



Ein Software-System zur interferometrischen Bearbeitung von ERS-1 Radarbildern

Heinrich Frick ¹, Rainer Kalliany ²

¹ *Institut für Computerunterstützte Geometrie und Graphik, TU Graz, Münzgrabenstraße 11, A-8010 Graz*

² *Institut für Computerunterstützte Geometrie und Graphik, TU Graz, Münzgrabenstraße 11, A-8010 Graz*

VGI – Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation **84** (2), S. 144–151

1996

BibT_EX:

```
@ARTICLE{Frick_VGI_199625,  
Title = {Ein Software-System zur interferometrischen Bearbeitung von ERS-1  
Radarbildern},  
Author = {Frick, Heinrich and Kalliany, Rainer},  
Journal = {VGI -- {"0}sterreichische Zeitschrift f{"u}r Vermessung und  
Geoinformation},  
Pages = {144--151},  
Number = {2},  
Year = {1996},  
Volume = {84}  
}
```



range of the scanner and high image noise in the darker areas. Problems also arise when scanning colour, especially false colour photographs due to the lower sensitivity in the blue area. The scanning process also affects the resolution of the original images and a thorough control of the MTF of the scanner is highly recommended.

Furthermore, it is apparent that the scanning process is still a very time consuming operation, mainly because each photograph has to be treated individually and hardly none of the scanners is equipped for film roll. A problem linked to the management of the scanning process is the organisation of the data. The repartition of the disc in units of 2 Giga Bytes, or the storing on tape considerably complicates the management of the data, and it appears necessary to conceive a special data base for this task.

7. CONCLUSION

High costs in data acquisition, an increased user demands for sophisticated applications, and thus for transparent access to information, regardless of the hosts on which it resides, combined with advances in databases systems and communications technology, have brought the

Geoinformatics Community to change from a pure data acquisition to a (distributed) information system perspective; this to enable cost effective access, exchange, integration, and use of geoinformation residing in distributed databases, to support decision making at different levels.

The OEEPE recognizes those changes, and next to keeping relevance to technical aspects of photogrammetry (experimental problem solving / cost saving technology), is developing a research programme that integrates photogrammetry into systems of wider scope (strategic and technological issues related to the European Geoinformation Infrastructure) for the next reporting period (1996-2000). Those objectives can only be achieved through strengthening international co-operation between the geoinformation user, producer and research communities.

For any further information, please contact:

C. Paresi, Secretary General of the OEEPE
c/o International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC)
P.O.Box 6, 7500 AA Enschede, The Netherlands
Tel.: +31 53 4874339
Fax: +31 53 4874335
e-mail: paresi@itc.nl



Ein Software-System zur interferometrischen Bearbeitung von ERS-1 Radarbildern

Heinrich Frick, Rainer Kalliany, Graz

Zusammenfassung

Radar-Interferometrie ist ein relativ junges Fachgebiet. Sie ermöglicht die Ableitung genauer geometrischer Informationen aus zwei Bildern. Eine interessante Anwendung ist die Erzeugung von digitalen Geländemodellen; eine andere die Messung von Lageverschiebungen, z.B. wegen Bodenverwerfungen nach einem Erdbeben. Dieser Bericht beschreibt die Entwicklung eines Prototypen-Softwaresystems zur interferometrischen Bearbeitung von Radarbildern. Als Anwendungs-Beispiel wurden mit Daten von ERS-1 Eisbewegungen in Westgrönland untersucht. Diese Arbeit bildet den Grundstein für ein modulares Softwaresystem, das künftig auch zur interferometrischen Erfassung von Höheninformation verwendet werden soll.

Abstract

Radar interferometry is a comparatively young discipline. It is capable of obtaining accurate geometric information from two similar images. One particular interesting application is the generation of digital elevation models, another is measuring displacements - e.g. of soil after an earthquake. This paper reports about the development of a prototype software system for interferometric processing of radar images. As an applications example, the movement of ice in western Greenland has been investigated by ERS-1 data. This work is the core of a modular software system which in the future should also be capable of obtaining elevation data.

1. Einleitung

Erste Untersuchung über die Verwendung interferometrischer Methoden zur Höhenmodellgewinnung aus Radardaten stammen bereits aus den 70er-Jahren von Graham [5]. Zebker und Goldstein [9] berichteten 1986 über die Berechnung eines Höhenmodells der San Francisco Bay mit 11 m Punktabstand und einer Standardabweichung von 2–10 m aus Flugzeug-Radardaten. Eine erste Anwendung zur Messung von Bewegung wurde 1987 von Goldstein und Zebker [2] gezeigt: Mit einem Flugzeuggestützten System mit zwei gegeneinander versetzten Antennen wurden Wasseroberflächenströmung in der San Francisco Bay erfaßt. Massonnet et.al. [7] dokumentierten 1993 erstmals nach einem Erdbeben Verschiebungen an der Erdoberfläche. Goldstein et.al. [4] untersuchten 1993 die Bewegung des antarktischen Eisstromes unter Verwendung von ERS-1 „repeat-pass interferometry“-Beobachtungen. Zwei weitere Berichte aus jüngerer Zeit über die Beobachtung des grönländischen Eisschildes stammen aus dem Jahr 1995 von Joughin et.al. [6] bzw. Rignot et.al. [8].

