

**Lentokäyttöinen SAR Interferometria ja sen soveltaminen
korkeusmallin tiedonkeruuseen**

Maa-57.270 Fotogrammetrian seminaari

Antero Kukko

11.4.2001

Sisälllys

1. Johdanto.....	3
2. SAR-tutkan toimintaperiaate	3
2.1 Lentosuunnan erotuskyky.....	4
2.2 Lentosuuntaa vastaan kohtisuora resoluutio	5
2.3 Pulssimodulaatioista	6
2.3.1 Chirp-modulaatio.....	6
2.3.2 Deramp-modulaatio.....	6
2.3.3 Jatkuva-aaltainen modulaatio	7
2.4 SAR-Proessori	7
3. SAR kuvanmuodostus ja kuvausgeometria	7
3.1 Kuvausgeometria.....	8
3.2. Kuvanmuodostuksen virheet	10
4. Lentokäyttöinen InSAR (järjestelmän kuvaus)	11
4.1 Lentokäyttöisen InSAR:n tarkkuuksista	11
4.2 Lentoalustaisen InSAR-kuvauksen etuja.....	12
5. Korkeusmallin muodostus	12
5.1 SAR interferogrammi	12
5.2 Koherenssi.....	13
5.3 Phase unwrapping-algoritmit	13
5.4 Improved Least Squares Method.....	14
6. Kuvia.....	15
7. Termejä	17
Viitteet.....	18
URL viitteet	19

1. Johdanto

SAR -interferometriaa voidaan käyttää esimerkiksi korkeusmallien tekemiseen ja maankuoren liikkeiden seuraamiseen, esimerkiksi maanjäristyksien ennustamiseksi (differentiaalinen InSAR). SAR -interferometriä perustuu kahteen, samasta kohteesta muodostettuun SAR-kuvaan. Kuvat on otettu toisistaan poikkeavilla katselukulmilla, jolloin niiden välisen interferenssin laskeminen on mahdollista. Käyttäen kahden SAR-kuvan vaihe-eroja voidaan laskea kullekin yhteiselle pisteelle etäisyysero, joka edelleen voidaan muuttaa digitaalisesti korkeusmalliksi. Kuvaus voidaan suorittaa käyttäen joko kaksiantennista järjestelmää (dual antenna single pass interferometry), joka on useimmiten käytössä lentokonejärjestelmissä, tai lentämällä kahdesti yksiantennisella järjestelmällä (repeat pass interferometry), kuten esimerkiksi ERS-1/2 tutkasatelliittien Tandem -missio. (Mingquan, Keong Leong & Kuldip 1998, Dowman 2001, Engdahl 1998.)

Huolimatta SAR-satelliittien saavuttamasta mielenkiinnosta, lentokäyttöisellä SAR-kuvauksella on monia merkittäviä etuja satelliittijärjestelmiin verrattuna. Se on tarkempi, ilmakehän vaikutus kuvaukseen on huomattavasti pienempi ja satelliittijärjestelmien eriaikaisesta kuvauksesta (repeat-pass) johtuvat virheet poistuvat. Lisäksi GPS- ja INS-navigointilaitteiden yleistyminen lentokoneissa mahdollistaa entistä laajemman lentokäyttöisen SAR-kuvauksen hyödyntämisen ja antaa uutta tietoa järjestelmien toiminnasta. (Dowman 2001.)

2. SAR-tutkan toimintaperiaate

Synteettisen apertuurin tutka (SAR) on toimintaperiaateeltaan sivukulmatutka, jonka lentosuunnan erotuskyky perustuu kantoalustan, joko lentokoneen tai satelliitin, liikkeeseen. Lentokoneen ja maanpinnan suhteellisesta liikenopeudesta johtuen maanpinnan kohdepiste aiheuttaa lentoradan eri kohdissa lähetyspulssiin erivaiheisen kaikuvasteen. Koneen ratatietojen ja maanpinnan pisteen sijainnin perusteella voidaan jokaisen tutkan valaisualueella olevan pisteen aiheuttama vaihekomponentti määrittää radan eri kohdissa. Vastaanotetuista kaikusignaaleista voidaan vaihetiedon avulla erottaa tietyn pisteen aiheuttaman sironnan osuus. Suorittamalla vaihekorjaus näin saaduille yhden pisteen sirontakomponenteille ja summaamalla korjatut signaalit saadaan aikaan voimakas kaikuvaste. Tällä tekniikalla saadaan aikaiseksi laskennallisesti synteettinen pitkä antenni, jolloin myös lentosuunnan resoluutio saadaan hyväksi. (Hallikainen, Koivula & Tares 1999.)

Tarkastellaan kiinteätä maanpinnan pistettä ja oletetaan mittaavan lentokoneen ja pisteen välinen nopeus vakioksi. Tästä seuraa:

$$f_d = - 2V/\lambda \quad (1)$$

f_d on Doppler-taajuus. Se kertoo, kuinka nopeasti vastaanotetun signaalin vaihekulma muuttuu ajan funktiona. Negatiivinen merkki tarkoittaa, että kohde loittoneen tutkasta. (Hallikainen et al. 1999.)

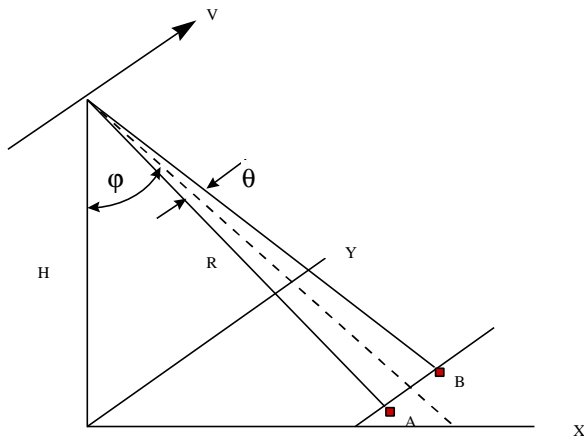
2.1 Lentosuunnan erotuskyky

Tutkan antennikeila on suunnattu kohtisuoraan lentorataan nähden ja kulmaan φ vertikaaliin nähden (Kuva 1). Pisteet A ja B ovat lentosuunnassa antennikeilan sisällä olevat pisteet, joiden aiheuttamien Doppler-taajuuksien ero pyritään ratkaisemaan. Piste B aiheuttaa kaikupulssiin Doppler-siirtymän:

$$f_b = 2V / (\lambda \sin(+\theta/2)) \quad (2)$$

Vastaavasti piste A aiheuttaa siirtymän:

$$f_a = 2V / (\lambda \sin(-\theta/2)) \quad (3)$$



Kuva 1. Lentosuunnan mittausgeometria. H lentokorkeus, l antennin pituus lentosuunnassa ja φ tutkan katselukulma. (Hallikainen et al. 1999.)

