Geodetische toevalsnetwerken: ontwikkelingen in deformatiemetingen met satelliet radar interferometrie en de permanent scatterers methode

R.F. Hanssen

1 Introductie

Deformatiemetingen worden sinds geruime tijd ingezet voor het monitoren van verschillende soorten deformatieprocessen, zoals bodemdaling, gletcherbeweging en tektonische en vulkanische deformatie. Alhoewel er een scala aan meettechnieken met een vast instrumentarium bestaan, zoals permanente hellings-, spannings-, of lengteverschilmeters, beschouwen we hier voornamelijk de niet-continue meetingen, uitgevoerd in beperkte campagnes en in een netwerkopzet, zoals waterpassing, elektronische afstandmeting, en triangulatie. Besproken zal worden hoe deze technieken zich verhouden tot moderne ruimte-geodetische technieken zoals GPS en radar interferometrie (InSAR). Hierbij wordt vooral ingegaan op de achtergronden van netwerkontwerp en de consequenties hiervan voor de uiteindelijke resultaten en kwaliteitsbeschrijving. In paragraaf 2 worden standaard geodetische netwerken besproken. Uit recente ontwikkelingen in InSAR is gebleken dat meetwaarden van een beperkte set stabiele reflectoren, bekend als *permanent scatterers*, die inhomogeen verdeeld zijn op onvoorspelbare locaties, bruikbaar is om hoognauwkeurige deformatieparameters te schatten[4, 5]. Aangezien de positie van deze punten onvoorspelbaar is, vormen alle punten een netwerk dat gekenschetst kan worden als *toevalsnetwerk*. In paragraaf 3 worden de achtergronden van InSAR kort besproken, waarbij vooral wordt ingegaan op de parameters die de inzetbaarheid van de techniek voor een specifiek geval beïnvloeden. Dit wordt gevolgd door een discussie over permanent scatterers in paragraaf 4. In 5 worden enkele belangrijke punten samengevat.

2 Geodetisch netwerkontwerp

Het concept van gecontroleerde optimalisatie is kenmerkend voor het ontwerp en de analyse van geodetische netwerken. Een nauwgezet ontwerp van het netwerk maakt vereffenings- en toetsingsprocedures mogelijk die leiden tot aanvaardbare precisie en betrouwbaarheid van de geschatte parameters, tegen aanvaardbare kosten [8, 2, 3, 1]. Een belangrijke, maar vaak onderbelichte voorwaarde voor een succesvol netwerkontwerp is de beschikbaarheid van a priori informatie of aannamen over de fysica van het deformatieproces. Deze informatie wordt voornamelijk gebruikt om te komen tot een optimale parametrisatie van het probleem, voor wat betreft robuustheid, gevoeligheid en een minimaal maar toereikend aantal onafhankelijke parameters. Wanneer een verscheidenheid aan meettechnieken beschikbaar is kan de vooraf bepaalde set van parameters worden gerelateerd aan de precisie en eigenschappen van deze techniek om via een optimaal ontworpen netwerk de inwendige betrouwbaarheid en de precisie en betrouwbaarheid van de parameters te bepalen.

In de praktijk houdt het ontwerpen van een netwerk in dat de fysische meetpunten optimaal gepositioneerd moeten worden in relatie tot het te verwachten deformatiepatroon. Hierbij moet worden gedacht aan de ruimtelijke omvang van het deformatiepatroon, maar ook aan de te verwachten ruimtelijke variabiliteit in verband met de bemonsteringsdichtheid en de relatieve positie van de punten binnen het netwerk. Deze beslissingen zijn direct bepalend voor de ontwerpmatrix van het vereffeningsprobleem. Een sub-optimaal netwerkontwerp leidt tot rangdefecten en schattingsproblemen, die een juiste interpretatie van de metingen in de weg staan. In de tweede plaats moet een beslissing worden genomen over de herhalingsfrequentie van de meetcampagnes. Een herhalingsfrequentie die te laag is, temporele onderbemonstering, kan leiden tot het ontstaan van een kunstmatig signaal, een effect bekend als *aliasing*. Een te hoge temporele bemonstering leidt tot een ongewenste toename in de meetkosten, zonder dat dit noodzakelijkerwijs leidt tot betere schatting. In deze overwegingen zit een paradox: om een netwerk en meetstrategie te ontwerpen om deformatie optimaal te monitoren, moet deze deformatie al bij voorbaat bekend zijn!

