

Zusammenstellung und Interpretation relevanter SAR-immanenter Spezialfälle der Radarrückstreuung am Beispiel einer hoch aufgelösten polarimetrischen L-Band Szene

CHRISTIAN THIEL, Jena

Keywords: scattering effects, Bragg-scattering, Dipole-scattering, phase noise, SAR-polarimetry, high-resolution-SAR, L-band

Zusammenfassung: SAR-Daten unterscheiden sich durch eine Vielzahl charakteristischer Eigenschaften von optischen Aufnahmen. Hintergründe hierfür sind die Verwendung quasi monochromatischer Mikrowellen, die Schrägsichtgeometrie sowie die kohärente Arbeitsweise eines SAR. Intensität und Mechanismus der Rückstreuung sind an die geometrischen und dielektrischen Eigenschaften der Streumediten gekoppelt. Die Kombination der Funktionsweise eines SAR mit der Sensitivität für die Geometrie der Streuobjekte resultiert in einer Fülle spezieller Rückstreuungseffekte. Insbesondere bei hoch aufgelösten SAR-Daten müssen derartige Effekte bei der Interpretation der Daten berücksichtigt werden. In dieser Abhandlung werden die wichtigsten Spezialfälle vorgestellt und mit Beispielen belegt.

Summary: *Compilation and interpretation of relevant SAR-immanent special cases of radar backscattering considering as an example a high resolution polarimetric L-Band scene.* SAR-data differ in a number of specific characteristics from optical recordings. The reasons for that are the applications of quasi-monochromatic microwaves, the slant range geometry as well as the coherent operating mode of SAR-Systems. Intensity and mechanism of the backscattered electromagnetic wave are driven by the geometric and dielectric properties of the scattering objects. Combining the functionality of a SAR with its sensitivity for the geometry of the scattering objects leads to an amount of special backscattering effects. For the interpretation of high resolution SAR-data in particular these effects need to be taken into account. In this paper the most essential special cases will be presented and examples are given.

1 Einleitung

Hoch aufgelöste polarimetrische SAR-Daten bieten ein breites Spektrum an Einsatzmöglichkeiten. Zu nennen sind vor allem die Ableitung biophysikalischer Parameter sowie die Klassifikation der Landbedeckung. Die korrekte Interpretation der Daten setzt allerdings die Kenntnis der prinzipiellen Funktionsweise eines SAR voraus. Im Zusammenhang mit dieser Funktionsweise stehen Spezialfälle der Radarrückstreuung, die bei optischen Fernerkundungsdaten nicht zu finden sind. SAR-Systeme arbeiten mit

quasi-monochromatischer Mikrowellenstrahlung in Schrägsichtgeometrie. Die Aussendung der einzelnen Pulse erfolgt kohärent. Zudem reagiert die verwendete elektromagnetische Strahlung auf geometrische sowie dielektrische Eigenschaften der Oberflächen.

Der Großteil der hier behandelten speziellen Rückstreuungseffekte wird in der Fachliteratur theoretisch beschrieben. Diese Arbeit soll dagegen einen praxisbezogenen Beitrag für die Interpretation hoch aufgelöster SAR-Daten leisten. Im Wesentlichen werden die folgenden Spezialeffekte behandelt:

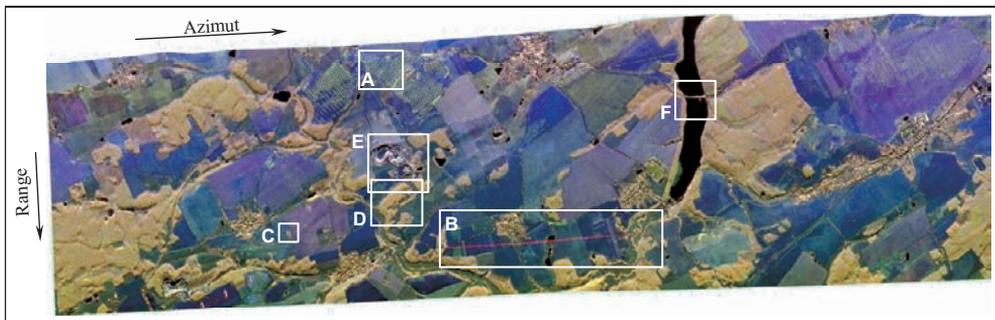


Abb. 1: E-SAR Szene – Intensitäten (RGB – L-HH, L-VV, X-VV).