Mikäli kulma θ on pieni, on pisteiden A ja B välinen Doppler-siirtymä:

$$B_D = \Delta f = f_a - f_b = 2VX_a \cos \varphi / (H\lambda) \quad (4)$$

Tästä saadaan lentosuunnan resoluutioksi:

$$X_a = H\lambda B_D / (2V \cos \varphi) \quad (5)$$

Lentosuunnan resoluutio ei siis riipu antennin keilanleveydestä θ , vaan ainoastaan vastaanottimen kyvystä erotella Doppler-taajuuksia.

SAR -tutka lähettää pulsseja, jotka ovat yleensä pituudeltaan mikrosekuntien luokkaa. Kohteen integrointiajat $T_i = 1/B_D$ Doppler-kaistanleveyden B_D erottamiseksi ovat kuitenkin suuruudeltaan millisekunteja, joten yhdestä pulssista ei voida erottaa muutaman kymmenen Herzin Doppler-taajuuksia. Tästä syystä kohteen integrointi täytyy suorittaa lähettämällä kohteeseen useita

pulsseja niin, että kohteesta sironneet pulssit kattavat ajallisesti Doppler-taajuuden jakson. Valaisun aikana kone lentää siten matkan:

$$L = VT_i = V / B_D = H\lambda / (2 X_a \cos\varphi) \quad (6)$$

Lentosuunnan resoluutio synteettisen antennin pituuden L avulla lausuttuna:

$$X_a = H\lambda / (2L \cos\varphi) \quad (7)$$

Yhtä pistettä voidaan tarkkailla niin kauan kuin se on antennikeilan valaisualueella. Synteettinen antenni on siten korkeintaan yhtä pitkä kuin valaisualan leveys F_a maanpinnalla:

$$L_{\max} = H\lambda / (l \cos\varphi), \quad (8)$$

missä l on fyysisen antennin pituus.

Kahdesta edellisestä lausekkeesta voidaan ratkaista ideaalisen SAR-tutkan resoluutioksi:

$$X_a = l / 2, \quad (9)$$

eli puolet fyysisen antennin pituudesta l , joten resoluutio ei riipu lentokorkeudesta tai nopeudesta.

Edellinen voidaan perustella seuraavasti: Mitä kauempana antenni on maasta, sitä suurempi on antennin valaisuala maanpinnalla. Tästä johtuen kohteen integrointi-aika kasvaa, eli synteettisellä apertuurilla aikaansaatu antennikeila on pienempi, ja etäisyydestä aiheutuva resoluution heikkeneminen kompensoituu. Toisaalta mitä pienempi on tutkan fyysinen antenni, sitä suurempi on antennikeila maanpinnalla ja synteettisen antennin maksimipituus kasvaa. (Hallikainen et al. 1999.)

2.2 Lentosuuntaa vastaan kohtisuora resoluutio

Lentosuuntaa vastaan kohtisuora resoluutio saadaan tarkemmaksi käyttämällä mahdollisimman lyhyttä lähetyspulsseja sivukulmatutkan tapaan. Pienin tutkan erottama signaalin matkaero vastaa ajassa lähetyspulssein kestoa T_1 . Mikäli maanpinnalla matkan X_r päässä toisistaan olevien pisteiden A ja B aiheuttamat kaikuvasteet pulssille T_1 osuvat vastaanotossa eri etäisyysportteihin, voidaan pisteet erottaa toisistaan. Mittausgeometrian perusteella voidaan johtaa:

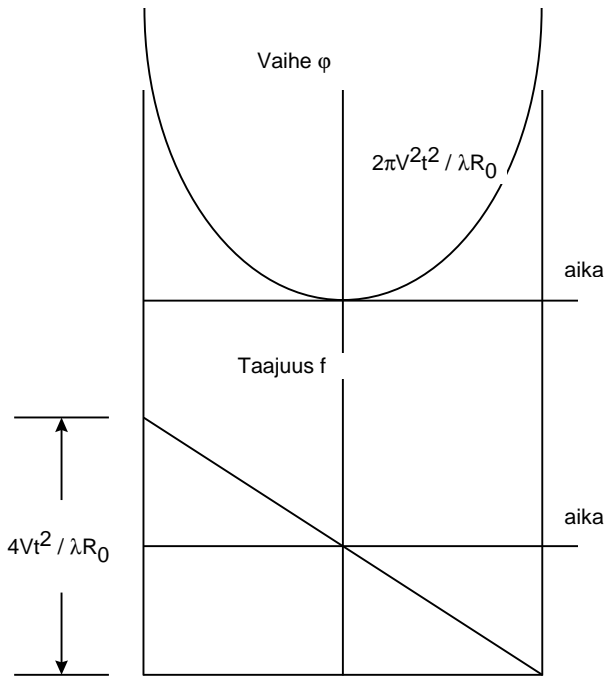
$$T_1 = 2 \Delta R / c, \quad (10)$$

missä c on valonnopeus ja ΔR etäisyysresoluutio.

Katselukulmalla φ etäisyysresoluutio ΔR vastaa maanpinnalla matkaa:

$$X_r = \Delta R / \sin\varphi = c T_1 / (2 \sin\varphi) \quad (11)$$

Edellisestä nähdään, että lyhyellä pulssilla saadaan hyvä resoluutio.



Kuva 2. Maanpinnan pisteestä sironneen signaalin taajuuden ja vaiheen muutos ajan funktiona koneen lentäessä pisteen ohi. (Hallikainen et al. 1999.)

2.3 Pulssimodulaatioista

Lähetyspulssin energia pienenee verrannollisena pulssin pituuteen ja kääntäen verrannollisena kaistanleveyteen, joten SAR-tutkan kaistanleveyden on oltava suuri. Tähän päästään pulssikompressiolla, missä lähetyspulssia taajuusmoduloidaan laajan kaistanleveyden aikaansaamiseksi. Tunnetuimmat kompressiotekniikat ovat chirp-modulaatio, deramp-modulaatio ja jatkuva-aaltainen taajuusmodulaatio. Muita harvemmin käytettyjä menetelmiä ovat diskreetti taajuuskoodaus ja digitaalinen vaihekoodaus. (Hallikainen et al. 1999.)

2.3.1 Chirp-modulaatio

Chirp-modulaatio on useimmin SAR-tutkissa käytetty pulssinkoodausmenetelmä. Chirp-modulaatiossa lähetyspulssin taajuutta f_0 muutetaan lineaarisesti pulssin keston aikana arvoon $f_0 + \Delta f$, jolloin pulssin kaistanleveys ei riipu lähetyspulssin pituudesta. Pulssin vastaanotossa puolestaan pulssi ohjataan ns. viivepiiriin, tai lähetyspulssin aaltomuodolle sovitettuun suodattimeen, jossa ensin lähetettyä taajuutta viivästetään eniten ja viimeiseksi lähetettyä taajuutta ei viivästetä lainkaan. Tulokseksi saadaan lyhyt, amplitudiltaan voimakas pulssi. Vaikka vierekkäisistä kohteista saadut kaiut menevät vastaanotossa päällekkäin, on kummankin kaiun hetkellinen taajuus ylimenoalueella samaan aikaan erisuuri. (Hallikainen et al. 1999, URL2.)

