



TIIVISTELMÄRAPORTTI (SUMMARY REPORT)

Korkean resoluution ja suuren kuva-alueen SAR

Ari Visa, Risto Vehmas, Juha Jylhä, Minna Väilä
Tampereen teknillinen yliopisto, Signaalinkäsittelyn laitos
ari.visa@tut.fi

Tiivistelmä

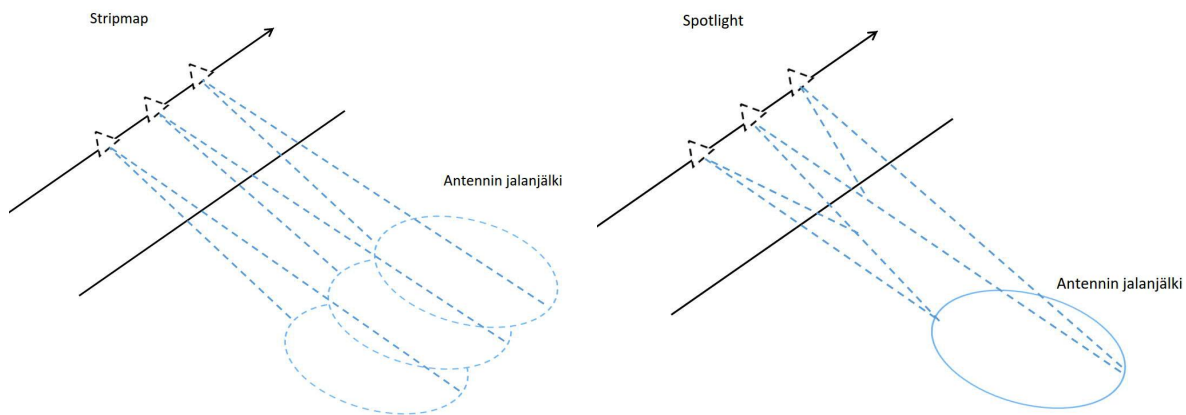
Perinteisiä aaltomuotoja käyttävän yksikanavaisen synteettisen apertuurin tutkan (SAR) toimintaparametrit sisältävät kompromissin, joka rajoittaa kyseisen systeemin käyttöä hyvin ison alueen kuvantamiseen erittäin korkealla erottelukyvyllä. Kompromissista päästään eroon hyödyntämällä systeemiä, joka koostuu useasta rinnakkaisesta vastaanottokanavasta. Mikäli jokaisen vastaanottokanavan signaali digitoidaan ja tallennetaan erikseen, tämä mahdollistaa selvästi matalamman pulssintoistotaajuuden käyttämisen lähettimelle. Tällöin käyttämällä erityistä kuvanlaskentatekniikkaa saadaan muodostettua kuva korkealla erottelukyvyllä ilman näytteenotosta aiheutuvia monikäsitteisyysongelmia. Monikanavaisesta vastaanotosta saadaan hyötyjä myös laitteistovaatimuksien ja häirinnänväistön suhteen. Tutkimuksessa vertailtiin ja sovellettiin erilaisia laskenta-algoritmeja tällaiselle monikanavaiselle SAR-systeemille. Ideaalinen tapa muodostaa SAR-kuva aika-alueessa ei vielä nykylaskentateholla ole järkevästi toteutettavissa. Tästä syystä tutkittiin erilaisia kompromisseja laskentatehokkuuden ja saavutetun kuvan laadun välillä. Paras kompromissi saavutetaan suorittamalla laskenta aika-alueessa hyödyntämällä nopeaa takaisinprojektiio-algoritmia.

1. Johdanto

Synteettisen apertuurin tutka (SAR, Synthetic Aperture Radar) on mikroaaltoalueella toimiva kaukokartoitus- ja tiedusteluinstrumentti, jolla on yhä enenevässä määrin sovelluksia sekä siviili- että sotilaskäytössä. SAR-tutkalla muodostetaan ilmakuvaa korkealla (jopa muutamien kymmenien senttimetrin) erottelukyvyllä tyypillisesti joko satelliitista tai lentokoneesta käsin. Tässä tutkimuksessa keskityttiin kaksiulotteiseen SAR-kuvanmuodostukseen. Tällöin korkea erottelukyky etäisyysuunnassa muodostetaan pulssikompressiotekniikoilla ja sivuttaissuunnan korkeaan erottelukyvyyteen vaadittava äärimmäisen leveä antenni saavutetaan muodostamalla synteettinen, tutkan liikeradan mittainen antenniryhmä tutkan liikkeen avulla. Etuna optiseen tiedusteluun ja kartoitukseen verrattuna on toimintavarmuus lähes täysin sääolosuhteista ja vuorokaudenajasta riippumatta sekä kyky mitata etäisyyttä täsmällisesti. Tämä mahdollistaa muun muassa tarkkojen digitaalisten korkeusmallien tekemisen ja erittäin pienten muutosten havaitsemisen kuvattavalla alueella SAR-tekniikkaa hyödyntämällä. Nykytekniikan suuntaus on kohti parempaa erottelukykyä ja suurempia kuvattavia alueita. Kyseinen tavoite aiheuttaa ristiriitaisia vaatimuksia perinteisillä aaltomuodoilla toimiville yksikanavaisille systeemeille. Ristiriita aiheutuu siitä, että korkea erottelukyky sivuttaissuunnassa vaatii hyvin pitkän lentoradan eli synteettisen apertuurin, jolloin pulssintoistotaajuuden on oltava hyvin korkea Nyquistin kriteerin toteutumiseksi signaalin liikeradan suuntaisessa ulottuvuudessa. Pulssintoistotaajuuden kasvaessa yksikäsitteisenä säilyvän etäisyysalueen koko pienenee, josta aiheutuu kompromissi kuvattavan alueen koon ja sivuttaiserottelukyvyn välille. Etäisyysuunnan monikäsitteisyysien ratkaiseminen esimerkiksi aaltomuodon modulaation vaihtelulla pulssista toiseen on mahdollista, mutta monikanavaisen vastaanoton avulla saavutetaan parempi signaali-kohina-suhde, hyötyä häirinnänväistöön ja matalammat vaatimukset lähettimelle.

