

Troposferische signaalvertraging; een vergelijking tussen GPS en SAR interferometrie

Ronald Stolk, Ramon Hanssen, Hans van der Marel en Boudewijn Ambrosius

I. INTRODUCTIE

Vertraging van radiogolven door de atmosfeer vormt een belangrijke foutenbron bij diverse geodetische technieken. Hoewel de principes van signaalvertraging voldoende bekend zijn, is een effectieve correctie van de metingen nog altijd een moeilijke zaak. Dit wordt veroorzaakt door (1) de heterogeniteit van de belangrijke atmosferische parameters, zoals vocht en temperatuur, en (2) het gebrek aan nauwkeurige metingen van deze parameters. In dit artikel wordt een vergelijking gemaakt tussen de effecten van de troposfeer op twee meetsystemen: GPS en SAR interferometrie (InSAR). Uitgangspunt hierbij is dat bij beide systemen troposferische invloeden zich als verstoringen van de positie zullen manifesteren.

Het experiment dat voor deze studie werd uitgevoerd is een onderdeel van het Groningen Interferometric SAR Experiment (GISARE). In het kader van dit experiment zijn gedurende 5 maanden diverse SAR opnames gemaakt door de satellieten ERS-1 en ERS-2, en zijn tijdens twee van deze opnames GPS metingen uitgevoerd in een netwerk van 8 ontvangers. Door de berekende GPS signaalvertragingen te vergelijken met die van InSAR kan een inventarisatie worden gemaakt van overeenkomsten en verschillen, zoals spatiële en temporele resolutie, nauwkeurigheid, complexiteit en inzetbaarheid [1], [3].

II. THEORIE

De voortplantingssnelheid v van radiogolven in een medium is

$$v = \frac{c}{n} \quad (1)$$

waarbij c de lichtsnelheid in vacuum is en n de refractieve index van het medium. Aangezien in het neutrale deel van de atmosfeer de refractieve index altijd groter is dan 1 zal de voortplantingssnelheid van de radiogolven altijd kleiner zijn dan de lichtsnelheid. Daardoor wordt er gesproken van de *vertraging* die het signaal oploopt in de atmosfeer. Deze vertraging Δt kan worden geschreven als

$$\Delta t = \tau_{atmos} - \tau_{vacuum} = \frac{S}{v} - \frac{S}{c} = \frac{S}{c} \cdot (n - 1), \quad (2)$$

met τ_{atmos} en τ_{vacuum} de looptijd van zender naar ontvanger door respectievelijk de atmosfeer en door vacuum en S de geometrische afstand van zender tot ontvanger. Door weer met de lichtsnelheid te vermenigvuldigen kan de vertraging uitgedrukt worden in de afstand

$$\Delta S = c \cdot \Delta t = S \cdot (n - 1). \quad (3)$$

Delft Institute for Earth Oriented Space Research (DEOS), Technische Universiteit Delft, Postbus 5030, 2600 GA, Delft. E-mail: ronald@dutlrub6.lr.tudelft.nl, hanssen@geo.tudelft.nl

Echter, aangezien de refractieve index van de atmosfeer niet homogeen is moet er worden geïntegreerd over het pad van zender naar ontvanger:

$$T = \Delta S = \int_{path} (n - 1) \cdot ds. \quad (4)$$

De vertraging ΔS (in meters) wordt nu aangegeven met T . Deze vertraging is op te splitsen in twee delen: de vertraging veroorzaakt door het geladen deel van de atmosfeer ook wel de *ionosferische vertraging* genoemd, en de vertraging door het neutrale deel van de atmosfeer; de *troposferische vertraging*. Dit onderzoek is voornamelijk toegespitst op het bepalen van de troposferische vertragingen. In de volgende paragrafen wordt deze parameter voor zowel InSAR als GPS afgeleid.

