

# **Differentiaali-interferometria ja sen soveltaminen jäätiköiden tutkimukseen**

**Esimerkkitapaus: Svartisen**

**Maa-57.290 Erikoistyö**

**Kirsi Karila 50825A**

<b>1. Johdanto</b> .....	<b>2</b>
<b>2. SAR-tutkakuvan ominaisuuksia</b> .....	<b>3</b>
2.1 Häilyntä.....	3
2.2 Layover, foreshortening ja varjot .....	3
<b>3. SAR-interferometria</b> .....	<b>5</b>
3.1 Kuvausgeometria .....	5
3.2 Prosessointi.....	6
3.3 SAR-kuvan vaihetieto.....	6
3.4 Koherenssi.....	6
3.5 Sovellukset .....	7
<b>4. Differentiaali-interferometria (DINSAR) .....</b>	<b>8</b>
4.1 DINSAR kahdella, kolmella ja neljällä kuvalla .....	8
4.2 Kaavat .....	8
4.3 Prosessointi.....	9
4.4 Rajoitukset.....	9
<b>5. Gradientti-interferometria (GINSAR).....</b>	<b>11</b>
5.1 GINSAR:n perusidea ja topogrammin muodostaminen .....	11
5.2 Kaltevuuskartan luominen.....	12
5.3 Nopeuskartan luominen .....	12
5.4 Rajoitukset.....	13
5.5 Edut.....	13
<b>6. DINSAR-kokeilu Svartisen-jäätiköllä.....</b>	<b>15</b>
6.1 Testiaineisto.....	15
6.2 Prosessointi.....	16
6.3 Tulosten arviointi.....	16
6.4 Johtopäätökset .....	17

## 1. Johdanto

Sähkömagneettisen signaalin vaihe ja voimakkuus voidaan mitata SAR-tutkalla. SAR-interferometriassa (INSAR) kohteesta kahteen eri paikoissa oleviin antenneihin takaisinsiroavien signaalien vaihe-ero lasketaan ja niistä muodostetaan interferogrammi. Interferogrammi sisältää tietoa kohteen topografiasta ja kohteessa kuvien oton välillä tapahtuneesta liikkeestä. SAR-interferometrian perusteet on esitetty luvussa 3.

Maapallon jäätiköt ovat herkkiä ilmastossa tapahtuville muutoksille. Erityisesti ympäristön keskilämpötilan ja sademäärän muutokset näkyvät jäätiköissä. Napajäätiköt reagoivat muutoksiin hitaasti, mutta tilavuudeltaan pienemmät vuoristojäätiköt reagoivat jo pienen aikavälin muutoksiin. Siksi on tärkeää saada tietää niiden jäämassan liikkeistä ja muutoksista. [URL1]

Tarkka korkeusmalli alueelta on jäätiköiden tutkimuksen perusta, koska sen avulla voidaan arvioida jään liikkeitä. Usein tarkkoja topografisia karttoja jäätikköalueilta ei kuitenkaan ole saatavilla, niiden hankalan sijainnin takia. SAR-interferometrialla alueelta voidaan muodostaa kattava ja riittävän tarkka korkeusmalli. [URL1]

Differentiaali-interferometria (DINSAR) on menetelmä, jossa interferogrammista poistetaan topografian aiheuttamat vaihekuviot toisen interferogrammin tai korkeusmallin avulla, jolloin voidaan havaita kohteessa tapahtunut pienikin liike. Differentiaali-interferometrian avulla jään liikkeitä voidaan mitata suoraan satelliittikuvilta ilman maanpinnalla olevia tukipisteitä ja ilman entuudestaan tunnettua korkeusmallia. DINSAR-tekniikkaa käsittelee luku 4 ja sen sovelluksesta Norjassa sijaitsevan Svartisen-jäätikön liikkeen havaitsemiseen kerrotaan luvussa 6.

Gradientti-interferometria (GINSAR) on kehitetty vaihtoehdoksi differentiaali-interferometrialle jäätiköiden liikkeen mittaamiseen. Tekniikassa käytetään interferometrisen vaiheen gradientteja kohteen kaltevuuskarttojen tuottamiseen. Vähentämällä kaltevuuskarttoja toisistaan voidaan muodostaa kohteen liikekartta. Menetelmä on esitetty luvussa 5.

## 2. SAR-tutkakuvan ominaisuuksia

SAR eli synteettisen apertuurin tutka (*Synthetic Aperture Radar*) on kuvaava tutka, joka pystyy tuottamaan kuvia hyvällä spatiaalisella erotuskyvyllä hyödyntämällä kuvausalustan liikettä signaalin prosessoinnissa. SAR-tutka lähettää kohteeseen mikroaaltopulsseja ja mittaa takaisin sironneen säteilyn amplitudia ja vaihetta. Kuvausalustana toimii yleensä lentokone tai satelliitti. Lentosuuntaa kutsutaan atsimuuttisuunnaksi (*azimuth direction*) ja lentosuuntaa vastaan kohtisuoraa suuntaa etäisyysuunnaksi (*range direction*).

Perinteinen tutkakuva sisältää vain tietoa takaisin sironneen pulssin voimakkuudesta eli intensiteetistä. SAR-tutkan kuvaussysteemin tärkein ominaisuus on sen koherenttisuus eli takaisin sironneesta pulssista tallennetaan sekä amplitudi- että vaihetieto. Kompleksisen SAR-kuvan pikselin arvo voidaan ilmaista napakoordinaateissa seuraavasti:

$$Z(x, y) = I(x, y)e^{i\phi(x, y)}, \quad (1)$$

missä  $I$  on pikselin intensiteetti,  $\phi$  on vaihe ja  $(x, y)$  kuvakoordinaatit. X-koordinaatti yhtyy lentosuuntaan ja y-koordinaatti kuvaussuuntaan. [1]

### 2.1 Häilyntä (*speckle noise*)

Koska yhden pikselin alueella kohteessa on monta erilaista ja eri asennoissa olevaa sirottajaa, tulee pikselin arvoksi näiden takaisinsironnan summa. Häilyntä näkyy amplitudikuvilla suola-ja-pippuri -kuviona. Keskiarvoistamalla pikseleitä voidaan saada kullekin kohdetyypille ominainen sironna. Häilyntä tekee myös yhden pikselin vaiheesta käytännössä satunnaisen.

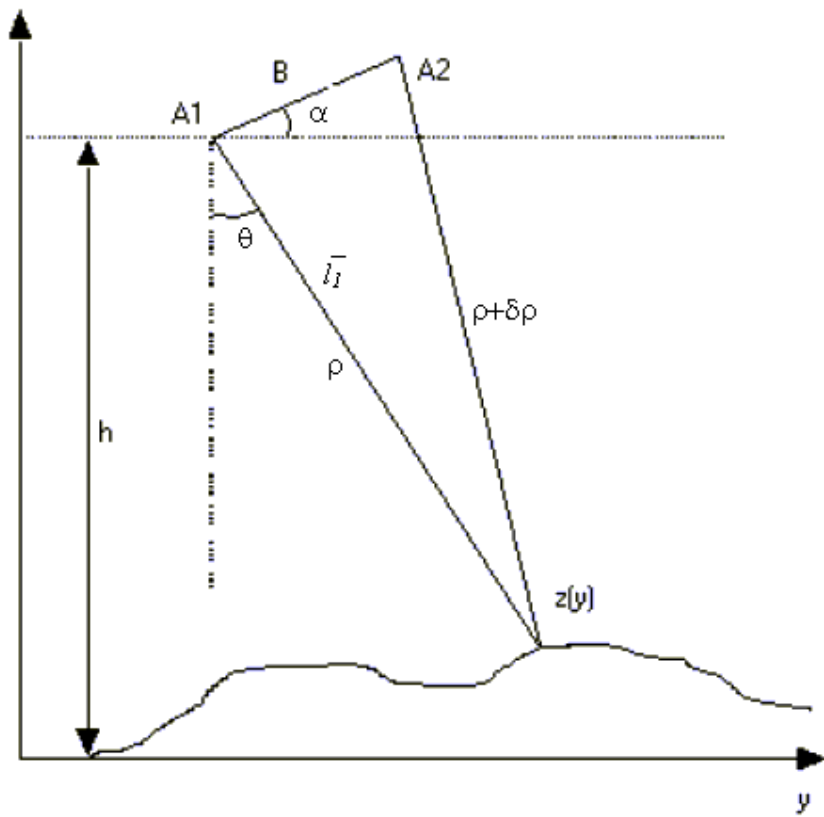
### 2.2 Layover, foreshortening ja varjot

SAR-tutka mittaa etäisyyden tutkan antennista kohteeseen (*slant-range distance*). Tämä etäisyys voidaan muuttaa kohteiden väliseksi maaetäisyydeksi (*ground range*). Etäisyyden mittaustavasta johtuen maanpinnan korkeusvaihtelut aiheuttavat vääristymiä tuloksena saatavaan SAR-kuvaan.

Mitä korkeampi kohde on, sitä lähempänä se on tutkaa. Tästä johtuen tutkaan päin olevat rinteet näyttävät kuvilla todellista lyhyemmiltä (*foreshortening*) ja ovat ympäristöään kirkkaampia kuvilla, koska rinteestä heijastunut energia pakkautuu pienemmälle alueelle kuvaa. Tutkasta poispäin olevat rinteet näyttävät vastaavasti todellista pitemmiltä ja ovat tummempia.

Kun tutkaan päin olevan rinteiden kaltevuus on suurempi kuin tutkan katselukulma, kohteen huippu on lähempänä tutkaa kuin sen alaosa ja huippu kuvautuu ennen alaosaa (*layover*).

