

Tieffrequente abbildende Radarsysteme

Ein neues Instrument in der Fernerkundung

**Arnold Barmettler, Erich Meier, Daniel Nüesch,
Zürich**

1 Einleitung

Die Fernerkundung hat zum Ziel, die Erdoberfläche möglichst exakt zu erkunden, ohne dass aufwändige *in situ* Messungen notwendig sind. Heute werden zu diesem Zweck meist flugzeug- oder satellitengestützte Sensoren eingesetzt. Aus dem breiten Spektrum der elektromagnetischen Wellen werden bevorzugt optische Wellen und Mikrowellen verwendet. Diese Frequenzbereiche haben den Vorteil, dass die (obere) Erdatmosphäre für diese praktisch durchsichtig ist, während sie andere, häufig für lebende Organismen schädliche Strahlung, absorbiert.

Optische Systeme arbeiten in der Regel mit dem reflektierten Licht einer natürlichen Strahlungsquelle, also üblicherweise der Sonne. Für Mikrowellen existiert keine solche konstant leuchtende Quelle, weil die Strahlungsdichte der Sonne im Mikrowellenbereich viele Zehnerpotenzen kleiner ist als im sichtbaren Licht (SCHEFFLER & ELSÄSSER 1990). Deshalb sind Mikrowellensysteme aktiv ausgelegt, das heisst sie verfügen über ihre eigene Beleuchtungsquelle. Die Vorteile liegen auf der Hand: Die Abhängigkeit vom Tageslicht entfällt und die Beleuchtungsquelle ist technisch wählbar und im Labor exakt messbar, sowohl in ihrer spektralen Zusammensetzung, wie auch in der Geometrie. Zudem sind Wolken und Niederschlag, häufig auch Rauch, für Mikrowellen durchsichtig: Die Fernerkundung mit Mikrowellen ist deshalb weder vom Tageslauf noch vom Wetter abhängig. Sie eignet sich deshalb hervorragend für den unmittelbaren Einsatz nach Katastrophen, um deren Umfang und weitere Entwicklungen festzustellen.

Elektromagnetische Wellen interagieren primär mit Objekten, die mindestens gleich gross sind wie die Wellenlänge. Heute eingesetzte Mikrowellensysteme verwenden Wellenlängen zwischen 1 mm und 10 cm, «sehen» also praktisch sämtliche von Auge sichtbaren Objekte. Deshalb erstaunt es nicht, dass Mikrowellenbilder optischen Schwarz-Weiss Aufnahmen ähneln.

Was geschieht nun, wenn die Wellenlänge vergrössert wird, nehmen wir an auf den Bereich zwischen 1 und 15 Meter? Viele natürlich vorkommende Objekte, v.a. die Vegetation und kleine Bodenunebenheiten,

interagieren nun nicht mehr stark mit den einfallenden Wellen, sie werden praktisch unsichtbar. Dieser Wellenlängenbereich eignet sich deshalb für die Abbildung von grösseren Objekten, wenn kleine Strukturen für die geplante Anwendung nicht relevant sind. Der wichtigste Vorteil ist aber Folgender: Die oberste, ja sogar eventuell die ganze Vegetationsschicht ist für diesen Wellenlängenbereich durchsichtig. Dies öffnet den Weg zu einer Reihe von Applikationen. Der Frequenzbereich von 20-300 MHz ist Teil der sogenannten «Radiowellen», so dass wir im Folgenden von Radiowellen-Fernerkundung sprechen.

2 Methoden

2.1 Die SAR-Technologie

Elektromagnetische Wellen werden häufig für die Untersuchung von Objektcharakteristiken verwendet. Eine Abbildungstechnik ist der Radar mit synthetischer Strahlöffnung (Synthetischer Apertur Radar, SAR). Diese Technik ist bereits seit Jahrzehnten bekannt und basiert auf dem Aussenden und Empfangen kohärenter Radarwellen über eine auf Flugzeugen oder Satelliten montierte Antenne. Bei konventionellen Radarsystemen bringen kleine Antennen nur eine grobe räumliche Auflösung bei grossen Distanzen, genauso wie bei optischen Systemen die räumliche Bodenauflösung vom Durchmesser der Optik und der Entfernung zum Zielgebiet abhängt. Bei SAR hingegen wird eine sehr grosse Antenne simuliert, indem eine kleine Antenne entlang dem Flugpfad bewegt wird und eine Reihe von Signalen ausgesendet und deren Echos von der Bodenoberfläche empfangen werden. Besonders wichtig während diesem Aufnahmeprozess ist die kontinuierliche und exakte Vermessung der geometrischen Position der Antenne. Anschliessend können die aufgezeichneten Echos rechnerisch kombiniert werden (BARMETTLER et al. 2001). Die maximale synthetische Apertur wird durch die Grösse der Antennenstrahlungskeule am Boden bestimmt: Die theoretische Antennengrösse kann auf diese Weise für Sensoren auf einer Erdumlaufbahn gut 100 km betragen und für Flugzeugplattformen werden Antennen bis zu einer Länge von 20 km synthetisiert.

Die Methode des Radars mit synthetischer Apertur ist der Holografie verwandt und wurde bereits in den 1960er Jahren für die Herstellung von hochauflösenden Radarbildern verwendet. Aber erst mit der Verbreitung von leistungsfähigen Rechensystemen konnte

sich diese Technik durchsetzen, und seit wenigen Jahren bietet die digitale Signalverarbeitung ein flexibles Mittel um eine Vielzahl von Einflüssen bei der Ausbreitung der elektromagnetischen Wellen zu korrigieren. Neue Bildrekonstruktionsalgorithmen liefern daher Radarbilder in der Nähe der physikalischen Auflösungsgrenze.

