

Atmosphärische Korrekturen für TerraSAR-X basierend auf GNSS Beobachtungen

CHRISTOPH GISINGER¹, ULRICH BALSS², MICHAEL EINEDER³ & URS HUGENTOBLER⁴

Durch die Nutzung des Globalen Navigationssatelliten-Systems (GNSS) zur Bestimmung lokaler atmosphärischer Korrekturen für absolute Radarmessungen konnte die Messgenauigkeit von TerraSAR-X unter Berücksichtigung aller weiteren signifikanten Fehlerbeiträge auf 1,5 cm in Range und 1,7 cm in Azimut gesteigert werden. Die Verifizierung der Korrekturkonzepte erfolgte mit Hilfe des Radarreflektors (CR) am Geodätischen Observatorium Wettzell, für welchen eine umfangreiche Messreihe ausgewertet wurde. Über die noch durchzuführende Validierung der erzielten Messergebnisse mittels weiterer CR Standorte in der Antarktis und Finnland sollen absolute Radarmessungen zur Erfassung geophysikalischer Signale etabliert und mit geodätischen Verfahren wie z.B. GNSS kombiniert werden.

1 Absolute Radarmessungen

Mit dem Erscheinen der neuesten Generation von Radarsatelliten, insbesondere RADARSAT-2, COSMO-SkyMed und TerraSAR-X (TSX-1) bzw. TanDEM-X (TDX-1), haben sich die Möglichkeiten der hochauflösenden Radarfernerkundung aus dem Weltraum beträchtlich erweitert. Neben der Bildinformation und der Trägerphase enthalten Radaraufnahmen auch absolute Geometrieinformation in Form der Laufzeitmessung des Signals, sowie der Zeit, zu der die Messung erfolgte. Erste Untersuchungen für die Satelliten TSX-1 und TDX-1 haben gezeigt, dass diese Messungen unter Berücksichtigung der Troposphäre, der festen Erdzeiten und der Plattentektonik Genauigkeiten im Bereich < 1 dm erzielen können [EINER ET AL., 2011, SCHUBERT ET AL., 2012], was bereits deutlich unter der nominell spezifizierten Lokalisierungsgenauigkeit von 1 m liegt [FRITZ & EINER, 2013]. Aufbauend auf diesen Untersuchungen wurde ein Konzept erarbeitet, um die Atmosphäre mit Hilfe von zeitgleichen GNSS Messungen und aktuellen Modellierungsansätzen zu korrigieren. Die Validierung erfolgt mittels der seit Sommer 2011 verfügbaren Messreihe des CR am Geodätischen Observatorium Wettzell, vergleiche Abb. 1. Mit diesen erweiterten Korrekturansätzen soll die Genauigkeit der absoluten Radarmessungen weiter gesteigert werden, um diese neben der Trägerphase als weitere Erfassungsmethode für geophysikalische Signale zu etablieren. Insbesondere der Bedarf an großen Bilderstapeln bei der phasenbasierten Signalerfassung könnte hiermit reduziert werden. Ebenso können durch die absolute Natur der Messungen großflächige Vorgänge wie Plattentektonik und postglaziale Hebungen detektiert werden, die mit der Trägerphase auf Grund der relativen Auswertungen innerhalb der Szene nicht erfasst werden können.

1) Christoph Gisinger, Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie, Technische Universität München, Arcisstraße 21, 80333 München; E-Mail: christoph.gisinger@bv.tum.de

2) Ulrich Balss, Institut für Methodik der Fernerkundung, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, 82234 Weßling; E-Mail: ulrich.balss@dlr.de

3) Michael Eineder, Institut für Methodik der Fernerkundung, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, 82234 Weßling; E-Mail: michael.eineder@dlr.de

4) Urs Hugentobler, Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie, Technische Universität München, Arcisstraße 21, 80333 München; E-Mail: urs.hugentobler@bv.tum.de