Kun tutkasta pois päin olevan rinteiden kaltevuus on suurempi kuin tutkan katselukulma, kohde ei kuvaudu kuvalle vaan jää varjoon (*shadow*), ja vastaava alue kuvalla sisältää vain kohinaa. [1]



**Kuva 1** INSAR kuvausgeometria. A1 ja A2 ovat antennit.

### 3. SAR-interferometria

Yhden SAR-kuvan vaiheinformaatio on lähes käyttökeltvotonta häilyynnän takia. SAR-interferometriassa käytetäänkin kahta samalta alueelta hieman eri kuvausalustan paikoista otettua SAR-kuvaa. Niiden vaihe-eroa voidaan käyttää hyväksi, koska niillä on samanlainen häilyntäkuvio. Vaihe-erokuvaa kutsutaan interferogrammiksi. [1]

Kuvat voidaan ottaa samanaikaisesti kahdella samalla alustalla olevalla antennilla (*single-pass INSAR*) tai lentämällä kahdesti yhdellä antennilla, kuvausalustan toistaessa likimain samaa rataa (*repeat-pass INSAR*). Topografiseen kartoitukseen suunnitellut järjestelmät perustuvat yleensä kahden antennin käyttöön, kun taas muutosten seurannassa yhden antennin järjestelmien ottamat kuvat ovat hyödyllisiä. [2]

#### 3.1 Kuvausgeometria

Kuvassa 1  $z$  on pinnan korkeus referenssipinnasta,  $B$  on kannan pituus eli antennien välinen etäisyys,  $h$  on tutkan korkeus,  $\rho$  on etäisyys maanpinnalle ja  $\theta$  on tutkan katselukulma. Etäisyys  $\rho$  tutkasta kuvapisteseen katseluvektorin  $l$  suunnassa saadaan tutkasignaalin viiveestä. Jos kuvausgeometria tunnetaan riittävällä tarkkuudella, maaston korkeus  $z$  voidaan saada seuraavasti [1]:

$$z = h - \rho \cos \theta \quad (2)$$

Kosinilauseen mukaan saadaan [1]

$$\begin{aligned} (\rho + \delta\rho)^2 &= \rho^2 + B^2 - 2\rho B \cos(\theta + 90^\circ - \alpha) \\ &= \rho^2 + B^2 + 2\rho B \sin(\alpha - \theta) \end{aligned} \quad (3)$$

Järjestämällä termit uudelleen saadaan [1]

$$\sin(\alpha - \theta) = \frac{[(\rho + \delta\rho)^2 - \rho^2 - B^2]}{2\rho B} \quad (4)$$

Mitattu vaihe-ero  $\phi$  antennien välillä on suoraan verrannollinen etäisyyseroon. Etäisyysero  $\delta\rho$  repeat-pass -tapauksessa [1]

$$\delta\rho = \frac{\lambda\phi}{4\pi} \quad (5)$$

missä  $\lambda$  on tutkan aallonpituus.

Kun oletetaan että vaihe-ero johtuu pelkästä maaston korkeusvaihtelusta, voidaan yhdistämällä yhtälöt (2), (4) ja (5) korkeus  $z$  ilmaista havaitun vaiheen ja järjestelmän parametrien funktiona [1]:

$$z = h - \frac{\left[\left(\frac{\lambda\phi}{4\pi}\right)^2 - B^2\right] \cos \theta}{2B \sin(\alpha - \theta) - 2\left(\frac{\lambda\phi}{4\pi}\right)} \quad (6)$$

Tämän jälkeen korkeuden  $z$  vaihe täytyy vielä purkaa.

### 3.2 Prosessointi

Aluksi toinen kuva (slave) on sovittava osapikselin tarkkuudella yhteen toisen kuvan (master) kanssa. Slave-kuva uudelleennäytteistetään saadun muunnoksen mukaan. Tämän jälkeen kuvilla on sama geometria. Rekisteröinti täytyy suorittaa erittäin tarkasti, jotta kuvan vaihetieto säilyy muuttumattomana.

Interferogrammi muodostetaan kertomalla toinen kompleksinen SAR-kuva toisen kuvan kompleksikonjugaatilla [1]:

$$Z_{\text{int}}(x, y) = I_1(x, y)I_2^*(x, y)e^{i(\phi_1(x, y) - \phi_2(x, y))}, \quad (7)$$

missä  $I_1$  ja  $I_2$  ovat kuvien 1 ja 2 intensiteetit ja  $\phi_1$  ja  $\phi_2$  kuvien 1 ja 2 vaiheet.

SAR-kuvissa vaihe on rajoittunut välille  $[0, 2\pi]$  ja tieto  $2\pi$ -vaihesyklien määrästä eli absoluuttisesta vaiheesta on kadonnut. Vaiheenpurku (*phase unwrapping*) on osa prosessointia ja siihen on kehitetty monia eri algoritmeja. Useimmat algoritmit yrittävät minimoida vaiheen epäjatkuvuuskohtien pituuden puretussa vaihekuvasa. Vaiheen purku on erityisen vaikeaa alueilla, joilla koherenssi on alhainen tai jos kohteessa on nopeita korkeusvaihteluja (layover, shadow). Vaiheen purkamisessa syntyneet virheet tulevat suoraan lopputuotteena saatavaan korkeusmalliin.

### 3.3 SAR-kuvan vaihetieto

Vaihe-ero ei kuitenkaan johdu pelkästään korkeusvaihteluista, vaan vaihe-ero  $\phi$  kahden pikselin välillä interferogrammissa voidaan ilmaista

$$\phi = \frac{4\pi B_n}{\lambda \rho_k \tan \theta} \Delta R + \frac{4\pi B_n}{\lambda \rho_k \sin \theta} \Delta z + \frac{4\pi}{\lambda} \Delta \eta + \frac{4\pi}{\lambda} \Delta \kappa + \Delta \Phi + n \cdot 2\pi \quad (8)$$

missä  $B_n$  on kantavektorin tutkan katselusuuntaa vastaan kohtisuora komponentti ja  $\rho_k$  on antennin ja maanpinnan pisteen välisten etäisyyksien keskiarvo. Ensimmäinen termi, jossa  $\Delta R$  on pikselien slant-range -etäisyyksien ero, johtuu SAR-kuvaussysteemin kuvausgeometriasta, ja se voidaan poistaa tasaisen maan korjauskertoimella (*flat earth compensation factor*). Toinen termi eli topografiatermi ilmaisee vaihe-eron korkeuseron  $\Delta z$  avulla. Kolmas ja neljäs termi vaikuttavat vain repeat-pass -tapauksessa. Koherentti liike kohteessa  $\Delta \eta$  aiheuttaa vaihe-eron, jonka kolmas termi sisältää. Jos ilmakehän ominaisuudet muuttuvat kuvien oton välillä, ilmakehä viivästyttää signaalia eri määrän  $\Delta \kappa$ , mikä aiheuttaa neljännen termin vaihe-eron.  $\Delta \Phi$ -termi liittyy kohteen fysikaalisiin ominaisuuksiin ja mitattujen vaihe-erojen epätarkkuuteen. Viimeinen termi sisältää vaiheen kokonaislukutuntemattoman. [3]

### 3.4 Koherenssi

SAR-interferometriä toimii vain koherenteissa olosuhteissa, jolloin takaisin tulevat signaalit korreloivat keskenään. Kun kuvilla on hyvä koherenssi, niiden häilyntäkuviot ovat samanlaisia. Kahden signaalin tilastollista samanlaisuutta mittaa korrelaatio. Kahden kompleksisen SAR-kuvan  $Z_1$  ja  $Z_2$  koherenssi voidaan määrittää kompleksikorrelaationa [1]

$$\gamma = \frac{E[Z_1 Z_2^*]}{\sqrt{E[|Z_1|^2] E[|Z_2|^2]}}, \quad (9)$$

missä  $E[]$  on odotusarvo ja  $*$  on kompleksikonjugaatti.

Koherenssia pienentävät kohteen muuttuminen kuvienoton välillä (*temporal decorrelation*), laitteiston lämpökohina (*thermal decorrelation*), kantavektorin pituuden kasvattaminen (*spatial baseline decorrelation*) ja kohteen kiertyminen tutkan katselusuuntaan nähden. Jos kantavektori on liian lyhyt, vaihe-eroista tulee liian pieniä, ja niitä ei pystytä havaitsemaan. Toisaalta, jos kantavektori on liian pitkä, spatiaalinen dekorrelaatio korruptoi signaalin.

Temporaalisen dekorrelaation määrä riippuu kohdealueen maaperä- ja kasvillisuustyypistä sekä sään muutoksesta kuvien oton välillä. Jos kohde pysyy muuttumattomana, interferometria on mahdollista hyvinkin pitkällä kuvanottovälillä. Pitkällä tutkan aallonpituudella temporaalinen dekorrelaatio on pienempää kuin lyhyemmällä aallonpituudella. [1]

### 3.5 Sovellukset

SAR-interferometrialla voidaan tuottaa korkeusmalli nopeasti kaikissa sääolosuhteissa vuorokauden ajasta riippumatta. Erityisesti alueilla, joilta on vaikea löytää tunnistettavia piirteitä (tukipisteitä), kuten jäätiköt, SAR-interferometria on stereoskooppisia menetelmiä parempi vaihtoehto digitaalisen korkeusmallin muodostukseen. Lisäksi kuvien koherenssia voidaan käyttää hyväksi maankäytön luokittelussa ja metsätaloudessa. [6]

## 4. Differentiaali-interferometriä (DINSAR)

Differentiaali-interferometriassa tavoitteena on yleensä maanpinnan deformaation mittaaminen käyttäen repeat-pass -interferometriä. Koska liikkeen aiheuttamat muutokset tulevat suoraan interferogrammiin riippumatta kuvauskannasta, voidaan tapahtunut muutos mitata tutkan aallonpituuden murto-osan tarkkuudella. Käyttämällä usean SAR-kuvan vaihetietoa voidaan mitata kohteessa tapahtuneet pienetkin (~1 mm) muutokset [4]. Differentiaali-interferometriän sovelluksia ovat esimerkiksi maan vajoamisen tai nousun tutkiminen, maanjäristysten aiheuttamien siirtymien ja tulivuorten muodon muuttumisen mittaaminen ja jäätiköiden dynamiikan tutkiminen. [5]

Interferogrammissa on tietoa sekä topografiasta että kohteessa kuvaparin kuvien oton välisenä aikana tapahtuneesta liikkeestä. Kun halutaan tietoa vain liikkeestä, topografian aiheuttamat interferenssikäyrät (*fringe*) on erotettava liikkeen aiheuttamista käyristä, eli vaiheen topografinen komponentti on poistettava interferogrammista. Topografinen vaihe voidaan saada olemassa olevasta korkeusmallista muuntamalla se interferogrammin muotoon (*two-pass DINSAR*) tai toisesta interferogrammista, joka sisältää vain topografisen vaiheen, eli kohteessa ei ole tapahtunut muutoksia kuvien oton välillä.

