



Doctoral Thesis

## **Fusion of spaceborne stereo-optical and interferometric SAR data for digital terrain model generation**

**Author(s):**

Honikel, Marc Wolfgang

**Publication Date:**

2002

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-004406677> →

**Rights / License:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

DISS. ETH Nr. 14636

**FUSION OF SPACEBORNE STEREO-OPTICAL AND INTERFEROMETRIC  
SAR DATA FOR DIGITAL TERRAIN MODEL GENERATION**

ABHANDLUNG  
zur Erlangung des Titels

**DOKTOR DER TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN**  
**der**  
**EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZÜRICH**

Vorgelegt von

**MARC WOLFGANG HONIKEL**

Dipl.-Ing. Elektrotechnik, Universität Fridericiana zu Karlsruhe

geboren am 23. Februar 1969

von Deutschland

Angenommen auf Antrag von:

Prof. Dr. Armin Grün, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Zürich, Referent  
Prof. Dr. Ian Dowman, Department of Geomatic Engineering, University College London, Koreferent

2002

## KURZFASSUNG

Für die satellitengestützte Messung von digitalen Geländemodellen (DGMs) bietet sich sowohl die photogrammetrische Auswertung eines Bildpaares als auch die Radar Interferometrie (InSAR) an. Mit der photogrammetrischen Methode, bis heute überwiegend mit den französischen SPOT Satelliten durchgeführt, erreicht man im Normalfall DGM Genauigkeiten von 10m. Da bei SPOT die Aufnahmen bei zwei verschiedenen Überflügen gemacht werden (repeat pass), entstehen durch Veränderungen oftmals aber Probleme bei der Punktbestimmung und dadurch inakzeptabel grosse Messlücken im DGM. Wolkenbehang macht vielerorts eine Messung ganz unmöglich. Auf der anderen Seite können interferometrische SAR Messungen unabhängig von Wolkenbehang oder Tageszeit durchgeführt werden. Die Bilder der europäischen Fernerkundungssatelliten ERS-1/2 stellen hinsichtlich Verfügbarkeit, Anzahl und Genauigkeit der Messungen und Automatisierung (und damit Preis) eine echte Alternative zur traditionellen photogrammetrischen Geländemodellgenerierung in diesem Massstab dar. Laufzeitmessverfahren wie InSAR haben jedoch einige schwerwiegende Nachteile, die im wesentlichen aus der Aufnahmegeometrie, der notwendigen Genauigkeit bei der Bestimmung der Aufnahmeposition und der repeat pass Konstellation entstehen. Aus diesen Gründen erreichen interferometrische DGMs nur selten höhere absolute Genauigkeiten als die mit optischen Systemen gemessenen DGMs.

Die vorliegende Arbeit behandelt die Fusion von optischen und InSAR Daten zur DGM Generierung. Es wird untersucht, wie und inwieweit sich bereits bestehende SPOT DGMs eignen, um mit interferometrischen Messungen fusioniert zu werden. Zwei Optionen und dementsprechend zwei Geometrien bieten sich hierfür an: zum einen die Fusion während der interferometrischen Prozessierung in der SAR Bildgeometrie, zum anderen die auf Produktebene, dem DGM. In beiden Fällen werden die Daten zur Fusion zunächst in eine gemeinsame Geometrie überführt und anschliessend deren Ähnlichkeit bestimmt. Anhand ihrer Ähnlichkeit werden die Messungen einander zugeordnet bzw. verworfen. Die zugeordneten Messungen werden als Elemente des lokalen Beobachtungsvektors aufgefasst, aus dem in einem letzten Schritt die gesuchte Grösse, interferometrische Phase oder Geländehöhe, mit Hilfe einer Ausgleichung der Beobachtungen geschätzt wird. Je nach Anwendung bedient man sich hierzu der Methode der kleinsten Quadrate zur Prädiktion, Interpolation oder Filterung der Daten.

