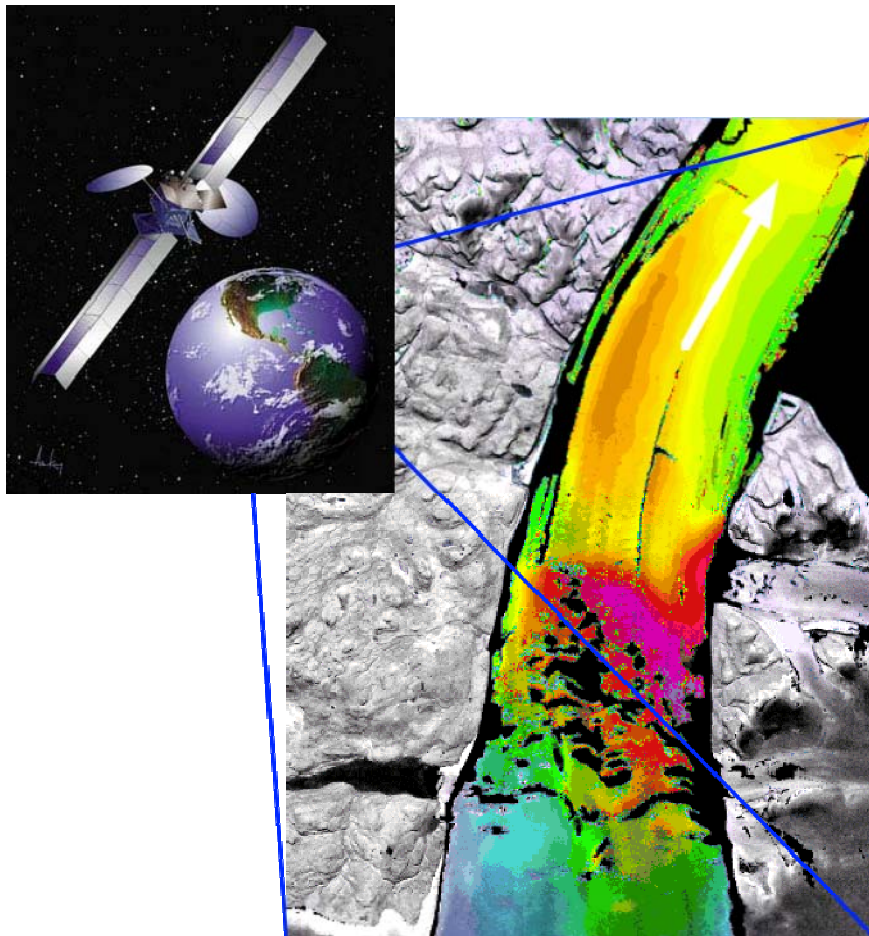


SAR-INTERFEROMETRIA



MAANPINNAN MUODONMUUTOSTEN HAVAITSEMISESSA

Maa-57.270
Fotogrammetrian, kuvatulkinnan
ja kaukokartoituksen seminaari

Valtteri Tuominen
57534C
valtteri.tuominen@hut.fi

Tiivistelmä

Niin luonnollisista kuin ihmisenkin aiheuttamista syistä johtuvat maanpinnan muodonmuutokset ovat jatkuvasti esiintyvä ilmiö. Näistä ilmiöistä voi seurata paljonkin vahinkoa. Maan pinnan muodonmuutosten seuranta ja sitä kautta niiden paikantaminen ja ennakointi ovat avain vahinkojen minimoimiseen tai korjaamiseen.

Differentiaaliseen SAR-interferometriaan (DINSAR) perustuvat menetelmät tarjoavat mahdollisuuden tarkkuudeltaan millimetriluokan liikkeen havaitsemiseen. GPS-mittaukset ovat kertaluokkaa epätarkempia ja sidottuja GPS-aseman pistemäiseen sijaintiin. Optinen vaaitus tarjoaa saman tarkkuusluokan kuin SAR-interferometriset menetelmät, mutta ei pysty vastaamaan DINSAR-menetelmän nopeuteen, aikariippumattomuuteen, pitkiin aikasarjoihin eikä kustannustehokkuuteen.

Monissa käytännön sovelluksissa on todettu pysyviin sirottajiin pohjautuvien SAR-interferometrinen sovellusten olevan vertaansa vailla maanpinnan liikkeen havaitsemisessa. DINSAR-aineiston yhdistäminen muuhun mittaus- ja kaukokartoitusaineistoon tuo paljon lisämahdollisuuksia maanpinnan liikkeen tutkimiseen. Näiden menetelmien kehittyminen tuo tulevaisuudessa paljon uusia mahdollisuuksia.

Sisällysluettelo

JOHDANTO	1
KÄSITTEITÄ	2
<i>Mikroaalto</i>	2
<i>Tutka</i>	2
<i>SAR</i>	2
<i>INSAR-menetelmä</i>	2
<i>DINSAR-menetelmä</i>	3
<i>PS-menetelmä</i>	3
TOIMINTAPERIAATE	4
ERI KÄYTÄNNÖN SOVELLUKSIA	8
<i>Hiilikaivos</i>	8
<i>Venetsia (Lagoon of Venice)</i>	9
<i>SAR-aineiston ja optisten kuvien integrointi</i>	9
TARKKUUS/LUOTETTAVUUS	12
<i>InSAR vs. GPS</i>	12
<i>InSAR vs. optinen vaaitus</i>	13
<i>Kuvauskannan vaikutus</i>	14
POHDINTAA	15
LÄHTEET	17
<i>Kirjallisuus</i>	17
<i>Internet</i>	17

Johdanto

Maanpinnan muodonmuutokset ovat jatkuvasti esiintyvä ilmiö. Muodonmuutoksia voivat olla niin mannerlaattojen liikkeestä aiheutuvat maanjäristykset, pitempiaikaiset maannousut ja –laskut kuin ihmisen toiminnasta aiheutuvat lyhyempiaikaiset maanpinnan muutoksetkin. Pitkäaikaisten ja luonnollisten maanpinnan muutosten havaitseminen mahdollistaa tilanteiden ennakoimisen ja muutokseen varautumisen. Ihmisen toiminnan aiheuttamien muutosten havainnoiminen taas puolestaan mahdollistaa joko osittain haitallisten toimien ehkäisyn tai vähentämisen, tai ehkä useammassa tapauksessa toiminnasta syntyvän haitan kompensoimisen.

Menetelmiä maanpinnan muutosten havaitsemiseen ovat pääasiassa perinteiset vaaitukset, jatkuvat GPS-mittaukset sekä tässä työssä käsiteltävät differentiaalisena SAR-interferometriaan (DINSAR) perustuvat menetelmät. DINSAR-menetelmällä päästään maanpinnan muutosten seurannassa millimetriluokan tarkkuuksiin, joka on useimmissa sovelluksissa vähintäänkin riittävä. Suhteessa GPS-mittauksiin DINSAR-menetelmällä saadaan kertaluokkaa parempi tarkkuus. Perinteisellä vaaituksella päästään teoriassa hieman tarkempiin mittaustuloksiin kuin DINSAR-menetelmällä, mutta näiden mittausten suorittaminen saattaa maastosta, poliittisista rajoitteista tai muista syistä johtuen olla mahdotonta. Joka tapauksessa vaaitusmittauksilla tulosten saaminen on huomattavasti kalliimpaa ja työläämpää kuin DINSAR-menetelmällä saadut tulokset.