2. Geometrie der Radar-Interferometrie

Wir beschreiben ausschließlich die „repeat-pass interferometry“, bei der aus – nominell – identen Umlaufbahnen zeitlich getrennt zwei Aufnahmen gemacht werden. Wie in Abb.1 stark

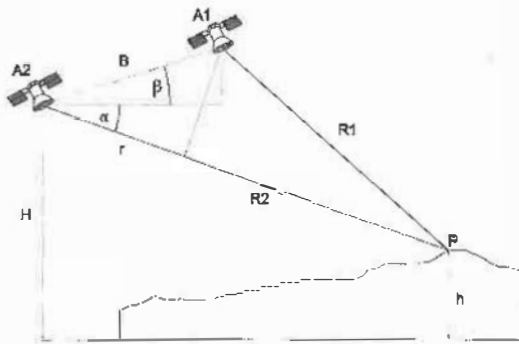


Abb.1: Schematische Darstellung der Geometrie der Radar-Interferometrie

übertrieben dargestellt, liegen jedoch in der Praxis die Aufnahmeorte einige dutzend Meter auseinander. Die daraus resultierenden unterschiedlichen Distanzen zu identen Bodenpunkten bewirken entsprechende Phasenverschiebungen, welche von der Radar-Interferometrie ausgewertet werden. Da der Satellit ERS-1 mit einem C-

Band-Signal von 5,7cm Wellenlänge arbeitet, sind hier theoretisch mit interferometrischen Methoden extrem hohe Genauigkeiten erzielbar.

Die verwendeten Radarbilder müssen mit kohärenten Mikrowellen erzeugt worden sein, d.h. Frequenz und Phasenlage der emittierten Strahlung sind wohldefiniert und bekannt. Weiters werden die Daten im „single-look complex“ (SLC) Format benötigt. Bei diesen SLC-Bildern ist für jedes Pixel sowohl die Amplitude als auch die Phasenlage der reflektierten Strahlung beim Empfänger dokumentiert; meist in Form einer komplexen Zahl mit Real- und Imaginärteil.

Die für die Radar-Interferometrie relevanten geometrischen Verhältnisse zeigt Abb.1. Die Antennenpositionen A1 und A2 sind um den Basisabstand B räumlich versetzt. Diese Verschiebung, die in der Realität nicht mit letzter Genauigkeit bekannt ist, ist essentiell für die Gewinnung von Höhenmodellen, da sie eine Korrelation zwischen Geländehöhe und beobachteter Phasenverschiebung bewirkt.

Der Satellit befindet sich in der Position A2 auf der Höhe H über der gemeinsamen Bezugsebene, während sich der Objektpunkt P in der Höhe h befindet. Die Schrägdistanzen („slant range“) zwischen den Antennenorten und dem Objektpunkt sind mit R1 und R2 bezeichnet. Die Differenz $r = R1 - R2$, hat eine unterschiedlich lange Laufzeit der Mikrowellen für denselben Objektpunkt zur Folge und führt schlußendlich zu einer unterschiedlichen Phasenlage des empfangenen Signals in den beiden Radarbildern. Die Phasenlagen des Punktes P in beiden Bildern wird durch Differenzbildung in eine Phasendifferenz umgerechnet.

Die Auswertung der Phasendifferenz ist das Kernstück der Radar-Interferometrie. Bei „repeat-pass interferometry“ trägt die Differenz r doppelt zur Phasendifferenz Φ bei, was zu folgender Beziehung führt:

$$\Phi = \frac{4 \cdot r \cdot \pi}{\lambda} \quad (1)$$

Dabei ist Φ die beobachtete Phasendifferenz für den Punkt P und λ die Wellenlänge des vom Sensorsystem emittierten und nach der Reflexion am Boden wieder empfangenen Mikrowellensignals. Leider ist der Wert dieser Phasendifferenz mehrdeutig, da die Phase nur modulo 2π gemessen werden kann. Dieser Umstand muß in einem speziellen Bearbeitungsschritt, dem „phase unwrapping“, berücksichtigt werden.

Abb. 2 zeigt zwei Möglichkeiten, wie es zu unterschiedlichen Laufzeiten der Radarsignale –

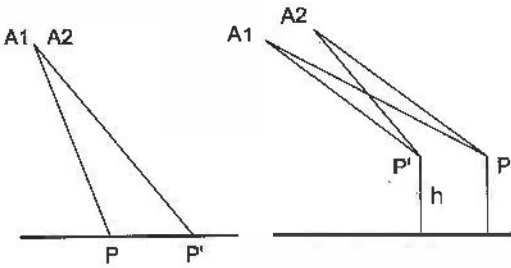


Abb.2: Phasendifferenzen aufgrund von ausschließlich horizontaler Bewegung des Bodenpunktes (links), bzw. in Kombination mit einem Versatz der Satellitenpositionen (rechts)

und somit zur Phasenverschiebung – kommen kann. Für die Messung von horizontalen Bewegungen wären völlig idente Aufnahmeorte ($A1=A2$, $B=0$) wünschenswert, da schon die unterschiedliche Position des Objektpunktes zu den beiden Aufnahmezeitpunkten (P und P') zu entsprechenden Laufzeitunterschieden führt. In der Realität kommt es aber zu einem Versatz zwischen den beiden Aufnahmeorten, der jedenfalls ein Vielfaches der Wellenlänge λ ausmacht. Dieser Effekt ist für die Beobachtung von relativen Höhenunterschieden zwischen unbewegten Bodenpunkten essentiell, weil er eine Korrelation zwischen Geländeöhe h und der Phasendifferenz Φ bewirkt. Für die Bewegungsmessung hingegen ergibt das einen systematischen Einfluß, der unter Verwendung eines bereits bekannten Geländemodells zu beseitigen ist.