A. Troposferische vertragingen in SAR interferometrie

Een Synthetische Apertuur Radar maakt een opname van een gebied door radiogolven naar dit gebied te zenden. Van de gereflecteerde signalen wordt vervolgens, per pixel, de fase en amplitude gemeten. Door gebruik te maken van het verschil in fase in twee SAR opnamen van het zelfde gebied kan een *interferogram* worden gemaakt—het faseverschil tussen de twee beelden. Uit dit interferogram kan informatie worden gehaald over eventuele deformaties die in de tijd tussen de twee opnamen zijn opgetreden, de topografie van het gebied en de lokale verschillen in atmosferische vertraging [4]. Wanneer bekende deformatie en topografische informatie geëlimineerd worden, kan de informatie in het interferogram rechtstreeks worden gebruikt voor de bepaling van de verschillen in troposferische vertraging. Het verschil in interferometrische fase tussen bijvoorbeeld de punten m en k beschrijft de verschillen in troposferische vertraging op de volgende manier:

$$\delta\phi_{p,mk} = 4\pi \frac{f_{SAR}}{c} [(T_{t_1} - T_{t_2})_k - (T_{t_1} - T_{t_2})_m] \quad (5)$$

Hierin is T_{t_i} de troposferische vertraging van satelliet naar object voor opnametijdstip t_i en f_{SAR} de frequentie van de SAR. Door gebruik te maken van een mapping functie kunnen de troposferische vertragingen omgezet worden naar zogenaamde zenithvertragingen:

$$\delta\phi_{p,mk} = 4\pi \frac{f_{SAR}}{c} \cdot M(\theta) \cdot [(T_{t_1,z} - T_{t_2,z})_k - (T_{t_1,z} - T_{t_2,z})_m] \quad (6)$$

waarin M de mapping functie is en θ de zogenaamde incidence angle van de SAR antenne. De interferogramwaarden weerspiegelen het temporele verschil in troposfeer. Door

verschillende punten in het interferogram met elkaar te vergelijken, kan nu de spatiële verdeling van deze verschillen worden onderzocht.

B. Troposferische vertragingen in GPS waarnemingen

De relatieve troposferische vertragingen worden bepaald uit de GPS fasewaarnemingen. Allereerst worden de klokfouten geëlimineerd door gebruik te maken van double differences. Met de ionosferische vertraging wordt afgerekend door met de ionosfeer vrije lineaire combinatie te rekenen, afgekort tot L3. De effectieve frequentie van L3 wordt aangeduid met f_{GPS} . Wanneer nu de satellietposities bekend zijn, en de stationscoördinaten en de correcte gehele waarden voor de fasemeerduidigheden zijn berekend, dan kunnen de zogenaamde ionosfeer vrije, double difference residuen bepaald worden:

$$\varphi_{mk,\text{res}}^{qp} = \frac{f_{\text{GPS}}}{c} \cdot T_{mk}^{qp} + d_{mk}^{qp} + \epsilon_{mk}^{qp}. \quad (7)$$

Hierin stelt T_{mk}^{qp} de double difference troposferische vertraging voor tussen de stations k en m en de satellieten p en q , d_{mk}^{qp} de multipath effecten en ϵ_{mk}^{qp} de meetruis. Uitsplitsen van de double difference troposferische vertragingen naar de twee stations en toepassen van een mapping functie om naar zenith vertragingen te transformeren levert dan

$$\varphi_{mk,\text{res}}^{qp} = C_1 \cdot (T_{k,z} - T_{m,z}) - C_2 \cdot T_{m,z} + d_{mk}^{qp} + \epsilon_{mk}^{qp}, \quad (8)$$

waarin

$$C_1 = \frac{f_{\text{GPS}}}{c} \cdot [M(\alpha_k^p) - M(\alpha_k^q)]$$

$$C_2 = \frac{f_{\text{GPS}}}{c} \cdot ([M(\alpha_m^p) - M(\alpha_m^q)] - [M(\alpha_k^p) - M(\alpha_k^q)]).$$

Hierin is M de mappingfunctie die afhankelijk is van de elevatiehoek α waaronder de satelliet gezien wordt. In (8) komt de troposferische vertraging in twee termen voor: als het *verschil* in troposferische zenith vertraging tussen station k en m (de relatieve troposfeer), en als *absolute waarde* voor de troposferische zenith vertraging voor station m .