Bragg-Streuung am Reifenabdruck eines landwirtschaftlichen Nutzfahrzeuges, Dipol-Streuung an einer Hochspannungsleitung, *Foreshortening* an einem Hochspannungsmast, multiple Rückstreupfade am Beispiel einer Waldkante und eines Steinbruchs sowie Phasenrauschen bei glatten Oberflächen am Beispiel eines Gewässers.

Für die Analyse dieser speziellen Rückstreuungseffekte erfolgt z.T. die Einbeziehung der anhand der Eigenvektordekomposition (CLOUDE & POTTIER 1996) berechneten Polarisationsparameter Alpha-Winkel (α), Entropie (H) und Anisotropie (A).

2 SAR-Daten

Die vom E-SAR aufgezeichnete polarimetrische L-Band Szene (Dimensionen ca. $3 \text{ km} \times 10 \text{ km}$, Abb. 1) befindet sich im nördlichen Sektor des Einzugsgebietes der Trinkwassertalsperre Zeulenroda, Thüringen (Abb. 2). Die Hauptausdehnung des Streifens verläuft in Ost-West-Richtung. Das Einzugsgebiet der Talsperre Zeulenroda befindet sich im östlichen Randbereich des Thüringer Schiefergebirges in Südostthüringen an der Grenze zu Sachsen. Es erstreckt sich mit einer Fläche von $138,9 \text{ km}^2$ (TTV 1999) über die Landkreise Schleiz und Zeulenroda in Thüringen sowie Plauen in Sachsen. Die Befliegung wurde am 30.03.1999 gegen 13:00 Uhr durchgeführt. Für eine weiterführende Gebiets- und Datenbeschreibung siehe THIEL (2004).

Im Amplitudenbild (Abb. 1) sind Areale hoher Rückstreuung wie Wälder und Sied-

lungen durch helle Farbschattierungen gekennzeichnet. Diese Landbedeckungsformen erscheinen in der Komposite in gelben Farbtönen. Die helle Farbe resultiert aus der hohen Rückstreuintensität dieser Landnutzungsformen im L-Band. Eine sehr geringe Rückstreuung ist bei Wasserflächen oder anderen glatten Oberflächen wie befestigten Straßen oder Plätzen zu verzeichnen. In Abb. 1 sind diese Bereiche sehr dunkel bis schwarz. Alle restlichen Flächen besitzen eine mittlere Rückstreuintensität. Hierzu zählen vor allem Bereiche mit niedriger Vegetation, landwirtschaftliche Nutzflächen oder Grünland.

3 Spezialfälle der Radarrückstreuung

In der Komposite aus Abb. 1 sind 6 Bereiche (A-F) durch weiße Rahmen hervorgehoben. Diese Areale wurden zum Zweck der Erklärung der Rückstreuphänomene gewählt. In den Abb. 3 und 5-9 sind diese Bereiche vergrößert dargestellt. Diese Vergrößerungen (RGB-Kompositen [L-HH, L-HV, L-VV]) basieren auf den anhand der SLC-Daten berechneten ungefilterten Amplitudenbildern.

3.1 Bragg-Streuung

Bildausschnitt A wurde gewählt, um die Ursache der hellen Streifen auf einigen Felder am Nordrand der E-SAR Szene zu klären. Diese sind jeweils etwa 45° zur Flugrichtung des Sensors ausgerichtet (Abb. 3).