Die geometrischen Verhältnisse des kombinierten Falles führen zu folgender allgemeiner Formel für die Phasendifferenz zufolge des Höhenunterschiedes:

$$\Phi(i) = \frac{4 \cdot \pi \cdot B}{\lambda} \cdot \cos \left[\arcsin \left(\frac{H - h(i)}{R_{\min} + i \cdot dR} \right) + \beta \right] \quad (2)$$

Dabei ist i der Pixelindex im „slant range“ Bild, $h(i)$ die Geländeöhe an dieser Stelle, R_{\min} die minimale Schrägdistanz im Bild (also die Entfernung zum ersten Pixel im Scan) und dR die Pixelgröße in „slant range“ Richtung. Um die Phasendifferenz zufolge der tatsächlichen Objektbewegung zu erhalten muß dieser durch die Aufnahmesituation bedingte Wert von der gemessenen Phasendifferenz subtrahiert werden.

3. Die Verarbeitungskette

Im Rahmen eines Forschungsaufenthaltes an der University of Colorado und der Diplomarbeit von H.Frick, [1] an der TU Graz wurde ein Softwarepaket zur Messung von horizontalen Bewe-

gungen mittels „repeat pass“ Radardaten entwickelt. Das Flußdiagramm in Abb. 3 zeigt die dabei erforderlichen Bearbeitungsschritte.

Zum Testen der implementierten Algorithmen wurde die beschriebene Prozeßkette auf ein ERS-1-Bildpaar des grönländischen Eisschildes Grönland angewendet. Die Aufnahmen datieren vom 25. und 28. November 1991 (Orbitnummern 1885 bzw. 1928). Die geographischen Koordinaten des Bildmittelpunktes sind $69,785^\circ$ nördliche Breite und $312,008^\circ$ östliche Länge. Im folgenden werden die Zwischenschritte und das Endresultat der interferometrischen Bearbeitung für den 2. Quadranten des ERS-1-Paares gezeigt. Ein Quadrant bedeckt eine Fläche von ca. $50\text{km} \times 50\text{km}$.

Das Testgebiet, mit den Beträgen der komplexen Zahlen als Grauwertbild codiert, zeigt sehr wenige Einzelheiten. Man sieht leicht ein, daß herkömmliche, nur Grauwerte berücksichtigende Matching-Algorithmen für solche Gebiete versagen müssen.

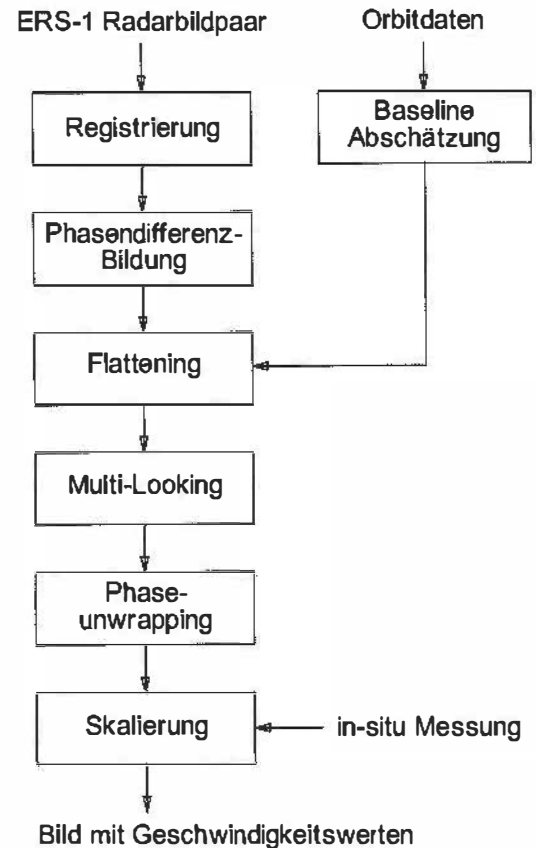


Abb.3: Flußdiagramm des Verfahrensablaufes zur Bewegungsmessung mittels Interferometrie