Het verschil in troposferische vertraging en de absolute waarde zijn nu in principe te schatten uit de double difference residuen van één meetepoche. De coëfficiënt van de absolute term C_2 is echter sterk afhankelijk van de lengte van de betreffende basislijn: wanneer de afstand tussen de stations k en m erg klein is zal de elevatiehoek waaronder satelliet p wordt waargenomen nagenoeg identiek zijn voor beide stations. Dezelfde redenering gaat op voor de andere satelliet van de double difference, satelliet q . Dit betekent dat voor korte basislijnen de coëfficiënt C_2 nul nadert en er dus geen informatie over de *absolute troposferische vertraging* uit de double difference ionosfeer vrije residuen kan worden gehaald. Ook coëfficiënt C_1 kan nul worden in het geval dat beide satellieten onder dezelfde elevatiehoek worden gezien vanuit één station. Wanneer alle satellieten dus onder dezelfde elevatiehoek zijn waargenomen, kan de relatieve troposfeer niet of slecht bepaald worden. Dit probleem is echter van tijdelijke aard en over het algemeen

is het mogelijk relatieve troposfeer te bepalen uit de double difference ionosfeer vrije residuen, onafhankelijk van de lengte van de basislijn.

Door nu het verschil in relatieve troposfeer te nemen tussen twee tijdstippen kunnen de gevonden waarden vergeleken worden met het interferogram. Kiest men bijvoorbeeld de tijdstippen t_1 en t_2 , dan geeft dat

$$(T_{k,z} - T_{m,z})_{t_1} - (T_{k,z} - T_{m,z})_{t_2} = (T_{t_1,z} - T_{t_2,z})_k - (T_{t_1,z} - T_{t_2,z})_m. \quad (9)$$

Door het rechterlid van (9) te vergelijken met het rechterlid van (6) kan worden afgeleid dat op deze manier dezelfde informatie uit de GPS waarnemingen kan worden gehaald als uit het interferogram.

III. HET GISARE GPS EXPERIMENT

A. Experimentele opzet

Tijdens GISARE zijn tussen 14 en 18 maart 1996 simultane GPS waarnemingen verricht op acht NAM locaties in Groningen en Noord-Drenthe. Door deze meetduur is het mogelijk de positie van de ontvangers te bepalen met een nauwkeurigheid van 1.2 milimeter. Er werd gebruik gemaakt van Turbo Rogue SNR 12, en Ashtech MDL Z-12 ontvangers, uitgerust met Dorne Margolin antennes. Op 16 en 17 maart werd hetzelfde gebied waargenomen door de Synthetische Apertuur Radar van resp. ERS-1 en ERS-2. Doordat de afstand tussen de beide opnameposities (de *interferometrische basislijn*) slechts 26 meter bedroeg, is de hoogtegevoeligheid van deze configuratie zeer gering, waardoor de invloed van de hoogte op de interferometrische fase praktisch kan worden verwaarloosd. Verder wordt groot-schalige deformatie uitgesloten door de korte tijdsduur tussen de opnames (24 uur), waardoor atmosferische effecten het belangrijkste signaal vormen.