Durch die repeat pass Konstellation der ERS Satelliten kann es zwischen den Überflügen zu Änderungen in den atmosphärischen Bedingungen kommen. Diese bedingen einen Laufzeitunterschied der Mikrowellen und überlagern sich dem topographischen Anteil der Phase. Mit einem bestehenden DGM kann der Einfluss der atmosphärischen Änderungen auf die interferometrischen Messungen abgeschätzt und beseitigt werden. Man unterscheidet zwischen lokalen und systematischen atmosphärischen Effekten. Lokale Störungen werden aufgrund ihrer Varianz im Interferogramm detektiert und vom weiteren Messvorgang ausgeschlossen. Systematische Einflüsse erzeugen ausgedehnte zusätzliche Interferenzlinien, die sich dem Phasenanteil aus der Geländehöhe überlagern. Mit Hilfe des DGMs lässt sich diese niederfrequente Überlagerung detektieren und durch ein Polynom niederen Grades approximieren. Ähnlich lässt sich auch der Effekt eines fehlerhaft bestimmten Basisvektors beseitigen. Die hierfür benötigte Genauigkeit des DGMs ist abhängig von der interferometrischen Basislänge und wird für Messungen, die mit kürzerer Basislänge durchgeführt wurden, von SPOT leicht erreicht. Gleiches gilt für den Einsatz eines DGMs zur Beschränkung der Lösung der  $2\pi$  Mehrdeutigkeit der interferometrischen Phase, der sogenannten Phasenabwicklung. Durch die Beschränkung lassen sich die Folgen der Rauschanfälligkeit der bestehenden Algorithmen vermeiden und eine kontinuierliche Lösung für die Phase für das gesamte Interferogramm bestimmen. Neben der reinen Beschränkung der Phasenabwicklung lässt sich mit Hilfe einer Interferogrammsimulation auch der Phasenverlauf selbst in verrauschten Regionen schätzen. Hierzu wird die Phase durch einen Wiener Filter geschätzt. Die Filterparameter werden mit der Simulation bestimmt. Der Schätzer wird durch die Phasenkohärenz gesteuert, adaptiert sich also an die Rauschegebenheiten der interferometrischen Messungen. Auch bestehende DGMs geringerer Auflösung können hierzu verwendet werden, wenn mit einer Bildpyramide gearbeitet wird.

Die Daten können ebenfalls auf der DGM Produktebene mit der genannten Methode fusioniert werden. Die Optionen zur Fusion sowohl von DGMs in gleicher Rasterweite, als auch eines groben DGMs mit dem höher auflösenden InSAR DGM werden hierzu im Orts- und Frequenzraum untersucht. Liegen beide DGMs im gleichen Rasterabstand vor, eignet sich eine lokale Polynomapproximation der Oberfläche zur Kombination der Beobachtungen. Interpolation und Filterung mit der Methode der kleinsten Quadrate eignet sich besonders für den Fall, dass ein existierendes weitmaschiges DGM mit den InSAR Daten fusioniert werden soll. Hierbei wird mit dem groben DGM der Höhentrend entfernt, die Beobachtungen mit der Methode der kleinsten Quadrate anschliessend gefiltert und schliesslich die lokale Oberfläche interpoliert. Die Synergie der Daten hinsichtlich ihrer Fehlereigenschaften lässt sich auch im Frequenzraum nutzen. Während bei

InSAR DGMs eher die niederen Frequenzen durch Fehler belastet werden, weisen stereo-optische DGMs das umgekehrte Verhalten auf. Die DGMs lassen sich somit durch einen Austausch der jeweils fehlerbelasteten Frequenzbänder fusionieren, indem man ihre Fehlereigenschaften ausnutzt. Die Methode eignet sich auch zur Fusion von bestehenden DGMs grösserer Rasterweite mit neuen InSAR Daten.

Alle Verfahren wurden zur Fusion von ERS und SPOT Daten in drei Testgebieten in der Schweiz und Spanien angewendet und evaluiert. Die Gebiete wiesen eine voralpine bis alpine Topographie auf, wodurch Probleme speziell für die InSAR Höhenmessung entstanden. Durch Datenfusion mit den SPOT Daten wurde in allen Fällen eine vollständige Phasenabwicklung ermöglicht und so jeweils ein vollständiges InSAR DGM generiert, das mit dem SPOT DGM fusioniert werden konnte. Beim Vergleich mit den nationalen Referenzdaten lag die fusionierte DGM Genauigkeit mit 5 - 6m in allen Fällen deutlich über den Ausgangswerten, wobei in diesem Wert der Einfluss der Vegetation noch nicht berücksichtigt ist. Die Ergebnisse, jeweils erreicht durch die Fusion eines InSAR DGMs mit einem stereo-optischen DGM, belegen die Synergie der Daten und das Potential, das in deren Fusion liegt.