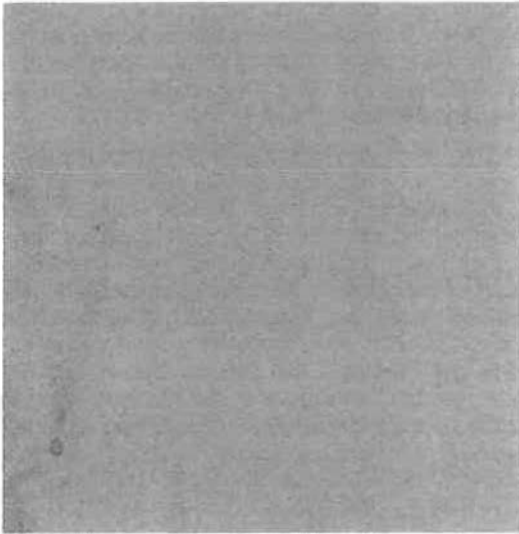


Abb.4: Eines der beiden Radarbilder des Testgebietes. Der Betrag der komplexen Zahl ist als Grauwert codiert

3.1 Basis-Abschätzung

Um von der gemessenen Phasendifferenz auf Höheninformation oder Bewegung rückrechnen zu können, muß der Wert der Basislinie und die Flughöhe bekannt sein. Das betreffende Modul verwendet die zu ERS-1 Bildern erhältliche Orbitinformation, deren Genauigkeit im Meter-Bereich liegt. Mit Hilfe der so bekannten Plattformpositionen und dazugehörigen Zeitpunkten wird der kürzeste Abstand zwischen beiden Orbits berechnet. Dies setzt die – weitestgehend zutreffende – Annahme voraus, daß die Mikrowellensignale normal zum Geschwindigkeitsvektor emittiert werden. Das Modul ermittelt zusätzlich eine später benötigte parametrische Repräsentation der Flugbahn.

3.2 Registrierung

Im allgemeinen Fall haben wir bei „repeat-pass interferometry“ verschiedene Aufnahmeorte, d.h. die Basis ist von Null verschieden. Dies impliziert eine unterschiedliche Geometrie der beiden Bilder. Obwohl in der Praxis die Basis nur sehr kleine Werte im Vergleich zur Flughöhe erreicht (etwa im Verhältnis 1:5000), darf diese Diskrepanz nicht vernachlässigt werden. Um zu erreichen, daß identische Pixel sich in beiden Bildern auf identische Objektpunkte beziehen, müssen die beiden Bilder aufeinander registriert werden.

Die Registrierung kann in zwei Arbeitsschritten unterteilt werden: Die Berechnung des Versatzes der beiden Bilder, sowie die geometrische Um-

bildung eines Bildes, um es mit dem anderen zur Deckung zu bringen.

Zur Durchführung der ersten Aufgabe werden die komplexen Korrelationskoeffizienten einer 8×8 Matrix komplexer Werte des ersten Bildes mit einer gleichgroßen Matrix im zweiten Bild berechnet. Die Matrix wird im zweiten Bild innerhalb einer 16×16 großen Umgebung verschoben. In der auf diese Weise erhaltenen 9×9 Matrix komplexer Korrelationswerte wird das Betragsmaximum gesucht und in dessen unmittelbarer Umgebung mittels Interpolation zweiter Ordnung der optimale Korrelationspunkt mit Subpixelgenauigkeit ermittelt. Die derart für jede Pixelposition errechneten Verschiebungswerte werden anschließend zur geometrischen Transformation des zweiten Bildes verwendet, die im wesentlichen aus einem „Resampling“ in Scanrichtung besteht.

Ein Nebenprodukt der Registrierung ist die sog. „correlation map“, die eine Visualisierung des Korrelationskoeffizienten über das komplette Bildpaar darstellt. Diese Darstellung kann zur Abschätzung der zu erwartenden Unsicherheiten des Meßresultate herangezogen werden. In Bereichen mit niedriger Korrelation muß mit größerer Unsicherheit gerechnet werden.

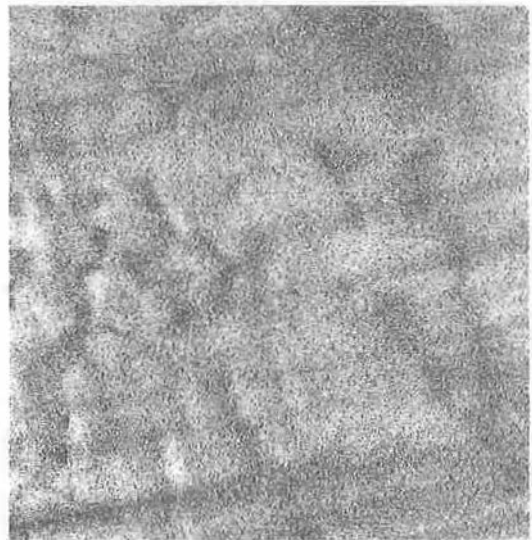


Abb.5: „Correlation map“ nach der Registrierung. Der Betrag des Korrelationskoeffizienten ist als Grauwert codiert. Größere Helligkeit bedeutet bessere Korrelation

Nach der Registrierung sollten die beiden Radarbilder geometrisch pixelgenau übereinstimmen. Die „correlation map“ zeigt in unserem Beispiel überraschenderweise deutlich mehr Strukturen als das vorhergehende Grauwertbild.