B. Data processing GPS en InSAR

Om uit de GPS fasewaarnemingen de double difference ionosfeer vrije residuen te kunnen maken is het noodzakelijk dat de satelliet- en ontvangerposities berekend zijn en dat voor de meerduidigheden de correcte gehele getallen worden gevonden. Informatie betreffende de satellietposities wordt beschikbaar gesteld door de International GPS Service for Geodynamics (IGS). Met de Bernese GPS Software worden de stations onderling verbonden tot een netwerk van onafhankelijke basislijnen, waarna de coördinaten worden bepaald en de meerduidigheden worden opgelost [2]. Vervolgens worden voor elke basislijn de double difference ionosfeer vrije residuen bepaald. De basislijnen zijn dermate kort dat het niet mogelijk zal zijn om de absolute component van de troposferische vertraging te bepalen; alleen de relatieve troposfeer is schatbaar uit deze data (zie paragraaf II-B). Om deze informatie te verwerken, wordt uit de double difference ionosfeer vrije residuen m.b.v. de kleinste kwadraten methode elke 30 seconden de relatieve troposfeer geschat. Dit levert voor elke basislijn een tijdserie van een dag op. Om de ruis uit deze tijdserie te verwijderen wordt een laagdoorlaat filter in het frequentie

domein toegepast. Uit deze gefilterde tijdseries kan vervolgens de relatieve troposfeer op de tijdstippen van de SAR opnamen worden bepaald.

In de interferometrische processing worden de beide SAR beelden allereerst gecoregistreerd: overeenkomstige pixels van het tweede beeld worden geïnterpoleerd op het grid van het eerste beeld. Hierna worden de data gefilterd, om ruis in het eindproduct te onderdrukken. Door nu een complexe vermenigvuldiging van beide beelden uit te voeren, ontstaat het interferogram. De pixels in dit interferogram worden in stukken van 2×10 gemiddeld, waardoor een resolutie van ca. 40×40 meter ontstaat met een verhoogde fasenauwkeurigheid. Nadat hierna de fasemeerduidigheden in het interferogram zijn opgelost (het *unwrappen* van de fase), en een referentie ellipsoïde van de fase is afgetrokken, kan het faseverschil tussen naburige pixels worden geïnterpreteerd als een spatiaal verschil in troposferische vertraging. Doordat echter de baanparameters van ERS-1 en ERS-2 onvoldoende nauwkeurig bekend zijn, kan het interferogram iets gekanteld liggen ten opzichte van de referentie ellipsoïde. Met deze mogelijke additionele kanteling wordt in de vergelijking van de resultaten rekening gehouden.

C. Vergelijkingsmethodiek

Om een correcte vergelijking te maken tussen troposferische vertragingen uit GPS en SAR interferometrie is het belangrijk dat de waarden die worden vergeleken betrekking hebben op hetzelfde stuk van de atmosfeer. Het gedeelte van de atmosfeer dat bijdraagt aan de troposferische zenithvertragingen verschilt sterk voor beide methoden. Het atmosferische gezichtsveld van een GPS antenne kan worden gezien als een omgekeerde kegel terwijl bij SAR interferometrie elke pixel in principe één enkel pad door de atmosfeer voorstelt. Om nu er voor te zorgen dat er zoveel mogelijk overlap is tussen het deel van de atmosfeer dat wordt bekeken door beide methoden zullen de troposferische vertragingen uit het interferogram gebaseerd worden op het gemiddelde over een groot aantal pixels. Hiervoor wordt aangenomen dat de lokale variaties van de troposferische vertraging voornamelijk wordt veroorzaakt door de in de atmosfeer aanwezige waterdamp (de zgn. *natte* vertraging). Uit analyse van de radiosonde data blijkt dat *de helft* van alle natte vertraging optreedt in de onderste 1.4 km van de atmosfeer. Daarom wordt als voorwaarde voor maximale overlap gesteld dat op deze hoogte zowel SAR als GPS een gelijk deel van de atmosfeer zien: onder 1.4 km ziet SAR meer atmosfeer, boven de 1.4 km is het gezichtsveld van GPS groter. Een grafische voorstelling van deze configuratie is afgebeeld in figuur 1. De doorsnede van de kegel van GPS op 1.4 km hoogte geeft een cirkel met een straal van 3.8 km. Alle SAR fasewaarden waarvan het pad binnen deze cirkel ligt dragen bij tot één gemiddelde waarde voor het temporele verschil in troposferische zenithvertraging.