Tässä työssä keskitytään pääosin maan liikkeen seurantaan, erityisesti tutkasatelliittidataa hyödyntäen. Työssä tuodaan esille SAR-interferometrialla saatuja tuloksia käytännön sovellusten kautta sekä paikoin verrataan menetelmää muihin käytössä oleviin menetelmiin.

Käsitteitä

Mikroaalto

Mikroaallot ovat elektromagneettista säteilyä. Kaukokartoituksessa käytettävät mikroaalloaallot ovat taajuudeltaan 0,3 – 300 GHz, vastaten aallonpituuksia 1m – 1mm. (*Canada Center for Remote Sensing*)

Tutka

Tutka (RADAR = **R**Adio **D**etecting **A**nd **R**anging) perustuu mikroaaltojen havainnointiin ja mittaamiseen. Tutkan toimintaperiaate on seuraavanlainen: lähetin lähettää mikroaaltoja, jotka heijastuvat kohteesta. Vastaanotin ottaa vastaan nämä heijastuneet aallot, joista havainnoidaan voimakkuus sekä aikaviive lähetyksen ja vastaanoton välillä. Useimmissa tutkajärjestelmissä lähetin ja vastaanotin sijaitsevat samassa paikassa. (*Canada Center for Remote Sensing*)

SAR

SAR (Synthetic Aperture Radar) perustuu ideaan, jossa tutkan erotuskykyä voidaan parantaa ”valaisemalla” kohdetta tutkan liikkuessa pidemmän matkan. Eli toisin sanoen signaalin prosessoinnilla keinotekoisesti pidennetään tutkan apertuuria. Siitä nimi synteettisen apertuurin tutka. (*Canada Center for Remote Sensing*)

INSAR-menetelmä

SAR-interferometria (INSAR) perustuu vastaanotetun signaalin amplitudi- ja vaihetietoon. Amplitudi kertoo kohteen sirontaominaisuudet kun taas vaihe kertoo etäisyyden tutkasta kohteeseen. SAR-interferometriassa kerrotaan kahden hieman eri paikasta ja eri aikaan otetun kuvan amplitudit ja vähennetään niiden vaiheet keskenään. (*Karila, 2005*)

DINSAR-menetelmä

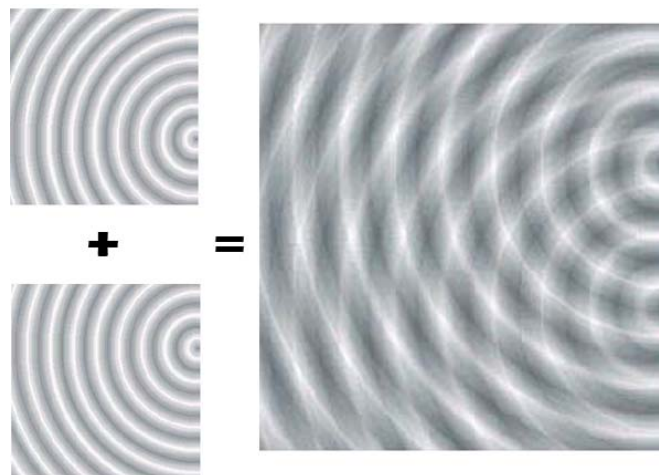
Laajennus INSAR-menetelmästä. DINSAR-menetelmässä pyritään interferogrammista poistamaan kohteen topografian vaikutus toisen interferogrammin avulla. Näin jäljelle jää teoriassa ainoastaan kohteen deformaatiosta johtuva interferenssi. Tämä voidaan toteuttaa myös kahdella SAR-kuvalla ja korkeusmallilla. (*Karila, 2005*)

PS-menetelmä

PS (Permanent Scatterers) –menetelmä eli pysyvien sirottajien menetelmä on seuraava kehitysaskel DINSAR –menetelmästä. Jotta temporaalinen dekorrelaatio eli kohteen muuttuminen ajan myötä saadaan vältettyä pitkissä aikasarjoissa, käytetään liikkeen havaitsemiseen ainoastaan pysyviä tai todella vähän muuttuvia kohteita, (esim. rakennukset ja kivet). Tällä menetelmällä voidaan myös vähentää ilmakehän vaikutusta sekä korkeusmallin virheitä. (*Karila, 2005*)

Toimintaperiaate

Perinteisessä SAR-sovelluksessa eli yksittäisen SAR-kuvan tulkinassa käytetään takaisinheijastuneen signaalin amplituditietoa, eli tietoa siitä, kuinka voimakas takaisinsironta on. Tällöin saadaan jossain määrin optisen alueen satelliittikuvaa vastaava esitys. SAR-interferometriassa puolestaan hyödynnetään tutkimituksen koherenttisuutta, eli käytännössä takaisinheijastuneen signaalin vaiheinformaatiota. Yhdeltä kuvalta vähennetään vastinpisteessä vastaanotetusta aallosta toisen kuvan saman vastinpisteen vastaanotetun aallon vaihe. Näin saadaan vaihe-ero. Tästä voidaan päätellä kahdelta tai useammalta SAR-kuvalta maastopisteen etäisyyksien muutoksia tai eroja. (*Foton labra*) Periaatteessa SAR-interferometriassa on kyse aivan tavallisesta aaltojen interferenssistä (ks. Kuva 1). Toki SAR-tekniikka sisältää paljon laskemista jo kuvan tuottovaiheessakin, mutta perusidea on yksinkertainen.

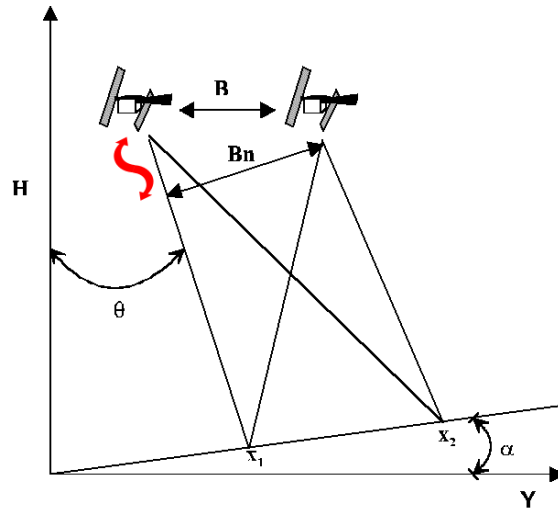


Kuva 1. Kahden aallon interferenssi. Samaa periaatteellista ideaa hyödynnetään SAR-interferometriassa. (Kuva: Open Door Web Site)

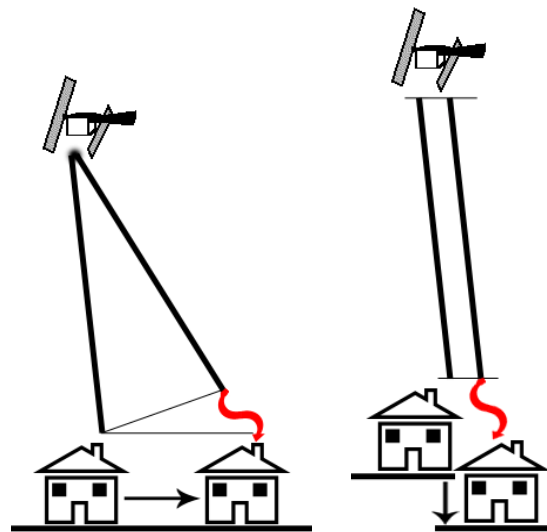
SAR-interferometrialla korkeusmallin luomista ei tässä työssä käsitellä sen tarkemmin. Korkeusmallin luominen perustuu kuitenkin edellä mainitun vaihe-eron ja kuvausgeometrian hyödyntämiseen (ks. Kuva 2 ja sivu 14).