3.3 Phasendifferenz-Bildung

Das bei der Phasendifferenzbildung entstehende sogenannte „Interferogramm“ wird im wesentlichen durch pixelweise Bildung der Phasendifferenz beider Bilder erreicht. In der Praxis wird für jedes Pixel die komplexe Zahl des ersten Bildes mit der konjugiert komplexen Zahl des zweiten Bildes multipliziert. Das Argument dieses Produktes ist identisch mit der Phasendifferenz der beiden ursprünglichen Zahlen. Bei Darstellung des Interferogrammes in schwarzweiß entspricht ein voller Phasendurchlauf ($0 - 2\pi$) einem Graukeil von schwarz bis weiß.

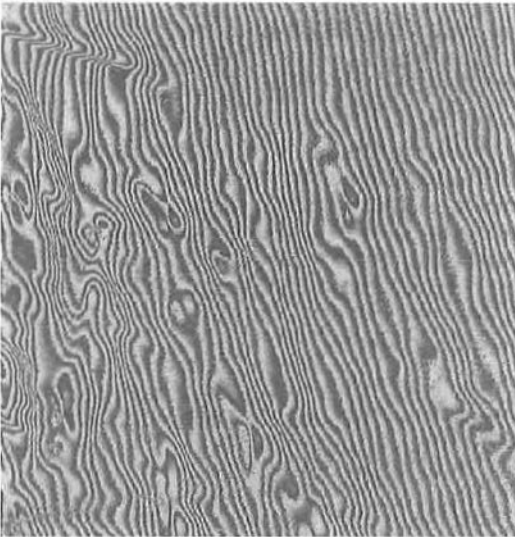


Abb.6: Interferogramm. Ein Phasendurchgang entspricht einer räumlichen Änderung von 2,85 cm in Richtung zum Sensor

Die Visualisierung der Phasendifferenzbildung zeigt einwandfrei erkennbare „Fringes“. Aus der vertikalen Vorzugsrichtung der Fringes ist eindeutig der starke Einfluß der „slant range“ Geometrie zu erkennen, der durch den räumlichen Versatz der beiden Umlaufbahnen bedingt ist.

3.4 Flattening

Die Ungleichheit der beiden Aufnahmepositionen bringt es mit sich, daß selbst eine theoretisch flache Erdoberfläche Phasendifferenzen in Scanrichtung (also normal zur Flugbahn) zur Folge hätte. Auch bei der Höhenmodellgewinnung mittel Interferometrie ist dieser sogenannte „flat terrain“-Einfluß aus dem Interferogramm zu entfernen. Im Falle der Bewegungsmessung ist zusätzlich noch, unter Zuhilfenahme eines Hö-

henmodells, der Einfluß der Topographie zu eliminieren. Das betreffende Modul berechnet für jedes Pixel die aus den Orbitdaten und der Geländehöhe auch ohne Objektbewegung zu erwartende Phasendifferenz.

Dazu muß für jedes Pixel die Lage des entsprechenden Objektpunktes berechnet auf der Erdoberfläche berechnet werden. Mit den bekannten Parametern „pulse rate frequency“ und „slant range pixel spacing“ können vorerst aus den Pixelindizes die SAR-Koordinatenwerte „along track“ und „across track“ berechnet werden. Mit Hilfe der parametrischen Repräsentation der Flugbahn (die bei der Basis-Abschätzung erstellt wurde) kann die Plattformposition zum betreffenden Aufnahmezeitpunkt ermittelt werden. Mit einem iterativen Verfahren wird sodann unter Verwendung eines Höhenmodells die Position des Objektpunktes bestimmt. Die dabei erhaltene Höheninformation wird dazu verwendet, die Phasendifferenz gemäß Formel 2 zu berechnen und vom gemessenen Wert zu subtrahieren. Somit sind – soweit es die Genauigkeit der vorliegenden Informationen erlaubt – alle durch die Aufnahmegeometrie bedingten systematischen Einflüsse beseitigt.

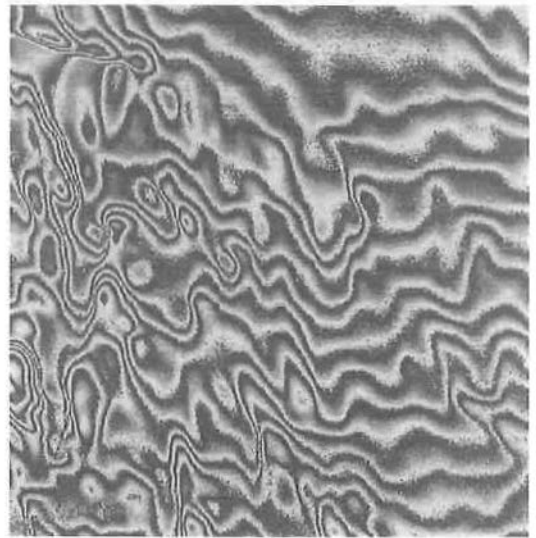


Abb.7: Geglättetes Interferogramm

Unser Beispiel zeigt, daß die Entfernung der „flat terrain phase“ und des Einflusses der Topographie die Anzahl der Fringes deutlich reduziert hat. Im vorliegenden Fall wurden, über die Bildbreite betrachtet, 48,13 Fringes entfernt. Die resultierenden Fringes können nunmehr der tatsächlichen Bewegung der Erdoberfläche zwischen den beiden Aufnahmen zugeschrieben werden.