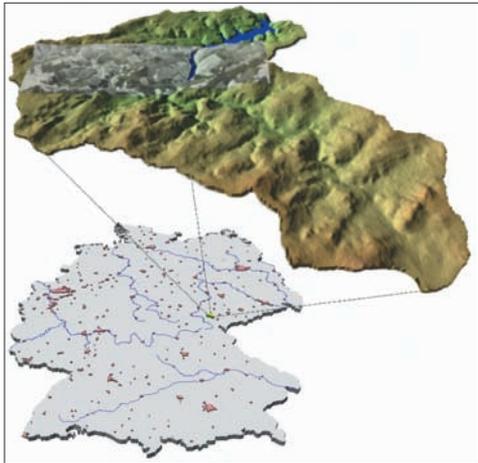


Abb. 2: Lage des Untersuchungsgebietes.

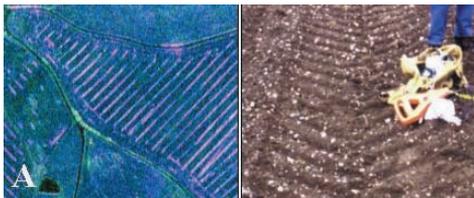


Abb. 3: Bragg-Streuung durch Traktorspuren.

Deren Gestalt und Anordnung auf dem Feld legt den Verdacht nahe, dass sie aus der Feldbearbeitung durch schwere landwirtschaftliche Maschinen resultieren. Tiefe Traktorspuren könnten wie zweiflächige Cornerreflektoren wirken und hohe Rückstreuwerte verursachen. Dagegen spricht jedoch die Ausrichtung der Spuren von 45° zum Sensor. Außerdem ergab die polarimetrische Auswertung der Daten den Rückstreutyp Oberflächenstreuung ($\alpha < 10^\circ$), nicht *Double Bounce*. Die Erklärung dafür liegt im Reifenprofil der Maschine. Die etwa 10 cm breiten Profillamellen sind V-förmig im Winkel von 45° bzw. -45° zur Fahrtrichtung angeordnet. Somit ist ein Teil der Vertiefungen des Reifenabdrucks parallel zur Flugrichtung des Sensors ausgerichtet. Der Abstand der Vertiefungen im Zusammenspiel mit deren Ausrichtung zum Sensor, einer Wellenlänge λ von 23 cm und dem passenden lokalen Einfallswinkel θ führt zu

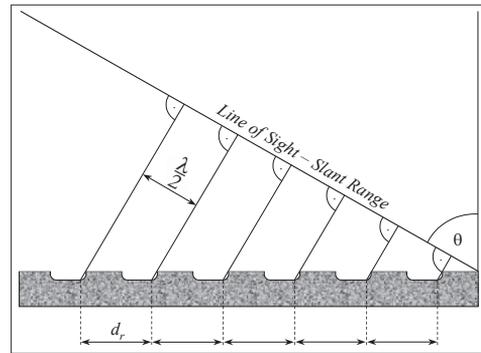


Abb. 4: Bragg-Rückstreukonditionen, verändert nach RANEY (1998), S. 43.

positiven Interferenz zwischen den Einzelstreuern innerhalb einer Auflösungszelle (Abb. 4). Die Bragg Rückstreukonditionen (Gl. 1) sind erfüllt (LEWIS 1998).

$$d_r = \frac{n\lambda}{2\sin\theta} \quad (1)$$

Die vektorielle Addition der kohärenten Strahlung der Einzelstreuern (Vertiefungen des Reifenabdrucks in der jeweiligen Fahrspur) ist konstruktiv. Im Bereich der Traktorspuren ist folglich kaum Speckle ausgebildet.

3.2 Dipol-Streuung

Am südlichen Bildrand (Bildausschnitt B) verläuft etwa in der Mitte der Szene ein auffälliger Streifen mit einer hohen Rückstreuintensität (Abb. 5). Dieser steht mit einer das Untersuchungsgebiet durchziehenden Hochspannungsüberlandleitung in Verbindung. Drei Überlandkabel werden hier von Holzmasten getragen.

