

SAR-interferometria kaupunkialueiden painumien tutkimuksessa

Kirsi Karila

Geodeettinen laitos, Kaukokartoituksen ja fotogrammetrian osasto
Teknillinen korkeakoulu, Fotogrammetrian ja kaukokartoituksen laboratorio
Geodeetinrinne 2, 02431 Masala
kirsi.karila@fgi.fi

Tiivistelmä. Rakennusten painuminen on ongelma monilla kaupunkialueilla. SAR-interferometriaan perustuvilla tekniikoilla kaupunkialueilla tapahtuva rakennusten painuminen voidaan mitata millimetritasolla ja saada painuma-alueesta kattava kuva. Mittauksissa käytetään hyväksi sirontaominaisuuksiltaan stabiileita pistemäisiä kohteita eli pysyviä sirottajia ja pitkää SAR-kuvien aikasarjaa.

Pysyviin sirottajiin perustuvaa tekniikkaa on sovellettu painumien tutkimukseen Turun ja Helsingin kaupunkien alueilla. Alueilla on havaittu useita vuodessa muutamien millimetrin suuruisia painumia. Tutkasatelliittikuvilta saatuja tuloksia on verrattu kaupungin suorittamiin vaaitusmittauksiin ja maaperäaineistoihin. Tulokset sopivat hyvin yhteen.

Avainsanat: SAR-interferometria, pysyvät sirottajat, painuminen

1 Menetelmistä

1.1 Differentiaalinen SAR-interferometria (DINSAR)

Synteettisen apertuurin tutka (SAR) tallentaa palaavan signaalin amplitudin ja vaiheen. Signaalin voimakkuuteen vaikuttaa maanpinnan takaisinsirontaominaisuudet ja vaiheeseen etäisyys satelliitista maahan. SAR-interferometriassa (INSAR) kaksi hieman eri paikoista ja usein myös eri aikaan otettua SAR-kuvaa yhdistetään interferogrammiksi, jossa kahden kuvan amplitudit kerrotaan ja vaiheet vähennetään keskenään. Interferogrammin vaiheeseen vaikuttavat korkeuserot ja deformaatiot kohteessa, ilmakehässä tapahtuva taittuminen sekä kohina. Differentiaalinen SAR-interferometria (DINSAR) on INSAR-tekniikan laajennus, jossa maaston topografian vaikutus interferogrammilla eliminoidaan käyttämällä hyväksi toista interferogrammia. Tällöin jäljelle jää lähinnä kohteessa tapahtunut liike.

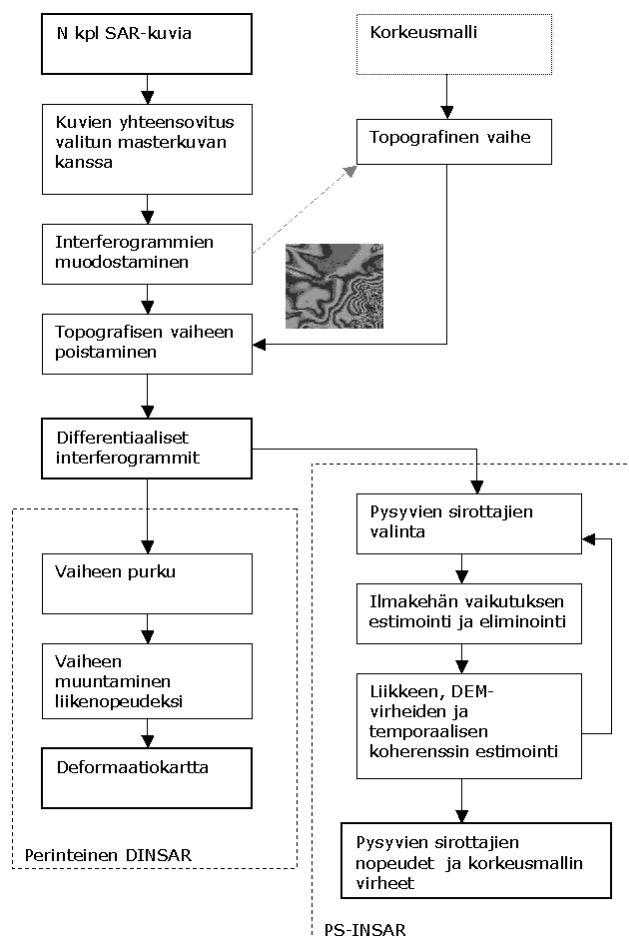
Tavallisessa differentiaalisessa SAR-interferometriassa käytetään 3-4 SAR-kuvaa tai kahta SAR-kuvaa ja korkeusmallia, joista muodostetaan kaksi interferogrammia. Tämä on nopea ja yksinkertainen menetelmä deformaation mittaamiseksi. Liikkeen mittaaminen interferogrammilta ei kuitenkaan aina onnistu. Tämä johtuu usein siitä, että kohteessa tapahtuvista muutoksista aiheutuva ns. temporaalinen dekorrelaatio tekee interferogrammista kohinaisen. Erityisesti kohteessa oleva kasvillisuus aiheuttaa pitkillä kuvanottoväleillä voimakasta temporaalista dekorrelaatiota, ja on hyvin mahdollista, että interferogrammilta ei