3.5 Multi-Looking

Das bis zu diesem Punkt gewonnene geglättete Interferogramm ist üblicherweise sehr verwascht. Der SAR-typische „speckle“-Effekt wirkt sich auch in der Interferometrie aus. Besonders in Hinblick auf die nachfolgenden Bearbeitungsschritte erweist sich eine Tiefpaßfilterung als vorteilhaft. Im vorliegenden Modul werden dazu die komplexen Werte mehrerer Input-Pixel zu einem einzigen Wert verdichtet. Dabei verringert sich natürlich die Auflösung des Bildes. Wegen unterschiedlicher Pixelgrößen in den beiden Richtungen wurden in unserem Fall zwei Pixel in „across track“ Richtung und acht Pixel in „along track“ Richtung, zu einem einzigen Output-Pixelwert kombiniert. Die resultierende Pixelgröße im „ground range“ Sytem ergibt sich daraus mit ca. $32m \times 32m$. Die Einzugsbereiche für benachbarte Output-Pixel überlappen sich nicht, d.h. jedes Input-Pixel trägt nur zu einem Output-Pixel bei.

3.6 Phase-Unwrapping

An dieser Stelle des Verarbeitungsprozesses liegt ein Bild mit Phasenwerten zwischen 0 und 2π vor. Offensichtlich sind diese Werte mehrdeutig, d.h. die Anzahl kompletter 2π -Phasendurchgänge ist nicht bekannt. Ein erster Schritt versucht daher einen korrekten relativen Zusammenhang aller Phasenwerte innerhalb des Bildes herzustellen. Dazu wird in einem Integrationsverfahren für jedes Pixel jene Anzahl kompletter Phasendurchgänge bestimmt, die die Phasendifferenz zu den Nachbarn minimiert. Dabei wird die Phasendifferenz modulo 2π betrachtet. Beispielsweise ist für die Phasenwerte 6,0 und 0,3 beim zweiten Wert 2π zu addieren, um die Phasendifferenz zu minimieren.

Leider können Rauschen und durch extreme Topographie bedingte Layover-Effekte dazu führen, daß das Resultat von der Integrationsrichtung abhängt und somit globale Phasenfehler erzeugt werden. Ein Möglichkeit derartige Problemzonen zu erkennen ergibt sich durch Aufsummieren der Phasendifferenzen von vier quadratisch angeordneter benachbarter Pixel, woraus sich sogenannte „Residuen“ abgeleitet werden. Positive oder negative Residuen haben eine Summe von $+2\pi$ bzw. -2π . Eine verschwindende Summe gilt als Indikator für einen unkritischen Bereich.

Goldstein et.al. [3] berichten, daß Integrationspfade die eine ungleiche Anzahl positiver und negativer Residuen umschließen zu globalen Fehlern führen. Der dort vorgeschlagene Algo-

rithmus vermeidet solche Integrationspfade und wurde hier implementiert:

Zunächst werden die Residuen für alle Pixelquadrate ermittelt. Ein zweiter Schritt neutralisiert jeweils zwei gegensätzlich „geladene“ Residuen durch einen sog. „branch cut“, das ist ein Pixelpfad zwischen den beiden Residuen. Der vorliegende Algorithmus betrachtet ein nicht-neutralisiertes Residuum und sucht mit sukzessive wachsendem Radius ein gegensätzlich geladenes Residuum. Sobald dieses gefunden ist verbindet der Algorithmus die beiden Partner durch einen „branch cut“. Dies wird wiederholt bis alle Residuen neutralisiert sind. Der abschließende Integrationsprozeß meidet die Integration über „branch cuts“ hinweg und somit auch die nach obiger Prämisse als gefährlich geltenden Pfade.

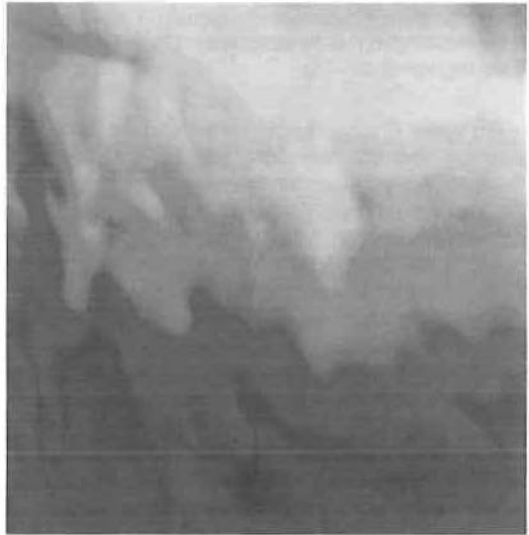


Abb.8: „Unwrapped“ Interferogramm. Das „phase unwrapping“ hat die relative Zuordnung aller Phasenwerte im Bild bewirkt. Die Phasenwerte laufen im gegebenen Fall zwischen Minimum und Maximum über einen grauwertkodierten Wertebereich von 91, 125 rad

3.7 Skalierung

Das „phase unwrapping“ stellt den korrekten relativen Zusammenhang der Phasendifferenzen her. Übrig bleibt noch die ungewisse Anzahl der tatsächlichen kompletten Phasendurchgänge für die Gesamtheit aller Pixel. Dieses Skalierungsproblem wird indirekt, durch die Einführung eines Bodenmeßresultates an einer beliebigen Stelle des Bildes, gelöst. Weiters muß auch noch die Phasendifferenz zwischen zwei Pixeln in einen Geschwindigkeitswert umgerechnet werden.