### 4.1 DINSAR kahdella, kolmella ja neljällä kuvalla

Kahta kuvaa käytettäessä (*two-pass DINSAR*) tarvitaan olemassa oleva digitaalinen korkeusmalli, joka muunnetaan tutkan koordinaatistoon ja edelleen interferogrammiksi. Tästä interferogrammista saatava topografinen vaihe vähennetään kuvaparin muodostamasta interferogrammista. Menetelmä on hyvä vaihtoehto silloin, kun alueelta on saatavissa riittävän tarkka korkeusmalli. Korkeusmallin virheet siirtyvät tuloksena saatavaan muutoskarttaan. [6]

Kolmen kuvan DINSAR (*three-pass DINSAR*) perustuu kuvien valitsemiseen siten, että kahden ensimmäisen kuvan välillä ei muutoksia ole tapahtunut (topografinen pari), ja muutokset ovat tapahtuneet toisen ja kolmannen kuvanoton välillä (deformaatiopari). Topografisella parilla kantavektorin pituuden tulisi olla sopiva topografisten vaihteluiden havaitsemiseen eli riittävän pitkä. Sen tulisi olla pidempi kuin deformaatioparin kohtisuorakanta (*normal baseline*), jotta se olisi deformaatioparia herkempi korkeusvaihteluille. Lisäksi topografisen parin koherenssin on oltava hyvä. Muut kuvat sovitetaan kuvaparien yhteiselle kuvalle. Yhteensovitusta helpottaa se, että kuvilla on valmiiksi sama projektio, orientaatio ja kuvauksesta aiheutuvat vääristymät. Koska pareilla on suuret kantavektorit, on topografisen parin kantavektori skaalattava deformaatioparin kantavektorin mukaan [6]. Kolmea kuvaa käytettäessä vältytään ulkopuolisen korkeusmallin yhteensovituksesta master-kuvan kanssa. Lisäksi korkeusmalli on varmasti ajantasainen, kunhan alueella ei ole suuria korkeusvaihteluita, jotka saattavat aiheuttaa virheitä interferometrialla tuotettuun korkeusmalliin.

Sopivia kolmikkoja on kuitenkin joskus vaikea saada, ja usein onkin helpompi saada kaksi koherenttia paria. Neljän kuvan DINSAR (*four-pass DINSAR*) perustuu kahden riippumattoman kuvaparin käyttöön. Näistä toisen oletetaan sisältävän vain vaiheen topografisen komponentin ja toisen sekä topografisen komponentin että liikkeen aiheuttaman vaihekomponentin. Topografisena parina käytetäänkin yleensä ERS1/2-tandemkuvapareja. [URL2]

### 4.2 Kaavat

Yhtälöstä (3) järjestämällä termit uudelleen ja jättämällä pois  $\delta\rho^2$ , joka on pieni, saadaan [URL1]

$$\delta\rho \approx B \sin(\theta - \alpha) + \frac{B^2}{2\rho} \quad (10)$$

Kuvattaessa satelliitista, voidaan katselusuunnat olettaa likimain yhdensuuntaisiksi ja edellisen yhtälön toinen termi voidaan unohtaa, jolloin saadaan [URL1]

$$\delta\rho \approx B \sin(\theta - \alpha) \approx B_{||} \quad (11)$$

missä  $B_{||}$  on kantavektorin tutkan katselusuunnan kanssa yhdensuuntainen komponentti.

Yhdistämällä yhtälöt (5) ja (10) saadaan vaiheeksi [URL1]

$$\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} B_{||} \quad (12)$$

Toisella interferogrammilla kantavektorin pituus  $B'$  ja sen asento  $\alpha'$  ovat erisuuruiset kuin ensimmäisellä interferogrammilla, joten myös  $B'_{||}$  on erisuuruinen. Toisessa interferogrammista on topografisen vaiheen lisäksi myös siirtymästä johtuva komponentti  $\Delta\rho$  ja tämän interferogrammin vaihe on siten [URL1]

$$\varphi' = \frac{4\pi}{\lambda} (B'_{||} + \Delta\rho) \quad (13)$$

$\lambda/2$ :n mittainen siirtymä  $\Delta\rho$  tutkan katselusuunnassa, aiheuttaa yhden vaihesyklin (*fringe*) interferogrammiin.

Kun topografinen vaihe vähennetään, saadaan yhtälöistä (13) ja (11) [URL1]

$$\varphi' - \frac{B'_{||}}{B_{||}} \varphi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta\rho \quad (14)$$

Näin ollen tutkan katselusuunnan suuntainen siirtymäkomponentti  $\Delta\rho$  (*slant range change*) voidaan mitata jokaiselle pisteelle, kun tunnetaan interferogrammien vaiheet ja kuvausgeometria. [URL1]

### 4.3 Prosessointi

Differentiaali-interferogrammin luomiseksi kaksi interferogrammia täytyy sovittaa yhteen. Kolmen SAR-kuvan tapauksessa tämä tehdään käyttämällä yhtä kuvaa referenssikuvana, jolle kaksi muuta kuvaa rekisteröidään ja interpoloidaan. Neljän kuvan DINSAR vaatii rekisteröinnin ja interpoloinnin toistamisen. Aluksi kaksi interferogrammia muodostetaan erikseen ja sen jälkeen toinen interferogrammi kohdistetaan toiselle interferogrammille. [6]

Kun kaikki kuvat on oikaistu samaan ruudukkoon, topografisen parin vaihe puretaan ja skaalataan interferogrammien kantavektorien suhteen mukaan. Tämän jälkeen topografinen pari vähennetään toisesta parista, jolloin vain muutossignaali jää jäljelle. [6]

### 4.4 Rajoitukset

#### *Muutoksen suuruus*

Kuvien oton välillä tapahtunut muutos ei saa olla liian suuri, koska silloin koherenssi katoaa. Jos sirottajien (*radar scatterers*) keskinäinen asema pikselin sisällä muuttuu enemmän kuin mikä on tutkan aallonpituus, koherenssi katoaa (temporaalinen dekorrelaatio). Tällöin muutoksen suuruuden voidaan vain sanoa ylittäneen jonkin minimiarvon. Muutoksen tulisi olla koherentti muutos, joka on yhteinen usealle vierekkäiselle pikselille. Tällöin tietyn pikselin sirottajien keskinäinen asema ei ole

muuttunut merkittävästi, mutta joukko sirottajia on liikkunut ylös, alas tai sivusuunnassa korreloivalla tavalla. [URL1]

#### *Muutoksen mittakaava*

Jotta muutos voitaisiin havaita luotettavasti, muutoksen mittakaavan tulisi olla pienempi kuin interferogrammin koko. Naapuripikselien välillä tapahtuvien pienten diskreettien muutosten suuruus on helpompi määrittää, kuin tasaisten paikallisten muutosten suuruus, koska ne muistuttavat ilmakehän häiriöitä ja virheellisten ratatietojen aiheuttamaa muutosta. [URL1]

#### *Deformaatiosignaalin voimakkuus*

Lisäksi deformaatiosignaalin voimakkuuden tulee olla vähintään kaksi kertaa kohinasignaalin voimakkuus. Jos muutosta havaitaan naapuripikselien välillä, signaalin ei tarvitse olla niin voimakas kuin suuremman alueen muutosta mitattaessa. Pienellä alueella ilmakehän virheet voidaan unohtaa ja kohinaa aiheutuu vain dekorrelaatioista. Suurella alueella myös ilmakehä pitää ottaa huomioon. Ilmakehän vaikutusta voidaan vähentää käyttämällä useampia kuvia. [6]

#### *Siirtymävektorin komponentit*

GPS:llä pystytään määrittämään kolmiulotteinen siirtymävektori (*surface displacement vector*), mutta tutka pystyy mittaamaan signaalin kulkumatkan muutoksia vain katseluvektorin suunnassa (*slant-range*). Siirtymävektori kohteessa on kuitenkin kolmiulotteinen ja koostuu pohjois-, itä- ja pystykomponenteista, jotka projisoituvat tutkan katseluvektorille. SAR-interferometrian etuna GPS:n nähden on kuitenkin sen täydellinen alueellinen kattavuus harvojen havaintojen sijaan. [URL1]

Yhdistämällä kuvia nousevilta ja laskevilta ylilennoilta, voidaan kaksi kolmesta siirtymävektorin komponentista ratkaista. Jos myös kolmas komponentti halutaan ratkaista, täytyy liikkeen suunnasta tehdä oletuksia. [7,8] Esimerkiksi jäätikön liike voidaan olettaa yhdensuuntaiseksi pinnan eli korkeusmallin gradientin kanssa. Myös maahavaintoja voidaan käyttää apuna. Useissa sovelluksissa yksi (pystysuora komponentti) tai kaksi komponenttia on riittävä tulos. [6]

## 5. Gradientti-interferometria (GINSAR)

Differentiaali-interferometrialla voidaan havaita pienetkin liikkeet kohteessa kuvien huonosta resoluutiosta huolimatta. Tämä on kuitenkin mahdollista vain, jos topografian ja liikkeen vaikutukset interferogrammiin voidaan täysin erottaa toisistaan. Koska esimerkiksi jäätiköt ovat jatkuvasti liikkeessä, voi olla mahdotonta löytää paria, jossa olisi vain topografiasta aiheutuneita interferenssikäyriä (*fringe*). Jos pystytään löytämään pari, jonka kantavektorin pituus on suurin piirtein nolla, sisältää interferogrammi vain liikkeestä aiheutuneita vaihekuvioita ja koko DINSAR-menetelmää ei tarvita. Tällaisen parin löytäminen on kuitenkin erittäin harvinaista, koska koherenssin tulee myös olla riittävä. [9]

Interferometrisen signaalin käsittelyn vaikein osa on vaiheen purku. Sen lisäksi, että käytetyt algoritmit ovat erittäin monimutkaisia ja laskennallisesti raskaita, prosessi on erittäin virhealtis ja usein paikallisesti mahdoton etenkin vuoristojäätiköillä, suurien korkeusvaihteluiden (*layover* ja *varjot*) ja huomattavan kohinan takia. Lisäksi perinteisessä DINSAR-tekniikassa vaiheen purku täytyy suorittaa kahdesti, mikä johtaa virheiden kasautumiseen. Tämän takia lopputuotteiden laadusta ei usein voida mennä takuuseen. [10]

Perinteiselle differentiaali-interferometrialle onkin alettu etsiä vaihtoehtoja. Gradientti-interferometria (GINSAR) on tarkka gradientti-menetelmä, joka on kehitetty jäätiköiden pinnan mallintamiseen ja nopeuden mittaamiseen. Menetelmä perustuu interferometrisen vaiheen gradienttien laskemiseen, kaltevuuskarttojen tuottamiseen ilman interferometrisen vaiheen purkua ja kaltevuuskarttojen vähentämiseen toisistaan. [10]