2 Das Wetzell SAR Experiment

Seit seiner Installation am Geodätischen Observatorium Wetzell im Südosten von Deutschland wird der dortige CR kontinuierlich von TSX-1 unter 34° Einfallswinkel aufgenommen. Mit Fortdauer des Experiments wurden auch Messungen von TDX-1, sowie ein zusätzlicher Orbit für Messungen unter 46° Einfallswinkel, in die Beobachtungsreihe integriert, um mögliche Unterschiede zwischen verschiedenen Einfallswinkeln und zwischen den grundsätzlich baugleichen Satelliten zu untersuchen. Die Beobachtungsreihe umfasst aktuell 57 Aufnahmen (42 Aufnahmen von TSX-1 und 15 Aufnahmen von TDX-1), wovon fünf Aufnahmen wegen Schnees im Reflektor nicht nutzbar sind [BALSS ET AL., 2013A].



Abb. 1: Radarreflektor mit 1.5 m Kantenlänge am Geodätischen Observatorium Wetzell.

Grundprinzip der Untersuchung ist der Vergleich zwischen den Referenzkoordinaten des Reflektors, die aus einer terrestrischen geodätischen Einmessung am Boden im Millimeterbereich bekannt sind, und den Beobachtungen von TSX-1 und TDX-1. Durch Korrektur der satellitenspezifischen Störgrößen (Einflüsse von Kabeln und Schaltkreisen, Auswirkung der Satellitendynamik auf die Zeitmessung), der Signalverzögerung durch die Atmosphäre und der Bewegungen des CRs aufgrund geodynamischer Effekte (Gezeiten der festen Erde, Plattentektonik, ...) wird eine Minimierung in der Abweichung zwischen Messung und Referenz angestrebt. Dies gibt einerseits Aufschluss über die Qualität der Korrekturen, andererseits lassen sich damit die absoluten Messgenauigkeiten von TSX-1 und TDX-1 bestimmen. Der Schwerpunkt dieses Beitrags liegt auf den atmosphärischen Korrekturen. Für die Details zu satellitenspezifischen Korrekturen und geodynamischen Effekten sei auf BALSS ET AL. [2013A] und BALSS ET AL. [2013B] verwiesen.

2.1 Beobachtung von Radarreflektoren

Das grundlegende Messprinzip von bildgebendem Radar basiert auf dem Aussenden von Radarpulsen und dem Empfangen der Echos, wobei für sämtliche Pulse beide Vorgänge, das Aussenden und das Empfangen, zeitlich hochpräzise registriert werden. Für die Echos eines bestimmten Objekts am Boden ermöglicht dies die Rekonstruktion der geometrischen Distanzen aus der Laufzeit und mit Hilfe des Dopplereffekts kann der Zeitpunkt der kürzesten Entfernung bestimmt werden. Somit ergeben sich für das Objekt zwei Koordinaten, die aus dem fokussierten Radarbild extrahiert werden können: der Ort der kürzesten Entfernung, Azimut genannt, und die zugehörige Distanzmessung oder auch Range.

Aus dem Messprinzip der laufzeitabhängigen Registrierung ist direkt ersichtlich, dass sämtliche Echos mit gleicher Laufzeit im Radarbild im selben Rangepixel abgebildet werden. Wird nun ein CR, bei dem aufgrund seiner Bauform alle einfallenden Radarpulse den gleichen Reflexionsweg zurücklegen, in der SAR Szene platziert und entsprechend der Aufnahmegeometrie ausgerichtet, so erscheint er im fokussierten Radarbild als markante Signatur. Über Methoden der digitalen

Bildverarbeitung kann der Schwerpunkt dieser Signatur exakt bestimmt werden, woraus sich die Range- und Azimutkoordinaten des CRs ableiten lassen. Seine Referenzwerte für Range und Azimut werden mit Hilfe der Doppler-Null-Gleichungen [CUMMING & WONG, 2005] und des Orbits aus den bekannten Referenzkoordinaten generiert, was den Vergleich mit der Messung ermöglicht.