Postiosoite	Käyntiosoite	Puhelin	s-posti, internet
Postadress	Besöksadress	Telefon	e-post, internet
Postal Address	Office	Telephone	e-mail, internet
MATINE/Puolustusministeriö	Eteläinen Makasiinikatu 8 A	Vaihde 295 160 01	matine@defmin.fi
PL 31	00130 Helsinki		www.defmin.fi/matine
FI-00131 Helsinki	Finland		
Finland			

Perinteistä yksikanavaista SAR-tutkaa operoidaan tyypillisesti kahdessa erilaisessa toimintamuodossa. Näitä toimintamutuja havainnollistaa kuva 1. Stripmap-toimintamuodossa antennikeila pyyhkäisee tutkittavan kohdealueen ylitse, jolloin kuvaa saadaan jatkuvana virtana ja suuri alue katetaan näin ollen osa kerrallaan. Saavutettavissa olevan sivuttaiserottelukyvyn määrittää muodostuvan synteettisen apertuurin pituus, jota tässä tapauksessa rajoittaa antennin jalanjäljen koko kuvattavalla alueella (eli antennikeilan leveys). Spotlight-toimintamuodossa synteettisen apertuurin pituutta kasvatetaan pitämällä antennikeila suunnattuna kiinnitettynä maanpinnan pisteeseen. Tällöin puolestaan kuvattavan alueen kooksi sivuttaissuunnassa rajoittuu antennin jalanjäljen kokoinen alue. Suuri kuvattava alue ja korkea sivuttaiserottelukyky vaativat siten stripmap-toimintamuotoa ja hyvin leveää antennikeilaa. Näytteenottoteoreeman soveltaminen apertuurin suunnassa tuottaa tuloksen, jonka mukaan stripmap-toimintamuodossa näytevälillä on oltava pienempi kuin saavutettavissa oleva sivuttaiserottelukyky. Näytevälillä määrittää lisäksi sen, kuinka suuri alue SAR-kuvassa pysyy yksikäsitteisenä sivuttaissuunnassa. Stripmap-muodossa näytevälillä on asetettava vähintään samaksi kuin saavutettavissa oleva sivuttaiserottelukyky, jolloin koko tarvittava apertuurin pituus on mahdollista mitata yksikäsitteisenä. Antennikeilan jalanjäljen on tällöin järkevää olla hieman pienempi kuin sivuttaissuuntainen yksikäsitteinen alue. Liian kapeakeilainen antenni rajoittaisi sivuttaiserottelukykyä ja liian leveä keila johtaisi monikäsitteisyysongelmiin apertuurin suuntaisessa ulottuvuudessa. Mitä parempi erottelukyky sivuttaissuunnassa halutaan, sitä tiheämpää näytevälillä apertuurin suunnassa (eli korkeampaa pulssintoistotaajuutta) on käytettävä. Toisaalta, mitä korkeampi pulssintoistotaajuus on, sitä pienempi alue säilyy yksikäsitteisenä etäisyysuunnassa.

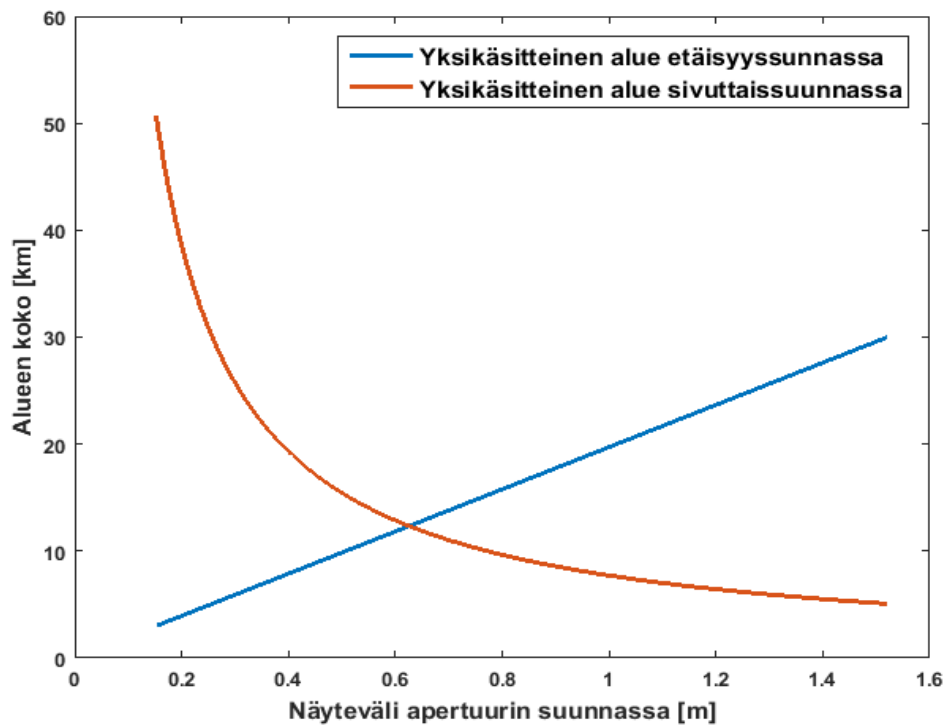


Kuva 1. Perinteiset yksikanavaisen SAR-systeemin stripmap- ja spotlight-toimintamuodot.