De belangrijkste praktische consequenties van de netwerkontwerp-aanpak zijn (i) de noodzaak tot het installeren van permanente kunstmatige meetpunten, (ii) de beperking in de ruimtelijke dichtheid van deze

meetpunten als gevolg van praktische en financiële overwegingen, (iii) een meetcampagne die qua uitvoering te lang kan duren in vergelijking met de deformatiesnelheid, in het bijzonder voor arbeidsintensieve methoden zoals waterpassing, en (iv) de noodzaak voor een nul-meting die kan worden gebruikt als referentie voor de deformatieanalyse. Het is evident dat deformaties die plaatsvonden voor de nul-meting niet kunnen worden bepaald. Hierdoor blijven deformaties die niet werden verwacht buiten beschouwing, net als deformaties die vanuit economisch, veiligheids of wetenschappelijk oogpunt minder belangrijk worden geacht. Lokale afwijkingen binnen een deformatiepatroon blijven vaak onopgemerkt. Wanneer een meetpunt binnen zo'n gebied met een afwijkend patroon ligt zal het de schatting van het ruimere patroon een systematische afwijking geven of, in het beste geval, worden verworpen in de toetsing.

De afhankelijkheid van permanente meetpunten, de *benchmarks*, leidt dus tot een belangrijke beperking in de optimalisatie en het onderhoud van geodetische netwerken. De fysieke aard van meetpunten, b.v. de bouten voor waterpassingen of de pijlers voor GPS ontvangers en theodolieten, beperken het aantal mogelijke locaties. Voor waterpasmetingen zijn stabiele (onderheide) gebouwen of infrastructurele werken nodig, terwijl GPS satellieten onder een lage elevatie dienen te worden gemeten voor nauwkeurige meetresultaten. Daarnaast verdwijnt jaarlijks vaak ook een aanzienlijk deel van de meetbouten ten gevolge van veranderende infrastructuur. Vaak zorgen deze praktische beperkingen in combinatie met financiële overwegingen voor een behoorlijke limitatie in de analyse van deformatiemetingen.

Door gebruik te maken van een speciale verwerkingsmethodiek van satelliet radargegevens, en onder bepaalde omstandigheden kunnen een aantal van de bovengeschetste problemen worden voorkomen door gebruik te maken van een set van door toeval gevonden en non-interveniërende kunstmatige meetpunten. Deze aanpak, permanent scatterers genaamd, is vergelijkbaar met een Monte Carlo methode, waarbij waarden willekeurig worden getrokken uit een bepaalde kansdichtheidsfunctie. Voordat we deze toepassing verder zullen bespreken volgt hier eerst een korte samenvatting van de conventionele toepassing van satelliet radar interferometrie voor deformatiemetingen.

3 InSAR conventionele aanpak

De introductie van de beeldvormende radar kan worden gezien als een van de meest spectaculaire ontwikkelingen in remote sensing sinds de jaren '60. Hierdoor werd een breed scala van toepassingsgebieden in de geowetenschappen en de astronomie geopend, en werd een alternatief gevonden voor de traditionele optische methoden, die belichting door de zon en wolkenvrije omstandigheden nodig hadden. Beeldvormende radar werd mogelijk gemaakt door het concept van de synthetische apertuur: het kunstmatig vergroten van de afmetingen van de radarantenne om hiermee hoge resoluties te behalen. De afstanden, afgeleid uit tijdmetingen, worden gemeten vanuit het referentiesysteem van de satelliet en kunnen worden gebruikt om de gemeten reflectiewaarden in een grid of beeld te representeren. Aangezien de radar geen hoekmetingen kan uitvoeren kan dit beeld niet direct worden gebruikt om b.v. topografie te meten. Wanneer echter twee radaropnamen worden gebruikt en het principe van multiplicatieve interferometrie wordt toegepast op de complexe waarden van het radarsignaal, kunnen zowel afstanden als hoeken nauwkeurig worden afgeleid waardoor hoogtemetingen mogelijk worden. Vanuit een satelliet kan deze techniek, bekend als Interferometrische Synthetische Apertuur Radar (InSAR), worden gebruikt om metingen te verrichten in willekeurige gebieden op aarde met een typische herhalingsfrequentie van een beeld per maand. De basis meetgrootheid in de combinaties van beelden zijn faseverschillen. De interferometrische beelden worden interferogrammen genoemd.

Temporele veranderingen in de afstand satelliet-aarde, zoals .b.v veroorzaakt door deformaties zoals bodemdaling, tektoniek, vulkaan- of gletcherbeweging, kunnen ook worden gemeten, met nauwkeurigheden vanaf het sub-cm niveau. Twee belangrijke groepen parameters: de ontwerp- en de omgevingsparameters, zijn van invloed op de potentiële toepassingen en de beperkingen van de techniek. Voor een diepgaander overzicht in de techniek kan worden verwezen naar b.v. [9, 7] en de daarin genoemde referenties. Figuur 1 is een schets van de interferometrische geometrie met haar relatie tot de belangrijkste parameters. De belangrijkste ontwerpparameters zijn de radar golflengte λ (3–24 cm), de loodrechte basislijn $B_\perp$ (de effectieve afstand tussen de twee satellieten), de temporele basislijn, B_T, (het tijdsinterval

tussen de radaropnamen) en het totale aantal radaropnamen N. De omgevingsparameters zijn de aardse atmosfeer A, het aardoppervlak S, en de eigenschappen van de deformatie D.

