



Einsatzmöglichkeiten der Radarinterferometrie zur Überwachung von Hangbewegungen und Absenkungen

Helmut Rott ¹, Christoph Mayer ², Thomas Nagler ³

¹ *Institut für Meteorologie und Geophysik, Universität Innsbruck, Innrain 52, A-6020 Innsbruck*

² *Institut für Meteorologie und Geophysik, Universität Innsbruck, Innrain 52, A-6020 Innsbruck*

³ *Institut für Meteorologie und Geophysik, Universität Innsbruck, Innrain 52, A-6020 Innsbruck*

VGI – Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation **89** (3–4), S. 167–172

2001

BibT_EX:

```
@ARTICLE{Rott_VGI_200120,  
Title = {Einsatzmöglichkeiten der Radarinterferometrie zur Überwachung  
von Hangbewegungen und Absenkungen},  
Author = {Rott, Helmut and Mayer, Christoph and Nagler, Thomas},  
Journal = {VGI -- Österreichische Zeitschrift für Vermessung und  
Geoinformation},  
Pages = {167--172},  
Number = {3--4},  
Year = {2001},  
Volume = {89}  
}
```





Einsatzmöglichkeiten der Radarinterferometrie zur Überwachung von Hangbewegungen und Absenkungen

Helmut Rott, Christoph Mayer und Thomas Nagler,
Innsbruck

Zusammenfassung

Methodische Grundlagen der differentiellen Radarinterferometrie (DINSAR), die es ermöglichen von Satelliten aus Bewegungen an der Erdoberfläche mit großer Genauigkeit zu messen, werden erläutert. Fallbeispiele für die Kartierung von langsamen Hangbewegungen in hochalpinen Gebieten und für die Analyse von Absenkungen einzelner Gebäude in städtischen Gebieten werden vorgestellt. Das Anwendungspotential von DINSAR wird diskutiert.

Abstract

Basic methods of differential radar interferometry (DINSAR), enabling measurements of surface motion from repeat-pass satellite images with very high accuracy, are briefly reviewed. Case studies are presented for mapping very slow slope movements in high Alpine areas and for monitoring subsidence of single houses in urban areas. The application potential of DINSAR is discussed.

1. Einleitung

Die Methode der differentiellen Radarinterferometrie (DINSAR) bietet die Möglichkeit, Bewegung und Deformation an der Erdoberfläche mit großer Genauigkeit zu messen. Grundlage dafür sind Wiederholungsaufnahmen mit bildgebenden Radarsystemen (Radar mit synthetischer Apertur, SAR). Auf Grund der hervorragenden Stabilität des SAR und der präzisen Navigation brachten die Europäischen Fernerkundungssatelliten ERS-1 (Juli 1991 bis März 2000) und ERS-2 (seit April 1995 in Erdumlauf) einen Durchbruch für die Anwendung der DINSAR Technik. Zahlreiche Anwendungsgebiete wurden erschlossen, wie z.B. die Kartierung von seismisch bedingter Deformation, von Oberflächen deformation in vulkanischen Gebieten, von Absenkungen zufolge Grundwasserentnahme und Bergbauaktivität, und von Gletscherbewegung [1].

Im Rahmen eines Projekts zur „International Decade for Natural Disaster Reduction“ (IDNDR), gefördert von der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, wurden Methoden zur Erfassung von Hangrutschungen mittels DINSAR entwickelt.

2. DINSAR Methoden zur Überwachung langsamer Bewegungen

2.1 Grundlagen der Radarinterferometrie

Ein Interferogramm wird durch pixelweise Multiplikation des komplexen (aus Amplitude und

Phase bestehenden) Signals von zwei SAR Bildern berechnet, die aus ähnlichen Positionen der Antenne im Raum aufgenommen wurden. Bei ERS beträgt der Wiederholungszyklus im Standardmodus 35 Tage. In der Zeit, in der ERS-1 und ERS-2 gleichzeitig in Betrieb waren, der „ERS Tandem Mission“, bestand die Möglichkeit, unter Verwendung beider Satelliten die Erdoberfläche in eintägigen Abständen aufzunehmen.