## ABSTRACT

Both spaceborne photogrammetry and SAR interferometry (InSAR) offer the opportunity for digital terrain model (DTM) generation. The photogrammetric method, during the last two decades preferably carried out with the French SPOT satellite series, generally achieves a DTM accuracy of around 10m. As SPOT acquires the images in two different passes (repeat pass), matching problems due to changes between the passes result in unacceptable large measurement gaps in the DTM. Cloud coverage compromises photogrammetric DTM generation in many parts of the world. On the other hand, InSAR height measurement is feasible independently from sunlight and cloud coverage. Data from the European remote sensing satellites ERS-1 and ERS-2 present an alternative to photogrammetric DTM generation in respect to data availability, measurement density and accuracy and processing automatization (and hence price). As InSAR is based on the range distance measurement, it faces some shortcomings from the image acquisition geometry, the required precision of the sensor location tracking and the repeat pass constellation of the ERS satellites. For those reasons, current spaceborne InSAR DTMs hardly match the accuracy of photogrammetric systems.

The presented work deals with the fusion of optical and SAR data for DTM generation. It will be examined, how and to what extent existing SPOT DTMs can be fused with InSAR measurements. Two options and accordingly two geometries present themselves for that problem: either the fusion during the InSAR processing, or the fusion on the DTM product level. In order to fuse the data, they are first converted to a common geometry and afterwards associated or rejected according to their similarity. The associated measurements are elements of the local observation vector, with which the concerning entity, phase or height, is estimated in a final step. Depending on the application, the least squares method is used for that purpose in order to predict, interpolate or filter the data.

The influence of atmospheric artifacts on the interferometric measurements can be estimated and removed with the existing DTM. One distinguishes between local and systematic atmospheric effects. Local disturbances of the phase are detectable by their variance and are rejected from the further processing. Atmospheric changes may also cause a systematic influence by adding large fringes superimposing the topographic fringes. This low frequency superposition is detected and removed with a low polynomial approximation derived with the

existing DTM. The required DTM accuracy depends on the interferometric baseline and is easily achievable for short baseline measurements. The same is valid for employing the DTM in order to constrain the solution of the phase  $2\pi$  ambiguity, the so-called phase unwrapping. With the unwrapping constraint, the performance limitation of existing phase unwrapping algorithms in presence of noise is avoided and a continuous solution for the whole interferogram is determined. Besides using the DTM as unwrapping constraint, the phase slope can be estimated in noise corrupted areas. The phase in those areas is estimated with a Wiener estimator, which is steered by the phase coherence, thus adapting to the interferometric noise conditions. Also DTMs of lower resolution are applicable, if a multigrid processing is performed.

The presented method also applies to data fusion on the DTM level. The fusion options both of DTMs of the same resolution and coarse with a high resolution DTMs are examined in the spatial and the frequency domain. If both DTMs are of similar resolution, a polynomial surface approximation is convenient for the combination of the observations. Least squares interpolation and filtering is suitable for the fusion of an existing coarse DTM with the InSAR measurements. For that purpose, the height trend is removed with the existing DTM from the InSAR measurements, which are afterwards filtered and used for the surface interpolation. The data synergy in respect to their error properties is also exploited in the frequency domain. While the lower frequencies of InSAR DTMs are generally more error corrupted, the stereo-optical DTMs behave inversely in the frequency domain. Hence, the DTMs are fused by an exchange of the corrupted frequency bands, by taking advantage of their error properties. Also low resolution and high resolution data sets can be fused in this way.

The methods have been tested for the fusion of SPOT and ERS data sets of three sites in Spain and Switzerland. The sites showed prealpine and alpine topography, causing problems especially for InSAR height measurement. Data fusion with the SPOT DTM enabled a complete unwrapping solution in all cases, allowing to fuse the InSAR height measurements with the SPOT counterparts. The achieved DTM accuracy of 5 - 6m after the fusion was in all cases significantly below the original values of the stand-alone data sets. The influence of the vegetation is not considered in these values. The results prove the synergy between the data and fusion potential of InSAR and stereo-optical DTMs.