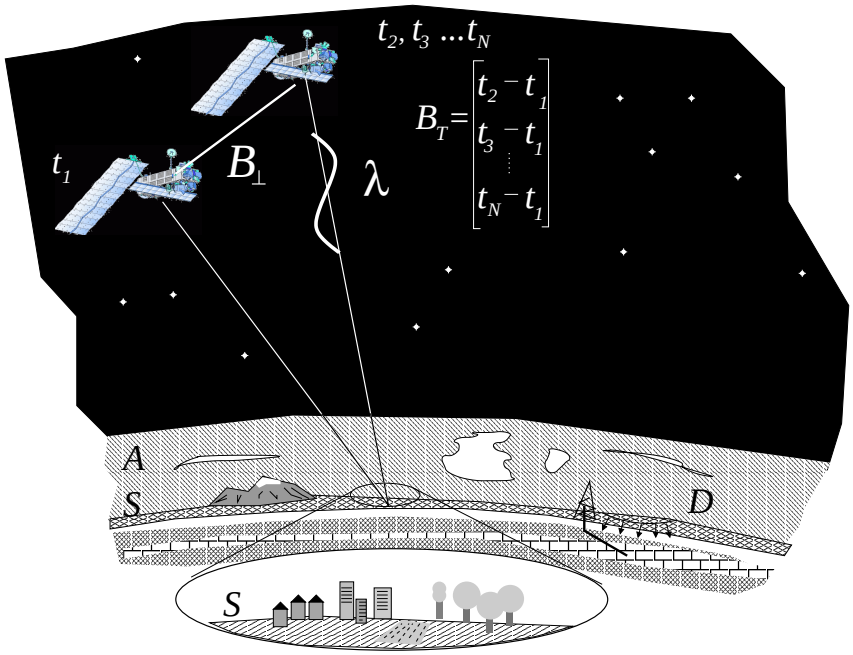

Figure 1: Belangrijkste parameters die van invloed zijn op de inzetbaarheid van satelliet radarinterferometrie voor deformatiemetingen: de loodrechte basislijn $B_\perp$, de temporele basislijn B_T, de radar golflengte, λ, de tijdstippen va opname, t_i, de atmosfeer A, het aardoppervlak, S, en de deformatieëigenschappen D.

De radar golflengte λ is belangrijk omdat de component van de deformatievector in de richting van de satelliet wordt gemeten als fractie van de (halve) golflengte. Afhankelijk van het signaal-ruisniveau van de radar wordt de nauwkeurigheid van de fasemeting direct vertaald naar de nauwkeurigheid van de gemeten deformatie. Een standaardafwijking van 15 graden in de fasemeting leidt dus bij een golflengte van 56 mm tot een standaardafwijking van 1.2 mm in de deformatiemeting. Een radar met een korte golflengte en een hoge signaal-ruis verhouding lijkt dus optimaal. Hierbij moet echter rekening worden gehouden dat korte golflengten (b.v. 3 cm) ook verstrooid worden door kleine objecten op aarde, b.v. door bladeren aan bomen. De willekeurige veranderingen van objecten van deze dimensies in de tijd verstoren de analyse van het fasesignaal. Om deze reden wordt vaak een wat langere golflengte zoals 5.6 en 24 cm geprefereerd. Een golflengte van 24 cm wordt voornamelijk verstrooid door grotere objecten, waardoor deze door het bladerdak van bomen heen dringt en dichter bij de grond wordt verstrooid. Statistisch gezien is de variatie in de tijd van deze grotere objecten kleiner, waardoor de verstoring van het fasesignaal beperkt is. Golflengten groter dan 24 cm zijn minder geschikt vanwege hun gevoeligheid voor radiogolf interferentie en ionosferische verstoringen.

De lengte van de loodrechte basislijn, $B_\perp$, bepaalt de interferometrische geometrie, zie figuur 1. Hierdoor wordt de gevoeligheid voor topografische hoogteverschillen geïntroduceerd. Afhankelijk van de radar golflengte en de terreinhelling variëert de absolute lengte tussen 0 m, waarbij de configuratie ongevoelig is voor topografische hoogte, en 1–2 km, waarbij er een zeer sterke invloed van de topografie op de fasewaarden is. Idealiter worden deformatiemetingen uitgevoerd met een basislijn van nul meter, waardoor alle invloed van topografie uit het signaal verwijderd is. Helaas vertonen satellietbanen een drift ten opzichte van hun nominale banen, waardoor de basislijn in het algemeen ongelijk aan nul zal zijn. Externe topografische informatie (DEMs) of DEMs afgeleid uit InSAR metingen zonder deformatiesignaal worden in deze gevallen gebruikt om de topografische invloed uit de deformatiemetingen te elimineren. Een additioneel ongewenst effect van de basislijn is dat faseruis wordt geïntroduceerd, proportioneel aan de basislijnlengte.