Tämän työn kannalta kiinnostavampi sovellus on interferometrian hyödyntäminen liikkeen havaitsemisessa. Liikkeen havaitseminen perustuu siihen, että tietyn ajan välein kyetään havainnoimaan tiettyä pistettä maastossa. Tietyllä ajanhetkellä mikroaalto kulkee tiensä lähettimestä pisteeseen ja siitä takaisin vastaanottimeen. Tämän aallon vaihetieto tallennetaan. Kun samaa pistettä seurataan toisella ajanhetkellä, voidaan satelliitin rata-, paikka- ja muut tiedot tuntien

havaita pisteen liike mikroaallon vaiheen muutoksen avulla (ks. Kuva 3). Kuitenkin on huomattava, että yhden kuvaparin vaiheinformaatiosta ei voida päätellä, onko kohteen liike pysty- vai vaakasuuntaista. Tämän ratkaisemiseksi tarvitaan joko päätelmä useammasta eri suunnasta tehdyn mittauksen pohjalta tai joissain tapauksissa pelkkä suora oletus.



Kuva 2. SAR-interferometriian geometria. Punainen aalto kuvaa SAR-interferometriassa hyödynnettävää kahden aallon vaihe-eroa. (Kuva: Foton labra)



Kuva 3. Yksinkertaistettu kuva havainnollistaa menetelmää, jolla liike havaitaan SAR-interferometriaa hyödyntämällä. Punainen aalto kuvaa vaiheinformaatiota takaisinheijastuneesta signaalista. Kuvien talot kuvaavat seurattavaa kohdetta (mielellään pysyviä sirottajia). Vasemman puoleisessa kuvassa kuvataan vaakaliikkeen havaitsemista, kun taas oikeassa kuvassa kuvataan pystyliikkeen (maan vajoamisen) havaitsemista.

Jotta yhtä tiettyä pistettä voitaisiin seurata, tulee tämän pisteen takaisinsirontaominaisuudet olla hyvin samanlaiset läpi seurattavan aikasarjan. Lisäksi takaisinsironnan tulee olla näissä pisteissä varsin voimakasta. Tällaisia sirottajia kutsutaan pysyviksi sirottajiksi (Permanent Scatterers = PS). Edellä mainitut vaatimukset täyttyvät parhaiten maastossa ihmisen rakentamille kohteille, kuten

talot, tien risteykset, tolpat ja muut selkeät rakenteet. Myös luonnollisia pysyviä sirottajia löytyy maastosta. Tällaisia voivat olla esimerkiksi suurehkot maasta esiin pistävät kivet. Metsäisillä alueilla harvemmin on samaa määrää pysyviä sirottajia kuin rakennetuissa keskustoissa tai taajamissa. Tämän vuoksi PS-tekniikkaan soveltuukin parhaiten rakennetut alueet (ks. Kuva 4). Toisaalta mielenkiintoista on, että käytettäessä amplitudin stabiilisuutta perusteena, voidaan todeta metsän olevan mahdollisten pysyvien sirottajien määrässä (kpl / km²) yllättävän lähellä taajama-alueita (Karila, 2004). (ks. Taulukko 1)



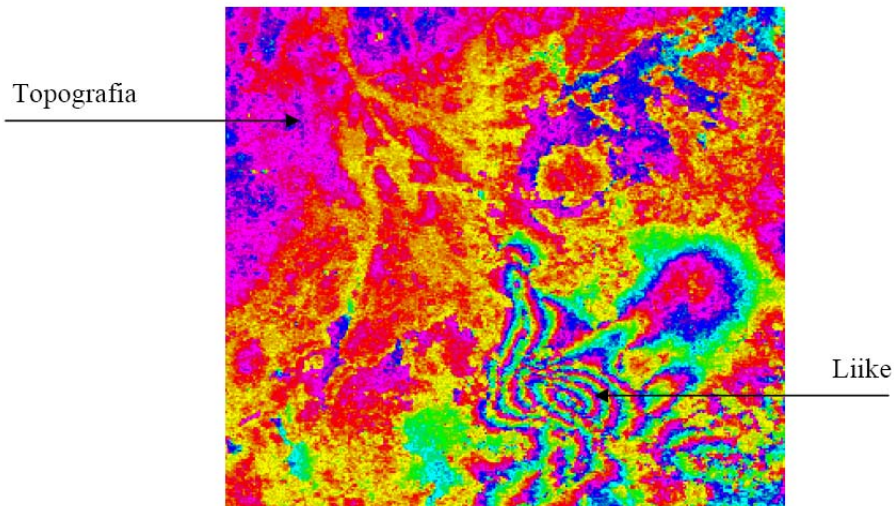
Kuva 4. Ilmakuva jonka päälle on lisätty PS-dataa (värilliset pisteet). Kuvasta voidaan huomata, että pysyvät sirottajat (PS) ovat usein ihmisen rakentamia kohteita, kuten rakennukset, valotolpat jne. Metsässä ja pelloilla ei juuri näy pysyviä sirottajia. Luonnollisia pysyviä sirottajia voi olla esimerkiksi paljaat kivet. (Kuva: P.Farina et. al)

Stabiilisuus	Metsä	Pelto	Keskusta	Taajama	Saaristo
< 0.25	0.2	0	0	0.3	0.1
< 0.30	4.9	1.6	19.0	9.8	0.7
< 0.35	58.7	17.2	138.0	76.0	7.4

Koherenssi	Metsä	Pelto	Keskusta	Taajama	Saaristo
> 0.7	-	0.2	7.0	11.6	0.03
> 0.6	-	0.4	38.0	43.0	0.4
> 0.5	0.06	0.6	147.9	125.0	3.2
> 0.4	0.4	0.8	510.0	357.1	23.1

Taulukko 1. Mahdollisten pysyvien sirottajien määrä (kpl / km²) käyttäen perusteena stabiilisuutta ja koherenssia. (Taulukko: Karila, 2004)

Kun vaiheinformatiosta on lentoparametrien avulla saatu muodostettua interferogrammi (ks. Kuva 5), tulee topografian vaikutukset erottaa liikkeen ja muutoksen aiheuttamista vaikutuksista. Tähän on kaksi vaihtoehtoa. Käytetään joko useampaa SAR-kuvaa (3-4) tai kahta SAR-kuvaa ja korkeusmallia. Näistä muodostetaan kaksi interferogrammia, joilta maaston deformaatiot voidaan selvittää. Tämä on ns. DINSAR-menetelmä.