Die Leitungen verlaufen für ca. 2,4 km parallel zur Flugrichtung des Sensors. Nur

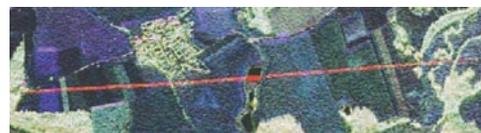


Abb. 5: Dipolstreuung an Hochspannungsleitung.

innerhalb dieser Strecke sind sie im SAR-Bild sichtbar. Die Analyse der Polarisationsparameter ergab für (α) einen Wert von 45° , die Entropie geht gegen Null ($H = 0,03$). Folglich besitzt die Anisotropie keine interpretierbare Information. Der Wert für (α) bedeutet Dipolstreuung. Da es sich hierbei um den einzigen Rückstreuprozess handelt, kann (α) direkt interpretiert werden. Der Dipol in Form der Leitung ist exakt zur Schwingungsebene des elektrischen Feldvektors der EM Welle ausgerichtet. Dies bestätigt sich zusätzlich dadurch, dass die Hochspannungsleitung nur in der HH-Polarisation zu sehen ist.

3.3 Foreshortening

Bei dem Bildausschnitt C handelt es sich um die Masten zweier weiterer Hochspannungsüberlandleitungen (Abb. 6). Diese durchziehen das Untersuchungsgebiet in der linken Bildhälfte von Südwest nach Nordost.

Durch die Metallbauweise und die vertikal, horizontal, als auch diagonal orientierten Streben erzeugen die Masten in jeder Polarisation und Frequenz ein sehr hohes Rückstreusignal. Auffällig im SAR-Bild ist die Neigung nach Norden (zum Sensor). Dieser Effekt basiert auf der *Slant Range* Geometrie während der Aufzeichnung des SAR-Bildes. Aufgrund deren spezifischen Höhe ist die Distanz zwischen der Spitze der Masten und dem Sensor geringer als jene zwischen Sensor und Mastfuß. Bei dem Bildausschnitt C handelt es sich folglich um einen speziellen Fall von *Foreshortening* bzw. *Layover*. Ein Radarschatten wird dennoch nicht erzeugt. Ein Großteil der Radarstrahlung durchdringt die Masten aufgrund der Strebenbauweise.



Abb. 6: Foreshortening an Hochspannungsmasten.

3.4 Multiple Rückstreupfade

3.4.1 Beispiel Waldkante

Bildausschnitt D umschließt eine dem Sensor zugewandte Waldkante. Dieser Bereich ist in Abb. 7 vergrößert dargestellt. Für diese RGB-Komposite wurden die Polarisationsparameter (λ_1 erster Eigenwert der Kohärenzmatrix), (H) und (A) herangezogen.

Der Waldbereich tritt durch hellblaue Farbtöne hervor. In *Range*-Richtung hinter der Waldkante ist ein Band besonders hoher Rückstreuwerte durch rote Farbschattierungen (hohe λ_1 -Werte) zu erkennen. In diesem Bereich dominiert Doppelreflexion (*Double Bounce*). Der Pfad der Rückstreuung bezieht hier zwei Reflexionsebenen ein. Dies sind die vertikal ausgerichteten Baumstämme sowie die glatte Oberfläche im Bereich der Waldkante (Abb. 7, rechts). Im restlichen Waldareal ist der *Double Bounce* Anteil zugunsten der Volumenstreuung geringer.

Im Fall der Volumenstreuung ist der zurückgelegte Weg der Radarstrahlung aufgrund der höheren Position der Baumkronen sowie des kürzeren Reflexionspfades deutlich geringer als jener bei *Double Bounce* (Abb. 7, rechts). Aus diesem Grund sind im SAR-Bild Objekte, die *Double Bounce* hervorrufen, in *Range*-Richtung verschoben.

3.4.2 Beispiel Steinbruch

Bildausschnitt E (Abb. 8) zeigt einen Alaunschiefersteinbruch inklusive Halde. Der Steinbruch ist ca. 300 m breit und 20 m tief. Die ebene Sohle ist von steilen Wänden umgeben.