Een derde ontwerpparameter is de temporele basislijn, B_T; een veelvoud van de herhalingstijd ΔT, zie tabel 1, van de satellietbaan en afhankelijk van de acquisitieplanning. De acquisitieplanning wordt gestuurd door het energieverbruik van de radar en het gebruik van mogelijke conflicterende andere instrumenten aan boord van de satelliet. De temporele basislijn dient lang genoeg te zijn om de verwachte deformatie te kunnen detecteren, maar niet te lang aangezien de ruis in de beelden meestal toeneemt proportioneel met het tijdsinterval. De redenen hiervoor worden hieronder verder beschreven.

Tenslotte is het totale aantal beschikbare radaropnamen N van belang, aangezien de beschikbaarheid van veel beelden alternatieve wijzen mogelijk maken om individuele pixels met een hoge kwaliteit te kunnen herkennen temidden van de ruis, zoals beschreven in de volgende paragraaf. Bovendien wordt met veel beelden de ratio tussen het deformatiesignaal en het atmosfeersignaal gunstiger.

De tweede groep van parameters bestaat uit de omgevingsinvloeden ten tijde van de radar opname: atmosfeer, deformatie eigenschappen en het landoppervlak. Alhoewel radargolven niet worden tegengehouden door wolken, worden ze wel inhomogeen vertraagd, wat resulteert in spatiëel gecorreleerde fouten in de afstandmetingen. De mate van verstoring is afhankelijk van de klimaatomstandigheden en de locale weerssituatie ten tijde van de opname. Weersverschijnselen zoals regen, convectieve bewolking en fronten resulteren vaak in significant fouten, oplopend tot enkele cm's [7]. Aangezien een potentieel deformatiesignaal relatief wordt gemeten tussen punten in het beeld zal een grotere afstand tussen de punten leiden tot een grotere atmosferische fout A in de deformatiemeting

De verwachte eigenschappen van het deformatiesignaal D dienen te worden meegenomen wanneer de inzetbaarheid van InSAR wordt overwogen. Fouten in de satellietbanen resulteren in langgolvige trends in de interferogrammen, terwijl atmosfeersignaal leidt tot een 'gladde' fasevariatie over verschillende schalen. Deformatiesignaal met vergelijkbare eigenschappen, zowel ruimtelijk als qua magnitude, is moeilijk te onderscheiden van de verstoringen. Bij interferometrische analyses die slechts gebruik maken van twee beelden worden hierdoor b.v. aardgetijden en langzame en ruimtelijk uitgestrekte bodemdaling zeer moeilijk te meten. De kinematische eigenschappen van de deformatie spelen een belangrijke rol: een plotselinge deformatie veroorzaakt door een aardbeving is vele malen makkelijker af te leiden dan tektonisch kruipgedrag, alhoewel methodologie voor het analyseren van dit laatste fenomeen al is ontwikkeld. Tenslotte dienen de ruimtelijke deformatiegradiënten tussen naburige pixels in het beeld kleiner te zijn dan de radar golflengte.

Verreweg de belangrijkste omgevingsparameter is het verstrooiende oppervlak S van de aarde. Het afleiden van deformatie uit interferometrische metingen is slechts mogelijk wanneer er sprake is van coherente verstrooiing. Dit betekent dat voor elk interferogram de faseïnformatie alleen afhankelijk mag zijn van de geometrie. Met andere woorden, in de tijd variërende verstrooiingseigenschappen binnen een resolutiecel dienen te worden vermeden. Deze beperking maakt b.v. water onbruikbaar voor interferometrie, aangezien de vorm van het wateroppervlak binnen minder dan seconden te sterk veranderd. Voor temporele basislijnen van meerdere weken worden door hetzelfde principe ook veel landbouwgebieden en gebieden met een sterke vegetatie uitgesloten. Ook gebieden waar veel menselijke activiteit waarneembaar is, b.v. bij het bouwen of slopen van gebouwen of infrastructuur, zijn in het algemeen onbruikbaar. De mate waarin deze interferometrische correlatie aanwezig is wordt uitgedrukt in de coherentie.

Table 1: Overzicht van satelliet InSAR missies de gebruikt kunnen worden voor deformatiemetingen, met duur van de missie, de herhalingsfrequentie en de golflengte.

Missie	start–eind	ΔT (days)	λ (cm)
ERS-1	1991–2000	35(3)	5.6
ERS-2	1995–	35	5.6
ERS-1/ERS-2	1995–1996	1	5.6
JERS	1992–1998	44	23.6
Radarsat	1995–	24	5.6
Envisat	2002–	35	5.6

Een hoogcoherent interferogram resulteert in een glad fasepatroon: er is in dat geval een sterke ruimtelijke correlatie tussen de modulo-2π fase waarden, zie fig. 2b. Gebieden met een lage coherentie resulteren in een ruizig fasebeeld, zie fig. 2c.