### 5.1 GINSAR:n perusidea ja topogrammin muodostaminen

GINSAR-tekniikassa hyödynnetään tietoa siitä, että suurimmalle osalle pisteitä interferogrammissa purkamattoman vaiheen (*wrapped phase*) osittaisderivaatat ovat yhtä suuret kuin puretun vaiheen (*unwarpped phase*) osittaisderivaatat eli

$$\begin{aligned}\frac{\partial W\{\varphi(x, y)\}}{\partial x} &= \frac{\partial \varphi(x, y)}{\partial x}, \text{ jos } \frac{\partial \varphi(x, y)}{\partial x} \in [-\pi, +\pi) \\ \frac{\partial W\{\varphi(x, y)\}}{\partial y} &= \frac{\partial \varphi(x, y)}{\partial y}, \text{ jos } \frac{\partial \varphi(x, y)}{\partial y} \in [-\pi, +\pi)\end{aligned}\quad (15)$$

missä  $W$  on *wrapping*-operaattori. [10]

Interferometrisen vaiheen osittaisderivaattoja atsimuutti- ja etäisyysuunnissa voidaan approksimoida seuraavasti [10]:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \{\varphi(x, y)\}}{\partial x} &\approx \nabla \varphi_x(x, y) = \frac{\varphi(x + \Delta x, y) - \varphi(x, y)}{\Delta x}; \\ \frac{\partial \{\varphi(x, y)\}}{\partial y} &\approx \nabla \varphi_y(x, y) = \frac{\varphi(x, y + \Delta y) - \varphi(x, y)}{\Delta y},\end{aligned}\quad (16)$$

missä siirtymät  $\Delta x$  ja  $\Delta y$  yleensä vastaavat yhtä pikseliä. Käytännössä interferometrisen vaiheen osittaisderivaatta voidaan laskea vähentämällä alkuperäinen interferogrammi saman

interferogrammin siirretystä versiosta. Tuloksena saatavaa gradienttikuvaa kutsutaan topogrammiksi (*topogram*) (Kuva 2a). [10]

Topogrammi esitetään RGB-kuvana. Kaksi ensimmäistä tasoa esittävät osittaisgradientteja  $\nabla\varphi_x$  ja  $\nabla\varphi_y$ . Kolmas taso esittää  $h(x,y)$ :n nousun pituusyksikköä kohden ja se määritellään  $\Delta h(x,y) = \Delta h_x \cdot \Delta x + \Delta h_y \cdot \Delta y$  (ks. luku 5.2). [10]

## 5.2 Kaltevuuskartan luominen

Topogrammi voidaan muuttaa suoraan kohteen kaltevuuskartaksi (*slope map*) ilman vaiheenpurkua. Maanpinnan kaltevuusarvo (*terrestrial slope value*)  $\varepsilon$  lasketaan pikseleittäin seuraavasti:

missä  $\Delta p$  on pikselin halkaisija maastossa [10]. Korkeuden muutokset (*height increments*)

$$\cos \varepsilon = \frac{\Delta p}{\sqrt{\Delta h_x^2 + \Delta h_y^2 + \Delta p^2}}, \quad (17)$$

määritellään seuraavasti

$$\Delta h_{x,y} \equiv C(x,y) \cdot \nabla \varphi_{x,y}, \quad (18)$$

$$C(x,y) = 0.25\pi^{-1} \cdot \lambda \cdot B_{\perp}^{-1}(x) \cdot \rho(y) \cdot \sin \theta(y) \quad (19)$$

$C(x,y)$  on muuntokerroin, joka riippuu kuvausgeometriasta. [10]

RGB-kuvana esitettäessä kaltevuuskartan kaksi ensimmäistä tasoa sisältävät kaltevuusarvot atsimuutti- ja etäisyysuunnassa ja ne saadaan seuraavasti:  $\varepsilon_x = \tan^{-1}(\Delta h_x / \Delta p_x)$  ja  $\varepsilon_y = \tan^{-1}(\Delta h_y / \Delta p_y)$ . Kolmas kerros sisältää kaltevuusarvon  $\varepsilon$ . [10]

## 5.3 Nopeuskartan luominen

Olellainen GINSAR-tekniikan tuoma etu on se, että topogrammi voidaan skaalata millä tahansa reaaliluvulla (ei välttämättä kokonaisluvulla), ja mikä tahansa lineaarikombinaatio kahden eri interferogrammeista saadun topogrammin välillä on mahdollinen. Topografinen vaihe voidaankin kompensoida helposti vähentämällä keskenään kaksi skaalattua ja yhteensovitettua topogrammia.

Merkitään kohteessa tapahtunutta liikettä  $V \cdot T$ , missä  $V$  on liikevektorin (*flow vector*) projektiio katselusuunnalle ja  $T$  on temporaalinen kanta (*temporal baseline*). Kun oletetaan, että  $\nabla\varphi = \nabla\varphi_{topo} + \nabla\varphi_{liike}$  ja  $C_1 \cdot \nabla\varphi_{topo1} = C_2 \cdot \nabla\varphi_{topo2}$ , kahden topogrammin kolmansien tasojen erotus voidaan esittää [10]

$$F = C_1 \cdot \nabla \varphi_{liike1} - C_2 \cdot \nabla \varphi_{liike2} \quad (20)$$

Tuloksena saatavaa kuvaa  $F(x,y)$ , joka sisältää vain differentiaalisen liikkeen vaiheen ilman topografista vaihetta, kutsutaan fluksogrammiksi (*fluxogram*) (Kuva 2b). Fluksogrammi esitetään 4-kerros kuvana. Kaksi ensimmäistä tasoa sisältävät erotukset atsimuutti- ja etäisyysuunnassa. Kolmannella tasolla on kokonaiserotus ja neljännellä tasolla differentiaalisen liikkeen suunta. [10]

Fluksogrammi sisältää vain suhteellista tietoa kohteen liikkeestä. Jotta yhtälö 20 voidaan ratkaista muuttujiensa suhteen, oletetaan että nopeusgradienttien suhde  $a = \nabla\varphi_{liike1} / \nabla\varphi_{liike2}$  säilyy vakiona jäätikön alueella. Lisäksi on määritettävä joitakin referenssiarvoja  $\nabla\varphi_{liike2}$ :lle. Tähän voidaan käyttää esimerkiksi *transferential approach*-menetelmää [10]. Lopuksi fluksogrammin kolmas taso muutetaan uudeksi kuvatuotteeksi seuraavasti

$$\nabla \varphi_{liike1} = \Delta V_1 \cdot T_1 = F \cdot (C_1 - aC_2)^{-1}, \quad (21)$$

missä  $\Delta V_1$  on ensimmäisen interferogrammin nopeusgradientti. [10]

Absoluuttisen nopeus saadaan laskemalla viivaintegraali sen osittaisgradieniteista  $\nabla V_x$  ja  $\nabla V_y$

$$\begin{aligned} V(x, y) &= \nabla V(1, y) + \sum_{i=1}^{x-1} \nabla V_x(i, y), \\ V(x, y) &= \nabla V(x, 1) + \sum_{j=1}^{y-1} \nabla V_y(x, j) \end{aligned} \quad (22)$$

jota edeltää tai seuraa lineaarinen ylipäästösuodatus ja atsimuutti- ja etäisyysuunnassa saatujen tulosten keskiarvoistaminen. [10]

#### 5.4 Rajoitukset

Yhtälö 15 ei voimassa, jos vaihe-ero kahden vierekkäisen pikselin välillä etäisyys- tai atsimuuttisuunnassa on suurempi kuin  $\pi$ . Interferogrammissa tällaisia kohtia kutsutaan singulariteeteiksi, ja ne aiheutuvat kohinasta, nopeista korkeusvaihteluista ja/tai nopeasti kiihtyneestä liikkeestä.

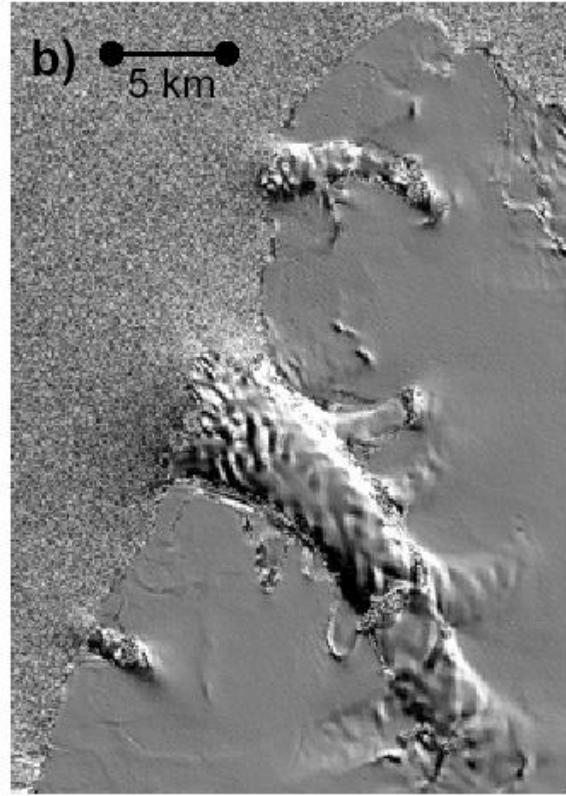
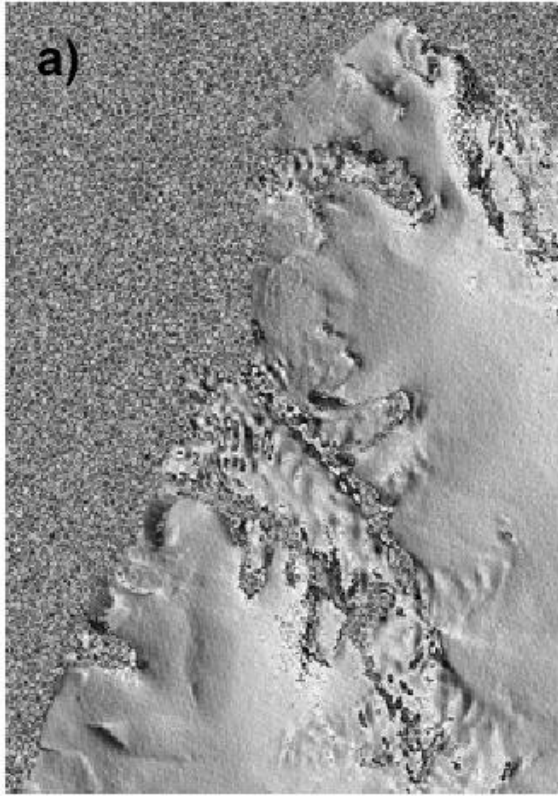
Jos maanpinnan kaltevuus ylittää kriittisen arvon  $\epsilon_{kr}$ , osittaisvaihegradientti (*partial phase gradient*) ylittää arvon  $\pi$ . Kriittinen arvo riippuu lähinnä kantavektorin katselusuuntaa vastaan kohtisuoran komponentin pituudesta ja katselukulmasta.