Kuva 5. Kuvassa näkyy SAR-interferogrammi. Topografia aiheuttaa interferointia samoin kuin liike (vaikka liike näkyykin selvemmin tässä kuvassa). Topografian vaikutus saadaan poistettua käyttämällä korkeusmallia, jolloin jäljelle jää vain liikkeen aiheuttama interferenssi. (Kuva: Karila, 2004)

Aina ei liikkeen havaitseminen kuitenkaan onnistu. Tähän voi olla useita samanaikaisestikin vaikuttavia syitä. Ensimmäisenä syynä voidaan pitää ns. temporaalista dekorrelaatiota, eli aikasarjan aikana kohteessa tapahtuvaa muutosta. Tämä voi olla voimakasta pitkillä kuvanottoväleillä. Tämä voi johtua esimerkiksi kasvillisuuden kasvusta tai häviämisestä. Tämä tekee interferogrammista kohinaisen, eikä vaihekuvioita pystytä erottamaan. Ilmakehä saattaa olla eri kuvanottoaikoina erilainen ja näin ollen taittaa mikroaaltoja eri tavalla. Vaikka mikroaaltoalue ei ole yhtä herkkä ilmakehän vaikutuksille kuin optinen alue, saattaa ilmakehässä eri aikana eri lailla taittavat aallot aiheuttaa virheellisiä tulkintoja. (Karila, 2004 ja 2005) Myös liikkeen suunta suhteessa satelliitin lentorataan saattaa vaikuttaa liikkeen havaitsemiseen. Jos liikkeen suunta on hyvin samansuuntainen satelliitin lentoradan kanssa, voi liikettä olla vaikea havaita. (C. Colesanti et al)

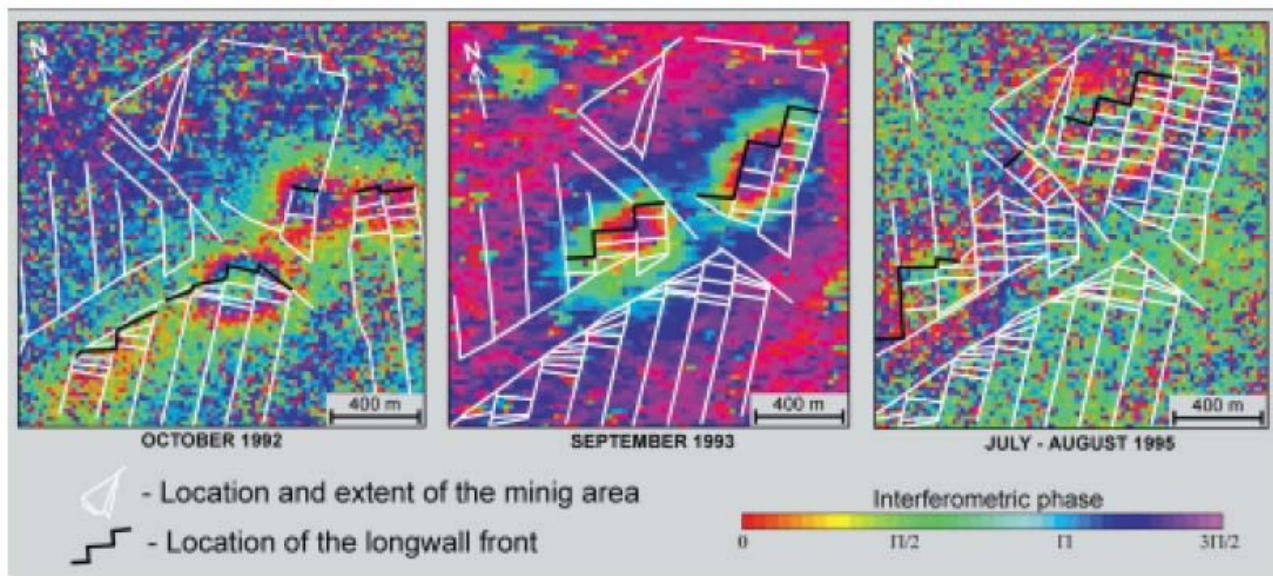
Eri käytännön sovelluksia

Puolan hiilikaivokset

Ylä-Silesian hiililaakso Puolassa on yksi maailman suurimmista kaivoskeskittymistä maailmassa. Alueen 65 kaivoksesta tuotetaan 130 miljoonaa tonnia hiiltä vuosittain. Alue on myös vahvasti kaupungistunut ja teollistunut. Lähes 40 % kaikista kaivoksista sijaitsee kaupunkien alla. Kaivostoiminnasta aiheutuva maanvajoama aiheuttaa suurta vahinkoa rakennuksille, muulle infrastruktuurille sekä ympäristölle, koska se muuttaa mm. sadevesien virtausta. SAR-interferometriä antaa mahdollisuuden maanvajoaman seurantaan.

Vajoama testialueella sijaitsevien maamittausasemien mukaan kuuden kuukauden periodilla oli kaivantojen läheisyydessä suurimmillaan 16–25 cm. SAR-interferometrialla saatuja tuloksia verrattiin maamittausasemien havaintoihin. Päätelmä oli, että SAR-interferometrialla päästään realistisempiin tuloksiin, sillä aikaväli on lyhyempi. Tutkimuksessa käytettiin vain kuutta SAR-kuvaa, joista luotiin kolme kahden kuvan interferogrammia lokakuulta 1992, syyskuulta 1993 ja heinä-elokuulta 1995 (ks. Kuva 6). Kuvien kuvanottoväli oli kahdessa ensimmäisessä tapauksessa 35 ja viimeisessä 70 päivää.

(Perski & Jura)



Kuva 6. Kuvasta on nähtävissä, miten SAR-interferogrammi näyttää suurimmat maan vajoamisen keskustat sijaitsevat aivan kaivosrintamien (mustat viivat kuvassa) läheisyydessä. (Kuva: Perski & Jura)

Venetsianlahti (Lagoon of Venice)

Luonnollisista ja ihmisen aiheuttamista syistä johtuva maanvajoama on yksi vakavimmista ympäristöongelmista Venetsianlahden (Lagoon of Venice) alueella, joka sijaitsee laajalti keskimerenpinnan alapuolella. Seurauksia ovat mm. jokien tulvimiset ja meriveden sekoittuminen pohjaveteen. Pohjaveden pumppausrajoitukset 1970-luvulla hidastivat merkittävästi vajoamista, mutta tutkimukset osoittavat vajoamista edelleen tapahtuvan tietyillä alueilla.

Vuoteen 1999 asti vajoamista on seurattu yksinkertaisilla vaaitusmittauksilla, ja vain Venetsian kaupungissa tehtiin tiheämpi vaaitusverkko. Vaaitusverkkoa ollaan laajentamassa. Nykyään vaaitusverkko kattaa noin 1000 vertauspistettä.

Vuonna 2001 alkaneessa projektissa otettiin vajoamisen seurannassa vaaituksen lisäksi GPS-mittauksia ja SAR –aineistoa mukaan samaan tietokantaan. Projektin tulokset ovat näyttäneet, että tällaisella integroimisella pystytään sekä takaisinseuraamaan viimeisen vuosikymmenen muutoksia että evaluoimaan tulevia trendejä. Tämä on tärkeää niin kunnostustöiden kuin alueen suojelemisenkin suunnittelemiseksi.