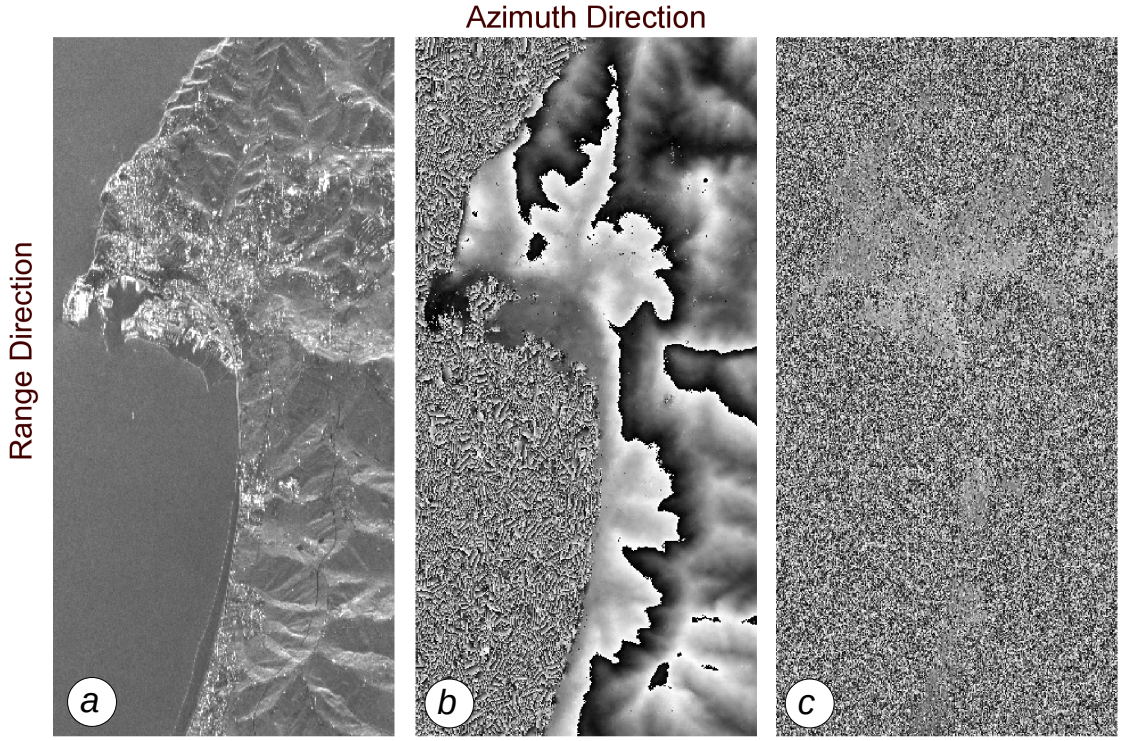

Figure 2: Interferometrische radar beelden van Ancona, Italië, uit Hanssen en Ferretti (2002) (a) ERS SAR magnitude beeld. (b) Hoogcoherent interferogram afgeleid uit een ERS 'tandem' paar: twee acquisities met een tussentijd van 24 uur. De fasecycli komen direct overeen met de locale topografie. (c) Laagcoherent interferogram van hetzelfde gebied. De loodrechte basislijn is kort($<$ 10 m), maar de temporele basislijn is langer dan 1 jaar. Interferometrische metingen zijn niet mogelijk wanneer de locale verstrooiing van het terrein teveel veranderd in de tijd.

Aangezien de coherentie een belangrijke kwaliteitsmaat voor het interferogram is, variërend over het beeld, dient deze per pixel te worden geschat. In een ideale situatie zijn herhaalde metingen onder identieke omstandigheden nodig om de coherentie per pixel te schatten. Dit is echter in de conventionele interferometrische aanpak niet mogelijk aangezien slechts twee beelden worden gebruikt waaruit één interferogram wordt berekend. Hierdoor is er geen overtalligheid in de interferometrische metingen per pixel en kan de coherentie niet worden geschat. Als benadering wordt in plaats hiervan de coherentie uit een groep waarnemingen rondom een pixel bepaald, onder de aanname van ergodiciteit. Deze aanname is in veel gevallen bruikbaar, voornamelijk wanneer de eigenschappen van het terrein homogeen zijn en korte temporele basislijnen worden gebruikt. Desalniettemin is de aanname zeker niet juist bij interferogrammen met lokaal sterk variërende verstrooiingseigenschappen. Hierdoor zijn veel interferogrammen met lange temporele basislijnen vaak aanzienlijk gedecorreleerd, voornamelijk in gebieden met vegetatie. Gebouwen, blootliggende rots, of infrastructurele werken behouden vaak hun verstrooiingseigenschappen over lange tijdsintervallen en onder variabele opnamegeometriën. Herkenning van dit soort punten, vaak een enkele pixel temidden van ruis, is zeer moeilijk wanneer slechts een beperkt aantal beelden beschikbaar is. Wanneer meerdere beelden beschikbaar zijn kan een oplossing voor dit herkenningsprobleem worden gevonden door een stapeling van beelden te maken. Deze aanpak wordt gehanteerd bij de permanent scatterers meth-

ode en besproken in de volgende paragraaf.