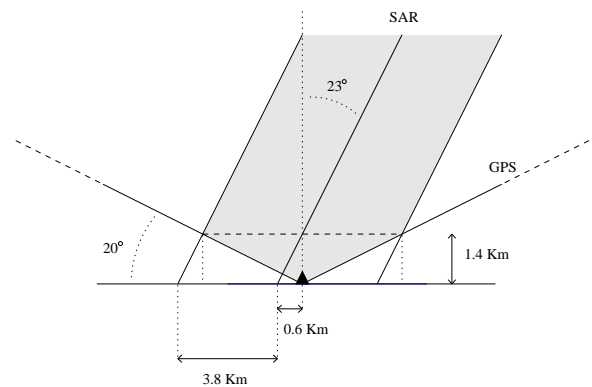


Fig. 1. Zijaanzicht van het verschil in schattingsgeometrie voor SAR en GPS. De GPS vertraging wordt bepaald uit alle waarnemingen boven een elevatiehoek van 20° . De SAR vertraging wordt gemiddeld binnen de *tube* onder een zenith hoek van 23° . Op 1.4 km hoogte wordt de overlap tussen beide configuraties bepaald.

IV. RESULTATEN

Met de beschreven verwerkingsmethoden zijn de data van het GISARE GPS experiment geanalyseerd. Achtereenvolgens worden hier de resultaten van SAR interferometrie, meteorologische observaties, GPS resultaten, en de vergelijking van GPS en InSAR beschreven.

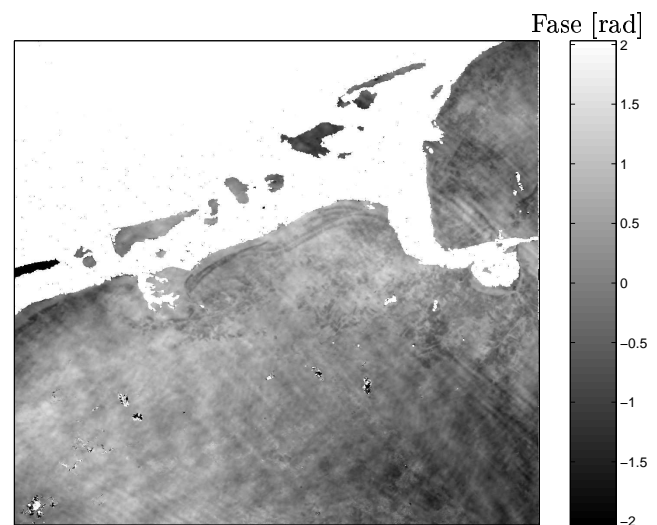


Fig. 2. Het interferogram van 16 en 17 maart 1996. De interferometrische fase is in radialen aangeduid. Eén radiaal komt overeen met ca. 5 mm vertraging. Zichtbaar zijn de langgolvlige verschillen en korte diagonale golfverschijnselen. Het GISARE GPS experiment beslaat de zuid-oostelijke hoek van dit interferogram.

A. Het interferogram

In figuur 2 wordt het *full scene* interferogram getoond dat het resultaat is van de verwerking van de SAR opnamen van 16 en 17 maart 1996. Voor het GISARE GPS Experiment is slechts gebruik gemaakt van een kwart van dit interferogram; de zogenaamde *quarter scene* rechts onder. De atmosferische verstoringen in dit interferogram zijn beperkt: een zwakke lokale verstoring rechts onder

(het donkere stuk) en een kortgolvlige diagonale lijnstructuur. Deze laatste verstoringen worden waarschijnlijk veroorzaakt door zogenaamde *gravity waves*: golfvorming tussen luchtlagen met een verschillende dichtheid. Locale variaties van minder dan 1 cm worden in dit gebied waargenomen en de golfverschijnselen hebben een golflengte van ca. 250–300 meter.