Ein Interferogramm stellt eine Abbildung der Differenz der Phase des Signals von zwei SAR Bildern in Radargeometrie dar, wobei die Phasendifferenz ($\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2$) einer Änderung der Weglänge ΔR in Richtung des Radarstrahls, also quer zur Flugrichtung des Satelliten, entspricht:

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R \quad (1)$$

ERS SAR arbeitet bei einer Wellenlänge, λ , von 5,66 cm; der Einfallswinkel, θ , im Zentrum des 100 km breiten Bildstreifens ist 23°. Ein Interferogramm gibt die Phase zyklisch in 2π wieder, wobei ein Phasenzyklus einer Weglängenänderung von 2,88 cm entspricht. Die gesamte Phasendifferenz setzt sich aus folgenden Beiträgen zusammen:

$$\Delta\phi = \phi(\text{flach}) + \phi(\text{topo}) + \phi(\text{bew}) + \phi(\text{atm}) + \phi(\text{n}) \quad (2)$$

wobei $\phi(\text{flach})$ die Phasendifferenz auf Grund der Änderung des Einfallswinkels auf der flachen Erde ist, $\phi(\text{topo})$ auf Grund topographischer Höhenänderungen, $\phi(\text{bew})$ zufolge von Bewegung der Oberfläche und $\phi(\text{atm})$ zufolge unterschiedli-

cher Ausbreitungsbedingungen in der Atmosphäre. $\phi(n)$ sind rauschbedingte Phasenänderungen, die primär durch zeitliche Änderungen der Rückstreuungseigenschaften der Oberfläche, aber auch durch thermisches Rauschen des Sensors bedingt sind.

$\phi(\text{flach})$ und $\phi(\text{topo})$ sind proportional zu derjenigen Komponente der Basislinie, B_n , zwischen den beiden Aufnahmepunkten, die senkrecht zur Ausbreitungsrichtung des Radarstrahls steht:

$$\Delta\phi(\text{flach}) = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_n \Delta R}{R_0 \tan \phi}; \quad \Delta\phi(\text{topo}) = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_n \Delta z}{R_0 \sin \phi} \quad (3)$$

R_0 ist die Distanz zwischen Satellit und Erdoberfläche. Bei ERS SAR entspricht z.B. ein Phasenzyklus von 2π bei $B_n = 20$ m einem Höhenunterschied, Δz , von 480 m und für $B_n = 200$ m einem $\Delta z = 48$ m. Dies zeigt, dass man für Bewegungskartierung nach Möglichkeit interferometrische Bildpaare mit kurzen Basislinien verwenden sollte, da $\phi(\text{bew})$ unabhängig von der Basislinie ist.

Der Phasenbeitrag der flachen Erde, $\phi(\text{flach})$, kann mit Hilfe präziser Orbitdaten exakt berechnet werden. Die topographische Phase, $\phi(\text{topo})$, wurde direkt aus Tandem Daten berechnet (siehe linker Teil von Abb.1), da in eintägigen Intervallen der Phasenbeitrag der Hangbewegungen zu vernachlässigen ist. Um Einflüsse von $\phi(\text{atm})$ und von $\phi(n)$ für die Berechnung von $\phi(\text{topo})$ weitgehend zu eliminieren, wurden mehrere Tandempaare kombiniert.

2.2 DINSAR Methode zur Kartierung von Hangbewegungen

Abb.1 zeigt die wesentlichen Schritte zur Ableitung einer Karte der Hangbewegung aus ERS SAR Daten. Als Datenbasis werden einerseits Tandem Paare mit eintägigen Zeitintervallen verwendet, um topographische Phase und Höhenmodell zu berechnen, andererseits Bildpaare über ein- oder mehrjährige Zeitintervalle, die zu-