pystytä erottamaan vaihekuviota. Lisäksi ilmakehästä johtuva signaalin taittuminen on erilainen eri aikaan otetuilla kuvilla, ja se voidaan virheellisesti tulkita kohteessa tapahtuneeksi liikkeeksi.

DINSAR-tekniikkaa on käytetty luonnonilmiöiden, kuten maanjäristysten (esim. Zebker et al. 1994; Massonnet et al. 1993), tulivuorten (esim. Briole et al. 1997) sekä vuoristo- ja mannerjäätiköiden liikkeiden seuraamiseen (esim. Goldstein et al. 1993). Näissä sovelluksissa deformaatiot ovat usein suuria ja nopeita. Ihmisen toiminnasta aiheutuvat deformaatiot, kuten kaupunkialueiden vajoaminen, ovat usein pienempiä kuin luonnonmullistusten aiheuttamat deformaatiot, mutta DINSAR-tekniikka sopii myös näiden ilmiöiden seurantaan.

1.2 Pysyviin sirottajiin perustuvat menetelmät (PS-INSAR)

Edellä mainittujen kohteen muutoksista ja ilmakehästä johtuvien ongelmien ratkaisemiseksi on kehitetty edistyneempiä DINSAR-menetelmiä, jotka käyttävät hyväkseen pitkää SAR-kuvien aikasarjaa ja muuttumattomia kohteita, joita kutsutaan pysyviksi sirottajiksi. Alkuperäisen Permanent scatterers -tekniikan esitti Ferretti et al. (2001). PS-tekniikan perusajatus on se, että temporaalinen dekorrelaatio ei vaikuta pysyviin sirottajiin. Pysyvät sirottajat ovat yleensä rakennuksia, rakenteita tai kiviä, jotka hallitsevat yksittäisestä pikselistä tulevaa sirontaa. Usean kuvan aikasarjan avulla voidaan ratkaista deformaation lisäksi ilmakehän vaikutus kullekin kuvalle ja korkeusmallissa olevat virheet.



Kuva 1. Kaavio PS-INSAR prosessoinnin vaiheista.

Yksi tämäntapainen algoritmi on toteutettu Vexcelin EV-INSAR ohjelman Coherent target monitoring -moduulissa. CTM-moduulilla voidaan analysoida usean SAR-kuvan aikasarja. Interferometriseen aineistoon sovitetaan erilaisia deformaatiomalleja. Ilmakehän vaikutusta arvioidaan deformaatioalueen lähellä olevan paikallaan pysyvän referenssialueen avulla. Liikkeen ja ilmakehän estimaattia parannetaan suorittamalla uusia iteraatiokierroksia. Tavoitteena on maksimoida nk. temporaalinen koherenssi, joka kuvaa vaiheen stabiilisuutta. Deformaation mallinnuksen aikana lasketaan myös estimaatit korkeusmallin virheille. Pysyvät sirottajat eli koherentit kohteet valitaan temporaaliseen koherenssiin perustuen. DINSAR- ja PS-INSAR-prosessoinnin vaiheet on esitetty yleisellä tasolla kuvassa 1.

2 Esimerkitapauksia

Kaupunkialueilla tapahtuva rakennusten painuminen on ongelma lähes kaikissa suurissa kaupungeissa. Painuminen vahingoittaa rakennuksia, ja niiden korjaaminen on kallista. Syy painumiseen voi olla esimerkiksi pohjaveden pinnan laskeminen, tunnelien rakentaminen, kaivostoiminta, maaperä tai seisminen aktiivisuus.