2.2 Atmosphärische Korrekturen mit GNSS

Signale im Gigahertz-Bereich, wie sie bildgebendes Radar und GNSS verwenden, können in Bezug auf atmosphärische Einflüsse als gleichwertig betrachtet werden [HOFFMANN-WELLENHOF ET AL., 2008]. Deshalb besteht die Möglichkeit, zur Korrektur der Signalverzögerungen in den radarbasierten Distanzmessungen zeitgleiche Beobachtungen der kontinuierlich aufzeichnenden GNSS-Permanentstationen zu verwenden. Die Grundlage für unsere Untersuchungen bilden die vier in Wettzell verfügbaren GNSS Empfänger WTZA, WTZR, WTZS und WTZZ, welche zugleich Teil des globalen Netzes des Internationalen GNSS Service (IGS) sind. Gemäß den bei GNSS angewandten Ansätzen zur Modellierung der Atmosphäre wird eine Unterteilung in Troposphäre und Ionosphäre vorgenommen [HOFFMANN-WELLENHOF ET AL., 2008].

2.2.1 Troposphäre

Bei GNSS wird die Troposphäre über die Signalverzögerung in Zenitrichtung, Zenith Path Delay (ZPD) genannt, und eine entsprechende Mapping Funktion modelliert, mit welcher der ZPD auf die Schrägdistanz umgerechnet werden kann. Unter Verwendung eines a-priori Modells für den hydrostatischen Anteil der Troposphäre, sowie der finalen IGS Produkte für Orbits und Uhren, wird der ZPD aus GNSS-Beobachtungen geschätzt, wobei ein zusätzlich mitbestimmter Gradient die Anisotropie im Messbereich des Empfängers erfasst.

Beide Komponenten, der ZPD und der Gradient, werden für die Empfänger des IGS Netzwerks routinemäßig vom U.S. Naval Observatory (USNO) mit einer zeitlichen Auflösung von 5 Minuten bestimmt und sind bei IGS verfügbar [BYRAM ET AL., 2011]. Deshalb wird bei der Auswertung in Wettzell auf diese Produkte zurückgegriffen und der ZPD und der Gradient zum Zeitpunkt der TerraSAR-X Messung extrahiert. Die Höhentransfers der ZPDs, die sich auf die Antennenhöhe der GNSS-Empfänger beziehen, auf CR-Höhe erfolgt gemäß der von KOUBA ET AL.

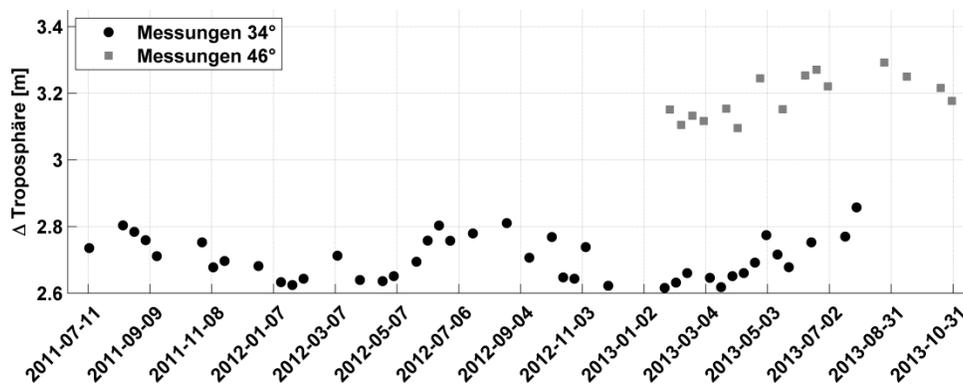


Abb. 2: GNSS-basierte troposphärische Korrekturen für die Radarmessungen des CRs in Wettzell. Wegen des längeren Weges durch die Troposphäre fallen die Korrekturen für die Messungen mit 46° Einfallswinkel größer aus.