Aiheutuvaa kompromissia voidaan havainnollistaa kuvan 2 avulla. Yksikäsitteisen etäisyysalueen koko kasvaa lineaarisesti näytevälillä kasvaessa. Tämä aiheutuu siitä, että yksikäsitteisen etäisyysalueen koko on kääntäen verrannollinen käytettyyn pulssintoistotaajuuteen. Siis mitä tiheämmin pulsseja lähetetään, sitä lyhempi on aikaväli, jonka aikana heijastunutta kaikua vastaanottaessa tiedetään varmasti mistä lähetetystä pulssista on kyse. Kuvasta 2 havaitaan esimerkiksi, että mikäli satelliittiparametreilla halutaan sivuttaiserottelukyvynä 20 cm, saadaan yksikäsitteiseksi etäisyysalueeksi vain noin 2 km leveä kaistale. Kuvan 2 punainen viiva kuvaa yksikäsitteisenä säilyvän alueen kokoa sivuttaissuunnassa. Stripmap-muodossa tämä tarkoittaa antennin jalanjäljen suurinta mahdollista kokoa sivuttaissuunnassa (jotta Nyquistin kriteeri toteutuu). Kuvaa voi tällöin muodostaa jatkuvana virtana apertuurin suunnassa vain laskentakapasiteetin, muistin ja datansiirtokapasiteetin rajoittaessa kuvattavan alueen jatkamista. Mikäli tutkaa operoidaan spotlight-toimintamuodossa, punainen viiva on yksikäsitteisyysrajoitteen lisäksi suurin

mahdollinen kuvan koko sivuttaissuunnassa. Johtopäätös kuvasta 2 on se, että sivuttaiserottelukyvyn parantaminen väistämättä pienentää etäisyysuunnassa yksikäsitteisenä säilyvän kuva-alueen kokoa perinteisissä stripmap- ja spotlight-toimintamuodoissa. Tämä mahdollisesti johtaa tarpeeseen ratkaista etäisyysuunnan monikäsitteisyyksiä, millä on hintansa.

Jotta perinteisiä pulssitutkan aaltomuotoja käyttämällä kyetään muodostamaan suuri SAR-kuva korkealla erottelukyvyllä, tarvitaan siis jokin keino saada tiheämpi näyteväli tutkan liikeradan suunnassa kasvattamatta pulssintoistotaajuutta. Luonnollinen ratkaisu on käyttää useasta elementistä koostuvaa antenniryhmää, jossa yksi elementeistä toimii lähettimenä ja kaikki elementit vastaanottavat valaistulta kohdealueelta heijastuneet kaiut. Digitoimalla ja tallentamalla erikseen kunkin vastaanottoelementin signaali saadaan kaivattuja lisänäytteitä liikeradan suunnassa kasvattamatta pulssintoistotaajuutta. Kyseinen ajatus monikanavaisesta vastaanotosta on lähtöisin synteettisen apertuurin kaikuluotauksesta, tietääksemme ensimmäisen analyysin aiheesta on tehnyt Cutrona vuonna 1975 [1]. Sittemmin kyseisen systeemin hyödyt on havaittu myös SAR-signaalinkäsittelyssä [2]–[5]. Tämänhetkissä satelliitti-SAR-systeemeissä nämä tekniikat eivät vielä ole laajasti käytössä, johtuen suurelta osin puutteellisesta datansiirto- ja laskentakapasiteetista. Ensimmäinen siviilipuolen SAR-systeemi, joka käyttää kyseisiä tekniikoita laajasti on vuonna 2020 toimintansa aloittava Tandem-L-kaksoissatelliitti [6].



Kuva 2. Näytteenoton vaikutus yksikäsitteisenä säilyvän kuva-alueen kokoon. Vaaka-akselin muuttujana on näyteväli lentoradan suunnassa, joka on vakioksi oletetun lentonopeuden ja pulssintoistotaajuuden suhde. Kuvassa on käytetty matalan Maan kiertoradan satelliitin parametreja, jolloin lentokorkeutena on 515 km ja lentonopeutena 7,6 km/s. Lisäksi kantoaallon aallonpituutena on käytetty arvoa 3 cm.



2. Tutkimuksen tavoite ja suunnitelma

Tutkimuksen tavoitteena oli analysoida monikanavaisen SAR-systeemin toimintaa näytteenoton kannalta sekä todentaa täsmälliseen aika-alueen algoritmiin [7] perustuvan kuvanlaskentamenetelmän toimivuus simulaatioita hyödyntäen. Lisäksi tarkoituksena oli pohtia täsmällisen SAR-laskennan haasteita ja vaatimuksia käytännön toteutuksessa. Näihin liittyy oleellisesti esimerkiksi SAR-kuvanmuodostuksen laskentavaatimukset.

Koska täsmällinen SAR-laskenta ei ole vielä nykylaskentateholla toteutettavissa reaaliaikaisesti, on SAR-laskentaan kehitetty lukuisia erilaisia yksinkertaistuksia hyödyntäviä laskentatehokkaita algoritmeja. Tarkoituksena oli myös selvittää, mitkä algoritmit näistä ovat sovellettavissa monikanavaiselle systeemille, kun halutaan saavuttaa hyvin korkea erottelukyky sekä etäisyys- että sivuttaissuunnassa. Tavoiteltavaksi tilanteeksi asetettiin se, että tutkan liiketilasta ja kuvausgeometriasta ei jouduta tekemään merkittävästi menetelmän yleisyyttä ja sovellettavuutta heikentäviä oletuksia. Laskenta-algoritmien soveltuvuutta oli tarkoitus arvioida laskentatehokkuuden ja saavutetun tuloksen laadun suhteen.