2.3.2 Deramp-modulaatio

Deramp-modulaation on lineaarinen pulssimodulaatio, kuten chirp-modulaatiokin. Pulssin vastaanotossa pulssi sekoitetaan lähetysoskillaattorin kanssa taajuus- ja vaiheominaisuuksiltaan samanlaisen paikallisoskillaattorin kanssa, jolloin etäisyysprofiili muodostuu vakiotaajuuksien

avulla. Eri etäisyyksiä vastaavia vakiotaajuusviivoja voidaan käsitellä esimerkiksi Fourier-analysein. Menetelmän etuna on nopean Fourier -muunnoksen (FFT) käyttömahdollisuus. (Hallikainen et al. 1999.)

2.3.3 Jatkuva-aaltainen modulaatio

Jatkuva-aaltainen modulaation on käytössä joissakin lentokäyttöisissä SAR-tutkissa, muutoin lähinnä sirontamittareissa. Se vastaa deramp-modulaatiota, mutta lähetysignaali on jatkuva-aaltainen. Eri etäisyyksiltä tutkaan sironneet signaalit peilautuvat taajuustasossa eritaajuisiksi komponenteiksi. (Hallikainen et al. 1999.)

2.4 SAR-Proessori

SAR-tutkan sydän on prosessori, jonka tehtävänä on erotella kaikusignaalista eri kuva-alkioiden aiheuttamat komponentit. Jotta tämä olisi mahdollista, täytyy prosessorin tallentaa jokaisen lähetetyn ja vastaanotetun signaalin amplitudi ja vaihe koko antennikeilan alueelta. Prosessorin on myös pystyttävä erottamaan vastaanotetuista signaaleista eri Doppler -vaihesiirtymät ja eri aikoina kohteesta saapuvat pulssin osat, sekä korjaamaan synteettisen antennin muodostuksessa syntyneet virheet. Jokainen synteettisen apertuurin resoluutioelementti sisältää parhaimmillaan tuhansien kaikusignaalien suodatuksen, vaihekorjauksen ja yhdistämisen. Järjestelmän monimutkaisuuden vuoksi prosessointi suoritetaan usein vasta maassa. (Hallikainen et al. 1999.)

3. SAR kuvanmuodostus ja kuvausgeometria

Kuvaava tutka on aktiivinen järjestelmä, joka valaisee kohteen tutkasäteillä. Yleensä valaistuksen suunta on poikittainen alustan kulkusuuntaan nähden. Tutkan lähettämän ja maan pinnasta takaisin heijastuneen tutkasignaalin, eli kaiun, kirkkaus (amplitudi) ja vaihe mitataan ja tallennetaan kuvan muodostamista varten. (URL1.)

Ajatellaan kuvan muodostuvan joukosta tutkahavaintoja $Z(x,y)$, missä x -koordinaatti yhtyy alustan lentosuuntaan ja y -koordinaatti valaistuksen suuntaan. Tällöin y :n arvo ja tutkasignaalin suuntainen resoluutio riippuu kaiun tuloajasta ja järjestelmän kellon tarkkuudesta (pulssin toisto- ja erotuskyky). X :n arvo ja lentosuunnan suuntainen resoluutio riippuu lentokoneen sijainnista ja tutkasäteen leveydestä (beam width). (URL1.)

SAR- järjestelmän mielenkiintoinen ominaisuus on sen koherenttisuus. Tämä edellyttää maasta takaisin antenniin heijastuneen tutkasignaalin amplitudin ja vaiheen havaitsemista sekä jälkikäteen suoritettavaa prosessointia. (URL1.) Kunkin kompleksisen SAR kuvan pikselin arvo voidaan jakaa vaihe- ja intensiteettiin seuraavasti (Enqdahl 1998):

$$Z(x,y) = I(x,y) e^{i\varphi(x,y)}, \quad (12)$$

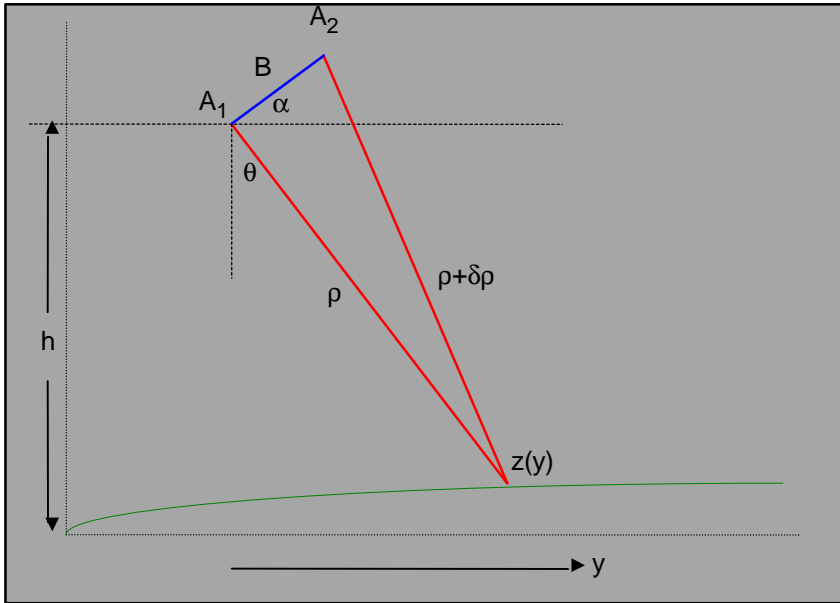
missä Z on kompleksinen pikseli

x,y	kuvakoordinaatit
I	pikselin intensiteetti
φ	pikselin vaihe
i	imaginääriyksikkö.

Yksittäisen SAR-kuvan vaihetieto on käytännössä hyödytöntä, eikä sitä siksi useinkaan ole sisällytetty SAR-intensiteettikuviin. Kuitenkin kahden tai useamman samasta kohteesta otetun kompleksisen SAR-kuvan vaihe-ero sisältää käyttökelpoista tietoa, olettaen kuitenkin, että kuvat on otettu hieman eri paikoista. (Enqdahl 1998.) Etäisyseroja (differential range) laskettaessa käytetään kahden tai useamman kuvan vaihehavaintoja. Kohdepisteen topografinen korkeus voidaan estimoida kahden antennin havaitsemien etäisyyksien erotuksen avulla. Vaihe-ero riippuu sekä kuvausgeometriasta, että kohdepisteen korkeudesta referenssipinnan suhteen. Mikäli katselugeometria (viewing geometry) tunnetaan riittävän tarkasti, voidaan kohdepisteen korkeus ratkaista vaihe-eron avulla, olettaen että aallonpituuksien lukumäärä (kokonaisluku) voidaan luotettavasti ratkaista. Tähän on kehitetty erilaisia phase-unwrapping-menetelmiä, mutta täysin toimivaa ratkaisua ei ole vielä löydetty. (URL1).

