojektien vastuullisena johtajana ja Minna Väilä projektitutkijana Tampereen yliopiston Tietotekniikan yksikössä tutkien, algoritmien ja koneoppimisen tutkimukseen keskittyvässä tutkimustiimissä.