Suomessa rakennetun alueen painumista on tutkittu kahdella testialueella: Turussa ja Helsingissä. DINSAR-tekniikan soveltamista suomalaisilla kaupunkialueilla vaikeuttaa niiden pieni koko, runsas kasvillisuus ja vuodenaikojen vaihtelut. Yksinkertaisilla differentiaalisilla interferogrammeilla on paljon kohinaa, ja niillä ei voida erottaa selkeitä vaihekuvioita. Alueet, joilla koherenssi säilyy pitkillä ajanjaksoilla, ovat hyvin pieniä. Siksi tarvitaan paljon kuvia ja edistyneempiä DINSAR-menetelmiä.

2.1 Turku

Turun alueella maaperässä vuorottelevat savi- ja peruskallioalueet, ja kaupunki on rakennettu osittain kymmenien metrien paksuisen savikerroksen päälle. Kun pohjaveden pinta savialueilla laskee rakennusten vanhat puupaalut lahoavat ja rakennukset painuvat syvemmälle maaperään. Muun muassa useissa arvokiinteistöissä, kuten Ruotsalainen teatteri, kaupungintalo ja Turun vanha pääkirjasto, on havaittu painumista. Turussa paalutusten uusimisen arvioidaan maksavan kaiken kaikkiaan 90 miljoonaa euroa (Helsingin sanomat, 2004).

Turun alueelta hankittiin 40 ERS-1 ja -2 satelliittien ottamaa SAR-kuvaa vuosilta 1992-2002. Kuvien valinnassa oli otettava huomioon vuodenaikat, koska erityisesti lumipeite saattaa lisätä temporaalista dekorrelaatiota ja tehdä interferogrammeista käyttökeltottomia. Kuvista muodostettiin 33 interferogrammin aikasarja EV-INSAR-ohjelman Coherent target monitoring -moduulilla. Laskennassa käytettiin lineaarista deformaatiomallia. Iteraatiokierroksia suoritettiin kaksi. Ensimmäisellä kierroksella käytettiin vakiomallia ilmakehälle ja toisella ilmakehä estimoititiin residuaalisen vaiheen keskiarvona.

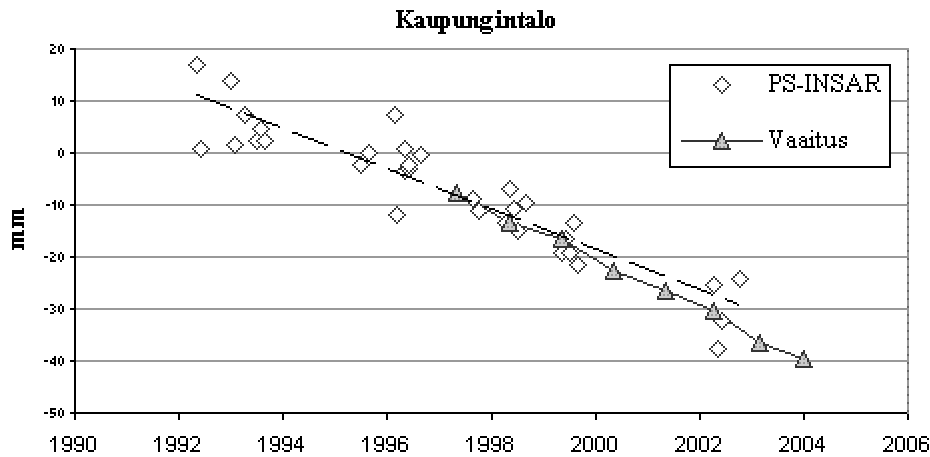
Tuloksena saatu koherenttien kohteiden pistekartta, joka sisälsi niiden painumisnopeudet, yhdistettiin Turun kantakartalta irrotettuun rakennusaineistoon (Kuva 2). Näin PS-INSAR-tuloksia voitiin verrata Turun kaupungin kiinteistöviraston suorittamien vaaitusmittausten tuloksiin. Aineisto sisältää noin 10 keskustan alueella sijaitsevan rakennuksen vaaitusmittaustulokset. Mittauksia on suoritettu yksittäisille rakennuksille, joissa on havaittu painumista, mutta alueellisesti kattavia mittauksia koko keskustan alueelta ei ole suoritettu. Myös mittausten ajanjaksot vaihtelevat eri rakennusten välillä.