3. Aineisto ja menetelmät

Tutkimuksen toteutustapana oli varmentaa monikanavaista vastaanottoa hyödyntävän SAR-systeemin kuvanmuodostuksen onnistumisen teoreettisen analyysin ja simulaatiototeutusten avulla. Simulaatiot toteutettiin MatLab-ympäristössä. Tutkimuksessa päätettiin keskittyä ilmakehästä suoritettavan SAR-kuvauksen toteutukseen pulssitutkalla, jonka käyttämäksi aaltomuodoksi valittiin lähes kaikkien siviilikäytössä olevien sistemien nykyään käyttämä lineaarinen taajuuspyyhkäisy. Tavoiteltavaksi erottelukyvyyksi asetettiin 10 cm, ja suuren kuva-alueen kokoluokaksi ilmakehästä kuvattaessa määritettiin reilusti yli yhden neliökilometrin kokoinen alue. Lisäksi rajoituttiin tarkastelemaan tilannetta, jossa kaikki antenniryhmän elementit sijaitsevat saman lentävän aluksen kyydissä.

4. Tulokset ja pohdinta

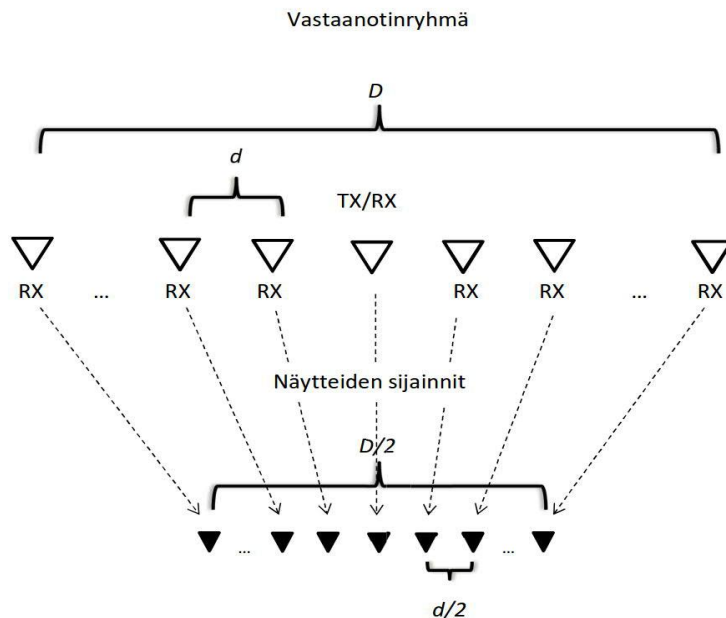
Näytteenottovaatimusten analysointi

Monikanavaisen antenniryhmän hyödyntämistä näytteenoton kannalta voidaan havainnollistaa kuvan 3 avulla. Tutkittava systeemi on lineaarinen antenniryhmä, jossa antennielementit on sijoitettu tasavälisesti tutkan liikeradan suunnassa. Ryhmän keskimäinen elementti toimii lähettimenä (TX) ja kaikki elementit toimivat vastaanottimina (RX). Antenniryhmän läpimitta on D , vierekkäisten elementtien välimatka on d ja antenniryhmässä on yhteensä N elementtiä. Tilanteen yksinkertaistamiseksi voidaan tehdä seuraava oletus. Korvataan kukin TX-RX-pari kuvitteellisella, näiden puolivälissä sijaitsevalla antennielementillä ja oletetaan, että kyseisestä TX-RX-parista saatu näyte vastaa tämän kuvitteellisen yksikanavaisen systeemin näytettä. Näin ollen yhdestä lähetetystä pulssista saadaan N kappaletta vastaanotettuja näytteitä, jotka muodostavat $D/2$ pituisen näytejonon näytevälin ollessa $d/2$. Mikäli kuvitteellisten näytesijaintien halutaan muodostavan tasavälisen jonon, seuraava pulssi lähetetään kun antenniryhmä on liikkunut matkan $Nd/2$ sivuttaissuunnassa. Tämä tarkoittaa sitä, että lähettimelle voidaan käyttää huomattavasti matalampaa pulssintoistotaajuutta kuin perinteiselle yksikanavaiselle systeemille saman näytevälin saamiseksi.

Edellä käytetyn yksinkertaistuksen voidaan osoittaa olevan hyvin tarkka, mikäli kukin TX-RX-parin välimatkan neliön ja kuvausetäisyyden suhde on huomattavasti pienempi kuin käytetyn mikroaaltosignaalin kantoaallon aallonpituus. Tämä pätee hyvin tarkasti erityisesti

siinä tapauksessa, että kaikki antennielementit ovat sijoitettuna saman lentävän aluksen kyytiin. Antennielementtien välimatkan kasvaessa yksinkertaistuksen tarkkuus heikkenee, ja edellä mainitun suhteen kasvaessa merkittäväksi kantoaallon aallonpituuteen nähden tämä yksinkertaistettu malli hajoaa. Lisäksi on otettava huomioon se, että kyseinen yksinkertaistus aiheuttaa erilaisen virheen eri kohdissa kuvattavaa aluetta. Käytännössä SAR-laskennan kannalta tämä tarkoittaa sitä, että kuvattavan alueen tutkaa lähimpänä olevassa osassa kuvan laatu heikkenee enemmän kuin kuvan kauimmaisissa osissa.