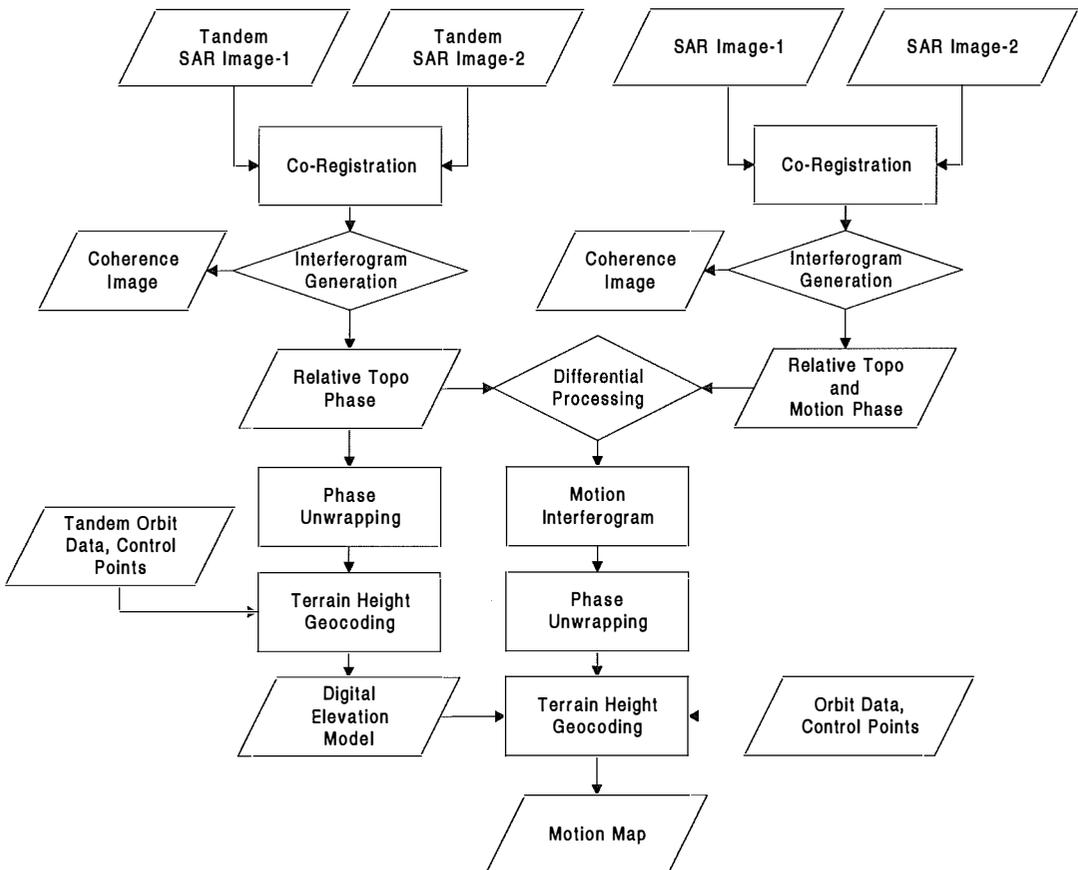


Abb.1: Flussdiagramm der wesentlichen Bearbeitungsschritte für die Kartierung von Hangbewegungen mittels DINSAR.

nächst Phasendifferenzen zufolge von Topographie und Bewegung aufweisen. Ein wesentlicher Schritt zu Beginn der Bearbeitung ist die exakte Koregistrierung der Bilder (auf etwa 0,1 Pixel).

Aus eintägigen- und ein- (bzw. mehr- jährigen) Interferogrammen wird mittels differenzieller Analyse ein Interferogramm berechnet, das im wesentlichen nur mehr die bewegungsbedingte Phase enthält. Atmosphärische Einflüsse spielen bei kleinräumigen Bewegungsanalysen im Gebirge eine geringe Rolle. Der wesentliche Störfaktor ist die zeitliche Dekorrelation der Phase auf Grund von Änderungen an der Oberfläche. Voraussetzung für interferometrische Analysen ist Kohärenz des Signals der beiden Radarbilder. In Gebieten mit dichter Vegetation dekoriert das Signal meist schon innerhalb weniger Tage.