Kuva 2. Turun pysyvät sirottajat ja niiden nopeudet kartalla. (Pohjakartta ©Turun kaupunki)

Useimmat pysyvät sirottajat sijaitsevat rakennuksissa. Katon ja rakennuksen suunta, muoto ja materiaali vaikuttavat mitatun signaalin voimakkuuteen ja siten myös hyvien sirottajien esiintymiseen. Savupiiput, antennit ja muut rakenteet hallitsevat usein sirontaa ja toimivat pysyvinä sirottajina. Verrattaessa eri mittausaineistoja oli tärkeää löytää toisiaan vastaavat havainnot. Vaaituspultit ja pysyvät sirottajat sijaitsevat eri kohdissa rakennusta. Pultit ovat aina rakennuksen kivijalassa katutasossa, kun taas tutkasignaali siroaa todennäköisesti katolla olevista rakenteista kuten savupiipuista. Takaisinsironta tulee usein myös vain yhdeltä puolelta rakennusta satelliitin sivulle katsovasta kuvausgeometriasta johtuen. PS-INSAR-mittauksista olikin vaikea sanoa, mistä heijastus tarkalleen on tullut. PS-INSAR-mittausaineistosta oli kuitenkin mahdollista löytää vaaituspulttien kanssa samassa rakennuksen osassa olevat pysyvät sirottajat. Näistä voitiin laskea rakennuksen tai rakennuksen osan keskimääräinen painumisnopeus. Keskimääräisen painumisnopeuden lineaarisen regressiomallin selitysaste oli 0,89. PS-INSAR-mittaukset antoivat keskimäärin 0,6 mm pienemmän vuosittaisen painumisnopeuden kuin vaaitusmittaukset.

Tuloksista tutkittiin myös yksittäisen vaaituspultin ja sitä lähinnä olevan pysyvän sirottajan nopeuksia. Kuvassa 3 on esitetty vaaitus- ja PS-INSAR-mittausten aikasarjat yhdelle Kaupungintalon pisteelle. Nollakohta on 27. elokuuta 1995. Kuvasta voidaan nähdä, että keskimääräinen painumisnopeus on sama, mutta yksittäiset havainnot saattavat poiketa huomattavastikin. Erityisesti yksittäiset PS-INSAR-havainnot saattavat olla epäluotettavia. Syynä poikkeaviin havaintoihin voi olla esimerkiksi talvikuvilla oleva lumi.



Kuva 3. Vaaitushavainnot ja PS-INSAR-havaintojen aikasarja

Verrattaessa tuloksia maaperäaineistoon voitiin todeta, että kallioalueilla painumista ei juuri tapahdu. Muut pienemmät rakennusten muodonmuutokset ovat tietenkin mahdollisia. Useissa savialueilla sijaitsevilla rakennuksissa sen sijaan havaittiin painumista PS-INSAR-mittauksissa. Deformaatiokartalta voidaan selvästi erottaa savi- ja kallioalueet.

Mittausten vertailua vaikeutti se, että ne on suoritettu eri ajanjaksoina ja eri pisteisiin. Eri ajanjaksoilla tehdyt mittaukset eivät ole vertailukelpoisia, jos painumisnopeus ei ole tasainen. On myös mahdollista, että havaintoajanjakson aikana rakennuksia ja niiden paalutuksia on saatettu korjata. Lisäksi tutkan kuvauskoordinaatistossa olevien pisteiden muuntaminen karttakoordinaatistoon ei välttämättä onnistu täydellisesti. Aina täytyy myös muistaa, että PS-INSAR-menetelmällä saadut nopeudet ovat suhteellisia ja stabiilin referenssialueen valinta vaikuttaa tuloksiin. Kaikesta huolimatta tekniikat antavat kohteille hyvin samankaltaisia painumisnopeuksia.

2.2 Helsinki

Helsingissä painumisongelma ei ole niin laaja kuin Turussa. Painumat ovat yleensä hyvin paikallisia. Syy painumiin on rakentamiseen huonosti soveltuva maaperä. Monia alueita on rakennettu täytemaalle ja esimerkiksi Malmin lentokenttä on rakennettu suolle. Uusia asuinalueita kuten Arabianranta ja Pikku-Huopalahti onkin rakennettu kalliita moderneja tekniikoita käyttämällä savisen maaperän takia.