Tarkoituksena on operoida kuvan 3 mukaista monikanavaista SAR-systeemiä käyttäen stripmap-tyylistä toimintamuotoa. Yksittäisen antennielementin antennikuvion tulee tällöin olla leveä, jolloin saadaan aikaiseksi pitkä synteettinen apertuuri eli korkea sivuttaiserottelukyky. Vaadittu apertuurin pituus riippuu kuvausetäisyydestä, kun vaaditaan tietty sivuttaiserottelukyky. Antennielementin keilan leveysvaatimus on kätevintä ajatella sivuttaiserottelukyvyn vaatimana (kuvatun alueen) valaisukulman muutoksena, joka on kiinteä eri kuvausetäisyyksille. Antennielementin keilan leveyden on taattava korkean sivuttaiserottelukyvyn vaatima pitkä valaisuaika (tietty muutos valaisukulmassa), mutta keilan ei kannata olla leveämpi kuin vaadittu valaisukulman muutos. Muuten kuvaan tulee esiin vaikutuksia sivuttaissuunnan monikäsitteistymisestä. Keilanleveys kannattaa asettaa juuri sopivasti hieman pienemmäksi kuin vaadittu valaisukulman muutos – tämä ehto pätee kuvaustapaan, jossa kyetään lentämään suhteellisen suoraviivaisesti antennielementit osoittaen kiinteästi sivulle lentosuuntaan nähden. Korkean erottelukyvyn vaatima tiheä näyteväli saavutetaan matalalla pulssintoistotaajuudella yllä esitetyistä perusteluista johtuen. Jotta Nyquistin näytteenottokriteeri toteutuu ja SAR-kuva säilyy yksikäsitteisenä molemmissa ulottuvuuksissa, on siten peräkkäisten antennielementtien välimatkan puolikkaan oltava pienempi kuin saavutettavissa oleva sivuttaiserottelukyky. Lisäksi uusi pulssi on lähetettävä aina (vähintään) silloin, kun antenniryhmä on liikkunut matkan $D/2$ sivuttaissuunnassa.



Kuva 3. Monikanavainen antenniryhmä, jonka keskimäinen elementti toimii sekä lähettimenä että vastaanottimena (TX/RX) ja muut elementit vastaanottimena (RX). Kutakin lähetin-vastaanotinparin näytettä voidaan suurella tarkkuudella käsitellä kyseisen lähetin-vastaanotinparin puolivälissä sijaitsevan kuvitteellisen monostaattisen yksittäisen antennielementin näytteenä.



SAR-kuvanmuodostus

SAR-kuvanmuodostuksen tarkoituksena on kohdistaa tutkan liikeradan muodostama synteettinen vaiheohjattu antenniryhmä erikseen kuhunkin kuvan erottelualkioon eli kuvapisteeseen. Tätä sivusuuntaista kuvanmuodostusta (eli SAR-laskentaa) vaikeuttaa se seikka, että tutkan ja kohdealueen välinen etäisyysmuutos on tyypillisesti suurempi kuin etäisyyserotelualkion koko. Tästä syystä sivusuuntainen kuvanmuodostus on suoritettava kaksiulotteisilla laskuoperaatioilla, joka tekee sitä laskennallisesti hyvin intensiivistä. Tämä seikka korostuu entisestään, kun kuvattavan alueen koko kasvaa ja erottelualkioiden koko pienenee.

Edellä mainitusta syystä johtuen SAR-laskentaan on kehitetty lukuisia laskentatehokkaita algoritmeja vuosien mittaan [8]. Karkeasti algoritmit voidaan jakaa kahteen ryhmään sen perusteella, että suoritetaanko laskenta aika- vai taajuusalueessa. Yksinkertaisimmat ja tarkimmat aika-alueen algoritmit ottavat täsmällisesti huomioon kuvausgeometrian tekemättä mitään niiden tarkkuutta ja sovellettavuutta heikentäviä yksinkertaistuksia. Sen sijaan taajuusalueen algoritmit perustuvat oletukseen suoraviivaisesta liikeradasta. Taajuusalueen algoritmien ideana on hyödyntää kyseistä oletusta sekä laskentatehokasta FFT-algoritmia (Fast Fourier Transform) signaalin muuntamisessa taajuusalueeseen, jolloin SAR-laskentaan vaadittavien laskentaoperaatioiden määrä vähenee huomattavasti. Tällöin on otettava huomioon, että FFT-algoritmin hyödyntämiseksi signaalin on oltava tasavälisesti näytteistetty tutkan liikeradan suunnassa. Monikanavaisen SAR-systeemin toiminnan kannalta tämä tarkoittaa sitä, että lähettimen on lähetettävä uusi pulssi aina täsmälleen silloin, kun antenniryhmä on liikkunut sen läpimitan puolikkaan verran sivuttaissuunnassa. Tämä vaatimus on toteutettavissa satelliitista käsin, mutta ilmakehästä kuvausta suoritettaessa sen täsmällinen toteutus on lähes mahdotonta. Toinen taajuusalueen algoritmien kannalta hankala seikka on todellisen liikeradan poikkeama ideaalisesta, kyseisten algoritmien olettamasta suoraviivaisesta liikeradasta. Ongelma aiheutuu siitä, että näiden poikkeamien aiheuttamat etäisyysmuutokset tutkan antennien ja kuvattavan alueen eri kohtien välillä ovat erilaisia, jolloin niiden huomioon ottaminen ei ole suoraviivaista. Edellä mainituilla poikkeamilla tarkoitetaan sellaisia lentävän aluksen liikkeitä, jotka kyetään mittaamaan esimerkiksi differentiaali-GPS:n ja inertia-navigoinnin avulla. Lisäksi eri asia on tuntemattomat liikeratavirheet, joita ei kyetä erikseen mittaamaan. Ne korjataan SAR-tutkan mittaamaan dataan perustuen, mihin ei tässä tutkimuksessa paneuduttu.

Sekä tasavälisen näytteistyksen että liikeradan epäideaalisuuksien korjaamisen aiheuttamista ongelmista päästään eroon suorittamalla SAR-laskenta aika-alueessa. Kuva-alueen ollessa suuri ja erottelukyvyn korkea ongelmaksi muodostuu kuitenkin hyvin suuri laskennallinen taakka. Helpotusta tähän ongelmaan tuovat tietokoneavusteisesta tomografiasta peräisin olevat takaisinprojektio-algoritmit. Viime vuosina näistä on kehitetty tarkkaan SAR-laskentaan soveltuvia nopeita takaisinprojektio-algoritmeja (FFBP, Fast Factorized Back-Projection) [9]. Kyseiset algoritmit ovat tämän tutkimuksen kannalta äärimmäisen houkutteleva vaihtoehto, sillä niissä yhdistyvät mielekkäällä tavalla aika-alueen algoritmien tarkkuus ja yleisyys sekä laskentatehokkuus.