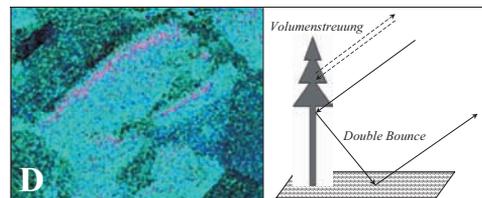


Abb. 7: Multiple Rückstreupfade am Beispiel einer Waldkante.



Abb. 8: Multiple Rückstreupfade am Beispiel eines Steinbruchs.

Die Nordwand wird nicht von der Radarstrahlung erreicht und erzeugt somit kein Rückstreusignal. Sie liegt im Radarschatten. Die Südwand hingegen wird direkt beleuchtet. Dies führt zu einem sehr hohen Rückstreusignal. Dieses setzt sich aus Oberflächenstreuung direkt von der Wand und aus Doppelreflexion mit den Rückstreupfaden Wand-Sohle und Sohle-Wand zusammen. Die Strecken der Rückstreupfade der Doppelreflexion übersteigen jene der direkten Oberflächenstreuung (vgl. 3.4.1). Im SAR-Bild ist dieser Rückstreuteil daher in *Range*-Richtung verschoben.

3.6 Phasenrauschen

Im Falle vollständigen Phasenrauschens liegt keine nutzbare Phaseninformation vor. Dies betrifft die Auswertung der polarimetrischen als auch der interferometrischen Phase. Vollständiges Phasenrauschen tritt in erster Linie für Wasserflächen (ohne Windinfluss) auf. Sie sind durch eine glatte Oberfläche und einer sehr hohen Dielektrizitätskonstante gekennzeichnet. In diesem Fall wird der Großteil der einfallenden Mikrowellenstrahlung vom Sensor weg reflektiert, der gemessene Phasenverlauf beinhaltet lediglich Systemrauschen.

Bei Bildbereich F (Abb. 9) handelt es sich um einen Abschnitt der Talsperre Zeulenroda. Der Ost-West verlaufende Damm unterteilt die Wasserfläche in Vorsperre und Hauptgewässer. In der RGB-Komposite der Intensitäten (links) ist die Wasserfläche aufgrund der geringen Rückstreuintensität durch sehr dunkle Farbschattierungen erkennbar. Abb. 9 (rechts) präsentiert den mittleren Rückstreumechanismus (α) für

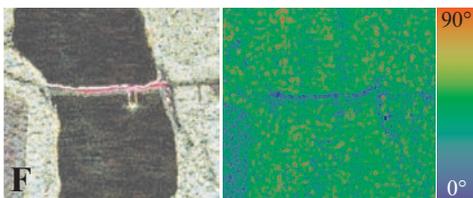


Abb. 9: Phasenrauschen am Beispiel einer Wasserfläche; links: Amplitudenbild, rechts: (α).

denselben Bildausschnitt. Obwohl hier mit Sicherheit Oberflächenstreuung stattfindet, wurden mittlere Werte für Alpha (Volumenstreuung) berechnet. Die Wasseroberfläche ist von den angrenzenden Waldgebieten daher kaum zu differenzieren. Lediglich der Damm tritt durch Oberflächenstreuung hervor. Demnach sind SAR-Parameter, die auf der Auswertung der polarimetrischen Phase beruhen, für Areale sehr geringer Rückstreuung nicht interpretierbar.

Zwar tritt Phasenrauschen vor allem bei Wasserflächen auf. Dennoch ist dieser Effekt (insbesondere in *Far Range*) auch bei anderen glatten Oberflächen wie Straßen, befestigten Plätzen oder glatten, unbestandenen Ackerflächen zu beobachten.

4 Fazit

Die hohe geometrische Auflösung moderner flugzeuggetragener SAR-Sensoren hat zur Folge, dass eine Reihe spezieller Rückstreueffekte an kleinräumigen Objekten sichtbar wird. Deren Interpretation auf alleiniger Basis der Amplitudenbilder ist in den meisten Fällen nicht uneingeschränkt möglich.