DINSAR-menetelmä osoittautui erityisen arvokkaaksi rannikkoalueilla. DINSAR:lla havaittiin parilla rannikkoalueella voimakas mereen päin suuntautunut maanvajoaminen, joka olisi ollut käytännössä mahdotonta havaita muilla menetelmillä. Vaaituslinjoja käytetään vielä kaupunkialueen ulkopuolella, osin luomaan DINSAR-menetelmälle referenssipisteitä. Näin saadaan myös vahvistettua molempien menetelmien paikkansapitävyys.

(EOQ, 2003)

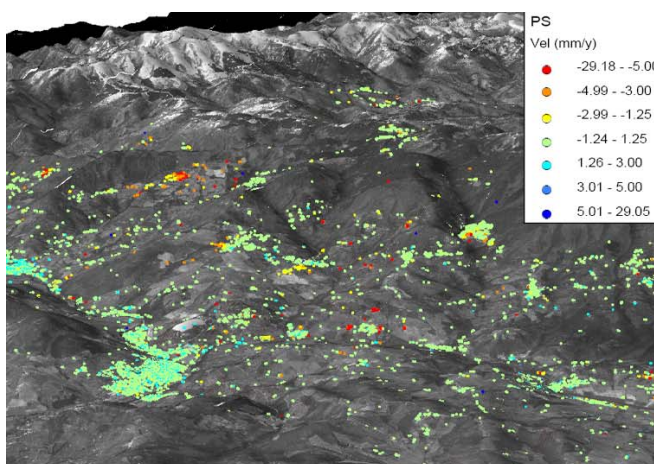
SAR-aineiston ja optisten kuvien integrointi (Italia)

Italiassa tapahtuvat maanvyörymät aiheuttavat varovaisestikin arvioituna keskimäärin 1-2 miljardin euron vuotuiset vahingot, lisättynä vielä keskimäärin 59 ihmishengen vuotuisella menetyksellä. Tämän ongelman ratkaisemiseksi on aloitettu ESA:n (European Space Agency) rahoittama SLAM (Service for LANDslide Monitoring) –projekti. Tavoitteena on tarjota palvelu maanvyöryriskin hallintaan. Testialueeksi on valittu Arno-joen valuma-alue Keski-Italiassa.

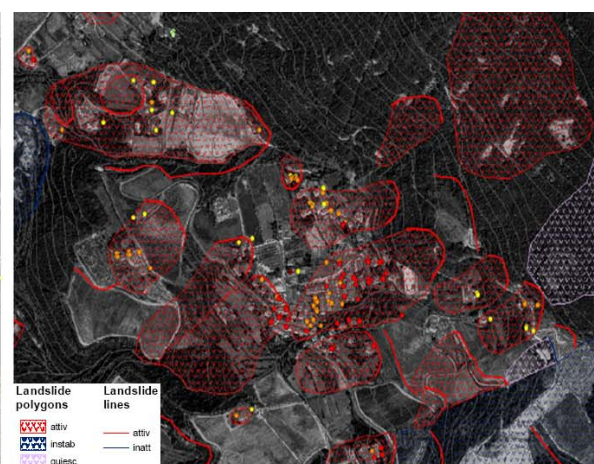
Tavoitteen saavuttamiseksi prosessoitiin noin 350 SAR-kuvaa, joilta löydettiin yhteensä noin 600 000 PS-pistettä. Projektissa yhdistettiin PS-DINSAR-tekniikalla saatua millimetriluokan siirtymätietoa korkearesoluutioisiin optisen alueen ilmakuviin ja SPOT5-satelliittikuviin (ks. Kuva 4 ja Kuva 7). Näin saadaan pääteltyä paremmin lähialueiden vaikutukset siirtymälle ja toisaalta siirtymän vaikutukset lähiympäristölle, kuin jos käytössä olisi ainoastaan PS-DINSAR-tekniikalla havaittua kvantitatiivista pistedataa. GIS tarjoaa tällaiselle spatiaalisesti jakautuneelle tiedolle hyvän työkalun ja tämän vuoksi analyysit tehtiin GIS-ympäristössä.

Laajalle alueelle voidaan suorittaa SPSA (Standard PS –Analysis), jolla saadaan kustannustehokkaasti selvitettyä lineaariset siirtymät aikasarjassa, löytäen näin maanliikkeen riskialueet sekä lisäksi stabiilit alueet. Tämän jälkeen voidaan halutulle pienelle alueelle (riskialue) suorittaa ASPA (Advanced PS –Analysis), joka vaatii paljon aikaa ja yhteistyötä ammattitaitoisten ihmisten kesken. Tällä saadaan hyödynnettyä kaikki käytettävissä oleva satelliittidata ja voidaan löytää myös ei-lineaariset siirtymät.

Optisilta, etenkin pankromaattisilta ilmastereokuvilta, saadaan suuren mittakaavan (1:10'000 – 1:50'000) ansiosta havaittua siirtymät ja niiden tyypit. Esimerkiksi suurten siirtymien aiheuttamat kasvistohäiriöt ja maaperän kosteusvaihtelut voidaan havaita. Pienemmän mittakaavan satelliittikuvilta voidaan hyvissä olosuhteissa löytää muutoksia kokonaisissa rinteissä. Projektissa luotiin myös topografiselle kartalle ns. maanvyöryriskialueita vektorimuodossa, joita päivitettiin ja muokattiin SAR-datasta tehdyillä havainnoilla ja päätelmillä (ks. Kuva 8).



Kuva 7. PS-datapisteitä plotattuna DEM:lle oikaistun pankromaattisen SPOT5 -satelliittikuvan päälle. (Kuva: P. Farina et al.)



Kuva 8. Topografiselle kartalle plotatut PS-datapisteet sekä vektorimuotoiset maansiirtymäalueet. (Kuva: P. Farina et al.)

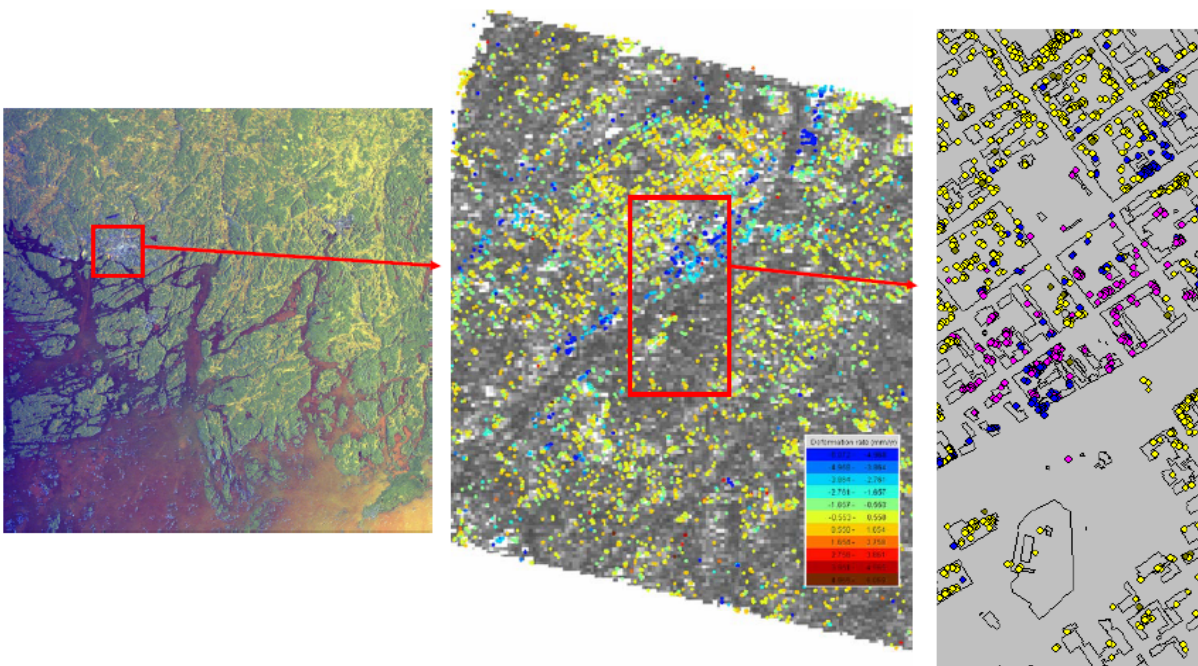
Optisen alueen satelliittikuvat kattavat laajan alan, mutta kykenevät havaitsemaan vain suuria muutoksia. Tämän vuoksi spatiaalisen resoluution kannalta tarkempi tieto saadaan irti ilmakuvilta. Ilmakuvien ongelmana puolestaan on se, että ne kattavat vain pienen alueen. Suurilta alueilta ilmiöiden etsiminen vaatii paljon aikaa ja vaivaa, eli rahaa. Tämän vuoksi SAR-inerferometri ja PS-tekniikan tarjoama apu on huomattavan tärkeää. InSAR-aineiston pohjalta löydetään juuri ne kriittiset alueet, joita sitten tutkitaan tarkemmin ilmakuvilta.