Gemeinsam mit Interferogrammen werden Kohärenzbilder berechnet, mit deren Hilfe inkohärente Teilbereiche des Bildes, für die eine interferometrische Analyse nicht möglich ist, eliminiert werden. Kohärenzdaten sind auch für die Überführung der zyklischen Phase in die absolute Phase (Phase Unwrapping) wichtig, um Fehlinterpretation in Gebieten mit geringer oder fehlender Kohärenz zu vermeiden. Nach dem Phase Unwrapping wird die bewegungsbedingte absolute Phase, die zunächst in Radarprojektion vorhanden ist, mit Hilfe digitaler Höhendaten, die von der Tandem Analyse oder von anderen Quellen stammen, in eine Bewegungskarte übergeführt.

Die bewegungsbedingte Phasenänderung resultiert aus der skalaren Änderung der Entfernung, (R , zwischen Aufnahmeposition und Erdoberfläche im Zeitraum zwischen den beiden SAR Aufnahmen, wobei für die Berechnung der Geschwindigkeit eine relative Messung zu einem unbewegten Objekt im Bild notwendig ist. Es wird nur die Komponente des Bewegungsvektors gemessen, die in Richtung des Radarstrahls orientiert ist. Wenn man das Koordinatensystem so wählt, dass y die Richtung des Radarstrahls projiziert auf eine horizontale Fläche beschreibt und z die Vertikale ist, so entspricht bei ERS einer Phasendifferenz von 2π eine horizontale Verschiebung, Δy , von 7,24 cm oder eine vertikale Verschiebung, Δz , von 3,07 cm:

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R = \frac{4\pi}{\lambda} (\Delta y \sin \theta - \Delta z \cos \theta) \quad (4)$$

Die Genauigkeit der Analyse der Phasenänderung liegt bei der flächenhaften INSAR Methode bei wenigen Millimetern. Der zeitliche Abstand der SAR Aufnahmen ist so zu wählen, dass ein ausreichendes Signal vorhanden ist. Für die un-

tersuchten Hangbewegungen im Bereich von wenigen Zentimetern pro Jahr wurden Zeitintervalle von ein oder zwei Jahren gewählt. Bilder mit Schneebedeckung wurden nicht verwendet, da die Schneedecke Phasenänderungen verursacht und das Signal dekoriert.

Die Einschränkungen von DINSAR von Seite der Kohärenz und Bildgeometrie wurden für Testgebiete in den Ötztaler und Zillertaler Alpen untersucht. Es zeigte sich, dass die flächenhafte interferometrische Methode der Bewegungskartierung primär für Gebiete oberhalb der Waldgrenze geeignet ist, wobei je nach Topographie und Oberflächenbeschaffenheit gute DINSAR Analysen für 50 bis 70 % der Fläche in diesen Höhenstufen möglich sind [2].

2.3 DINSAR Analyse einzelner Pixel

In Gebieten mit Bewuchs kann man mit der Methode der permanenten Streuer Bewegungsanalysen einzelner Objekte (z.B. Häuser, Strassen etc.) durchführen, die zeitlich stabiles Rückstreuverhalten aufweisen [3]. Dafür werden Zeitserien von SAR Bildern über mehrere Jahre hinweg benötigt. Zunächst werden in den Bildern mittels Analyse der zeitlichen Variabilität der Radar-Rückstreuung Pixel identifiziert, deren Phase zeitlich konstant ist (permanente Streuer, PS). Für jedes einzelne Pixel werden aus der Zeitserie der SAR Bilder die verschiedenen Beiträge zur Rückstreuung (Gleichung 2) iterativ ermittelt. Dabei werden die Beiträge $\phi(\text{flach})$ und $\phi(\text{topo})$ zunächst mit Hilfe präziser Orbitdaten berechnet. $\phi(\text{atm})$ wird über ein lokales Ensemble von PS-Pixeln abgeschätzt, da dieser Beitrag über kurze Distanzen sehr stark korreliert ist. Für die Korrektur der atmosphärischen Einflüsse sollten mindestens 5 PS pro km^2 vorhanden sein. Im Innsbrucker Raum wurden z.B. in ERS Zeitserien einige hundert PS pro km^2 identifiziert.