3.1 Kuvausgeometria

Kuvassa 3 on esitetty SAR interferometrikan kuvausgeometria. Kahden antennin, A_1 ja A_2 , välinen kantavektori on pituudeltaan B ja sen suuntakulma horisonttiin nähden on α . A_1 sijaitsee korkeudella h tunnetusta referenssipinnasta. Antennin A_1 ja kohdepisteen välinen etäisyys on ρ , ja vastaavasti antennin A_2 ja saman kohdepisteen välinen etäisyys on $\rho + \delta\rho$.



Kuva 3. SAR interferometrian kuvausgeometria. A1 ja A2 ovat samaa konetta mittaavien antennien paikat (single pass- havainnoinnissa kaksi antennia yhtä aikaa, repeat pass- havainnoissa erilliset antennit eri aikoina). (URL1, Carande, Marra, Cronin & Nagy 1998.)

Geometriasta nähdään, että:

$$z(y) = h - \rho \cos\theta, \text{ missä } \theta \text{ on tutkan katselukulma.} \quad (13)$$

Tästä saadaan edelleen

$$\begin{aligned} (\rho + \delta\rho)^2 &= \rho^2 + B^2 - 2\rho B \cos(\alpha + 90^\circ - \theta) \\ &= \rho^2 + B^2 - 2\rho B \sin(\alpha - \theta) \\ &= \rho^2 + B^2 + 2\rho B \sin(\theta - \alpha), \end{aligned} \quad (14a)$$

josta saadaan

$$\sin(\theta - \alpha) = \{(\rho + \delta\rho)^2 - \rho^2 - B^2\} / 2\rho B. \quad (14b)$$

Lopuksi saadaan kahden antennin välinen mitattu vaihe-ero $\delta\phi$:

$$\delta\phi = 2\pi \delta\rho / \lambda. \quad (15a)$$

Vaihe-ero $\delta\phi$ on suuruudeltaan $0 - 2\pi$ rad ja sen avulla voidaan ratkaista etäisyshavaintojen ero:

$$\delta\rho = \delta\phi \lambda / 2\pi. \quad (15b)$$

Aallonpituuksien kokonaislukutuntemattoman ratkaisuun tarvitaan ns. phase unwrapping-menetelmiä, jotta absoluuttinen etäisyys saadaan ratkaistua (ks. kohta 5.3).

Yhtälöt 13 - 15 yhdistämällä saadaan:

$$z(y) = h - \{[(\lambda\phi / 2\pi)^2 - B^2] / 2B \sin(\theta - \alpha) - (\lambda\phi / 2\pi)\} \cos\theta \quad (16)$$

Maaston resoluutioalkion korkeusarvoksi lasketaan esimerkiksi keskiarvo siihen osuneista havainnoista.

3.2. Kuvanmuodostuksen virheet

Korkealaatuisen SAR-kuvan saamiseksi on otettava huomioon kuvanmuodostuksessa mahdollisesti syntyvät virheet. Suurimpia virheitä aiheuttavat: antennin sivukeilat, lentokoneen liike, lähettimen tai vastaanottimen vaihevirheet, suodattimien sivukeilat, sekä ilmakehä, jonka vaikutus lentoalustaisilla SAR-tutkilla on tosin käytännössä pieni matalan lentokorkeuden vuoksi. (Hallikainen et al. 1999.)

Lentokäyttöinen SAR -interferometria vaatii aina koneen liikkeen kompensoimista. Liikkeen aiheuttamia virheitä voidaan korjata esimerkiksi sovitetuilla suotimilla (matched filter). Goblirsch (1998) toteaa lentokoneen heilunnan ja huomattavien vertauskorkeuden siirtymien aiheuttavan vakavia ongelmia matalalla lentäville lentoalustaisille SAR -järjestelmille, erityisesti jos tavoitteena on korkearesoluutioinen ja tarkka korkeusmalli (Goblirsch 1998).

SAR -interferometrian kuvausgeometriasta saatavan maastopisteen topografisen korkeuden epävarmuus riippuu olennaisesti kannan B suuntakulman epävarmuudesta $\delta\alpha$:

$$\delta z = \rho \sin\theta \delta\alpha \quad (17)$$

Satelliittijärjestelmillä ρ on suuri, jolloin $\delta\alpha$ täytyy olla pieni. Esimerkiksi jos tavoitellaan 2 metrin tarkkuutta 500 km korkeudelta ja $\theta = 30^\circ$, $\delta\alpha$ ei saa olla yhtä kaarisekuntia suurempi. Lentokäyttöisen SAR -interferometrian tapauksessa ρ on luonnollisesti pienempi, jolloin muut virheet korostuvat. Virheet kannan B orientoinnissa aiheuttavat virheen absoluuttiseen korkeuteen, mutta suhteelliset korkeudet antennikeilan alueella säilyvät suurimmaksi osaksi keskenään muuttumattomina. (URL1.)

Korkearesoluutioisissa SAR kuvissa esiintyy täplämäistä kohinaa eli häilyntää (speckle noise), joka aiheutuu resoluutioalkiosta heijastuvien koherenttien tutkasäteiden vahvistavista ja vaimentavista yhdistelmistä. Häilyntä aiheuttaa SAR kuvaan rakeisuutta (Rogers & Johnston 1998), toisin sanoen tummia ja kirkkaita pisteitä. Tästä syystä häilyntä vaikeuttaa kuvan tulkintaa (Canaba, Lopès & Fjørtoft 1998).

Häilyntää pienennetään usein käyttämällä niin sanottua "multi-look" -prosessointia, missä samasta alueesta eri kaikuspektrien avulla muodostetut kuvat keskiarvoistetaan. Toinen yleinen tapa on käyttää adaptiivisia paikkatason suotimia, kuten Lee, Frost, Gamma MAP ja Kuan -suodattimet. Lisäksi on kehitetty erilaisia aallokkeisiin (wavelet) perustuvia tekniikoita. (Rogers & Johnston 1998.)

4. Lentokäyttöinen InSAR (järjestelmän kuvaus)

Lentokäyttöinen SAR -järjestelmä on useimmiten kaksiantenninen (dual antenna), jolloin päästään eroon kuvauksen eriaikaisuuden aiheuttamista ongelmista ja virhelähteistä, kuten kohteen muuttuminen ja kannan määrtymiseen liittyvät epävarmuudet. Samanaikainen tiedonkeruu mahdollistaa havaittujen signaalien yhdistämisen ja prosessoinnin korkeusmalliksi (Carande et al. 1998). SAR interferometriian vaatimat lentokoneen ratatiedot kerätään DGPS ja INS navigointijärjestelmän avulla.