Myös Helsingistä hankittiin noin 40 tutkakuvaa. Helsingissä PS-INSAR-tulokset paljastivat painumista muutamilla alueilla eri puolilla kaupunkia, mm. Rautatientorilla, Jätkäsaarella, Pikku-Huopalahdessa ja Malmin lentokentän alueella. Painumisnopeus oli yleensä muutamia millimetrejä vuodessa. Valitettavasti Helsingin alueelta ei ollut saatavilla kattavia referenssimittauksia. Saatavilla oli kuitenkin kaupungin maaperäkartta, josta löytyi tietoa maaperätyypistä ja mm. savikerroksen paksuudesta. Vertailtaessa tuloksia maaperäkartaan sekä joihinkin sanomalehtiartikkeleihin perustuen voitiin kuitenkin todeta, että painumia on näillä alueilla havaittu, tai että ne ovat ainakin erittäin todennäköisiä. Jätkäsaaren ja Rautatientorin alueet on rakennettu täytemaalle yli 3 m paksun savikerroksen päälle. Malmin lentokenttä on savialueella, joka on entistä suota. Pikku-Huopalahdessa puolestaan on sekä savi- että täytealueita. Alueen rakentaminen on voitu suorittaa vasta viime vuosina, kun rakennustekniikka on kehittynyt. Uusista rakennustekniikoista huolimatta painumista tapahtuu näillä alueilla.

3 Johtopäätökset

Pysyviin sirottajiin perustuvia tekniikoita tarvitaan SAR-kuvilta suoritettavissa deformaatiomittauksissa alueilla, joilla perinteiset DINSAR-mittaukset eivät onnistu kasvillisuuden tai muiden muutosten takia. Runsas kasvillisuus Suomessa pienentää koherenssia ja tekee interferogrammeista kohinaisia. Kuitenkin pitkää kuvien aikasarjaa ja kehittyneitä algoritmia käyttäen deformaatiota voidaan mitata kaupunkialueilla millimetritasolla.

3.1 Rajoitukset

Esimerkiksi Suomen olosuhteissa perinteinen DINSAR ei toimi ja tarvitaan edistyneempiä tekniikoita. Näiden tekniikoiden käyttöön tarvitaan suuri määrä (> 25) kuvia, jolloin ongelmaksi saattaa muodostua tietyllä kuvausgeometrialla otettujen kuvien saatavuus halutulta alueelta sekä kuvien ja niiden käsittelyn hinta. On kuitenkin muistettava, että myös maastomittaukset ovat kalliita ja ne vievät huomattavasti enemmän aikaa ja työvoimaa.

PS-INSAR-tekniikat tarvitsevat toimiakseen riittävästi pysyviä sirottajia, siksi niitä voidaan käyttää vain rakennetuilla alueilla. Erillisiä rakennettuja alueita on mahdollista yhdistää joillakin tekniikoilla. Liian harvalla pisteverkolla algoritmit eivät toimi. Myöskin käsiteltävän alueen koko on rajoitettu. Eroja on eri algoritmien välillä mm. pysyvien sirottajien määrittämisessä.

Tarkoissa mittauksissa ongelmaksi tulee se, että ei voida tietää mistä rakenteesta takaisinsironta on tarkalleen tapahtunut. Esimerkiksi savupiipun deformaatio ei välttämättä vastaa koko rakennuksen deformaatiota. Viistosta kuvausgeometriasta johtuen sirottajat ovat usein myös jakautuneet epätasaisesti rakennukseen, ja sijaitsevat usein vain toisella puolella rakennusta.

On huomattava, että ilmakehäkorjauksen alkuarvojen saamiseksi tarvitaan tunnettu liikkumaton alue, jolla on korkea koherenssi. Koska mittaukset ovat suhteellisia, virheellinen valinta vaikuttaa tuloksiin huomattavasti.

3.2 Mahdollisuudet

SAR-kuvilta voidaan saada nopeasti kattava kuva rakennusten painumisesta kaupunkialueilla. Rakennuskohtaisesti voidaan saada mitattua jopa millimetriluokan liikkeitä. Vertailu kaupungin suorittamiin vaaitusmittauksiin osoitti, että tulokset ovat hyvin yhteensopivia ja eroa oli alle millimetri vuosittaisissa painumisnopeuksissa.