Alueilla, joilla muutosnopeus on suuri, liikkeen osittaisgradientti ylittää arvon  $\pi$ , jos nopeuden gradientti kahden naapuripikselin välillä on suurempi kuin  $0.25\lambda$ .

Topogrammissa saattaa olla interferenssikäyrien reunasta lähteviä kapeita jälkiä (*traces*). Nämä jäljet voidaan kompensoida paikallisesti lisäämällä tai vähentämällä  $2\pi$ :n arvo topogrammiin. [10]

#### 5.5 Edut

Interferogrammeista muodostettuja topogrammeja (kaltevuuskarttoja) voidaan verrata toisista interferogrammeista saatuihin topogrammeihin riippumatta niiden atsimuutti- ja etäisyysuunnista. Gradientti-interferometriassa vältytään alueelliselta virheen kasautumiselta ja tuloksena saatavat nopeusgradientit sietävät melko hyvin paikallisia virheitä vaiheessa, joten menetelmä toimii merkittävästä vaihekohinasta huolimatta. Algoritmi on yksinkertaisempi ja laskennallisesti kevyempi. Alkuperäinen resoluutio ja yksityiskohtaisuus säilyvät jopa 75 prosenttisesti. [10]



**Kuva 2** a) Topogrammi ja b) fluksogrammi Impetuosa-jäätiköstä. [10]

## 6. DINSAR-kokeilu Svartisen-jäätiköllä

### 6.1 Testiaineisto

Jäätikkö-alueilla suurimmat temporaalisen dekorrelaation aiheuttajat ovat sulaminen, ja jos alueella on kuivaa lunta, kova tuuli. [11] Svartisen-jäätikön alueelta käytössä olleista kuvista vain muutamalla parilla oli hyvä koherenssi. Osalla kuvista, erityisesti kesällä otetuilla kuvilla, takaisinsironna oli jäätiköiden alueella heikkoa ja siksi koherenssi pareilla oli liian alhainen interferogrammin muodostamiseen. Tästä johtuen samalta radalta (*track*) otettuja hyvätasoisia kuvapareja oli vain yksi nelikko. Myöskään kolmen kuvan differentiaali-interferometriaan toimivia kuvia ei löytynyt, koska temporaalinen dekorrelaatio on jäätiköllä erittäin voimakasta.

Ensimmäisen differentiaali-interferogrammin muodostamisessa topografinen vaihe saatiin muiden kuvien kanssa eri radalta otetulta tandemparista. Toisella saman radan tandemparilla kuvien koherenssi ei ollut riittävä. Käytetyt kuvat olivat kaksi ERS-1/2 -tandem paria 16.3.96–17.3.96 (*track* 380) ja 1.4.96–2.4.96 (*track* 108).

Muodostettiin myös toinen differentiaali-interferogrammi kahdelta samalta radalta olevalta tandemparilta. Näissä molemmissa koherenssi oli riittävä tandem-interferogrammien muodostamiseen.

Yleensä differentiaali-interferometriassa käytetyistä kuvapareista toinen sisältää vain topografian ja toinen sekä topografian että muutoksen. Tällöin vain ensimmäinen pari on tandempari ja toisen parin kuvien välillä aikaa on yleensä kulunut viikkoja, kuukausia tai jopa vuosia. Tässä tapauksessa molemmat kuvaparit sisältävät vain topografian. Jos topografiassa on näiden kahden viikon aikana tapahtunut pieniä, muutaman senttimetrin suuruisia muutoksia (jäätikkö sulanut tai paksuuntunut), niitä ei voida havaita differentiaali-interferogrammista. Interferogrammi on herkempi liikkeelle kuin topografialle. Yksi vaihesykli vastaa 180 metrin korkeuden muutosta, eli hyvin pieni korkeuden muutos näkyy hyvin pienenä vaiheen muutoksena, jota ei voida erottaa kohinasta ja muista virhelähteistä. Pieni liike interferogrammin sisällä näkyy suurempana vaiheen muutoksena, koska yksi vaihesykli vastaa 2,8 mm:n liikettä katselusuunnassa.

Koska jäätiköt ovat usein jatkuvassa liikkeessä, jäätikköalueella on saattanut tapahtua muutoksia jommankumman tai molempien tandemparien kuvien oton välillä, jolloin niissä on molemmissa sekä topografian että liikkeen aiheuttamia vaihekuvioita. Tällöin differentiaali-interferogrammi muodostuu näiden liikkeiden kombinaatiosta. Jos kohde on merkittävässä jatkuvassa liikkeessä, tandempareja ei pitäisi käyttää topografisena referenssinä, vaan tulisi käyttää muulla tavoin luotua korkeusmallia.

**Taulukko 1.** Differentiaali-interferogrammien muodostamiseen käytetyt kuvat

Pvm	Frame	Track	Pvm	Frame	Track	Kanta $B_{\perp}$
ERS1 16.3.96	2259	380	ERS2 17.3.96	2259	380	-80,26
ERS1 1.4.96	2259	108	ERS2 2.4.96	2259	108	55,51
ERS1 28.3.96	1341	057	ERS2 29.3.96	1341	057	-11
ERS1 13.3.97	1341	057	ERS2 14.3.97	1341	057	-81

## 6.2 Prosessointi

Interferogrammien muodostamiseen käytettiin Atlantis Scientific Inc.:n EVInSAR –ohjelmaa. Ensin 16.–17.3.96 otetusta parista muodostettiin korkeusmalli. Ohjelman valmiita oletusasetuksia ERS1/2 -tandemkuville käytettiin hyvin pitkälle. Master- ja slave- kuviksi valittiin 16.- ja 17.3.96 otetut kuvat, ja määriteltiin master-kuvalta prosessoitava alue (**Kuva 3**).

Ohjelma suoritti kuvien yhteensovituksen automaattisesti määrittämällä bikuutiopolynomien kertoimet slave-kuvan uudelleennäytteistystä varten. Yhteensovituksessa käytettiin 63:a pistettä ja jäännösvirhe oli 0.1185 pikseliä. Tarkasti yhteensovitetuista kuvista muodostettiin interferogrammi, josta poistettiin tasaisen maan vaihe, ja jota ehostettiin poistamalla kohinaa selkeämpien vaihekuvioiden saamiseksi (**Kuva 4**). Tämän jälkeen interferogrammin vaihe purettiin käyttämällä ohjelman omaa *Iterative disk masking* -vaiheenpurkualgoritmia. Alueet, joilla koherenssi (**Kuva 5**) oli heikko, jätettiin pois. Lopuksi vaihe muutettiin kohteen korkeudeksi ja korkeusmalli muunnettiin karttaprojektioon käyttämällä hyväksi kuvan ratatietoja (**Kuva 6**).

Muutoksen havaitsemista varten muodostettiin differentiaali-interferogrammi ohjelman differentiaalimoodilla. Master- ja slave-kuviksi valittiin 1.4.96 ja 2.4.96 otetut kuvat ja master-kuvalta määriteltiin prosessoitava alue (**Kuva 7**). Lisäksi määriteltiin aikaisemmin muodostettu korkeusmalli. Master- ja slave-kuvien yhteensovituksen lisäksi oli suoritettava korkeusmallin yhteensovitus master-kuvalle. Korkeusmallin yhteensovituksessa ohjelma käytti hyväksi olemassa olevaa master-kuvaa (16.3.96), jolta korkeusmalli on tehty. Tämän jälkeen interferogrammi muodostettiin, ja siitä poistettiin tasaisen maan vaihe ja topografinen vaihe (**Kuva 8**). Kun interferogrammin vaihe oli purettu, se muutettiin tutkan katselusuunnassa tapahtuneeksi muutokseksi ja muunnettiin karttakoordinaatistoon (**Kuva 9**). [12]

Kuvassa 10 on 28.–29.3.96 ja 13.–14.3.96 kuvista samalla tavoin muodostettu differentiaali-interferogrammi. Topografinen vaihe saatiin 13.–14.3.97 otetulta parilta ja masterkuvana oli 29.3.96 otettu kuva. Nämä kuvat olivat kaikki samalta radalta, mutta edellisten kuvien tavoin tandempareja.

## 6.3 Tulosten arviointi

Deformaatiokuvio on hyvin samantapainen molemmilla kuvanelikoilla tuotetuilla differentiaali-interferogrammeilla. Suurin liike on odotetusti jäätikön reunoilla, jotka sijaitsevat jyrkillä rinteillä. Topografista vaihetta ei ole saatu täysin poistettua ja jäätikön ulkopuolisilla alueilla on havaittavissa heikkoja vaihekuvioita. Kaikista selkeimmät kuviot ovat kuitenkin jäätikön alueella ja sen reunoilla.

On erittäin todennäköistä että ne aiheutuvat jäätikön liikkeestä jommankumman tai molempien interferogrammien kuvien oton välisenä aikana. Jos kohteessa on tapahtunut liikettä topografisen parin kuvien oton välillä, saadaan tuloksena kombinaatio kummankin tandem-parin sisäisestä muutoksesta.