Venezuelassa lentokäyttöistä single-pass -periaatteella toimivaa InSAR:ia on sovellettu topografiseen kartoitukseen ja digitaalisen korkeusmallin luomiseen. Kartoituksessa käytettiin AeroSensingin AeS-1 cross-track SAR-tutkaa, joka toimii X-kaistalla ja jonka interferometrinen kanta (baseline, katso kuva 3) on 0.59 metriä sekä mittauskulma välillä 20°-67°. Kuvaukset suoritettiin n. 7800 metrin korkeudelta. Lentokoneen ratatiedot kerättiin differentiaalisella GPS:llä ja Applanixin INS -laitteistolla. (Ruiz, Castillo, Arbiol & Colomer 2001.) AeS -tutkia ja lentokäyttöistä InSAR -kartoitusta on esitelty AeroSensingin kotisivuilla (URL5). Samaa sensoria korkeusmallien mittaamiseen käyttää esimerkiksi sveitsiläinen sarmap (Pasquali 2000).

Kiinan tiedeakatemia käyttää L -kaistan SAR-järjestelmää tutkimuksissaan luonnonkatastrofien seuraamiseksi. Järjestelmä on asennettu Citation S/II -koneeseen, lentokorkeus vaihtelee 6000:sta-10000:een metriin ja lentonopeus on 550km/h. L-SAR järjestelmä toimii 1250MHz taajuudella HH ja VV polarisaatioilla. HH polarisaatiossa pulssi lähetetään vaakasuuntaisena värähtelynä (ensimmäinen H) ja vastaanotossa havaitaan vain vaakapolarisoituneita kaikuja (jälkimmäinen H). VV polarisaatiossa vastaava tehdään pystypolarisoiduilla signaaleilla. Lisäksi tutka voidaan tarvittaessa kääntää kuvaamaan kummalle tahansa puolelle lentosuuntaan nähden. (Guo 2000.)

4.1 Lentokäyttöisen InSAR:n tarkkuuksista

Dowman (2001), on koonnut lentokäyttöisen SAR -interferometriian tarkkuuteen vaikuttavia tekijöitä.

- InSAR -järjestelmän tarkkuus vaihtelee senttimetreistä useisiin metreihin ja on sovitettavissa kulloiseenkin sovellukseen.
- Tarkkuus riippuu maastotyypistä ja peitteisyydestä.
- Kumpuileva maasto aiheuttaa aukkoja tutkan varjoalueille, samoin kuin huono koherenssi. (Dowman 2001.)

Lisäksi Brüggemann & de Lange (2001) ovat vertailleet laserskannerin ja InSAR:n avulla tuotettuja korkeusmalleja, sekä niiden tarkkuutta perinteisin menetelmin (GPS ja takymetri) mitattuihin korkeuspisteisiin verrattuna. InSAR -korkeusmallin ja korkeuspisteiden väliseksi systemaattiseksi korkeusvirheeksi saatiin $\Delta h = 12$ cm ja keskihajonnaksi $\sigma_{\Delta h} = 75$ cm. Poistamalla 5% vieraista havainnoista (outlier, vieras havainto (Laininen)) tulokset paranivat arvoihin $\Delta h = 7$ cm ja $\sigma_{\Delta h} = 37$ cm. (Brüggemann & de Lange 2001.)

4.2 Lentoalustaisen InSAR-kuvauksen etuja

Lentokäyttöinen SAR -interferometria on verrattain edullinen ja nopea tapa hankkia aineistoa digitaalista korkeusmallia varten. Tutkakuvauksella voidaan kattaa laajoja alueilta. Lentokäyttöisissä järjestelmissä on usemmiten käytössä kaksiantennien tutka, jolloin kohteesta saadaan samanaikaiset havainnot molemmille interferogrammin muodostamiseen tarvittaville kuville. Tämä helpottaa prosessointia, parantaa interferogrammin koherenssia, ja siten korkeusmallin tarkkuutta, koska kohteen ajalliset muutokset eivät vaikuta mittaukseen. (Dowman 2001, URL1.)

5. Korkeusmallin muodostus

InSAR -prosessointi sisältää tyypillisesti kolme erillistä vaihetta: esikäsitteilyn (SAR focussing), interferometrisen prosessoinnin ja kartografisen editoinnin. Jotta tutkalla kerätty aineisto saataisiin SAR interferometriaan sopivaan muotoon, täytyy se ensin prosessoida käyttäen apuna lennon aikana kerättyjä navigointitietoja (DGPS ja INS). SAR -prosessoinnin tärkein ominaisuus on sen kyky käsitellä vaihetietoa, jonka täytyy säilyä prosessoinnista huolimatta, koska se vaikuttaa suoraan tuotetun korkeusmallin laatuun. Korkeusmallin tarkkuuteen vaikuttavat voimakkaasti myös navigointitiedon oikeellisuus. Varsinkin GPS tukiaseman näkyvyys on tärkeää. (Ruiz et al. 2001). Lisäksi esiprosessoinnissa täytyy huomioida lentosuunnan normaalin ja antennikeilan keskuksen välinen kulma, toisin sanoen antennikeilan poikkeama suorasta kulmasta lentosuuntaan nähden. Poikkeama aiheuttaa vaiheliukuman (phase ramp) keilan suunnassa. (Bara, Scheber, Broquetas & Moreira 2000, URL2.)

5.1 SAR interferogrammi

SAR interferogrammi muodostetaan kahdesta kompleksisesta SAR-kuvasta kertomalla ensimmäinen kuva toisen kuvan kompleksikonjugaatilla. Interferenssikuvion tuottamiseksi (pattern, fringe) kuvat täytyy rekisteröidä osapikselin tarkkuudella (co-register, sub-pixel accuracy). (URL3.) Riittäväällä tarkkuudella rekisteröidyt kuvat kerrotaan pikseleittäin seuraavasti:

$$\mathbf{Z}_{\text{int}} = \mathbf{Z}_1 \mathbf{Z}_2^* = \mathbf{I}_1 \mathbf{I}_2 e^{i(\varphi_1 - \varphi_2)} = \mathbf{I}_{\text{int}} e^{i\varphi_{\text{int}}}, \quad (18)$$

missä \mathbf{Z}_{int} on SAR interferogrammi

$\mathbf{Z}_1, \mathbf{Z}_2$ kompleksisia SAR-kuvia

$\mathbf{I}_1, \mathbf{I}_2$ SAR intensiteettikuvia

φ_1, φ_2 SAR vaihekuvia

\mathbf{I}_{int} interferometrinen intensiteetti

φ_{int} interferometrinen vaihe

Yhtälön (18) tarkastelu osoittaa, että interferogrammin intensiteetti \mathbf{I}_{int} on kahden intensiteettikuvan tulo ja interferometrinen vaihe φ_{int} on vaihekuvien erotus (Engdahl 1998.)