Hinta, joka edellä mainituista hyödyistä joudutaan maksamaan täsmälliseen aika-alueen algoritmiin verrattuna, on nopeiden takaisinprojektio-algoritmien huomattavasti monimutkaisempi ja hienovaraisempi toteutus. Toteutus sisältää monia säädettäviä yksityiskohtia, jotka liittyvät algoritmin vaatimiin interpolaatioihin ja aliapertuurien rekursiiviseen yhdistämiseen. Näiden yksityiskohtien lisäksi on otettava huomioon tutkittavan monikanavaisen antenniryhmän geometria. Tämän suhteen tutkimuksessa



päädettiin kahteen erilaiseen laskentatoteutukseen nopealle takaisinprojektio-algoritmile. Ensimmäisessä tavassa (FFBP 1) käytetään kuvan 3 mukaista yksinkertaistusta, eli kunkin vastaanotetun näytteen oletetaan tulleen TX-RX-parin puolivälissä sijaitsevasta monostaattisesta yksikanavaisesta antennielementistä. Tässä tapauksessa SAR-laskenta ei siis eroa millään tavalla perinteisestä yksikanavaisesta SAR-laskennasta. Toisessa tavassa (FFBP 2) luodaan digitaalisella keilanmuodostuksella tarpeellinen määrä spotlight-antennikeiloja, jotka kohdistetaan kuvattavan alueen eri kohtiin. Koko kuvattava alue katetaan siis spotlight-antennikeiloilla mittauksen jälkeen, mikä on mahdollista, koska kukin vastaanottokanava on tallennettu erikseen. Suuri kuva-alue muodostetaan laskemalla kustakin spotlight-keilasta SAR-kuva ja yhdistämällä saadut tulokset. Jälleen kukin yksittäinen spotlight-kuva lasketaan aivan kuten perinteisessä yksikanavaisessa SAR-laskennassa.

Laajimmin käytössä olevat taajuusalueen SAR-algoritmit ovat range-Doppler- (RD), chirp scaling- (CSA), range migration- (RMA) ja range stacking-algoritmit (RSA) [8]. Täsmällisen aika-alueen laskennan voi toteuttaa joko kaksiulotteisena korrelaatiolaskentana (MAKE, Matched Kernel Algorithm) [7] tai takasinprojektio-algoritilla (BP, Back-Projection) [9]. Taulukossa 1 on näiden algoritmien vertailemiseksi muodostetun simulaation tuloksia. Nopeasta takaisinprojektioalgoritmista mukana ovat yllä mainitut toteutukset (FFBP 1 ja FFBP 2). Simulaatiossa on tutkittu tilannetta, jossa tutkaa kuljettava alus lentää 10 km korkeudella 10 km vaakaetäisyydellä kuvattavasta alueesta kantoaallon aallonpituuden ollessa 3 cm. Etäisyserottelukyky on 15 cm, lentoradan pituus 2 km ja vastaanottimia on 128 kappaletta 1,5 cm välein sijoiteltuna. Kuvattavan alueen koko on 2 km X 2 km. Pulssintoistotaajuus on asetettu siten, että kuvan 3 mukaisessa yksinkertaistuksessa näytteistyksestä liikeradan suunnassa tulee tasavälinen, mikä mahdollistaa taajuusalueen algoritmien suoraviivaisen soveltamisen. Taulukossa 1 on kunkin algoritmin suhteellinen laskentanopeus, sekä kuvattavan alueen keskellä olevasta ideaalisesta pistemäisestä sirottajasta lasketut ensimmäisen sivukeilan ja pääkeilan maksimitehojen suhde (PSLR, Peak to Sidelobe Ratio), integroidun sivukeilatehon ja integroidun pääkeilatehon suhde (ISLR, Integrated Sidelobe Ratio) sekä arvioitu sivuttaiserottelukyky.

Taulukko 1. Laskenta-algoritmien vertailun tulokset. Algoritmin lyhenteen edessä on mainittu suoritetaanko SAR-laskenta aika- (t) vai taajuusalueessa (f).

Algoritmi	Suhteellinen nopeus	PSLR [dB]	ISLR [dB]	Erottelukyky [m]
(t) MAKE	0.0023	-13.54	-11.26	0.0924
(t) BP	1	-13.37	-11.20	0.0930
(t) FFBP 1	95.66	-13.32	-10.57	0.0947
(t) FFBP 2	367.5	-13.83	-10.33	0.0973
(f) RSA	4.571	-13.47	-10.16	0.0940
(f) RMA	1551	-13.09	-10.27	0.0940
(f) RD	1462	-12.63	-8.80	0.1440
(f) CSA	12720	-9.44	-6.11	0.1100