Differentiaali-interferogrammin käyrät voivat myös johtua

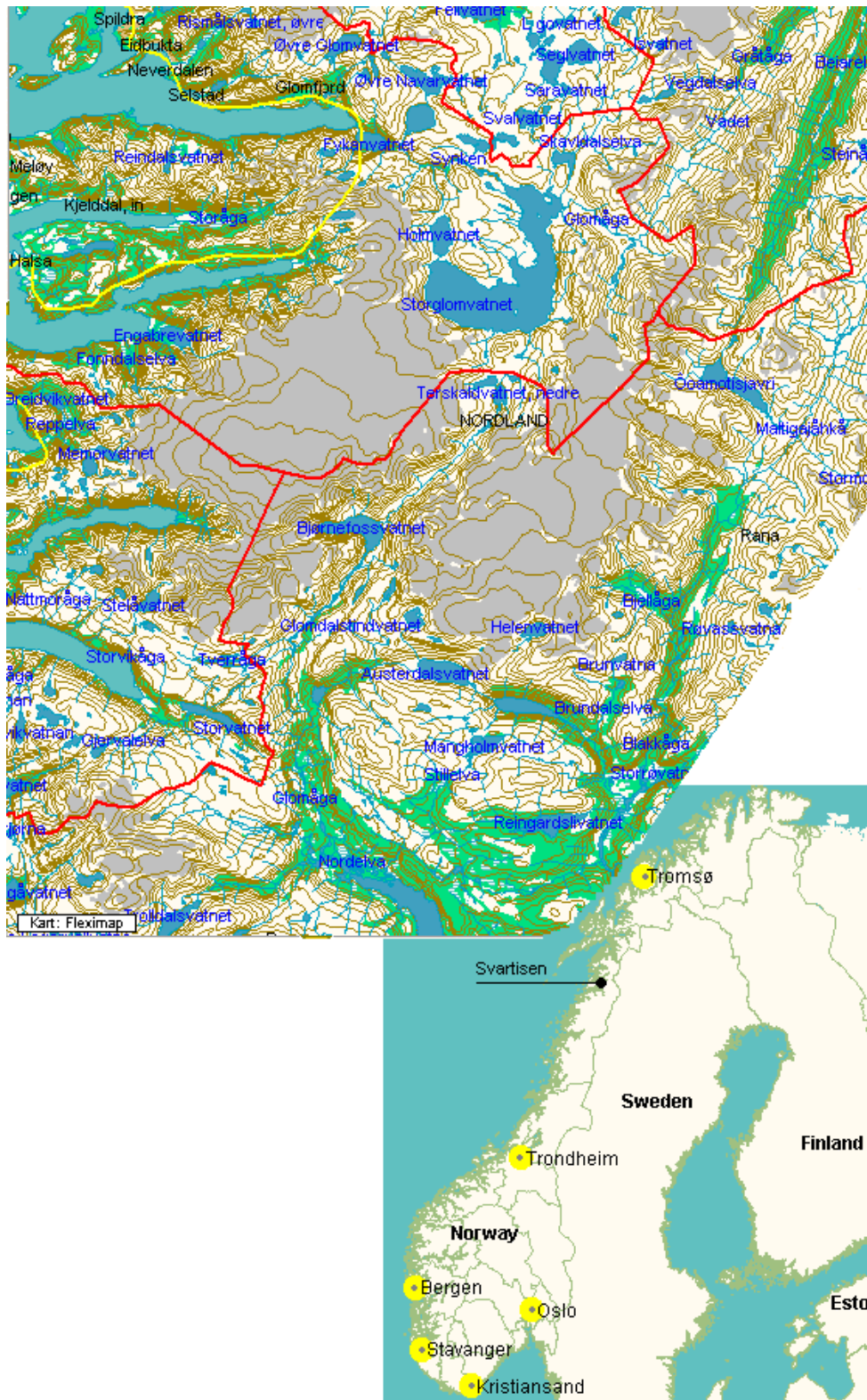
- korkeusmallin epätarkkuudesta tai trendistä: Korkeusmallin luominen on hankalaa suurten korkeusvaihteluiden vuoksi, erityisesti vaiheen purkamisessa voi olla tapahtunut virheitä.
- epätarkoista rataparametreista: tarkkoja rataparametreja ei ole saatavilla vuoden 1997 ERS1-kuville
- huonosta yhteensovituksesta: käytettäessä eri radoilta otettuja kuvia yhteensovituksessa voi olla ongelmia
- ilmakehän aiheuttamasta signaalin viivästymisestä
- vaihekohina ja alhainen koherenssi aiheuttavat myös ylimääräisiä käyriä

Täytyy myös huomioida että interferometrialla saadaan vain suhteellinen liike. Havaittu liike on suhteessa oletetusti paikallaan olevaan pisteeseen. Tässä tapauksessa se on yksi kulmapiste (0,0). Koska referenssinä ei ole käytetty varmasti paikallaan olevaa pistettä, referenssipisteen mahdollinen liike aiheuttaa virheen havaitun liikkeen suuruuteen.

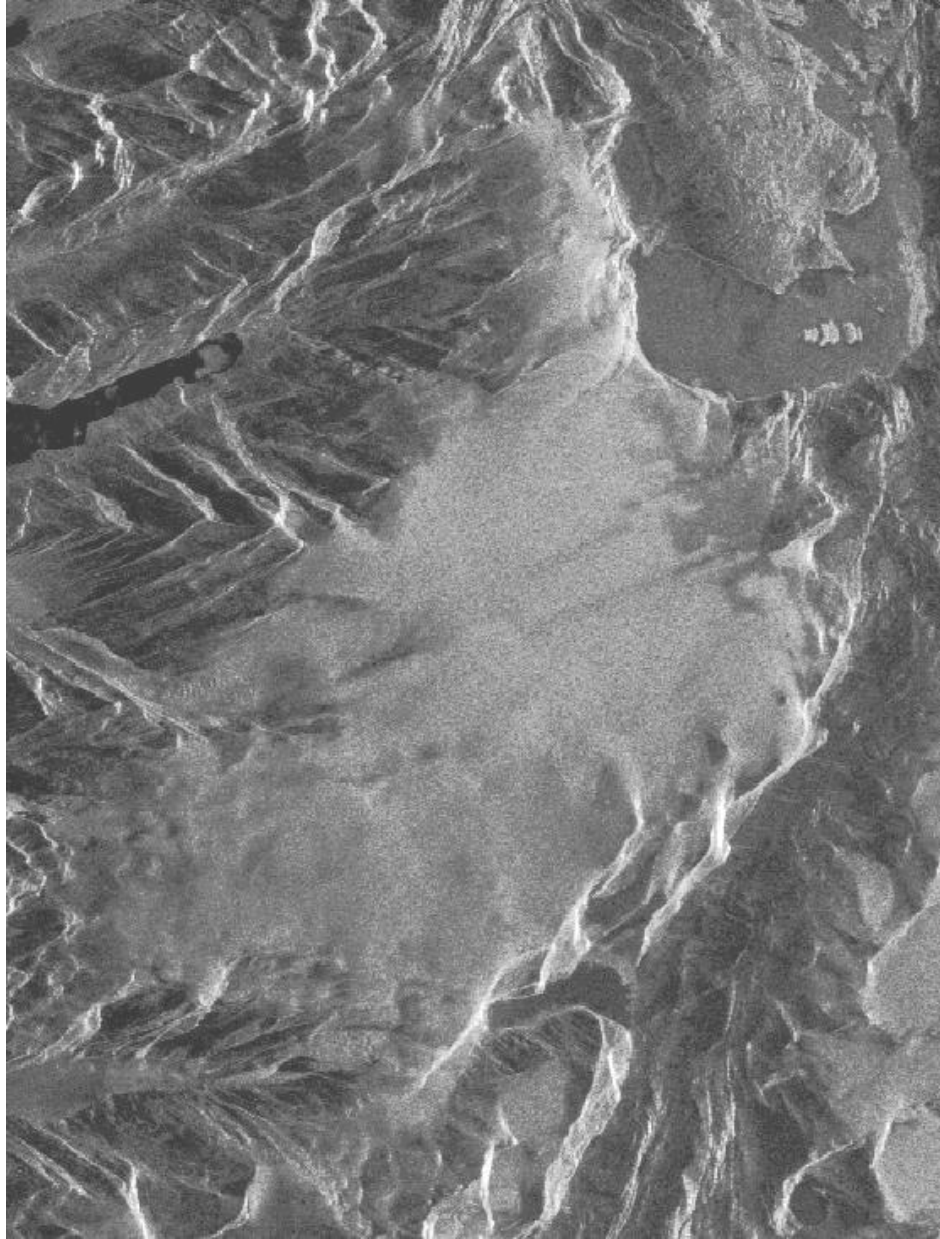
#### 6.4 Johtopäätökset

Koska maastomittaustuloksia ei ole saatavilla interferogrammin ajalta, ei saatujen tulosten oikeellisuutta voida arvioida. Jos sellaisia olisi käytössä, voitaisiin verrata tuloksia liikkeen sijainnista ja sen suuruudesta. Käytössä olleilla kuvilla on perinteistä differentiaali-interferometriaa käyttäen vaikea saada luotettavampia tai tarkempia tuloksia jäätikön liikkeestä. Riittävän tarkkaa olemassa olevaa korkeusmallia alueelta olisi voinut käyttää topografisen vaiheen laskentaan ja poistoon. Tällöin topografinen vaihe ei varmasti sisältäisi liikettä.