Die Phasenresiduen durch zeitliche Dekorrelation sind für permanente Streuer sehr gering, so dass nach Elimination der oben erwähnten Phasenbeiträge der bewegungsbedingte Phasenbeitrag, $\phi(\text{bew})$, übrig bleibt.

3. Fallbeispiele für Bewegungsanalysen mit DINSAR

Aus einem Datensatz von etwa 50 ERS-1 und ERS-2 Bildern aus fünf verschiedenen Umlaufbahnen wurden flächendeckende DINSAR Analysen für die Österreichischen Alpen vom Kautertal bis zu den Niederen Tauern durchgeführt. Es wurden zahlreiche Hänge identifiziert, die

Oberflächenbewegungen im Zentimeterbereich aufweisen.

Abb.2 zeigt ein Beispiel der interferometrischen Analyse für einen Rutschhang im Weertal südwestlich von Innsbruck, das in der Quarzphyllitzone der Tuxer Alpen liegt. Die Rutschzone befindet sich auf einem nach Westen orientierten Hang, erstreckt sich fächerförmig über einen Höhenbereich von 500 m und ist im unteren Teil etwa 600 m breit. Abb. 2a) zeigt ein Tandem Interferogramm in Radargeometrie, das als Referenz für die topographische Phase verwendet wurde. Die Basislinien-Normale, des verwendeten Bildpaares beträgt 274 m, sodass ein Phasenzyklus von 2π einem Höhenunterschied von 35 m entspricht. Die Radarbeleuchtung erfolgt in dem Bild, das aus der absteigenden Umlaufbahn aufgenommen ist, von Osten. Deshalb wird der Westhang unterhalb des Roßkopf gut aufgelöst, während der Osthang unterhalb des Nafingkopfes im SAR Bild stark komprimiert wird.

lysen für einen Hang über dem Gepatschstausee im Kaunertal für die Jahre 1992 bis 1999. Die Geschwindigkeiten wurden aus den Interferogrammen unter der Annahme hangparalleler Bewegung berechnet. Im untersten Bereich des Hanges ist wegen der Bewaldung eine interferometrische Analyse nicht möglich, im oberen Bereich wirkten sich in einzelnen Jahren persistente Schneefelder störend aus. Dennoch erkennt man deutlich zwei Maxima der Bewegung, eines unter dem Gipfel, eines im unteren Hangbereich. Die Gleitgeschwindigkeit schwankt von Jahr zu Jahr relativ stark; die Schwankungen korrelieren mit dem Sommerniederschlag [4].

Ein Beispiel für die Analyse der Bewegung von zwei permanenten Streuern aus dem Stadtgebiet von Innsbruck (Höttinger Au) zeigt Abb.4. Die Analyse beruht auf 29 ERS-1 und ERS-2 SAR Bildern aus dem Zeitraum von Sommer 1995 bis Sommer 2000. Die offenen Kreise in Abb. 4 zeigen die abgeleitete relative Position eines Gebäudes, das keine Bewegung aufweist, wie der