Uit dit interferogram worden voor de vergelijking met GPS troposferische vertragingen bepaald door te middelen over een groot aantal pixels. Zoals reeds besproken worden deze pixels op een dusdanige manier gekozen dat er een maximale overlap ontstaat tussen het atmosferisch gezichtsveld van de GPS ontvanger en de SAR antenne. Figuur 3 laat de projectie van deze pixels op het *quarter scene* interferogram zien. Hieruit wordt ook het verschil in atmosferische resolutie tussen GPS en InSAR duidelijk: één GPS resolutie element (de witte cirkels in figuur 3) bestaat uit zo'n 25000 pixels in het interferogram. Door nu het verschil te nemen van de gemiddelde waarden voor twee van deze cirkels wordt het verschil in relatieve troposfeer voor de betreffende basislijn verkregen.

B. De atmosfeer

Additionele meteorologische informatie is verkregen door Meteosat en NOAA-AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) satellietbeelden, meteorologische grondwaarnemingen op verschillende grondstations, radiosonde en regenradar. Beide dagen was er volledige bewolking tijdens de opnametijdstippen. Stratus en stratocumulus bewolking bevond zich op 300 à 400 meter, terwijl er tijdens de tweede opname ook hogere bewolking was. De AVHRR beelden tonen diverse golfpatronen aan in de omgeving van het testgebied. De windrichting varieerde van oost op de grond tot meer zuidelijk op grotere hoogtes.



Fig. 3. De uitsnede van het interferogram van 16 en 17 maart. De witte cirkels geven de pixels aan die gebruikt worden om 1 gemiddelde waarde te bepalen voor het temporele verschil in troposferische zenith vertraging.

C. De GPS resultaten

Aangezien één van de acht GPS ontvangers na enkele uren uitgevallen is zijn van de resterende 7 stations 6 onafhankelijke basislijnen opgezet. Van deze basislijnen is het mogelijk de relatieve troposferische vertraging te schatten. Nadat met de Bernese software de double difference ionosfeer vrije residuen zijn berekend voor elk van deze basislijnen, voor zowel 16 als 17 maart, is het verschil in troposferische zenith vertraging geschat per epoche van 30 seconden. In figuur 4 is een voorbeeld gegeven van de schattingen van de relatieve troposfeer voor 1 dag voor een specifieke basislijn (Assen-Blijham, dag 76). Duidelijk valt op dat de hoeveelheid ruis op de resultaten aanzienlijk is. De resultaten van het laagdoorlaat filter, toegepast op de data uit figuur 4 worden getoond in figuur 5. Het verschil in troposfeervertraging op dag 76 tussen Assen en Blijham (33 km) is zeer gering. De temporele variaties bedragen minder dan 2 cm.

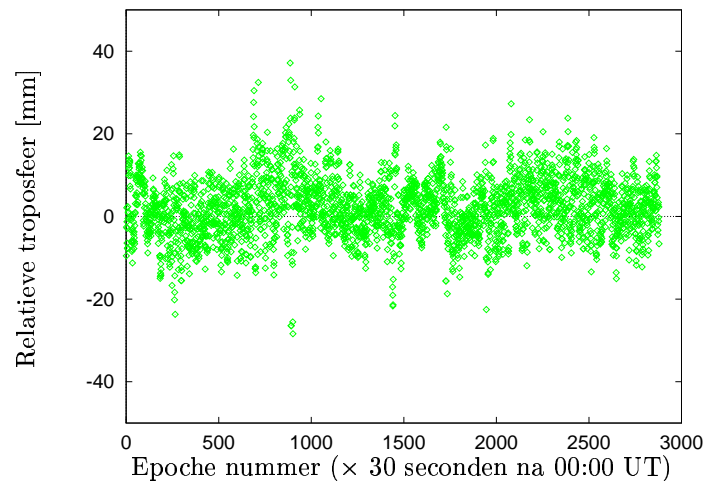


Fig. 4. De ongefilterde relatieve troposfeer voor de basislijn Assen-Blijham, 16 maart 1996.