Die Ansätze der Polarimetrie erlauben eine direkte Darstellung der stattfindenden Streuprozesse. Die Interpretation SAR-immanenter Spezialfälle der Radarrückstreuung wird durch polarimetrische Verfahren deutlich erleichtert. Dennoch gilt es, mögliche Verfälschungen der polarimetrischen Information durch Phasenrauschen zu berücksichtigen.

Dieser Artikel ist als beispielorientierte Zusammenfassung der besprochenen Thematik zu sehen. Aktuelle Auswerteverfah-

ren polarimetrischer und interferometrischer Daten wie beispielsweise die SAR-Tomographie (REIGBER 2001) befassen sich eingehender mit der Untersuchung stattfindender Streuprozesse. Stellvertretend wird hier auf die Arbeiten von YUEH et al. (1988), BOERNER & PAPATHANASSIOU (1998), AINSWORTH et al. (1999), PAPATHANASSIOU et al. (1999), REIGBER et al. (2001) und FERRO-FAMIL et al. (2003) verwiesen.

Danksagung

Der vorliegende Beitrag entstand am Lehrstuhl für Geoinformatik des Institutes für Geographie an der Friedrich-Schiller-Universität Jena. Ein Teil der durchgeführten Untersuchungen erfolgte im Rahmen der Projektaufgaben des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Projektes PHYMO (Parametrisierung Hydrologischer Modelle mit multifrequenten, multipolarimetrischen und interferometrischen Flugzeug-SAR-Daten, DFG-GZ: HO 1840/5-1 & HO 1840/5-2).

Literatur

- AINSWORTH, T.L., JANSEN, R.W., LEE, J.S. & FIEDLER, R., 1999: Sub-aperture analysis of high resolution polarimetric SAR data. – Proc. IGARSS, pp. 41–43.
- BOERNER, T. & PAPATHANASSIOU, K.P., 1998: A Model-Based Analysis of Surface Scattering Effects in Polarimetric SAR Interferometry. – Proc. EUSAR'98, Friedrichshafen, pp. 61–64.
- CLOUDE, S.R. & POTTIER, E., 1996: A Review of Target Decomposition Theorems in Polarimetry. – IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing **34** (2): 498–518.
- FERRO-FAMIL, L., REIGBER, A., POTTIER, E. & BOERNER, W.-M., 2003: Scene Characterization Using Subaperture Polarimetric SAR Data. – IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing **41** (10): 2264–2276.
- LEWIS A.J., 1998: Geomorphic and Hydrologic Applications of Active Microwave Remote Sensing. – In: HENDERSON, F.M. & LEWIS, A.J. (eds.) (1998): Principles and applications of imaging radar. – 3rd ed., Wiley, New York.
- PAPATHANASSIOU, K.P., 1999: Polarimetric SAR Interferometry. – DLR, Forschungsbericht 7.
- RANEY, R.K., 1998: Radar Fundamentals: Technical Perspective. – In: HENDERSON, F.M. & LEWIS, A.J. (eds.) (1998): Principles and applications of imaging radar. – 3rd ed., Wiley, New York.
- REIGBER, A., 2001: Polarimetric SAR Tomography. – Ph.D. Thesis, Univ. Stuttgart, Germany.
- THIEL, C., 2004: Extrahierung hydrologisch relevanter Parameter aus hochaufgelösten polarimetrischen L-Band sowie interferometrischen X-Band SAR-Daten. – Dissertation, Friedrich-Schiller-Univ. Jena.
- YUEH, H.A., SHIN, R.T., & KONG, J.A. 1988: Scattering from randomly perturbed periodic and quasiperiodic surfaces. – Progress in Electromagnetic Research **1**: 297–358, Elsevier, Amsterdam.

Anschrift des Verfassers

Dr. rer. nat. CHRISTIAN THIEL
Friedrich-Schiller-Universität Jena
Institut für Geographie
Löbdergraben 32, 07743 Jena
Tel.: 03641-948856, Fax: 03641/948852
e-mail: c5thch@web.de

Manuskript eingereicht: April 2004
Angenommen: Juli 2004