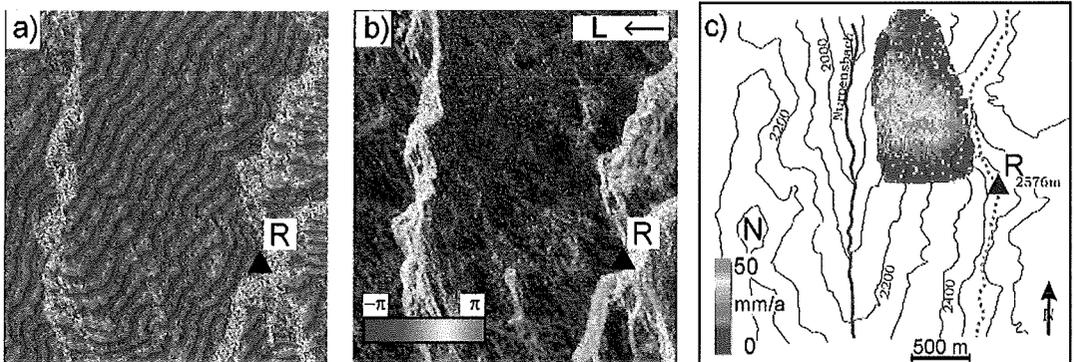


Abb.2: DINSAR Analyse eines Rutschhanges im Weertal, südwestlich von Innsbruck. R – Roskopf (2576 m), N – Nafingkopf (2454 m). Der Pfeil zeigt die Richtung des Radarstrahls. (a) Relative Phase aus dem ERS Tandem Paar 24./25.9.1995. (b) Bewegungsbedingte Phase aus dem Bildpaar 3.7.1992/27.8.1993. (a) und (b) sind in Radargeometrie dargestellt; ein Farbzyklus entspricht einer Phasenänderung von 2π . (c) Karte der Oberflächenbewegung aus der DINSAR Analyse (farbkodiert).

Abb.2b zeigt die bewegungsbedingte Phase, ebenfalls in Radargeometrie. Der Rutschhang weist (in violetter Farbe dargestellt) im Vergleich zu Umgebung eine Phasenverschiebung von etwa (Radian auf. Nach Geokodierung des Phasenbildes unter Verwendung eines digitalen Höhenmodells wurde unter Annahme hangparalleler Bewegung eine Bewegungskarte berechnet (Abb. 2c). Die Rutschung zeigt im zentralen Bereich eine Bewegung bis zu 4 cm pro Jahr, die Geschwindigkeit nimmt zu den Randzonen hin etwas ab.

Als Beispiel für eine Zeitserie der Hangbewegung zeigt Abb.3 ERS DINSAR Bewegungsana-

überwiegende Teil der permanenten Streuer in diesem Gebiet. Die schwarzen Quadrate zeigen ein Gebäude, das sich in den 5 Jahren im Mittel mit 4 mm pro Jahr absenkte. In der näheren Umgebung dieses Gebäudes gibt es noch einige Pixel, die eine ähnliche Absenkung zeigen.

4. Schlussfolgerungen für den operationellen Einsatz

Interferometrie mit satellitengetragenem SAR ermöglicht die Kartierung geringfügiger Bewegungen an der Erdoberfläche mit großer Genau-

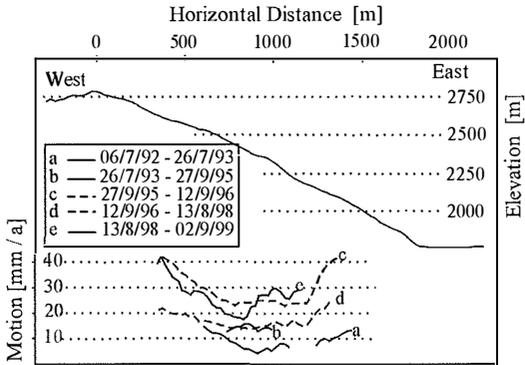


Abb.3: Profil der Topographie und Oberflächenbewegung (in mm/Jahr) des Hanges unter dem Atemkopf oberhalb des Gephatschtausees aus ERS SAR Daten von 1992 bis 1999.

der Abbildungsgeometrie des SAR und aus zeitlichen Änderungen des Reflexionsverhaltens an der Erdoberfläche resultieren. Bewegungen in Flugrichtung des Satelliten können nicht gemessen werden. Die relativ rasche zeitliche Dekorrelation des Signals verhindert den Einsatz von flächenhaften DINSAR Analysen in Gebieten mit dichter Vegetation. Falls stabile Einzelstreuer vorhanden sind, kann jedoch für diese Objekte die Bewegung aus SAR Zeitserien exakt bestimmt werden.