[2011] beschriebenen Methode. Als Mapping Funktion wird die Vienna Mapping Funktion 1 (VMF1) [BÖHM ET AL., 2006] verwendet. Im letzten Schritt werden die Korrekturlösungen der einzelnen GNSS-Empfänger gemittelt, was den finalen Korrekturwert für die Troposphäre ergibt, siehe Abb. 2. Die zugehörige Standardabweichung liegt für die Zeitpunkte unserer Messreihe unter 5 mm.

2.2.2 Ionosphäre

Die Modellierung der Ionosphäre basiert auf dem vertikalen totalen Elektronengehalt (vTEC) und einer Mapping-Funktion, die aus der Geometrie eines sphärischen 1-Schicht-Modells bestimmt werden kann [SCHAER, 1999]. Im Gegensatz zur Troposphäre, für welche die Signalverzögerung zu sämtlichen GNSS-Satelliten einer Epoche für eine ZPD-Lösung am Ort des Empfängers ausgewertet wird, bleibt bei der Modellierung der Ionosphäre der vTEC für jede Streckenmessung zu den einzelnen Satelliten erhalten. Als räumliche Bezugspunkte gelten dabei die Schnittpunkte (IPPs) zwischen den Sichtverbindungen des Empfängers zu den einzelnen GNSS-Satelliten und der Schale des sphärischen 1-Schicht-Modells.

Aufbauend auf der dargelegten Modellierung bestimmen wir die Korrektur der Ionosphäre aus der geometriefreien Linearkombination von Zweifrequenz-GNSS-Messungen. Dabei wird der vTEC für sämtliche zum Zeitpunkt der Radarmessung verfügbaren GNSS-Satelliten an den zugehörigen IPPs berechnet, wobei für die Höhe des 1-Schicht-Modells 450 km angenommen werden. Anschließend erfolgt für diese diskrete, zweidimensionale vTEC-Verteilung die Schätzung eines linearen Modells, welches für den IPP der Radarmessung evaluiert wird. Über die zugehörige Mapping-Funktion und unter Berücksichtigung der von TerraSAR-X genutzten 9,65 GHz Trägerfrequenz wird der so ermittelte vTEC in die von der Ionosphäre verursachte Signalverzögerung umgerechnet. Abschließend werden diese Korrekturwerte um 25% reduziert, da der von TSX-1 und TDX-1 verwendete Orbit innerhalb der Ionosphäre liegt. Der für Wettzell angenommene Wert von 25% wurde über das Modell IRI 2007 (Internationale Referenz Ionosphäre) [BILITZA & REINISCH, 2008] bestimmt und durch Korrelationsexperimente bestätigt.

Wie bei der Troposphäre erfolgt die Auswertung zunächst getrennt für alle in Wettzell verfügbaren GNSS-Empfänger und für die endgültigen Korrekturen, siehe Abb. 3, werden die Einzelergebnisse gemittelt. Die erzielte Übereinstimmung zwischen den Lösungen der Empfänger bewegt sich im Bereich weniger Millimeter.

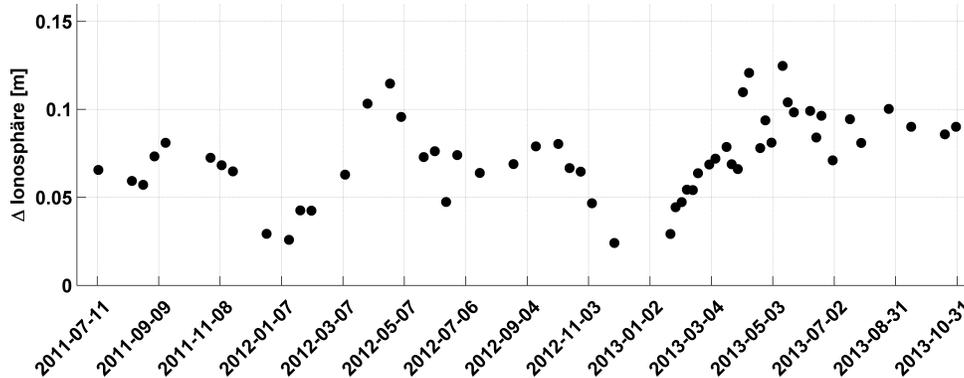


Abb. 3: Aus GNSS bestimmte ionosphärische Korrekturen für die Radarmessungen des CRs in Wettzell.