(P. Farina et al.)

Rakennusten vajoaminen Turussa

Turku on satoja vuosia vanha kaupunki, ja useat edelleen pystyssä olevat rakennukset ovat vähintäänkin vanhoja. Nämä rakennukset on rakennettu osin puupylväiden varaan, ja pohjaveden laskiessa pylväät lahoavat ja rakennukset alkavat vajota. Näiden paalujen uusimisen on arveltu maksavan lähteestä riippuen 90:stä aina 200 miljoonaan euroon.

Jotta vajoamisalueilla saadaan aloitettua korjaustyöt, on ensin tiedettävä missä nämä korjattavat kohteet sijaitsevat. Perinteisen vaaitusmittauksen lisäksi Turun alueelta hankittiin 40 SAR-kuvaa (ERS-1 ja -2) kymmenen vuoden aikasarjalta. Näistä tehtiin 33 interferogrammin aikasarja ja niistä tehty koherenttien kohteiden pistekartta yhdistettiin rakennusaineistoon (ks. Kuva 9) Näin löydettiin vajoavat rakennukset. (Karila, 2005)



Kuva 9. SAR-interferogrammeilta muodostettu koherenttien kohteiden pistekartta (keskellä) yhdistetty rakennusaineistokarttaan (oikealla). (Kuva: TEKES)

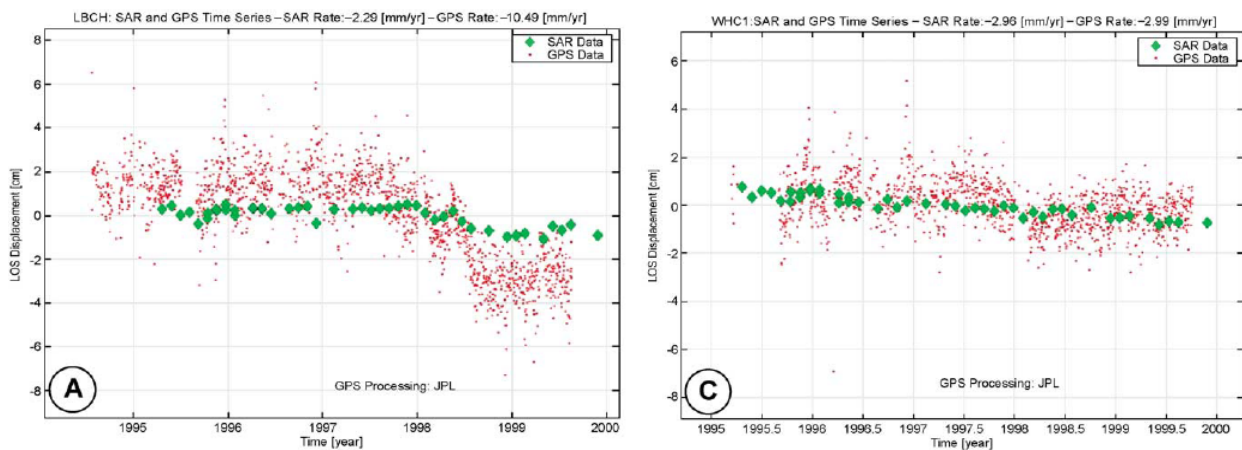
Tarkkuus ja luotettavuus

PS-DINSAR vs. GPS

Verrattaessa PS-menetelmällä saatua INSAR-dataa pysyvistä GPS-aseamista mitattuun dataan huomataan, että PS-DINSAR-aineistolla päästään kertaluokkaa tarkempaan tulokseen. Myös alueellinen otanta on paljon parempi. PS-tekniikalla voidaan saada satoja kiintopisteitä neliökilometriä kohden, kun taas pysyvien GPS –asemien määrä on hyvin pitkälti rajoitettu. Lisäksi PS-tekniikalla seurattavista pisteistä saadaan dataa varsin usein, esimerkiksi ERS–satellitilla 35 päivän välein.

SAR-data on hyvin herkkää vaakasuuntaiselle liikkeelle, jota taas GPS ei niin herkästi havaitse. Kuitenkin, jos kohdepisteen liike on satelliitin radan suuntaista, ei liikettä pelkällä SAR-datalla helposti havaita.

(C. Colesanti et al.)