Käyttökelpoisuus eri sovelluksiin riippuu vaadittavasta tarkkuudesta ja mitattavien pisteiden sijainnista. Tulevaisuudessa pysyvien sirottajien lukumäärä rakennuksissa tulee todennäköisesti kasvamaan, kun SAR-kuvien spatiaalinen erotuskyky paranee. Myös keinotekoisien heijastimien asentaminen tarkkailtavaan kohteeseen saattaa yleistyä.

Euroopan avaruusjärjestön (ESA) ERS-kuva-arkisto ulottuu aina vuoteen 1992 asti, joten myös aiemmin tapahtuneista deformaatioista on mahdollista saada tietoa. Uusia deformaatioita voidaan tällä hetkellä seurata parhaiten ENVISAT-satelliitin kuvilta. Lisäksi monia uusia satelliittimissioita, jotka sopivat SAR-interferometriaan, on suunniteltu laukaistavaksi lähitulevaisuudessa. Uusien satelliittien myötä kuvien saatavuus tulee todennäköisesti parantumaan ja aineistojen valikoima tulee monipuolisemmaksi. Lisäksi interferometriset sovellukset on otettu erityisesti huomioon satelliitin suunnittelussa. Esimerkiksi lyhyemmät kuvauksen toistoajat ja uudet aallonpituudet luovat uusia mahdollisuuksia.

Olemassa on myös lentokoneeseen asennettavia SAR-tutkia. Lentokäyttöisellä SAR-tutkalla mittaussparametrit, kuten aallonpituus ja mittauskulma, voidaan valita joustavammin sovelluksen mukaan. Esimerkiksi kasvillisuuden peittämällä alueilla voidaan käyttää pidempää aallonpituutta, joka tunkeutuu kasvillisuuden läpi, ja saada tietoa maanpinnan

liikkeistä. Myös maakäyttöisellä SAR-tutkalla on maailmalla tehty muutamia tutkimuksia (esim. Tarchi et al. 2000).

Kiitokset

Kiitokset Jouko Levolle Turun kaupungin kiinteistövirastosta ja Osmo Korhoselle Helsingin kaupungin geotekniseltä osastolta erilaisista referenssiaineistoista. Satelliittikuvat on saatu ESA:sta tutkimuskäyttöön Category 1 -projektissa “Land subsidence and land uplift determination due to the post glacial rebound in the boreal forest zone using repeat pass satellite SAR interferometry and permanent scatterers technique”.

Lähdeluettelo

Briole P., Massonnet D., Delacourt C. (1997). Post-eruptive deformation associated with the 1986.87 and 1989 lava flows of Etna detected by radar interferometry. *Geophysical research letters*, vol. 24, no. 1, s. 37-40.

Ferretti A., Prati C., Rocca F. (2001). Permanent Scatterers in SAR Interferometry. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 39, No. 1.

Goldstein R.M., Engelhardt H., Kamb B., Frolich R.M. (1993). Satellite radar interferometry for monitoring ice sheet motion: Application to an Antarctic stream. *Science*, 262, s. 1525-1350.

Helsingin sanomat. (17.5.2004). Teatteri saa uuden perustuksen Turussa / Turku on savelle rakennettu.

Massonnet D., Rossi M., Carmona C., Adragna F., Peltzer G., Feigl K., Rabaute T. (1993). The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry. *Nature*, Vol. 364.

Tarchi D., Rudolf H., Pieraccini M., Atzeni C. (2000). Remote monitoring of buildings using a ground-based SAR: Application to cultural heritage survey, *Int. Journal of Remote Sensing*, 21(18), s. 3545-3551.

Zebker H., Rosen P., Goldstein R., Gabriel A., Werner C. (1994). On the derivation of coseismic displacement fields using differential radar interferometry: The Landers earthquake. *Journal of geophysical research* 99, B10, s. 19617-19634.

Muuta luettavaa

Gabriel A., Goldstein R., Zebker H. (1989). Mapping small elevation changes over large areas: differential radar interferometry. *Journal of Geophysical Research* 94:B7, s.9183-9191.

Massonnet D., Feigl K.L. (1998). Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface. *Reviews of Geophysics* 36:4, s.441-500.

Bürgmann, Rosen, Fielding. (2000). Synthetic Aperture Radar Interferometry to Measure Earth's Surface Topography and Its Deformation. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28, s.169-209.

Hanssen R. (2001). *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis*. Kluwer Academic Publishers. 308 s.