Digitaalinen korkeusmalli saadaan muodostettua interferometrisella prosessoinnilla. Matalan koherenssin alueilla vaiheen purku (phase unwrapping) on hankalaa, ja vaatii usein manuaalista käsittelyä. Vaiheen rekonstruoinnin jälkeen vaihepurettu (phase unwrapped) suhteelliset vaiheet täytyy muuntaa absoluuttisiksi, jotta georekisteröity digitaalinen korkeusmalli saadaan aikaiseksi. (Ruiz et al. 2001.) Seuraavissa kappaleissa perehdytään koherenssiin, ja tutustutaan phase unwrapping'in peruseriaatteisiin.

5.2 Koherenssi

SAR-tutkan kaikusignaaliit ovat koherentteja mikäli niistä voidaan mitata amplitudi ja vaihe. Koherentit kaiut korreloivat keskenään mikäli ne esittävät lähes samanlaista vuorovaikutusta tutkasäteitä sirottavan kohteen (scatterer) kanssa. SAR-kuvien koherenttisuus näkyy myös niin sanottuna häilyntänä (speckle), joka toistuu samanlaisena interferoivilla kuvilla. (Engdahl 1998.) Koherenssi on toisiaan vastaavien signaalien korrelaation eli yhtenevyyden mitta, ja se saa arvoja väliltä]0, 1[(URL2).

Koherenssin avulla voidaan mitata kvantitatiivisesti SAR interferogrammin käyttökelpoisuutta. Kun koherenssi on korkea, häilyntäkuviot interferoivilla SAR-kuvilla ovat samanlaiset, kun taas pieni koherenssi osoittaa suurta vaihekohinan määrää. Koherenssi voidaan esittää signaali-kohina -suhteen (SNR) funktiona seuraavasti:

$$\gamma = 1 / (1 + \text{SNR}^{-1}) \quad (19)$$

Mikäli koherenssi on pieni (esim. < 0.3 Ruiz et al. 2001), interferogrammi voi olla käytännön interferometrikan kannalta käyttökelvoton. Korrelaation heikkenemistä aiheuttavia virhelähteitä ovat esimerkiksi kohteen ajalliset muutokset tutkan aiheuttama lämpökohina ja kohteen kiertyminen tutkan katselukulman suhteen. (Engdahl 1998, URL3.)

5.3 Phase unwrapping-algoritmit

Interferogrammin vaihetieto, joka liittyy suoraan kohdepisteen topografiaan, on tunnettu ainoastaan 2π jakojäännöksenä (mod 2π) todellisesta aallonpituuksien kokonaislukumäärästä. Siksi kunkin pisteen topografisen korkeuden laskemiseksi on vaihemittauksiin lisättävä oikea määrä 2π vaihesyklejä. Kertoimien määrittäystä kutsutaan vaiheen purkamiseksi (phase unwrapping). (URL2.)

Phase unwrapping käsittää kaksi vaihetta. Esimmäinen on interferogrammin vaihegradienttien estimointi joko käyttämällä useita kuvia (multi look) ja vaihe-eroja tai estimoimalla paikallisia vaihekuvioiden (fringe) taajuuksia. Toinen vaihe on estimoitujen gradienttien integrointi, jolloin päädytään vaihepurettuun vaihepintaan. Phase unwrapping -menetelmiä voidaan parantaa, käyttämällä matalaresoluutioista vaihepintaa, esimerkiksi eri taajuuksilla mitattua, jo ratkaistua vaihepintaa (Davidson & Bamler 1999.)

5.4 Improved Least Squares Method

Seuraavassa esitellään lyhyesti parannettu pienimmän neliösumman (Improved Least-Squares Method, ILSM) menetelmä (Mingquan et al. 1998), joka on kehitetty yleisesti käytetystä pienimmän neliösumman menetelmästä liittämällä siihen normalisointi (regularisation).

Mitattu vaihe φ_{ij}^m on määritelty suorakulmaisessa $M \times N$ gridissä, missä $0 \leq i \leq M$ ja $0 \leq j \leq N$.

Mitatun vaihetiedon osittaisderivaatat on määritelty rivi- ja sarake-eroiksi:

$$f_{ij}^x = \varphi_{ij}^m - \varphi_{i, j+1}^m \quad \text{ja} \quad f_{ij}^y = \varphi_{ij}^m - \varphi_{i+1, j}^m \quad (20)$$

Etsitään unwrapped -ratkaisua φ_{ij} minimoimalla kustannusfunktiota, joka on mitatun ja puretun (unwrapped) vaiheen diskreettien osittaisderivaattojen neliöllisten erojen summa. Tähän lisätään tasaisuusehto (smoothness constraint), eli toinen summaustermi:

$$J = \sum w_{ij}^f [(\varphi_{ij} - \varphi_{i, j+1} - f_{ij}^x)^2 + (\varphi_{ij} - \varphi_{i+1, j} - f_{ij}^y)^2] \\ + \sum w_{ij}^s [(\varphi_{ij} - \varphi_{i, j+1})^2 + (\varphi_{ij} - \varphi_{i+1, j})^2], \quad (21)$$

missä w_{ij}^f ja w_{ij}^s ovat φ_{ij} :n painokertoimet. w_{ij}^f ja w_{ij}^s suhteellinen suuruus määrittävät ratkaisun tasaisuuden. Painotetut funktiot valitaan kahden kompleksisen SAR-kuvan, jotka muodostavat InSAR-kuvan, korrelaatiokerroimen perusteella. Mitä suurempi korrelaatiokerroin on, sitä suurempi on kerroin w_{ij}^f . Differentioimalla kustannusfunktio φ_{ij} suhteen ja asettamalla yhtälö nolaksi saadaan:

$$(2 w_{ij}^f + w_{i, j-1}^f + w_{i-1, j}^f + 2 w_{ij}^s + w_{i, j-1}^s + w_{i-1, j}^s) \varphi_{ij} \\ - (w_{ij}^f + w_{ij}^s) \varphi_{i, j+1} - (w_{ij}^f - w_{ij}^s) \varphi_{i+1, j} \\ - (w_{i, j-1}^f + w_{i, j-1}^s) \varphi_{i, j-1} - (w_{i-1, j}^f + w_{i-1, j}^s) \varphi_{i-1, j} = \rho_{ij}, \quad (22)$$