4 InSAR permanent scatterers aanpak

De permanent scatterers (PS) techniek is ontwikkeld om geïsoleerde coherente pixels te herkennen en om het probleem van atmosfeerfouten op te lossen. De prijs die hiervoor betaald wordt is dat een groot aantal beelden (meer dan 30), pixel voor pixel, moet worden verwerkt.[5]. Puntdoelen die niet worden beïnvloed door temporele decorrelatie worden herkend door middel van een statistische analyse van hun amplitude in de gehele set radarbeelden. De statistische verdeling van de amplitudewaarden per pixel in de gehele gecoregistreerde set SAR beelden wordt gebruikt om potentiële permanent scatterers te identificeren. Deze selectie vindt plaats onder de aanname dat pixels met PS eigenschappen een minimale verandering in amplitude hebben, waardoor hun variantie laag is. Pixels die sterk variëren in amplitude zijn hoogstwaarschijnlijk ook niet stabiel in fase. De invloed van topografie, deformatie en atmosfeer kan met behulp van een iteratieve kleinste-kwadratenvereffening worden geschat door zorgvuldig gebruik te maken van het verschil in hun ruimtelijke en temporele gedrag. Zo is atmosferisch signaal ruimtelijk sterk gecorreleerd, terwijl het in de tijd nagenoeg ongecorreleerd is. Topografie is constant in de tijd en schaalt met de loodrechte basislijn. Deformatie tenslotte is vaak sterk gecorreleerd in de tijd, op breukpunten na, en afhankelijk van het type deformatie ook in meer of mindere mate in ruimtelijke zin.

De combinatie van alle geïdentificeerde permanent scatterers is vergelijkbaar met een standaard geodetisch netwerk, zie figuur 3, alhoewel de posities van deze punten door het toeval worden bepaald en onvoorspelbaar en niet te optimaliseren zijn. Desalniettemin, alhoewel voor stedelijke gebieden slechts tussen de 0.5 en 2.5% van het totale aantal punten kan worden gebruikt, correspondeert dit met tussen de 50 en 400 punten per vierkante kilometer. Dit is veel meer dan de gemiddelde puntdichtheid bij typische waterpassings- of GPS-metingen, waardoor optimaliseren minder belangrijk is dan in standaard geodetisch netwerkontwerp. De nauwkeurigheid van de permanent scatterer deformatiemetingen is in bepaalde gevallen beter dan 0.1 mm per jaar. De hoge herhalingsfrequentie van nieuwe satellietbeelden leidt tot een tijdige indentificatie van een veranderend deformatiepatroon. Dit is bijvoorbeeld belangrijk bij het monitoren van de stabiliteit van individuele gebouwen.

Alhoewel de verzameling van geïdentificeerde permanent scatterers kan worden gezien als een geodetisch toevalsnetwerk zijn er ook belangrijke verschillen. Zo ontbreekt de sluitfout, zoals bekend uit waterpasnetwerken. Dit wordt veroorzaakt doordat waterpassingen hoogteverschilmetingen zijn die in een waterpaskring gesommeerd worden. Hierdoor stapelen meetfouten zich op, en dient er vereffend te worden, wat meteen een controle op de metingen vormt. De permanent scatterers netwerken zijn in feite kinematische deformatiemetingen, waarbij per punt een deformatiegederag in de tijd wordt geschat. Ruimtelijk gezien zijn de metingen vergelijkbaar met hoogte- in plaats van hoogteverschilmetingen. De hoogteverschillen zijn afgeleide grootheden van de hoogten, en daarom ook niet te vereffenen of te toetsen in kringmetingen.

Een kort overzicht van de voor- en nadelen van de permanent scatterers methode. Voordelen zijn onder andere: (i) de grote puntdichtheid in stedelijke gebieden, (ii) de instantane waarnemingsgreep (iii) de hoge potentiële nauwkeurigheid van geschatte deformaties, (iv) het grote archief van data, vanaf 1991, (v) de hoge herhalingsfrequentie, gevoeligheid voor b.v. seizoensinvloeden, selectieve wateronttrekking, etc, (vi) de potentiële monitorfunctie: ook wanneer er niks deformeert of verzakt kan dat aangetoond worden (dit is belangrijk b.v. in relatie met juridische aspecten), en (vii) de relatief lage kosten per radaropname. De nadelen zijn onder andere: (i) de onzekerheid van de serievoortzetting in verband met de beperkte levensuur van de sateliet, (ii) de beperking in de omvang gebied, (iii) succes niet bij voorbaat verzekerd, dient van geval tot geval te worden bekeken, (iv) de beperking tot gebieden met een behoorlijke dichtheid van infrastructuur of lage vegetatiegraad, (v) de afhankelijkheid van een minimum aantal beelden (dit wordt niet overal ter wereld gehaald), en (iv) de rekentechnische aspecten.