Für die operationelle Nutzung von DINSAR wäre die langfristige Verfügbarkeit desselben Satellitensystems wertvoll. Dies ist z.B. durch ERS-1 und ERS-2 seit nunmehr 10 Jahren gegeben. In den kommenden Jahren werden mehrere neue SAR Systeme zum Einsatz gelangen, die

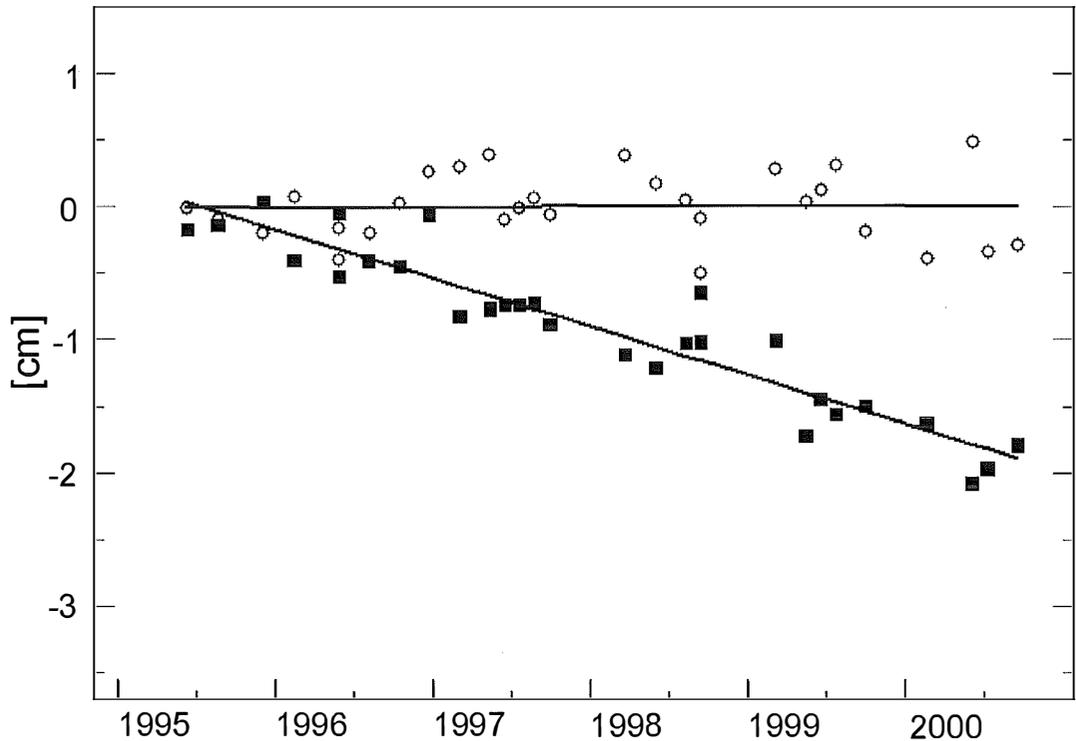


Abb.4: Beispiel von Zeitserien der relativen Vertikalposition von zwei permanenten Streuern, abgeleitet aus ERS SAR Bildern von Innsbruck.

igkeit. Ein wesentlicher Vorteile ist die Möglichkeit, die Analysen ohne Messungen vor Ort weltweit durchzuführen. Das seit 1991 aufgebaute Archiv von ERS SAR Bildern stellt eine wertvolle Grundlage für retrospektive Analysen der Oberflächenstabilität dar.

Für den operationellen Einsatz sind jedoch Einschränkungen zu berücksichtigen, die aus

zwar in verschiedener Hinsicht (z.B. Aufnahmegeometrie, räumliche Auflösung) leistungsfähiger als ERS SAR sein werden. Für DINSAR Anwendungen wird es allerdings notwendig sein, für jeden dieser Sensoren ein eigenes Datenarchiv aufzubauen, da für interferometrische Analysen Bilder von jeweils exakt demselben Aufnahme-modus notwendig sind.

Dank

Die Arbeiten wurden von der Österreichischen Akademie der Wissenschaften im Rahmen des IDNDR Programms unterstützt. Die SAR Daten wurden von der ESA für das Projekt AO3-239 zur Verfügung gestellt.