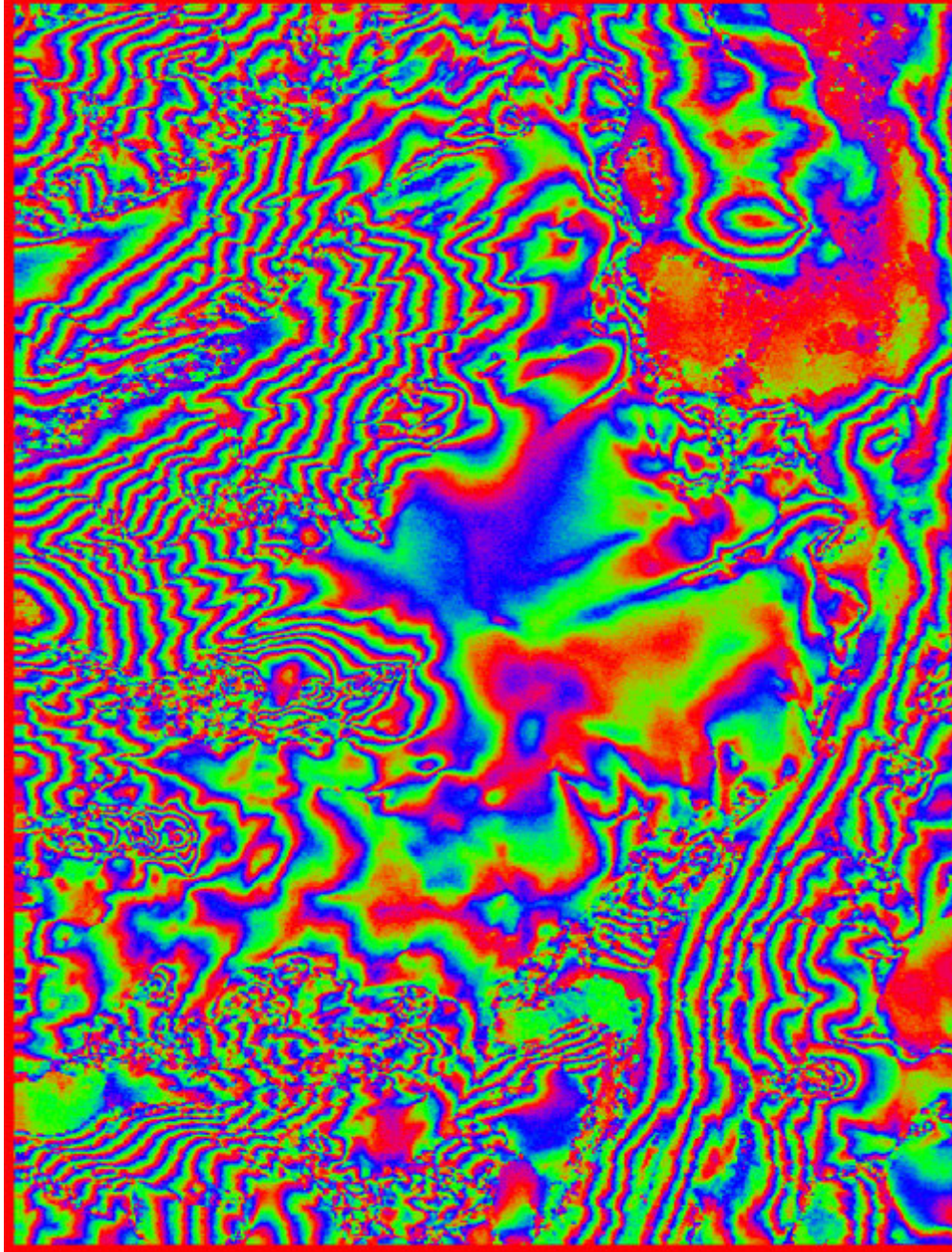
Kuvat on ilmeisesti hankittu gradientti-interferometria –tekniikan kehittämiseen, ja sitä käyttämällä voitaisiin kuvia hyödyntää paremmin. Gradientti-interferometriassa liikkeen havaitsemiseen voidaan käyttää kahta tandemparia, koska laskennalla ratkaistaan molemmille pareille niissä esiintyvän liikkeen suuruus. Interferogrammeista muodostettuja topogrammeja (kaltevuuskarttoja) voidaan verrata toisista interferogrammeista saatuihin topogrammeihin riippumatta niiden atsimuutti- ja etäisyysuunnista. Lisäksi topogrammi voidaan kertoa millä tahansa reaalityylillä, mikä sallii minkä tahansa lineaarikombinaation eri interferogrammeista muodostettujen topogrammien välillä. Vierekkäisiltä radoilta otettuja tandempareja voidaan hyvin käyttää liikkeen mittaamiseen.



**Kuva 3** Kartta Svartisen-jäätikön alueelta. Jäätiköt on merkitty harmaalla. [URL4]



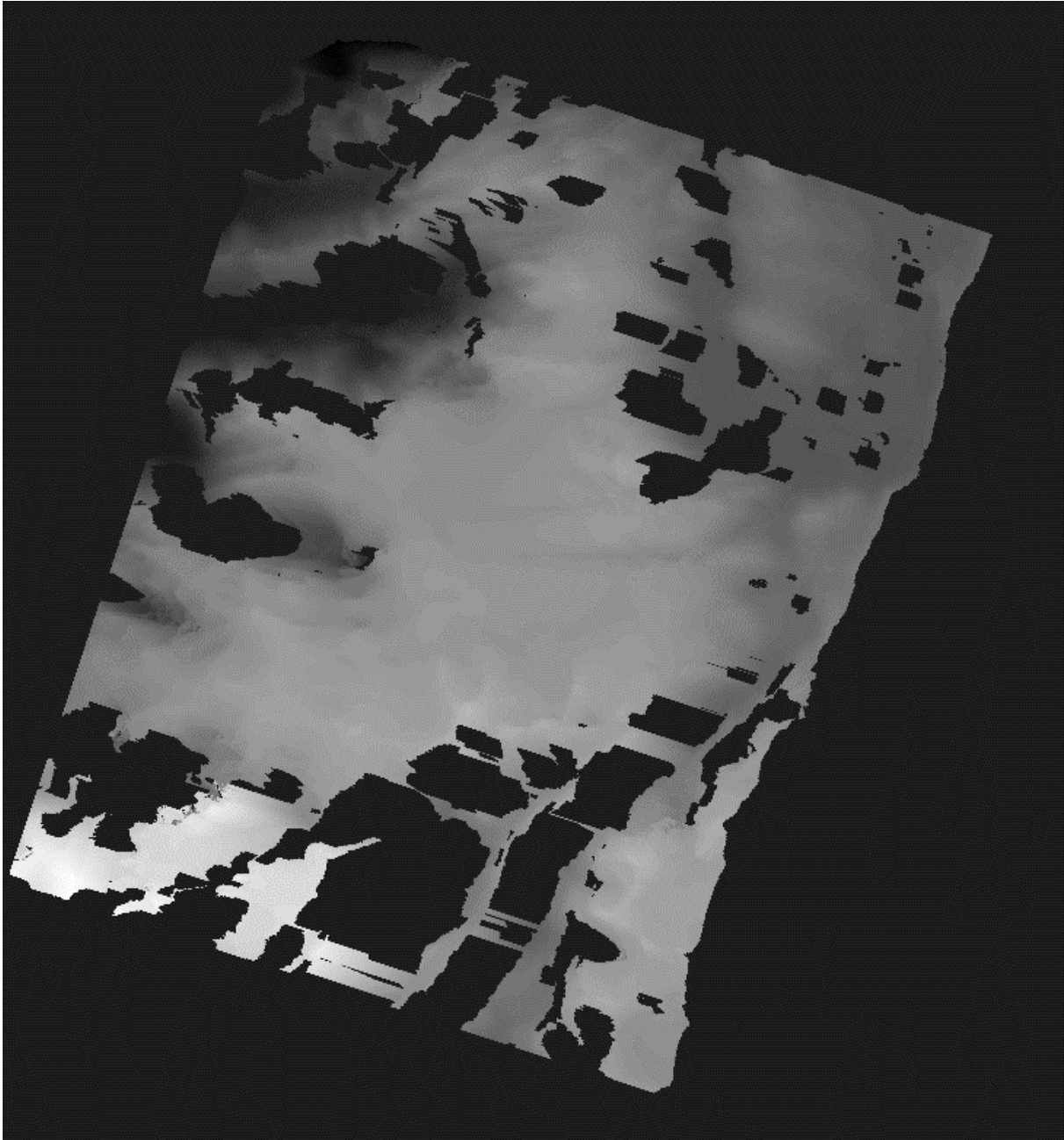
**Kuva 4** Svartisen 16.3.96 intensiteettikuva: kuvalta korkeusmallin tekoon valittu alue. Mitä vaaleampi pikseli on sitä voimakkaampi takaisinsironta. Jäätikön alueelta takaisinsironta on ympäröiviä rinteitä voimakkaampaa. Kuva on kuvauskoordinaatistossa. Vasemmalla ylhäällä on Storglomvatnet-järvi.



**Kuva 5** Interferogrammi 16.–17.3.96. Yksi vaihesykli vastaa noin 120 metrin korkeuden muutosta.



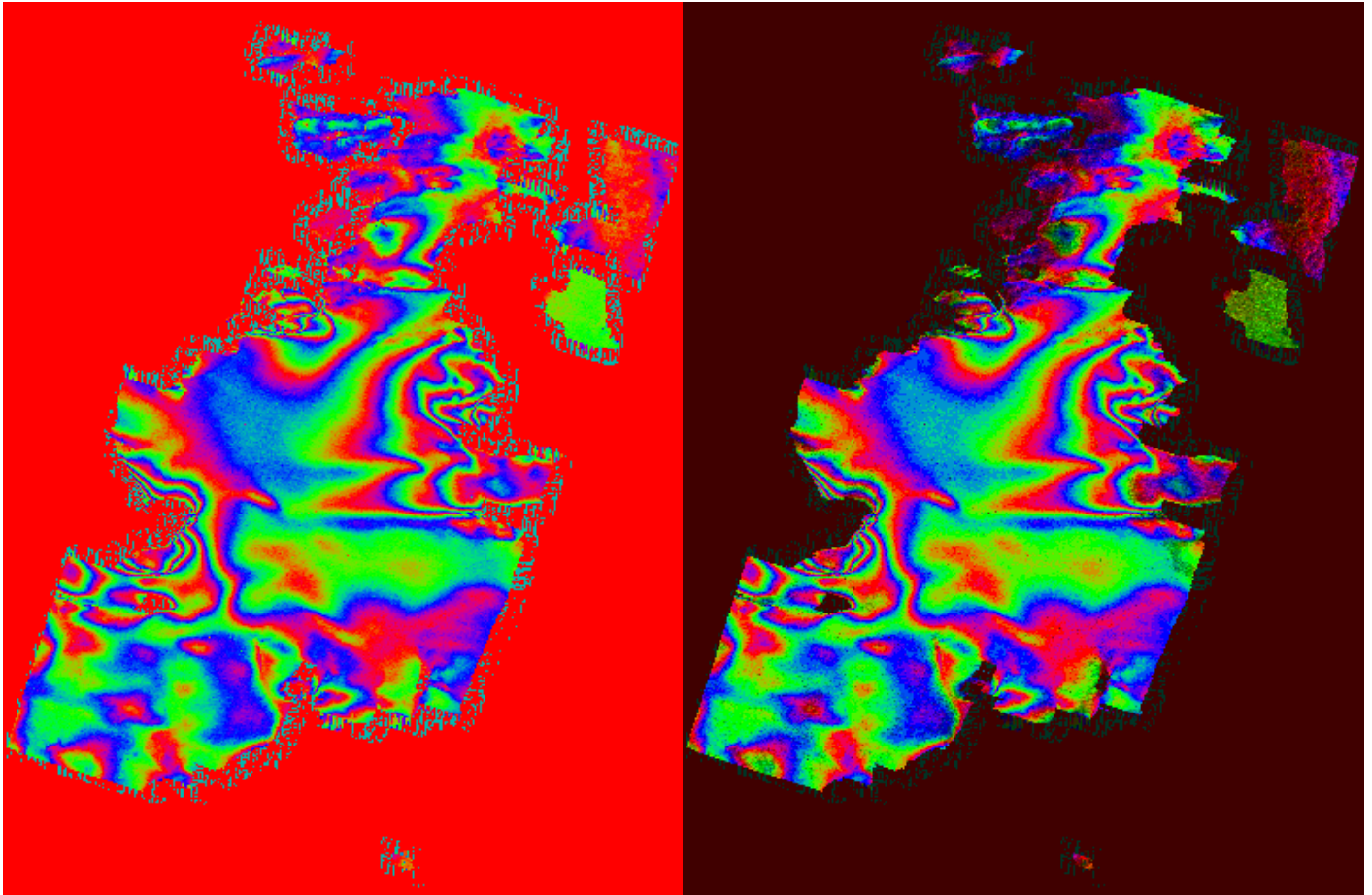
**Kuva 6** Koherenssikuva 16.–17.3.96. Mitä vaaleampi pikseli sitä parempi koherenssi. Oikealla erottuu tummana Holandsfjorden-vuono.