3 Ergebnisse

Unter Verwendung der mit GNSS bestimmten atmosphärischen Korrekturen und unter Berücksichtigung der geodynamischen Effekte, sowie der vollständigen Modellierung der Sensoren TSX-1 und TDX-1, kann für den CR in Wettzell eine Genauigkeit (1σ) von 1,5 cm in Range und 1,7 cm in Azimut erzielt werden. Abbildung 4 links zeigt diese Genauigkeit in Bezug auf die nominell spezifizierte Geolokalisierungsgenauigkeit von 1 m, die für den CR in Wettzell um annähernd den Faktor 100 verbessert werden konnte. Absolut betrachtet zeigt sich ein Rangeoffset von -30,4 cm, der durch die nominelle geometrische Kalibrierung entsteht. Die hauptsächliche Ursache ist, dass in der Kalibrierung eine vereinfachte atmosphärische Modellierung verwendet wurde, die für die vorgegebene Spezifikation von 1 m ausgelegt ist. Dieser Kalibrieransatz ist zur verbesserten Modellierung der Atmosphäre inkonsistent, da mit ihm ein Teil der atmosphärischen Verzögerung in die geometrische Kalibrationskonstante einfließt, weshalb eine neue geometrische Kalibrierung benötigt wird.

Die Detailansicht in Abb. 4 rechts zeigt für die verschiedenen Einfallswinkel ein konsistentes Ergebnis, es lassen sich keine signifikanten Abweichungen zwischen den 34° und den 46° Messungen erkennen. Zwischen den beiden Systemen TSX-1 und TDX-1 besteht noch ein geringer systematischer Offset von etwa 2 cm. Hierbei ist zu bedenken, dass die Genauigkeit der nominellen geometrischen Kalibrierung nur im Dezimeterbereich liegt und folglich zu einer Diskrepanz zwischen beiden Satelliten von wenigen Zentimetern führen kann.

Im nächsten Schritt wird nun die Reproduzierbarkeit der für den CR in Wettzell erzielten Ergebnisse angestrebt. Zu diesem Zweck wurden bei der deutschen Antarktis-Forschungsstation GARS O'Higgins im Frühjahr 2013 zwei CRs installiert, sowie im Herbst 2013 ein weiterer CR am Geodätischen Observatorium Metsähovi in Finnland. Zudem wurden in Wettzell bereits die Grundlagen für die Installation eines zweiten CRs gelegt.

Auf lange Sicht sollen die durch unsere Untersuchungen geschaffenen Korrekturmethode dazu dienen, absolute Radarmessungen als geodätische Beobachtungen zu etablieren und mit anderen geodätischen Messverfahren wie z.B. GNSS oder Gravimetrie zu kombinieren.