Referenzen

- [1] Massonet D., Feigl K.L. (1998): Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface. *Reviews Geophys.* Vol. 36, pp. 441-500.
- [2] Rott H., Mayer C., Siegel A. (2000): On the operational potential of SAR interferometry for monitoring mass movements in Alpine areas. *Proc. of the 3rd European Conf. on Synthetic Aperture Radar (EUSAR 2000)*, Munich, 23-25 May 2000, pp. 43-46.

- [3] Ferretti, A., Prati C., Rocca F. (2001): Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Trans. Geosc. Rem. Sens.*, Vol. 39, pp. 8-20.
- [4] Rott H., Scheuchl B., Siegel A., Grasmann B. (1999): Monitoring very slow slope movements by means of SAR interferometry: a case study from a mass waste above a reservoir in the Ötztal Alps, Austria. *Geophys. Res. Letters*, Vol. 26, pp. 1629-1632.

Anschrift der Autoren

Univ.-Prof.Dr. Helmut Rott, Dr. Christoph Mayer und Dr. Thomas Nagler: Institut für Meteorologie und Geophysik, Universität Innsbruck, Innrain 52, A-6020 Innsbruck; E-mail: helmut.rott@uibk.ac.at, christoph.mayer@uibk.ac.at, thomas.nagler@uibk.ac.at



3D Objekterfassung mittels Fernerkundung

Franz Leberl und Rainer Kalliany, Graz

Zusammenfassung

Die Erfassung der Erdoberfläche durch die Fernerkundung war bisher traditionell 2-dimensional, wird aber zunehmend um die dritte Dimension erweitert. Digitale Verfahren der optischen Bildmessung, Radardaten-Verarbeitung sowie auch die Laserabtastrung werden vermehrt eingesetzt, sodass damit 3-dimensionale Modelle der Umwelt entstehen. Als besonderes Beispiel wird die Erstellung von Gebäudemodellen aus interferometrischen Radarbildern mit Genauigkeiten im Bereich von ± 1 Meter behandelt

Abstract

Remote Sensing of the Earth's surface has traditionally produced two-dimensional data products, but recently, this is being augmented by the third dimension. Digital optical imaging, radar data processing, as well as laser scanning, are increasingly being applied to produce three-dimensional models of the environment. As a special example, the generation of building modelings from interferometric radar images, with results at an accuracy of ± 1 meter is discussed.

1. Fernerkundung als Quelle für 3D Modelle

Als „Remote Sensing of the Environment“ in den 60er-Jahren entstanden ist, beschränkte man sich meist auf eine 2-dimensionale Betrachtung der Erdoberfläche. Dies ursprünglich im Gegensatz zur Photogrammetrie, die seit Anbeginn auf eine dreidimensionale Datenerfassung abzielte und diese für die meisten Anwendungen benötigt. Diese Einschränkung der Fernerkundung war einerseits in der Sensorik begründet, die meist nur eine geometrische Auflösung im Bereich von 10 bis 80 Metern lieferte. Andererseits waren auch die untersuchten Umwelt-Phänomene im wesentlichen 2-dimensional, wie etwa bei der Erfassung von Landnutzung, Biomasse, Ernte-Ertrag oder Bodenfeuchte.

Während die SPOT-Satelliten seit den späten 80er-Jahren eine für topographische Anwendun-

gen mittlerer Genauigkeit brauchbare Stereo-Kapazität bieten, begann der echte Wandel in Richtung „3D“ Anfang der 90er-Jahre mit der Radarinterferometrie. Es entstanden eine ganze Reihe von Satellitenfernerkundungs-Projekten, die zum Ziel hatten Phänomene in drei Dimensionen zu betrachten. Dazu zählten digitale Höhenmodelle, Eisbewegungen, Beobachtung von Bodensenkungen usw.

Aber auch im Bereich der optischen Satelliten erweitern sich die Messverfahren in die dritte Dimension. Neben der – mittlerweile auch stark von Seiten der „klassischen“ Photogrammetrie vorangetriebenen – Entwicklung von Methoden zur Automatisierung der Stereo-Auswertung sind die neuen hochauflösenden satellitengestützten Sensoren der Träger dieser Entwicklung. So ist von der Firma EarthWatch mit QuickBird-2 noch für das Jahr 2001 der Start des er-