Nadat dit filter is toegepast op alle basislijnen, voor beide dagen, kunnen de waarden voor de relatieve troposfeer worden bepaald op het tijdstip van de SAR opnamen. Door voor elke basislijn het verschil te nemen tussen deze waarden op 16 en 17 maart worden de *verschillen* in relatieve troposfeer bepaald. Vervolgens wordt de vergelijking gemaakt met de overeenkomstige gegevens uit het interferogram.

D. De vergelijking tussen InSAR en GPS

Een eerste numerieke vergelijking tussen de resultaten uit InSAR en GPS geeft een goede overeenkomst tussen de twee methoden: de rms van het verschil is 3 mm. Een additionele correctie voor de mogelijke kanteling van het interferogram, veroorzaakt door baanfouten resulteert in een daling van de rms van het verschil tot 2 mm.

Door gebruik te maken van een referentiestation, waarvoor de waarde van het resultaat voor beide methoden op

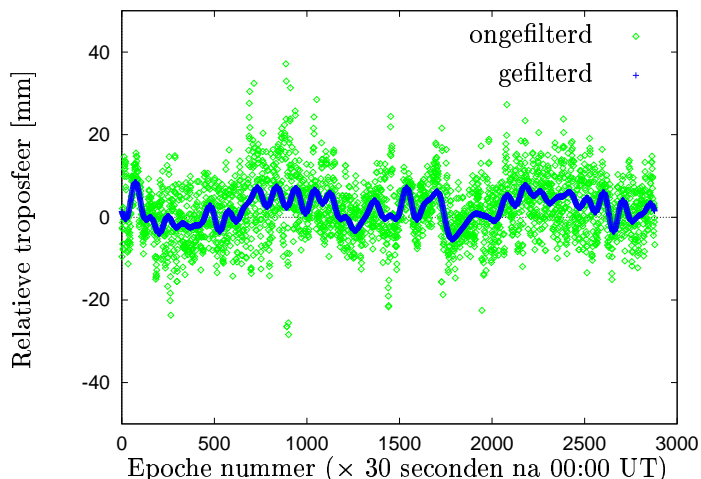


Fig. 5. De ongefilterde en de gefilterde relatieve troposfeer voor de basislijn Assen-Blijham, 16 maart 1996.

nul wordt gesteld, kan het *absolute* verschil in troposferische zenith vertraging tussen de twee opnametijdstippen, per ontvanger geëlimineerd worden. Dit is gedaan in figuur 6. De errorbars vertegenwoordigen een betrouwbaarheidsinterval van twee maal de standaardafwijking van de schattingen. In deze figuur kan duidelijk de overeenkomst tussen de resultaten voor InSAR en GPS worden waargenomen.

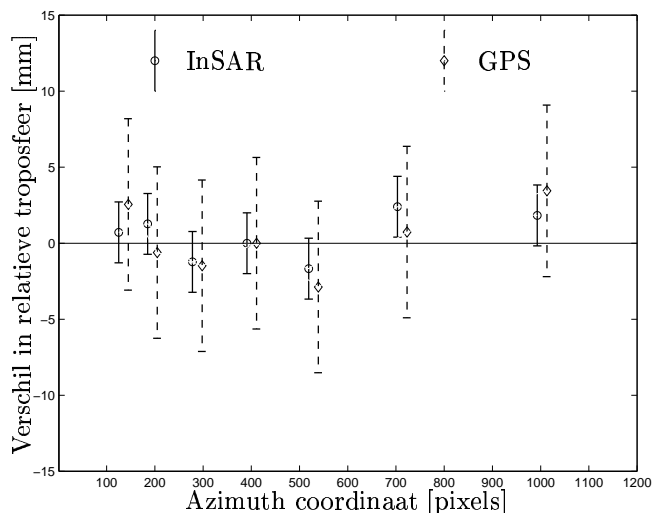


Fig. 6. De verschillen in relatieve troposfeer voor zowel GPS als InSAR, uitgezet tegen de azimuth coördinaat van de GPS stations. Voor de duidelijkheid is er een offset van 20 pixels naar rechts gegeven aan de azimuth coördinaat van de GPS resultaten. Station Slochteren (vierde van links) is gebruikt als referentie.