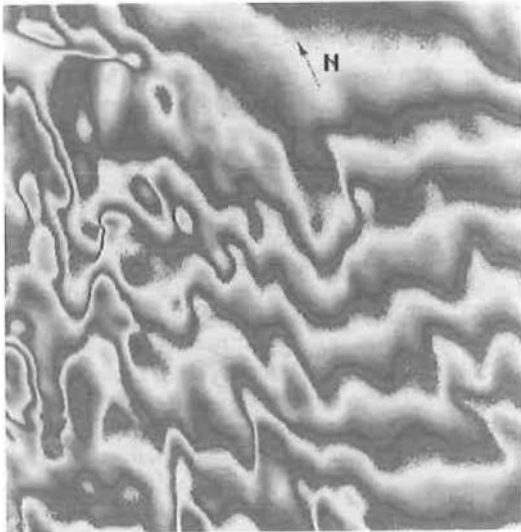


Abb.9: Skaliertes Geschwindigkeitsbild. Ein kompletter Phasendurchgang entspricht einer Geschwindigkeitsänderung von 5 cm/Tag

Ein voller Phasendurchlauf entspricht einer Bewegung von $\lambda/2$, also 2,85 cm, in Richtung zum Sensor. Wird dieser Wert durch den Sinus des Einfallswinkes von 25° geteilt, und der Beobachtungszeitraum von 3 Tagen berücksichtigt, erhält man eine horizontale Geschwindigkeit von 2,25 cm/Tag für einen vollen Phasendurchgang. Mit diesem Wert und einem tatsächlichen Geschwindigkeitswert aus einer Bodenmessung wurde der Datensatz skaliert. Die in dieser Darstellung sichtbaren „Fringes“ sind „Zonen gleicher Geschwindigkeit“; aus ihrer Ausformung lassen sich Rückschlüsse über das Fließverhalten im Eisschild ziehen. Im vorliegenden Testgebiet messen wir eine minimale Geschwindigkeit von 17 cm/Tag in der rechten oberen Ecke des Bildes, und maximal 58 cm/Tag links unten. Dazwischen liegen 8 Phasendurchgänge, von denen jeder einer Geschwindigkeitszunahme von 5 cm/Tag entspricht.

4. Resümee und Ausblick

Wir haben gezeigt, daß mit satellitenbasierter Radar-Interferometrie großflächige Karten der Geschwindigkeitsverteilung langsamer Bodenströmungen hergestellt werden können.

Zur Lösung der gegebenen Aufgabenstellung wurden im wesentlichen alle für die Radarinterferometrie erforderlichen Arbeitsschritte implementiert. Eine eingehende Überprüfung der Genauigkeit der erzielten Resultate wurde im Rah-

men der vorliegenden Arbeit nicht vorgenommen. Es bestehen aber konkrete Vorstellungen, welche Arbeitsschritte noch verbessert bzw. erweitert werden sollten:

- Das Modul zur Baseline-Abschätzung sollte ein Genauigkeitsmaß für den Wert der Baseline berechnen, damit durch Fehlerfortpflanzung die Unsicherheit des Endresultates angegeben werden kann.
- Der Prozeß der Registrierung sollte vom derzeitigen semi-automatischen Betrieb in einen vollautomatischen umgewandelt werden und erforderlichenfalls auch ein Resampling in beide Achsenrichtungen ermöglichen.
- Das Verhalten des Phase-Unwrapping Moduls sollte auch in gebirgigen Terrain, wo Layover-Effekte auftreten, erprobt werden.
- Bei Weiterentwicklung der Methodik sollen künftig auch Bilder von Vegetation und Kulturlandschaften bearbeitet werden, da dort eine schlechtere Korrelation als im relativ homogenen Eis zu erwarten ist. Dieser Aspekt ist besonders wichtig wenn mit Interferometrie hochgenaue Höhenmodelle im europäischen Raum erstellt werden sollen.

Von der ERS-1/2-Tandem-Mission 1995/1996, bei der die beiden Satelliten dieselben Gebiete im Abstand von nur 1 Tag aufgenommen haben, liegt mittlerweile eine große Anzahl von Datensätzen vor, die insbesondere für die Erstellung von Höhenmodellen mittels Interferometrie gedacht sind. In Hinblick auf diese interessante Aufgabenstellung werden wir das bestehende modulare Softwaresystem weiter ausbauen und hoffen, künftig neue Aufgabengebiete der Radar-Interferometrie zu erschließen.

Dank

Die Autoren bedanken sich bei Konrad Steffen von der University of Colorado für die Unterstützung bei der Verfassung der Diplomarbeit von Heinrich Frick, bei John C. Curlander und Richard E. Carande von Vexcel Corp. in Boulder für das technologische Know-How und bei Ken C. Jezek von der Ohio State University und Eric Rignot vom Jet Propulsion Laboratory in California für die Bereitstellung des Datenmaterials.