Pohdintaa

Taulukon 1 tuloksista havaitaan, että taajuusalueen algoritmeista RD ja CSA tuottavat heikoimmat tulokset, eivätkä siten sovellu SAR-laskentaan näin korkealla erottelukyvällä. Tämä johtuu siitä, että kyseiset algoritmit sisältävät oletuksia, jotka pätevät signaalin suhteellisen kaistanleveyden ollessa pieni ja apertuurin ollessa melko lyhyt. Molemmat näistä oletuksista alkavat hajota tutkituilla parametreilla, joten näillä algoritmeilla saatujen tulosten heikkeneminen on odotettu tulos. Sen sijaan RMA ja RSA perustuvat ainoastaan oletukseen



viivasuorasta liikeradasta, joten ne tuottavat tässä tapauksessa vielä hyvän tuloksen. Nopeat takaisinprojektiio-algoritmit tuottavat ainoastaan hieman täsmällisiä algoritmeja heikommalla tuloksella mutta jopa 100–400 kertaa nopeammin. Kyseisiä algoritmeja pystytään nopeuttamaan entisestään, mikäli ollaan valmiita luopumaan halutusta tarkkuudesta eli tyytymään hieman heikompiin tuloksiin. Kuitenkin, mitä parempi on haluttu erottelukyky, sitä vähemmän pystytään laskentaa nopeuttamaan heikentämättä saatuja tuloksia merkittävästi. Johtopäätöksenä taulukon 1 tuloksista voidaan sanoa, että näin tarkalla erottelukyvulla ei nopeista takaisinprojektiio-algoritmeista saada nopeimpien taajuusalueen algoritmien veroisia laskentanopeudella mitattuna, mutta täsmällisiin aika-alueen algoritmeihin (BP ja MAKE) verrattuna saadaan aikaiseksi merkittävä nopeutus tekemällä hyvin vähän sovellettavuutta heikentäviä oletuksia.

Taulukon 1 tuloksia analysoitaessa on huomioitava, että ilmakehästä kuvausta suoritettaessa simuloitu tasavälinen näytteistys ja ideaalinen suoraviivainen liikerata eivät kuvaa realistista tilannetta. Aika-alueen algoritmien toiminnan kannalta oletuksella suorasta liikeradasta ei kuitenkaan ole suurta merkitystä, mikäli lentävän aluksen liiketila kyetään mittaamaan hyvin tarkasti ja sekä pulssintoistotaajuus että antennielementtien sijainnit tiedetään tarkasti. Sen sijaan taajuusalueen algoritmien soveltamiseksi on suoritettava laskennallisesti raskas signaalin uudelleennäytteistys ja tyypillisesti (algoritmista riippuen) epäideaalinen liikeradan korjaus. Kyseiset toimenpiteet lisäävät laskennallista taakkaa ja heikentävät saadun tuloksen laatua. Siten taulukon 1 tulokset taajuusalgoritmien osalta kuvaavat vain ideaalista, ainoastaan satelliitista saavutettavissa olevaa lopputulosta.

Taulukossa 1 esitettyjen tuloksien lisäksi tutkimuksen aikana suoritettiin suuremman mittakaavan simulaatio, jossa SAR-kuva muodostettiin 10 km X 10 km kokoisesta alueesta 10 cm erottelukyvulla molemmissa ulottuvuuksissa. Käyttämällä laskentaa 2,7 GHz tuplaydinprosessorilla ja 10 gigatavun keskusmuistilla varustettua tietokonetta SAR-laskentaa täsmällisellä takaisinprojektiio-algoritmilla kuluisi noin 10 vuotta. Nopeilla takaisinprojektiioalgoritmeilla laskenta-aika on noin 2-14 päivää, riippuen siitä kuinka hyvälaatuinen tulos halutaan. Tämän kokeen perusteella voidaan todeta, että nykylaskentateholla reaaliaikainen kuvanmuodostus lentävän aluksen kyydissä olevilla laskentaresursseilla ei vielä ole järkevästi toteutettavissa.

5. Loppupäätelmät

Monikanavaista vastaanottoa hyödyntävä systeemi parantaa SAR-tutkan toimintaa usealla eri tavalla. Koska yhdestä lähetetyistä pulssista saadaan useita vastaanotettuja näytteitä synteettisen apertuurin suunnassa, voidaan lähettimelle käyttää matalaa pulssintoistotaajuutta. Tämä mahdollistaa hyvin suuren yksikäsitteisen etäisyysikkunan, jonka ansioista voidaan laskea SAR-kuva suuresta kuva-alueesta korkealla erottelukyvulla ilman monikäsitteisyysongelmia. Koska lähetetyn signaalin energiaa kerätään talteen usealla erillisellä antennielementillä ja vastaanottokanavalla, luonnollisesti myös lasketun SAR-kuvan signaali-kohina-suhde paranee.

Koska yksittäisen antennielementin tulee valaista suuri alue (sivuttaissuunnassa korkean erottelukyvyn saavuttamiseksi ja etäisyysuunnassa suuren kuva-alueen saavuttamiseksi), on se kooltaan hyvin pieni. Lisäksi, koska lähettimelle voidaan käyttää matalaa pulssintoistotaajuutta ja yksinkertaista aaltomuotoa, on myös sen toteutus yksinkertainen. Edellä mainituista syistä johtuen yksittäiseltä antennielementiltä ja vastaanottokanavalta ei vaadita samanlaista herkkyyttä kuin yksikanavaisen systeemin tapauksessa. Yhdessä nämä seikat tarkoittavat sitä, että yksittäisen elementin ja kanavan toteutus tulee hyvin yksinkertaiseksi ja edulliseksi. Kuitenkin on otettava huomioon, että näitä yksinkertaisia elementtejä ja kanavia tarvitaan useita, jolloin kokonaiskustannuksessa ei välttämättä



saavuteta kovin suurta etua. Lisäksi usean rinnakkaisen ja koherentin vastaanottokanavan toteutus sisältää erilaisia haasteita kuin yksikanavaisen systeemin toteutus, esimerkiksi digitoitujen näytteiden suuremman määrän osalta.

Häirinnän väistämiseen monikanavainen SAR-järjestelmä tarjoaa etua digitaalisesti muodostettavan adaptiivisen vaimennuksen osalta. Se perustuu elementtipainojen säätämiseen kuvanmuodostuksessa siten, että tietyistä suunnasta havaitun voimakkaan signaalin vaikutus saadaan vaimenemaan koko kuvatulla alueella.