Onderzoeksonderwerpen die kunnen worden geïdentificeerd zijn onder meer (a) het kwantitatief beschrijven van de precisie en betrouwbaarheid van de resultaten, (b) het oplossen van de faseambiguïteiten en het kwantitatief beschrijven van de kwaliteit van de oplossing, b.v. met integer kleinste-kwadratenmethoden, (c) het opzetten van toetsingsmethodiek om fouten of afwijkingen in het model (en dus het deformatiege-

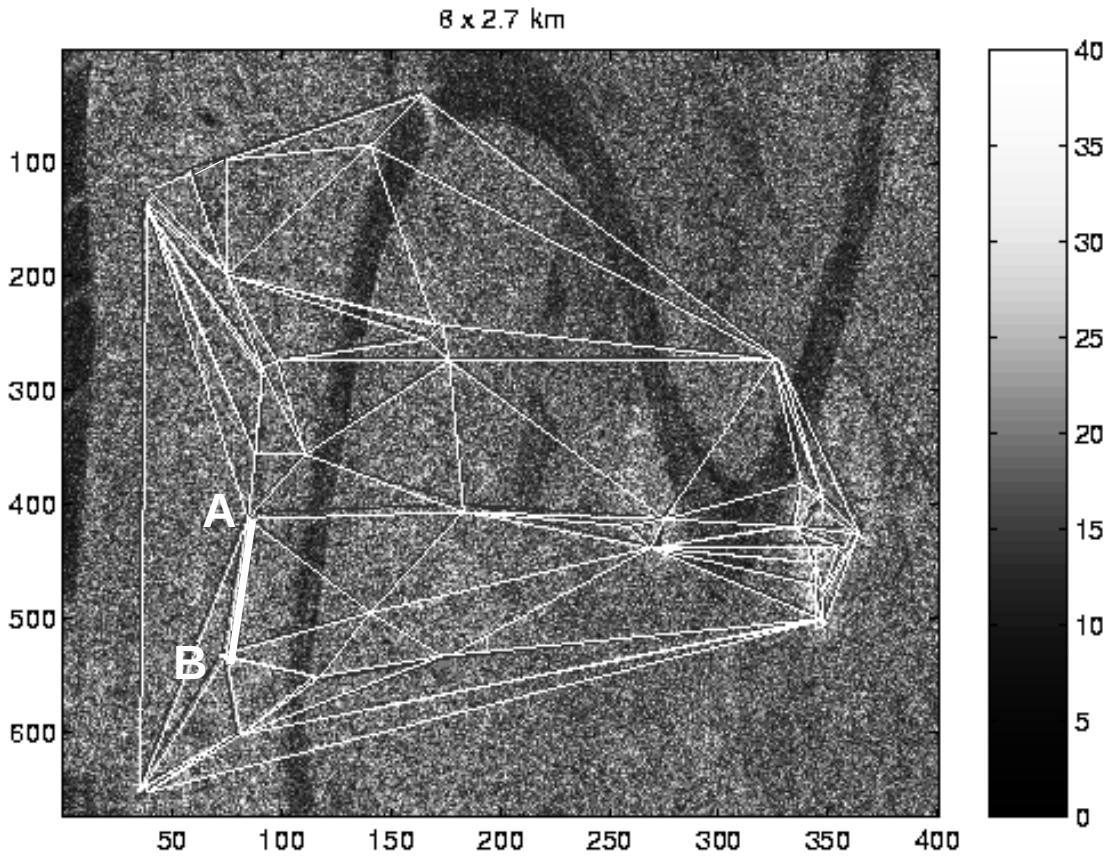

Figure 3: Eerste selectie pixels (permanent scatterers) met een signaal-ruis verhouding hoger dan 50, georganiseerd in een netwerk van basislijnen. Ondergrond vormt het gemiddelde amplitudebeeld 20 interferogrammen van Hangu, China. Bij een groter aantal beelden wordt de detectiedrempel van stabiele reflectoren lager, waardoor een hogere puntdichtheid kan worden bereikt.