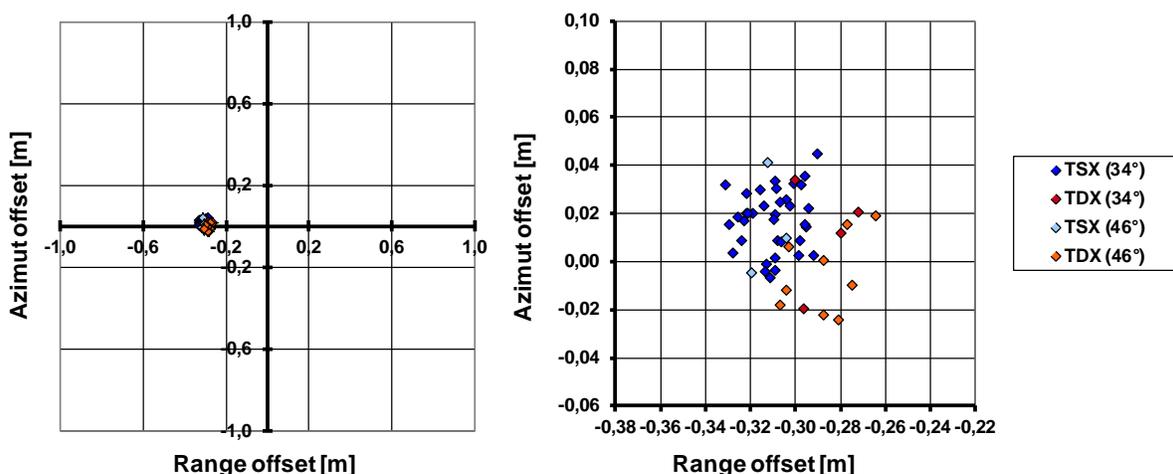


Abb. 4: Vergleich zwischen den gemessenen Range- und Azimut-Werten und den Referenzwerten für den CR am Geodätischen Observatorium Wettzell. Übersicht (links) und Detailansicht (rechts).

Danksagung

Diese Arbeit wurde in Teilen von der Deutschen Helmholtz Gemeinschaft über die Allianz DLR@Uni mit dem Munich Aerospace Projekt „Hochauflösende Geodätische Erdbeobachtung“ finanziert. Unser Dank geht an das Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) für die Erlaubnis zur Installation des Radarreflektors am Geodätischen Observatorium Wettzell und für die Unterstützung bei der Wartung.

4 Literaturverzeichnis

- EINER, M., MINET, C., STEIGENBERGER, P., CONG, X. & FRITZ, T., 2011: Imaging geodesy – Toward centimeter-level ranging accuracy with TerraSAR-X. *IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sens.*, **49** (2), S. 661-671.
- SCHUBERT, A., JEHL, M., SMALL, D. & MEIER, E., 2012: Mitigation of Atmosphere Perturbations and Solid Earth Movements in a TerraSAR-X Time-Series. *J. of Geodesy*, **86** (4), S. 257-270.
- FRITZ, T. & EINER, M., 2013: TerraSAR-X Ground Segment Basic Product Specification Document. TX-GS-DD-3302, v1.9.
- BALSS, U., GISINGER, C., CONG, X., BRCIC, R., STEIGENBERGER, P., EINER, M., PAIL, R. & HUGENTOBLE, U., 2013A: High resolution geodetic Earth observation with TerraSAR-X: Correction schemes and validation. *Proc. of IGARSS'13 Conf.*, 21.-26. Juli, Melbourne, Australien.
- BALSS, U., GISINGER, C., CONG, X., EINER, M. & BRCIC, R., 2013B: Precise 2-D and 3-D Ground Target Localization with TerraSAR-X. *Int. Archives of the Photogrammetry, Remote Sens. and Spatial Inform. Sci. (ISPRS) Hannover Workshop 2013*.
- CUMMING, I. G. & WONG, F. H., 2005: *Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation*. Artech House, S. 114-129.
- HOFFMANN-WELLENHOF, B., LICHTENEGGER, H. & WASLE, E., 2008: *GNSS Global Navigation Satellite Systems*. Springer Wien New York, S. 116-140.
- BYRAM, S., HACKMAN, C., & TRACEY, J., 2011: Computation of a High-Precision GPS-Based Troposphere Product by the USNO. *Proc. of the 24th Int. Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2011)*, S. 572-578.
- KOUBA, J., 2007: Implementation and testing of the gridded Vienna Mapping Function 1 (VMF1). *J. of Geodesy*, **82** (4-5), S. 193-205.
- BÖHM, J., WERL, B., & SCHUH, H., 2006: Troposphere mapping functions for GPS and VLBI from ECMWF operational analysis data. *J. of Geophys. Res.*, **11** (B02406).
- SCHAER, S., 1999: *Mapping and Predicting the Earth's Ionosphere Using the Global Positioning System*. Serie: Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz, **59**.
- BILITZA, A. & REINISCH, B., 2008: International Reference Ionosphere 2007: Improvements and new parameters. *Advances in Space Res.*, **42**, S. 599-609.