Literatur

- [1] H. Frick: Interferometric satellite synthetic aperture radar and its application to the observation of Greenland ice sheet motion. Diploma thesis, Graz University of Technology, 1996.
- [2] R.M. Goldstein, H.A. Zebker: Interferometric radar measurement of ocean surface currents. Nature, vol. 328, pp. 707-709, Aug. 1987.
- [3] R.M. Goldstein, H.A. Zebker and C.L. Werner: Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping. Radio Science, vol. 23, pp. 713-720, July-Aug. 1988.
- [4] R.M. Goldstein, H. Engelhardt, B. Kamb and R.M. Frolich: Satellite Radar Interferometry for Monitoring Ice Sheet Mo-

tion: Application to an Antarctic Ice Stream. *Science*, vol. 262, pp. 1525-1530, Dec. 1993.

- [6] L.C. Graham: Synthetic interferometric radar for topographic mapping. *Proceedings of the IEEE*, vol. 62, pp. 763-768, June 1974.
- [7] J.R. Joughin, D.P. Winebrenner and M.A. Fahnestock: Observations of ice-sheet motion in Greenland using satellite radar interferometry. *Geophysical Research Letters*, vol. 22, pp. 571-574, Mar. 1995.
- [8] D. Massonnet, M. Rossi, C. Carmona, F. Adragna, G. Peltzer, K. Feigl and T. Rabaute: The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry. *Nature*, vol. 364, pp. 138-142, July 1993.

[8] E. Rignot, K.C. Jezek and H.G. Sohn: Ice Flow Dynamics of the Greenland Ice Sheet from SAR Interferometry. *Geophysical Research Letters*, vol. 22, pp. 575-578, Mar. 1995.

[9] H.A. Zebker and R.M. Goldstein: Topographic mapping from interferometric Synthetic Aperture Radar Observations. *Journal of Geophysical Research*, vol. 91, pp. 4993-4999, Apr. 10, 1986.

Anschrift der Autoren:

Dipl.-Ing. Heinrich Frick, Dipl.-Ing. Rainer Kalliany, Institut für Computerunterstützte Geometrie und Graphik, TU Graz, Münzgrabenstraße 11, A-8010 Graz.



Cryospheric Monitoring and Research by Means of ERS

Helmut Rott, Thomas Nagler and Wolfgang Rack, Innsbruck

Zusammenfassung

Im Rahmen von Experimenten betreffend die Nutzung des Aktiven Mikrowellen Instrumentes (AMI) der Europäischen Erdbeobachtungssatelliten ERS-1 und ERS-2 wurden Methoden und Anwendungen auf dem Gebiet der Kryosphärenforschung untersucht. Feldmessungen der Radarrückstreuung in den Alpen und in der Antarktis lieferten Grundlagen für die Analyse der Satellitendaten. Mittels AMI Scatterometer Daten wurden großflächig Eigenschaften von Schnee und Eis über der Antarktis untersucht. Es wurde ein Verfahren zur Kartierung schmelzenden Schnees mittels AMI Synthetisch Apertur Radar (SAR) entwickelt, das bereits für die Modellierung von Schnee- und Gletscherschmelze erprobt wurde. ERS-1 SAR Daten der Antarktischen Halbinsel und des Südlichen Patagonischen Eisfeldes zeigten einen markanten Rückzug des Eises, was als Hinweis auf regionale Klimaänderungen zu sehen ist.

Abstract

In the frame of scientific experiments on the use of the Active Microwave Instrument (AMI) of the European Earth Observation Satellites ERS-1 and ERS-2 methods and applications for snow and ice monitoring have been investigated. Ground based scatterometer measurements and field campaigns in the Alps and in Antarctica provided the basis for the analysis of the spaceborne microwave data. Large scale characteristics of Antarctic snow and ice were analyzed by means of AMI scatterometer data. An algorithm was developed for snow mapping by means of AMI Synthetic Aperture Radar (SAR) and successfully tested for modelling of snow and glacier melt. Dramatic changes of ice extent, including the collapse of an ice shelf, have been detected by means of ERS-1 SAR on the Antarctic Peninsula and on the Southern Patagonian Icefield, providing evidence for regional climatic change.

1. Introduction

ERS-1, the first European Remote Sensing Satellite, was launched by the European Space Agency (ESA) on 17 July 1991, followed by its successor ERS-2, launched on 20 April 1995. Though the sensors had been designed for research and applications in coastal zones, in polar regions, and for global ocean processes, in the course of the ERS-1 mission a wide range of applications developed also over land surfaces [1].

In the frame of three scientific ESA-approved experiments with ERS-1 and ERS-2 (Principal In-

vestigator H. Rott) scientists of the University of Innsbruck have been involved in the development of methods on the use of ERS data for snow and ice monitoring and research and studied dynamics and ice/climate interactions on Alpine glaciers, on the Patagonian Icefield and in various parts of Antarctica. Research on scattering signatures provided the basis for the analysis of satellite data. The main activities were related to the Active Microwave Instrument (AMI) of ERS.

AMI operates in the C-band at 5.3 GHz (5.6 cm wavelength) parallel (VV) polarizations; it comprises a synthetic aperture radar (SAR) with high