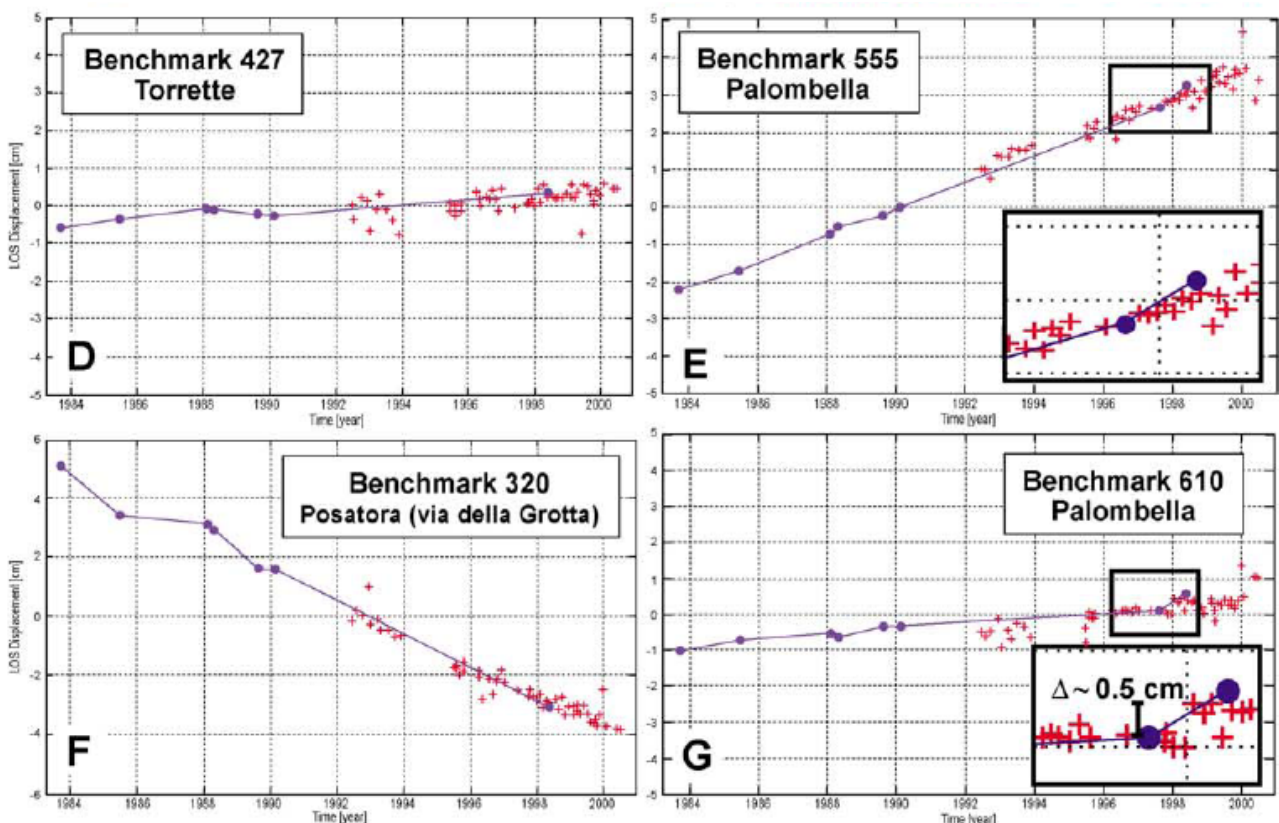


Kuva 10. Kuvaajissa on verrattu GPS- ja PS-DINSAR-menetelmien suhteellisia tarkkuuksia (GPS = pienet punaiset pisteet, PS-DINSAR = isot vihreät pisteet). Ulkoisen tarkkuuden (keskiarvo) korreloidessa molempien aineistojen kesken hyvin, huomataan PS-DINSAR-tulosten sisäisen tarkkuuden (hajonnan) olevan kertaluokkaa parempi suhteessa GPS-aineistoon. (Kuva: C. Colesanti et al.)

PS-DINSAR vs. optinen vaaitus

Optisella vaaituksella saadut tulokset ovat jossain määrin tarkempaa kuin SAR –aineistolla saadut tulokset. Optisella vaaituksella päästään teoriassa millimetrin murto-osien tarkkuuksiin, kun INSAR:lla päästään PS-menetelmää soveltaen parhaillaan millimetritarkkuuksiin. (C. Colesanti et al.) Vaaituksen tarkkuus käytännössä on kuitenkin vain millimetrituokkaa. Molempien tulokset ovat joka tapauksessa toisiaan täydentäviä ja hyvin samansuuntaisia (ks. Kuva 11). Suomen Turussa tehdyssä mittauksessa vaaituksella ja PS-menetelmällä saadut tulokset poikkesivat toisistaan korkeintaan millimetrin vuotuisella tasolla (Karila, 2005).

Optisen vaaituksen luotettavuutta suhteessa PS-DINSAR:iin lisää se, että vaaituspiste voidaan valita vapaasti. Näin voidaan välttyä satunnaisilta poikkeamilta. Toisaalta PS-DINSAR:ssa käytettävien seurantapisteen suuri määrä poistaa epävarmuutta ja antaa hyvän kuvan myös ympäristöstä, kun optisessa vaaituksessa puolestaan saadaan havainnot ainoastaan valitulta vaaituslinjalta.

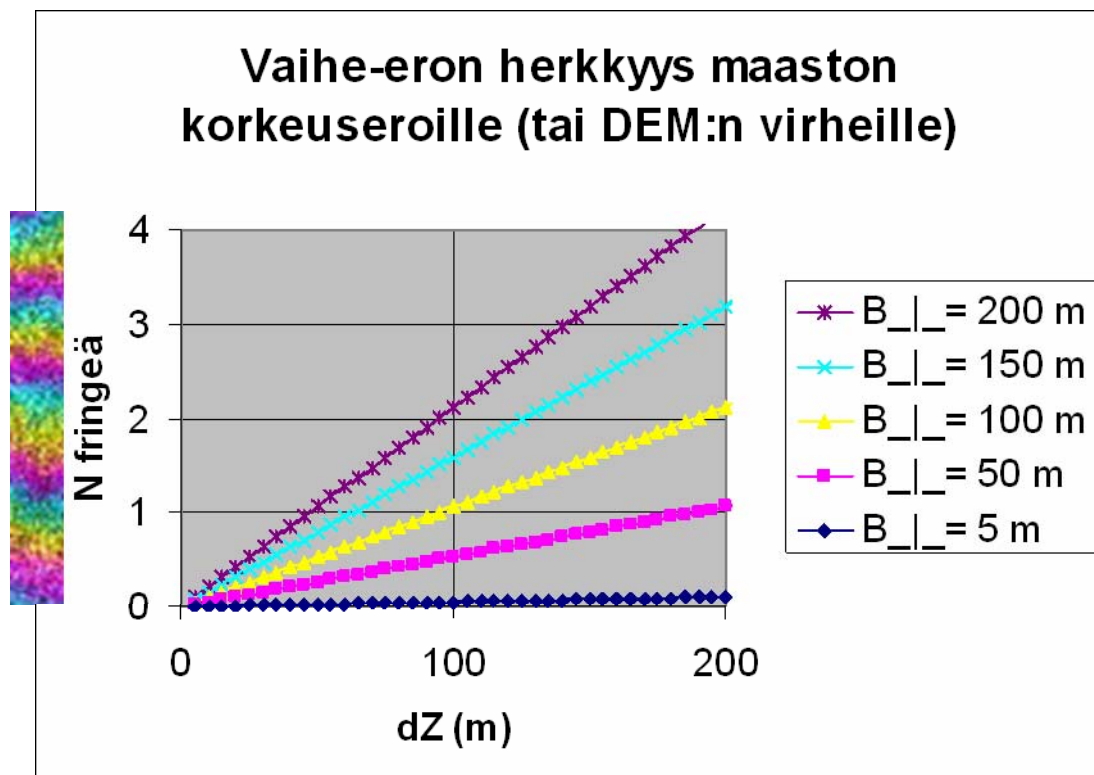


Kuva 11. Kuvaajissa on verrattu PS-InSAR –menetelmällä saatuja havaintoja perinteiseen optisen vaaituksen menetelmällä saatuihin havaintoihin. Kuvaajista on nähtävissä, että molemmat menetelmät korreloivat keskenään hyvin. InSAR –menetelmän havaintojen poikkeama (hajonta) vaaituksen havainnoista on vain millimetrituokkaa. (Kuva: C. Colesanti et al.)