Eräs merkittävä tutkitun monikanavaisen systeemin etu on siinä, että yhä suurempi osa SAR-tutkan toiminnallisuudesta siirtyy laskenta-algoritmeihin ja tietokoneohjelmistoihin. Tämä lisää merkittävästi systeemin joustavuutta, sillä uudelleenkonfiguroinnit ja päivitysten tekeminen tulevat huomattavasti helpommaksi. Tarkoituksena on siis pitkälti korvata aiemmin käytössä olleita analogisia komponentteja viemällä digitaalinen rajapinta yhä lähemmäksi antennia. Pääsemällä eroon analogisista komponenteista säästetään myös tehonkulutuksessa. Myös nämä asiat laskevat systeemin kokonaiskustannuksia.

SAR-tekniikassa on tällä hetkellä käynnissä kilpajuoksu kohti parempaa erottelukykyä. Sotilaallisesta näkökulmasta SAR on yksi komponentti tilannekuvan muodostamisessa. Parempi erottelukyky entistä suuremmalta kuva-alueelta parantaa tilannekuvaa. Tässä tutkimuksessa ehdotetut ja sovelletut menetelmät mahdollistavat korkean erottelukyvyn ja suuren kuva-alueen yhdistämisen realistisilla kokonaiskustannuksilla ja laskentateholla lähitulevaisuudessa. Lisäksi tulokset tukevat mahdollista kotimaista SAR-tuotekehitystä, ovat avuksi mahdollisessa SAR-järjestelmähankinnassa ja SAR-datan käsittelyssä.

Mahdollinen jatkotutkimusaihe on SAR-laskennan kehittäminen hajautetulle antenniryhmälle. Lähetin- ja vastaanotinantennien hajauttaminen on erityisesti satelliittien kannalta järkevää avaruusromun ja muiden toimintaepävarmuuksien takia. Tällöin yksittäisen satelliitin tuhoutuminen ei lamautta koko järjestelmän toimintaa. Hajautetun antenniryhmän tapauksessa näytteenottovaatimusten analysointi ja SAR-laskenta on haastavampaa kuin saman aluksen kyydissä olevan antenniryhmän tapauksessa. Tämä tutkimus tarjoaa kuitenkin hyvän pohjan tähän uuteen tilanteeseen vaadittaville yleistyksille. Lisäksi mielenkiintoinen jatkotutkimuksen aihe on SAR-kuvan muodostaminen kolmessa ulottuvuudessa. Tämä onnistuu kun lentorataan lisätään pystysuuntainen komponentti, jolloin SAR-periaatetta voidaan soveltaa pystysuunnassa samalla tavalla kuin kaksikulotteisessa kuvantamisessa tehdään sivuttaissuunnassa. Ilmakehässä suoritettavassa SAR-kuvauksessa oleellinen osa kuvanmuodostusta on tuntemattomien liikeratavirheiden korjaaminen, sillä nykytekniikka (differentiaali-GPS ja INS-sensorit) mahdollistaa liikeradan arvioimisen noin kymmenen senttimetrin tarkkuudella. Johtuen SAR-laskennan vaihekoherentista luonteesta ja kantoaallon senttimetriluokan aallonpituudesta tämä tarkkuus ei ole riittävä, varsinkaan erittäin korkeaa erottelukykyä tavoiteltaessa. Tästä syystä oleellinen jatkotutkimuksen aihe on tuntemattomien liikeratavirheiden korjaamiseen tarvittavien algoritmien (kuten [10]) soveltaminen ja kehittäminen monikanavaiselle SAR-systeemille.

6. Tutkimuksen tuottamat tieteelliset julkaisut ja muut mahdolliset raportit

Tutkimuksen tuloksista ollaan jättämässä artikkelia arvioitavaksi IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems-lehteen: R. Vehmas et. al., "On high resolution wide-swath SAR imaging using digital beamforming on receive", *IEEE transactions on Aerospace and Electronic Systems*, to be submitted.



7. Lähdeluettelo

- [1] L. J. Cutrona, "Comparison of sonar system performance achievable using synthetic-aperture techniques with the performance achievable by more conventional means", *The Journal of the Acoustical Society of America*, 58(2), s. 336-348, elokuu 1975
- [2] A. Currie et. al., "Wide-swath SAR", *IEE Proceedings F, Radar and Signal Processing*, 139(2), s. 122-135, huhtikuu 1992
- [3] M. Younis et. al., "Digital beamforming in SAR systems", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(71), s. 1735-1739, heinäkuu 2003
- [4] G. Krieger et. al., "Multidimensional waveform encoding: A new digital beamforming technique for synthetic aperture radar remote sensing", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46(1), s. 31-46, tammikuu 2008
- [5] N. Gebert et. al., "Digital beamforming on receive: Techniques and optimization strategies for high resolution wide-swath SAR imaging", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 45(2), s. 564-592, huhtikuu 2009
- [6] A. Moreira et. al., "Tandem-L: A highly innovative bistatic SAR mission for global observation of dynamic processes on the Earth's surface", *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 3(2), s. 8-23, kesäkuu 2015
- [7] J. Jylhä et. al. "On SAR processing using pixel-wise matched kernels", in *Proceedings of the 11th European Radar Conference (EuRAD 2014)*, s. 97-100, Rooma, Italia, lokakuu 2014
- [8] A. Reigber et. al., "Very-high-resolution airborne synthetic aperture radar imaging: Signal processing and applications", *Proceedings of the IEEE*, 101(3), s. 759-783, maaliskuu 2013
- [9] L. M. H. Ulander et. al., "Synthetic-aperture radar processing using fast factorized back-projection", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 39(3), s. 760-776, heinäkuu 2003
- [10] R. Vehmas et. al. "A computationally feasible optimization approach to inverse SAR translational motion compensation", in *Proceedings of the 12th European Radar Conference (EuRAD 2015)*, s. 17-20, Pariisi, Ranska, syyskuu 2015
-