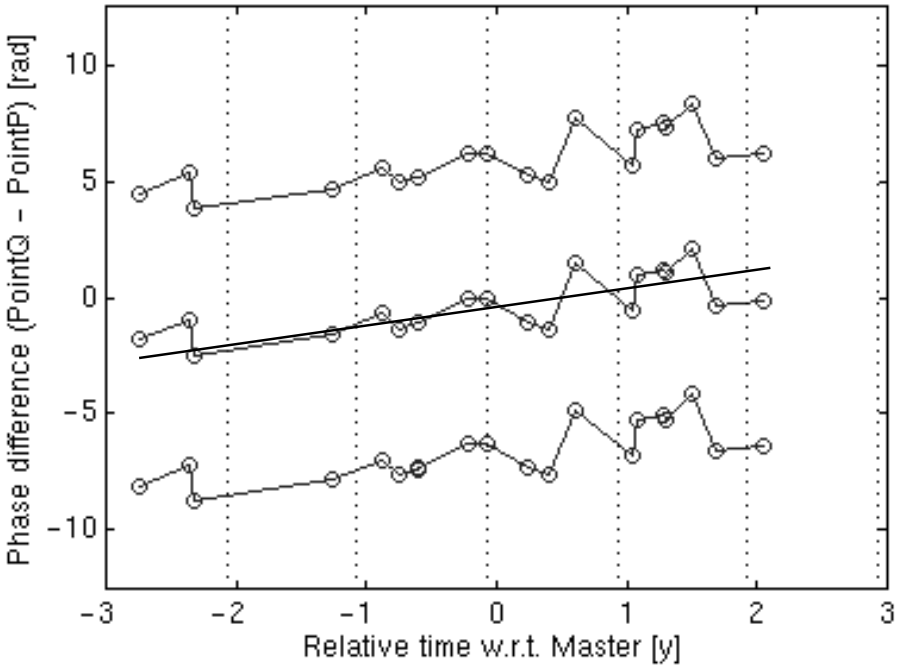

Figure 4: Deformatie van zijde AB in figuur 3, met een lengte van 530 m. De fasewaarnemingen zijn gerepresenteerd in drie ambiguiteiten mogelijkheden. De geschatte lineare deformatie bedraagt 3 mm per jaar.

drag) automatisch te detecteren, (d) het uitbreiden van de techniek voor grotere gebieden, waardoor o.a. atmosfeerschatting moeilijker wordt, (e) het uitbreiden van de toepassingen naar gebieden met een lagere dichtheid van stabiele reflectoren en het analyseren van dit type geïsoleerde reflectoren, (f) de aanscherping van het model voor verdwijnende en bijkomende reflectoren, (g) het doorzetten van de ERS-1 en ERS-2 tijdserie met ENVISAT data, in principe mogelijk voor een selecte set punten, (h) het optimaliseren van rekenmethoden voor grote datahoeveelheden, en (i) het integreren van de radarmetingen met alternatieve en complementaire technieken.

5 Discussie

De definitie van geodetische netwerken zou kunnen worden uitgebreid met de *toevalsnetwerken*, netwerken van meetpunten die op onvoorspelbare locaties worden gekozen. Alhoewel dit concept nieuw is in de geodesie, is het statistisch vergelijkbaar met de bekende Monte Carlo methoden. De inzetbaarheid van deformatiemonitoring met behulp van satelliet radar interferometrie en de permanent scatterers aanpak kan redelijk snel worden nagegaan door een beperkt aantal parameters te evalueren. De ontwerpparameters zoals de loodrechte en temporele basislijnen, de radar golflengte en het totale aantal beelden (belangrijk voor de permanent scatterers aanpak) kunnen eenvoudig worden verkregen uit de overzichtsbestanden van data zoals deze door de diverse ruimtevaartorganisaties beschikbaar worden gesteld. De omgevingseigenschappen, zoals atmosfeer, oppervlaktedecorrelatie en de verwachte deformatieëigenschappen zijn moeilijker te voorspellen en worden dan ook stochastisch gemodelleerd. Voorstellen voor InSAR satellietmissies toegesneden voor deformatiemetingen worden momenteel geëvalueerd door de grote ruimtevaartorganisaties.

References

[1] J E Alberda. Planning and optimization of networks: some general considerations. *Bolletino di Geodesia e Scienze Affini*, 2:209–240, 1974.

[2] W Baarda. *Statistical concepts in geodesy*, volume 4 of *Publications on Geodesy*. Netherlands Geodetic Commission, Delft, 1967.

[3] W Baarda. *A testing procedure for use in geodetic networks*, volume 5 of *Publications on Geodesy*. Netherlands Geodetic Commission, Delft, 2 edition, 1968.

[4] Alessandro Ferretti, Claudio Prati, and Fabio Rocca. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(5):2202–2212, September 2000.

[5] Alessandro Ferretti, Claudio Prati, and Fabio Rocca. Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(1):8–20, January 2001.

[6] Ramon Hanssen and Alessandro Ferretti. Deformation monitoring by satellite radar interferometry: Design parameters and environmental factors affecting feasibility. *GIM International*, 16(9):27–31, September 2002.

[7] Ramon F Hanssen. *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2001.

[8] F R Helmert. Studien über rationelle Vermessungen im Gebiete der höheren Geodäsie. *Zeitschrift für Mathematik und Physik*, 13(73), 1868.

[9] Paul Rosen, Scott Hensley, Ian R Joughin, Fuk K Li, Søren Madsen, Ernesto Rodríguez, and Richard Goldstein. Synthetic aperture radar interferometry. *Proceedings of the IEEE*, 88(3):333–382, March 2000.