Kuvauskannan vaikutus

Kuvauskannalla (B) tarkoitetaan kahden SAR-kuvan kuvanottoaikan eroa, eli käytännössä satelliittien lentoratojen välistä etäisyyttä. Ilmiö on hyvin samanlainen, kuin tavallisen stereokuvaparin tuotannossa (ks. Kuva 2). Kuva 12 on havainnollistettu kuvauskannan vaikutusta vaihe-eron havaitsemisherkkyydelle korkeuseron selvittämisessä. Huomataan, että pidemmällä kuvauskannalla (B) saadaan paremmin korkeuserot havaittua. Tosin kuvauskannan pidentäminen vaikuttaa myös koherenssiin, jolloin pidemmällä kuvauskannalla on vaikeampi saada koherentteja SAR-kuvia. Optimaalinen kuvauskanta löytynee pisimmällä kuvauskannalla, jolla saadaan riittävän hyvä koherenssi.

Kuvaajaa voi tutkia myös käänteisesti liikkeen havaitsemissovelluksissa käytettävän korkeusmallin tarkkuusvaatimusten selvittämiseksi. Huomataan, että korkeusmallin tarkkuudeksi riittää muutaman metrin tai muutaman kymmenen metrin tarkkuus. (Vuorela)



Kuva 12. Kuvassa havainnollistettu ERS-satelliitille kuvakannan B (ks. Kuva 2) vaikutusta vaihesyklien (=fringien) määrään (ERS-satelliitille $d\phi/dz \approx B_{_}[m]/1500[m^2]$). Jos korkeusmallia käytetään topografiasta johtuvien vaihesyklien kompensoimiseen liikkeen havaitsemiseksi, tulee DEM:n olla melko hyvälaatuinen. Kuitenkin jo muutaman metrin tai kymmenen metrin tarkkuus kelpaa. (Kuva ja tutkimus: Arto Vuorela, Jaakko Pöyry Group)

Pohdintaa

Kuten tässä työssä on tuotu esille, on maanpinnan liikkeiden havainnoinnissa PS-menetelmää hyödyntävä SAR-interferometriaan perustuva tekniikka varsin käyttökelpoinen ja toimiva. Suhteessa muihin mahdollisiin menetelmiin on PS-DINSAR monin puolin lyömätön.

SAR-datan perusteella saadaan hyvä käsitys maan liikkeestä laajalla alueella kokonaisuutena. Perinteisiin menetelmiin (vaaitus ja GPS) verrattuna SAR-interferometria mahdollistaa varsin lyhyen aikavälin (esim. ERS, 35 päivää) muutosten seurannan suhteellisen laajalta alueelta. Varsinkin tiheästi rakennetun alueen seurannassa lyhyet seuranta-ajat saattavat mahdollistaa suurien tuhojen estämisen. SAR-teknologia tuo täysin uusia ulottuvuuksia esimerkiksi vajoamisdynamiikan ja vajoamisen spatiaalisen jakauman tutkimiseen. Varsinkin yhdistämällä SAR-kuvilta saatua dataa muihin datalähteisiin, saadaan hyvää informaatiota ja eväitä varsin tehokkaaseen ennustamiseen ja ennakointiin. Tämä puolestaan mahdollistaa hyvissä ajoin tapahtuvan kattavan suunnittelun, jolla saadaan maanliikkeiden aiheuttamat vahingot minimoitua.

Kustannustehokkaasti ajateltuna SAR-teknologia on todella kiinnostava sovellusalue maan liikkeen ja muodonmuutosten tutkimuksessa. Vaikka kuvien hankkiminen ja prosessointi eivät ole ilmaista, on niihin perustuva tutkimus kuitenkin edullisempaa kuin esimerkiksi optinen vaaitus, jolla päästään suunnilleen samoihin tarkkuuksiin. Pysyvien sirottajien tekniikka mahdollistaa tarkan (millimetriluokan) liikkeen havaitsemisen. Pysyvien sirottajien tekniikka on houkutteleva siinä mielessä, että seurattavat pisteet ovat jo olemassa olevia pisteitä, kuten rakennusten kulmat jne. Täten niiden ylläpitoon ei vaadita sen enempää työtä kuin rahaakaan. Ongelmakohtiakin toki on. PS-DINSAR:ia voidaan soveltaa käytännössä vain rakennetulla alueella, josta löytyy riittävä määrä pysyviä sirottajia. Toinen ongelmakohta on pysyvän sirottajan liikkeen suhde maan liikkeeseen. Esimerkiksi korkeassa savupiipussa havaittu deformaatio ei välttämättä vastaa koko rakennuksen deformaatiota.

Tulevaisuudessa tutkakuvien spatiaalinen resoluutio paranee, mikä mahdollistaa useampien PS-pisteiden löytämisen. Tällöin myös sovellusalueet laajenevat. Lisäksi tulevaisuudessa on nähtävissä mahdollisuus keinotekoisien pysyvien sirottajien, ns. heijastimien asentamiseen, jolloin niitä saadaan juuri halutuille paikoille halutuilla sirontaominaisuuksilla. Kiinnostava ominaisuus INSAR-menetelmässä on aikasarjojen tutkiminen. Jo 90-luvun alusta on olemassa paljon käyttökelpoisia

SAR-kuvia. Tämä mahdollistaa sen, että dataa tutkimusalueesta voidaan tälläkin hetkellä saada parhaimmillaan yli kymmenen vuoden takaa ajalta, jolloin ei tutkimustarpeesta edes tiedetty. Tämä mahdollisuus lienee varsin houkutteleva kymmenen tai parinkymmenen vuoden päästä, jolloin voidaan jo tutkia oikeasti pitkiä aikasarjoja.

Lähteet

Kirjallisuus

C. Colesanti, A. Ferretti, C. Prati, F. Rocca: Monitoring landslides and tectonic motions with the Permanent Scatterers Technique (Engineering Geology 68 (2003) 3 –14)

EOQ 2003: Land Subsidence Monitoring Service in the Lagoon of Venice (Earth Observation Quarterly - June 2003)

Farina, P.; Colombo, D.; Fumagalli A.; Gontier, E.; Moretti, S.: Integration of permanent scatters analysis and high resolution optical images within landslide risk analysis.

Karila, Kirsi (2004): Tutkakuvien käyttö maanpinnan liikkeiden havaitsemiseen

Karila, Kirsi (2005): SAR-interferometriä kaupunkialueiden painumien tutkimuksessa

Z. Perski & D. Jura: ERS SAR Interferometry for Land Subsidence Detection in Coal Mining Areas (Corrigendum to EOQ 63, pages 25-29)

Internet

(Canada Center for Remote Sensing)

http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/resource/tutor/gsarcd/pdf/gsarcd_e.pdf (vierailtu 11.2.2006)

(Foton Labra)

<http://foto.hut.fi/~markus/article/Jarkko/int.html> (vierailtu 10.3.2006)

(Open Door Web Site)

<http://www.saburchill.com/physics/chapters2/0007.html> (vierailtu 14.3.2006)

(TEKES)

http://websrv2.tekes.fi/opencms/opencms/OhjelmaPortaali/Kaynnissa/AVALI/fi/Dokumenttiarkisto/Viestinta_ja_aktivointi/Seminaarit/vuosiseminaari05/Suomi-Kanada_yhteistyö_Hannula.pdf
(vierailtu 16.3.2006)

Muut

Vuorela, Arto - Jaakko Pöyry Group.