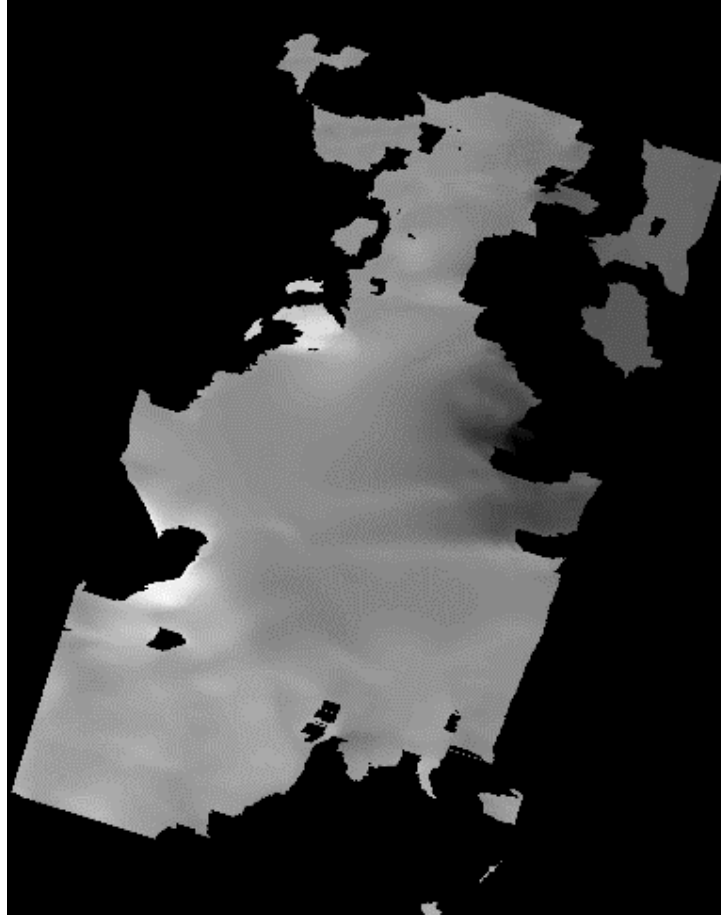
**Kuva 7** Korkeusmalli oikaistuna karttaprojektioon (UTM, WGS84). Mustilla alueilla koherenssi on ollut liian heikko, ja ne on jätetty pois korkeusmallista. Mitä vaaleampi pikseli sitä korkeampi.



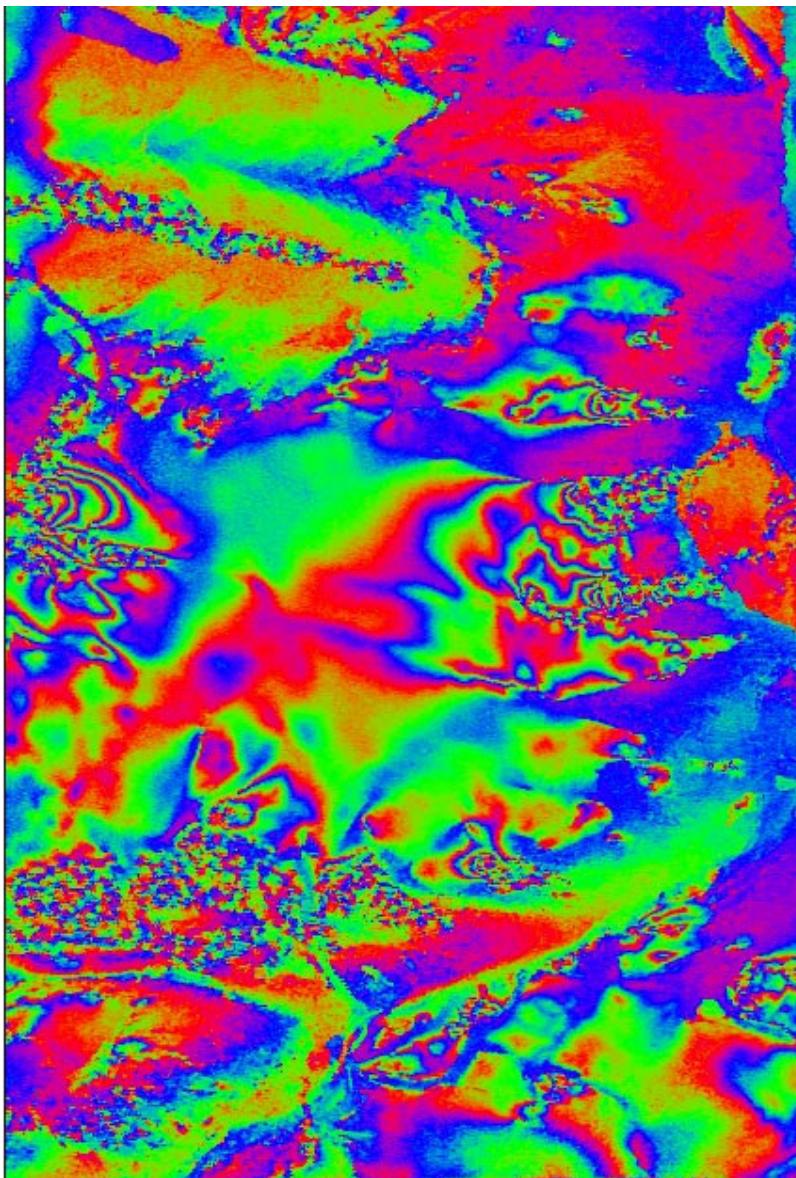
**Kuva 8** . Differentiaali-interferometriaan valittu alue 1.4.96-kuvalta.



**Kuva 9** Differentiaali-interferogrammi oikaistuna karttaprojektioon. Yksi sykli vastaa n. 2,8 cm muutosta. Vasemmalla kuvalla on pelkkä vaihe ja oikealla kuvalla on sekä amplitudi että vaihe.



**Kuva 10** Suhteellinen muutos tutkan katselusuunnassa. Asteikko on 0-31,5 cm, jäätikön keskellä suhteellinen muutos on 16–20 cm. Liikkeen referenssi eli muutos on oletettu nolllaksi tummimmalla alueella



**Kuva 11** 28.–29.3.96 ja 13.–14.3.96 kuvista muodostettu differentiaali-interferogrammi. Kuva on eri kuvauskoordinaatissa edellisten kuvien kanssa ja peilikuva omasta kuvauskoordinaatistostaan. Kuvaa ei ole oikaistu eikä heikon koherenssin alueita ole poistettu.

## Lähdeluettelo

- [1] M. Engdahl, 'Phase Unwrapping in SAR Interferometry Using Instantaneous Frequency Estimation', Master's Thesis, Helsinki, 1996
- [2] R. Bürgmann, P. A. Rosen, E. J. Fielding, Synthetic Aperture Radar Interferometry to Measure Earth's Surface Topography and Its Deformation, *Annu. Rev. Earth Planet Sci.* 2000. 28:169-209
- [3] M. Santoro. Characterisation of Boreal Forests and Urban Areas Using ERS InSAR Coherence, Technical Report No. 394L, Göteborg, Sweden, 2001
- [4] P. B.G. Dammert, Applications of spaceborne SAR interferometry, Technical Report no. 245L, Göteborg, Sweden, 1996
- [5] T. Strozzi, U. Wegmüller, L. Tosi, G. Bitelli, V. Spreckels. Land Subsidence Monitoring with Differential SAR Interferometry. *PE & RS*, Vol. 67, No. 11, November 2001, pp. 1261-1270
- [6] R. F. Hanssen. Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis. Kluwer Academic Publishers, 2001
- [7] I. Joughin, R. Kwok, M. Fahnestock. Interferometric Estimation of Three-Dimensional Ice-Flow Using Ascending and Descending Passes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 36, No. 1, 1998.
- [8] K. Mattar, P. Vachon, D. Geudner, A. Gray, I. Cumming, M. Brugman. Validation of Alpine Glacier Velocity Measurements Using ERS Tandem-Mission SAR Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 36, No. 3, 1998.
- [9] A. Sharov, K. Gutjahr. Some methodological enhancements to INSAR surveying of polar ice caps. In: *Observing our environment from space*. G.Begni (Ed.). Proc. of the 21st EARSel Symposium in Paris 14-16 May, 2001, Balkema, Lisse, pp. 65 - 72. (2002)
- [10] A. Sharov, K. Gutjahr, F. Meyer, M. Schardt, 2002. Methodical alternatives to the glacier motion measurement from differential SAR interferometry. Proc. of the PCV`02 Symposium in Graz, 6 p.
- [11] H. Rott, A. Siegel. Glaciological Studies in the Alps and in Antarctica Using ERS Interferometric SAR. Proc. of the 'Fringe 96' Workshop on ERS SAR Interferometry, ESA SP-406, Vol. II, December 1997.
- [12] Atlantis Scientific Inc., EVInSAR version 1.2 User's Guide
- [URL1] "SAR Interferometry and Surface Change Detection". Ed. Dixon, T. H., <http://southport.jpl.nasa.gov/scienceapps/dixon/>.
- [URL2] "Multiple Images SAR Interferometry". Derauw, D., Moxhet, J., <http://www.geo.unizh.ch/rsl/fringe96/papers/derauw/>

[URL3] “Delft Object-oriented Radar Interferometric Software:User's manual and technical documentation”, Bert Kampes  
<http://www.geo.tudelft.nl/fmr/research/insar/sw/doris/Usersmanual/node104.html>”

[URL4] “Map”, Norwegian Tourist Board, <http://www.visitnorway.com>