V. CONCLUSIES

Vergelijking van troposferische vertraging verkregen met InSAR en GPS levert rms verschillen van 2 mm. GPS verwerking maakt gebruik van de ionosfeer vrije lineaire combinatie, een 30 seconden waarnemingsinterval, en een

minimale elevatiehoek van 20° . Het SAR interferogram is verkregen in een 24-uurs interval, met een multilook van 2×10 pixels. De geschatte standaardafwijking van de GPS afgeleide relatieve troposfeerparameters wordt direct afgeleid uit de kleinste kwadratenschatting, en bedraagt ca. 2 mm. Voor SAR interferometrie wordt de standaardafwijking van de fase, ca. 1 mm, bepaald uit de coherentieschatting. Ruimtelijke resoluties worden bij GPS bepaald door de positionering van de ontvangers en de minimale elevatiehoek. Bij SAR interferometrie zijn de pixelgrootte en de mate van decorrelatie in het gebied de beperkende factoren voor de ruimtelijke resolutie. De effectieve temporele bemonstering werd bij GPS bepaald door de filtering van de tijdreeks, in dit geval een periode van 80 minuten. De SAR beelden werden verkregen in tandem paren met een 24 uur interval, en een herhalingsbaan van 35 dagen. Deze ruimtelijke en temporele eigenschappen geven een indicatie van de mate waarin de methoden elkaar aanvullen. Hieruit kan tevens worden geconcludeerd dat de inzet van de methoden niet moet worden gericht op wederzijdse correctie, maar op een totale beschrijving van de troposfeer op verschillende schalen.

Doordat de variatie in troposferische vertraging zeer beperkt was tijdens de uitvoering van het GISARE GPS experiment, wordt de toetsing van de gekozen methodiek bemoeilijkt. Verdere, eventueel langdurigere experimenten zijn noodzakelijk om hierover gefundeerde uitspraken te doen. Hierbij kan voor korte basislijnen de ionosfeer vrije lineaire combinatie vervangen worden door verwerking op de L1 en L2 frequentie. Ook kunnen hierbij i.p.v. de gemiddelde zenithvertragingen ook *slant* vertragingen worden onderzocht.

VI. NAWOORD

Het GISARE GPS experiment werd mogelijk gemaakt door de materiële ondersteuning door de Meetkundige Dienst van Rijkswaterstaat, het Kadaster, TNO-FEL en de NAM. De SAR acquisities werden door ESA verzorgd in het kader van tandem AO (AOT.NL.305). De auteurs danken hierbij diegenen die bijgedragen hebben in de uitvoering en ondersteuning van dit project.

REFERENCES

- [1] Ramon Hanssen. GISARE: GPS metingen voor de schatting van atmosferische parameters. *GPS Nieuwsbrief*, 11(1):17-21, June 1996.
- [2] M Rothacher and L Mervart, editors. *Bernese GPS Software version 4.0*. Astronomical Institute University of Berne, Berne, 1996.
- [3] Ronald M Stolk. GPS and SAR interferometry, a comparative analysis of estimating tropospheric propagation delays: The GISARE GPS experiment. Master's thesis, Delft University of Technology, Delft, oct 1997.
- [4] Howard A Zebker, Paul A Rosen, and Scott Hensley. Atmospheric effects in interferometric synthetic aperture radar surface deformation and topographic maps. *Journal of Geophysical Research*, 102(B4):7547-7563, apr 1997.