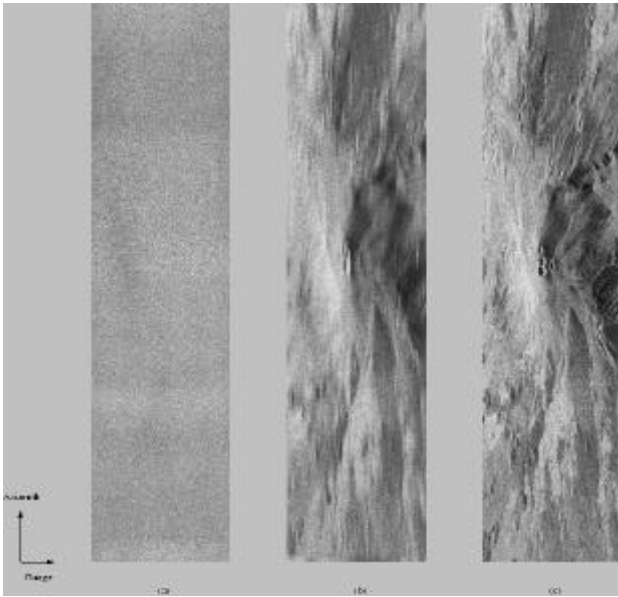
missä

$$\rho_{ij} = w_{ij}^f (f_{ij}^x + f_{ij}^y) - w_{i, j-1}^f f_{i, j-1}^x - w_{i-1, j}^f f_{i-1, j}^y \quad (23)$$

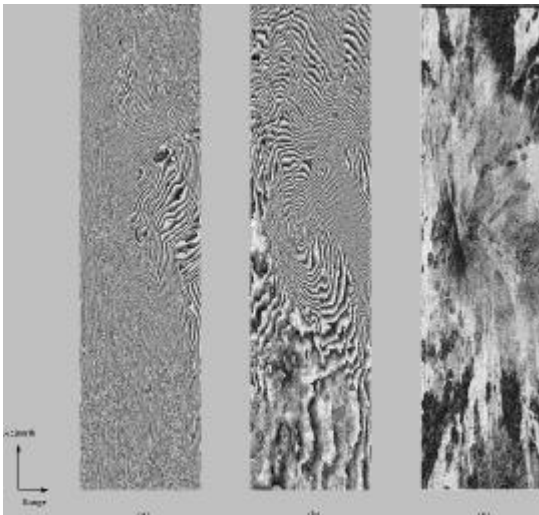
Yhtälöt ratkaistaan käyttäen Newtonin iteraatiota Gauss-Seibelin relaksaation pätiessä. Iteroinnin konvergoitumista voidaan nopeuttaa käyttämällä useampia resoluutiopintoja.

Muita phase unwrapping -algoritmeja on kuvailtu seuraavissa: Davidson et al. (1999), Mori ja Rapaccini (1998), Fornaro ja Rossi (1998), Flynn (1998) sekä Eineder, Hubik ja Milcke (1998).

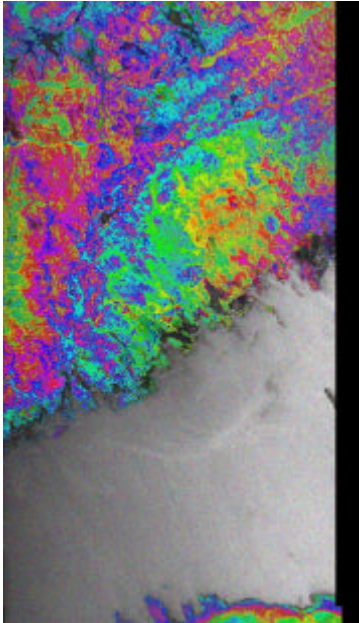
6. Kuvia



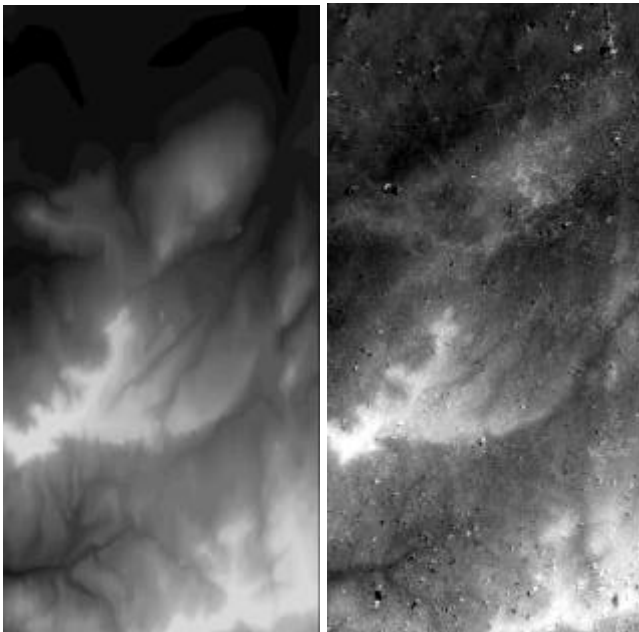
Kuva 4. SAR-kuvan muodostus. (a) kompressoimaton data, (b) etäisyyskompressoitu ja (c) valmis data. Kuvan koko on 4096 näytettä atsimuutin ja 1024 näytettä etäisyysuunnassa (range direction) (URL3).



Kuva 5. InSAR-kuvan prosessointivaiheet. (a) Interferogrammi, (b) Interferogrammi Flat-Earth Phase Removal'n jälkeen, (c) Inferometrinen koherenssi. (URL3).



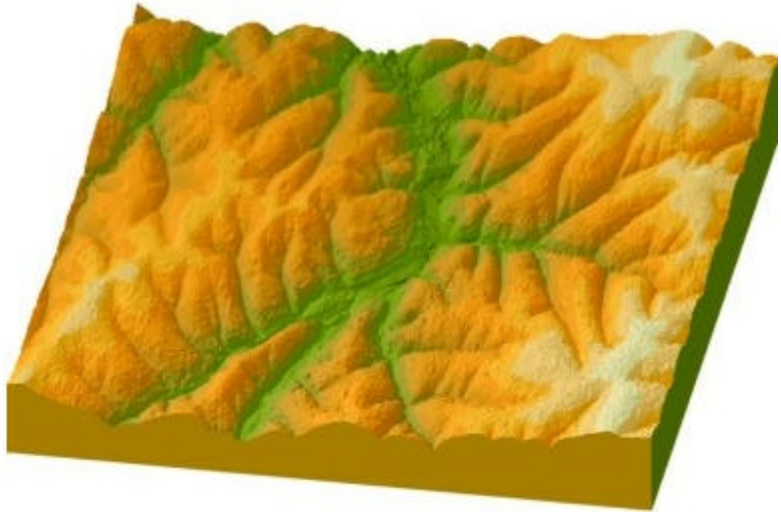
Kuva 6. ERS interferogrammi Suomen etelärannikolta. Kukin värijakso (fringe) kuvaa satelliittigeometrian perusteella mitattua maanpinnan korkeuden muuttumista (URL4).



Kuva 7. NGI DEM (Belgia) ja ERS Tanden kuvaparista muodostettu InSAR DEM.

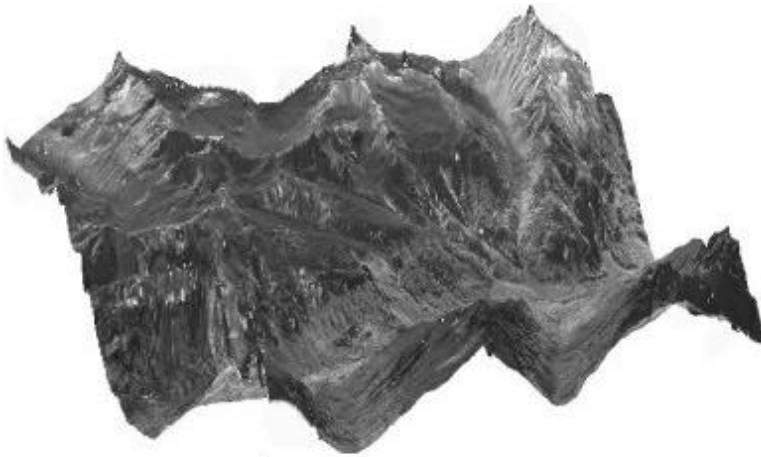


SAR-ortho-image of an area of São Francisco, Brasil produced from X-band radar data acquired by our AeS-1 instrument; the geometric resolution is 0.5 m.

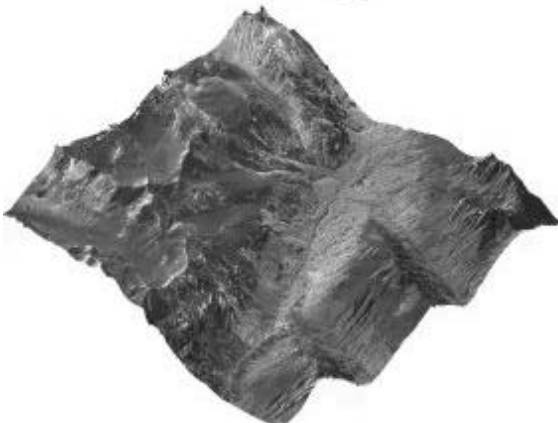


The associated DEM of the same area of São Francisco with a height accuracy of 25 cm.

Kuva 8. Lähde: AeroSensing GmbH (URL5).



Panoramic view from three different directions of part of the high mountains (Alps, Galtuer, Austria) produced from X-Band radar data acquired by our AeS-1 instrument; the height accuracy is 2 m.



Kuva 8. Lähde: AeroSensing GmbH (URL5).

7. Termejä

SAR interferometriaan liittyviä termejä on määritelty esimerkiksi (URL2).

Viitteet

Bara, M., Scheber, R., Broquetas, A. & Moreira, A. "Interferometric SAR Signal Analysis in the Presence of Squint". IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 38. No. 5, pp.2164 - 2177. Sep 2000.

Brügelmann, R. & de Lange, R. "Airborne laserscanning versus airborne InSAR - a quality comparison on DEM's". Proceedings of OEEPE Workshop on Airborne Laserscanning and Interferometric SAR for detailed Digital Elevation Models, Ed. Torlegård, K. 1-3 March 2001.

Canaba, J. C., Lopès, A. & Fjørtoft, R. "On the use of ratio likelihood and GNC for the restoration of SAR images". IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings, Volume I, pp. 16-18, 1998.

Carande, R. E., Marra, M., Cronin, D. & Nagy, P. "Automated Mapping Using Airborne INSAR Data". IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings, Volume I, pp. 360-362, 1998.

Davidson, G. W. & Bamler, R. "Multiresolution Phase Unwrapping for SAR Interferometry" IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 37.No. 1, pp.163 - 174. Jan1999.

Dowman, I. "Airborne Interferometric SAR A Review of the state of the Art and of OEEPE activities". Proceedings of OEEPE Workshop on Airborne Laserscanning and Interferometric SAR for detailed Digital Elevation Models, Ed. Torlegård, K. 1-3 March 2001.

Eineder, M., Hubik, M. & Milcke, B. "Unwrapping Large Interferograms Using the Minimum cost Flow Algorithm". IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings, Volume I, pp.83-87, 1998.

Engdahl, M. "ERS-1/2 Tandem Interferometric Investigations in Agriculture and Forestry". Report on Young Graduate Trainee in the Land and Surface Unit of the Earth Sciences Division in ESA/ESTEC, 1998.

Flynn, T. J. "Phase Unwrapping Using Discontinuity Optimization". IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings, Volume I, pp.80-82, 1998.

Fornaro, G. & Rossi, D. "Region growing strategy applied to least square phase unwrapping". IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings, Volume I, pp.68-70, 1998.

Goblirsch, W. "Motion Errors in Airborne SAR Interferometry". IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings, Volume V, pp.2668-2670, 1998.

Guo, H. "Spaceborne and Airborne SAR for Target Detection and Flood Monitoring" PE&RS Vol. 66, No: 5, pp. 611-617, May 2000.

Hallikainen, M., Koivula, J. & Tares, T. "Kaukohavainnoinnin perusteet", luentomoniste, pp. 71-82, 1999.

Laininen, P. "Sovelletun todennäköisyyslaskun kaavoja ja taulukoita". Otatieto.

Mingquan, B., Leong Keong, K. & Kuldip, S. "An Improved Least-Squares Method for INSAR Phase Unwrapping". IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings, Volume I, pp.62-64, 1998.

Mori, A. & Rapaccini, A. "An Iterative Method to Improve Phase Unwrapping of Noisy Interferograms". IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings, Volume I, pp.65-67, 1998.

Pasquali, P. "INDUSTRIAL PROFILE remote Sensing Activities at sarmap". IEEE Geoscience and Remote sensing Newsletter. Ed. Reising, S. C. Cumulative Issue #117, pp.21-25, Dec 2000.

Rogers, L. S. & Johnston, C. "SAR Image Despeckling Using the Multiscale Edge Representation". IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings, Volume I. pp. 10. 1998.

Ruiz, A., Castillo, M., Arbiol, R. & Colomer, J. L. "ISAR DEM Data Processing for Contours Generation". OEEPE Workshop on Airborne Laserscanning and Interferometric SAR for detailed Digital Elevation Models, 2001.

URL viitteet

URL1. "SAR Interferometry and Surface Change Detection". Ed. Dixon, T. H., <http://southport.jpl.nasa.gov/scienceapps/dixon/report2.html>. 4.4.2001.

URL2. "Relevant terms in INSAR". Gens, R., <http://www.images.alaska.edu/~rgens/index.html>. 9.4.2001.

URL3. Huber, R., <http://www.cosy.sbg.ac.at/~reini/diss/node2.html>. 10.4.2001.

URL4. "INSI: INSAR Sample Images". <http://earth1.esrin.esa.it/INSI/iib.html>. 10.4.2001.

URL5. "AeroSensing GmbH". <http://www.aerosensing.de/english/index.html>. 11.4.2001.

URL6. "Quality assessment of insar topographic mapping: the example of belgium". <http://styx.esrin.esa.it:8099/csl/contentf.html>. 11.4.2001.