Eine deutschsprachige Einführung in Radar mit realer und synthetischer Apertur geben beispielsweise KLAUSING & HOLPP 2000.

2.2 Ultrabreitband SAR-Systeme

Die Entwicklung der SAR-Systeme tendiert in Richtung einer räumlichen Auflösung, welche vergleichbar ist mit jener optischer Systeme, v.a. für topografische Kartierung und dies nicht zuletzt wegen der Erfahrung und Gewohnheit der potentiellen Anwender mit optischem Bildmaterial. Darüber hinaus ist die Unempfindlichkeit gegenüber Regen und Wolken nicht der einzige Vorteil solcher Systeme. Die Verwendung von Radiowellen hat ein hohes Potential weit über die Applikation der topografischen Kartierung hinaus: Natürliche und künstliche Objekte sind typischerweise in der Dimension der Wellenlänge der eingesetzten Frequenzen. Die Physik zeigt, dass eine solche Übereinstimmung einen grossen Einfluss auf die Interaktion zwischen Welle und Objekt zeigt, mit teilweise starken Resonanzeffekten (die Objekte agieren als $\lambda/2$ -Dipole und die Interaktion findet im Bereich der Mie-Brechung statt).

Dieses Verhalten wird dazu verwendet, um Objekte zu unterscheiden. Die Resonanzfrequenzen dieser Wellen liegen im tiefen Very High Frequency (VHF)- und höheren High Frequency (HF)-Band (Radiowellen) und somit viel tiefer als die meisten kommerziellen Mikrowellen-SAR-Systeme. Objekte, welche kleiner sind als die ausgesendete Wellenlänge, interferieren in der Rayleigh-Region der Rückstreuung: Der Rückstreuquerschnitt variiert in diesem Bereich linear mit der vierten Potenz der Frequenz. Folglich nimmt die Interaktion zwischen der einfallenden elektromagnetischen Welle und kleineren Objekten rasch ab, so dass diese Objekte bei tieferen Frequenzen quasi unsichtbar werden (KNOTT et al. 1993).

Für abbildende Mikrowellen-Radars ist die räumliche Auflösung typischerweise in der Grössenordnung mehrerer Wellenlängen. Die Auflösungszelle beinhaltet deshalb die Information einer Vielzahl von Streuern. Abhängig von der Geometrie zwischen Sensor und der abgebildeten Zone, interferieren die Echosignale dieser Elementarstreuer gegenseitig und produzieren ein Radarecho, das durch eine Art Rauschen (*speckle*) dominiert ist.

Eine sinnvolle räumliche Auflösung für die Detektion

von Objekten sollte besser als 2-5 m sein. Diese minimal abzubildende Objektgrösse entspricht gerade derjenigen der kürzesten Wellenlängen der Radiowellen. Entsprechen sich die Wellenlänge und Objektgrösse in etwa, so streut das Objekt die einfallenden elektromagnetischen Wellen besonders stark, also in der Resonanzregion der frequenzabhängigen Rückstreuung, während kleinere Objekte praktisch unsichtbar sind.

Im VHF arbeitende Radarsensoren sehen also vor allem Objekte in der Grösse der Auflösungszelle. Dies hat einen grossen Vorteil: Die Echos sind nicht mehr länger durch *speckle* dominiert, sondern durch Resonanzeffekte zwischen der einfallenden Welle und dem Objekt. Vereinfacht gesprochen, die Auflösungszelle enthält die Information eines einzelnen dominierenden Streuelements (HELLSTEN & GUSTAVSSON 1994).

Ist übrigens die Wellenlänge viel kleiner als das Objekt – wie es typisch ist für die optische Fernerkundung und bei Mikrowellen-SAR – findet die Streuung in der optischen Region statt, es gelten also die Gesetze der Optik.

Beim SAR findet die Bildgenerierung in Quer- und Längsdistanz unabhängig voneinander statt. In Flugrichtung ist die höchste erreichbare räumliche Bodenauflösung durch die halbe physikalische Antennenlänge bestimmt. Moderne Mikrowellen-Fernerkundungssatelliten wie der im Frühjahr 2002 gestartete europäische Umweltsatellit Envisat liefern Bilder mit 10 m Auflösung. Flugzeuggestützte Mikrowellen-Systeme realisieren rund 40 cm Bodenauflösung, während Radiowellen-Systeme 2.5 m erreichen können.

Die räumliche Auflösung eines SAR-Bildes quer zur Flugrichtung ist nur durch die Bandbreite des Radars gegeben (ist die Lichtgeschwindigkeit im Ausbreitungsmedium):

$$\Delta r = \frac{c}{2B} \quad (1)$$

Um eine hohe Distanzauflösung bei Radiofrequenzen zu erreichen muss das Verhältnis von B zur Trägerfrequenz (bzw. Mittenfrequenz des gesamten Frequenzbandes) gross werden. Ein System mit einem Verhältnis von 25% oder mehr wird mit dem Attribut «Ultra-Breitband» beschrieben (Ultra-Wideband, UWB).

Die notwendige Bandbreite wird in heute eingesetzten Systemen oft durch kurze Signalimpulse mit hoher Bandbreite erzeugt (Impuls-Radar). Diese verfügen aber über einen stark nicht-linearen Frequenzgang. Für tieffrequente SAR-Anwendungen wird deshalb eine Frequenz-Schritt-Technik verwendet: Hierbei wird die

hohe Bandbreite durch numerische Kombination einer Reihe von schmalbandigen Einzelimpulsen erzeugt.

Die der Distanzauflösung äquivalente Formel für die beste erzeugbare Auflösung in Flugrichtung (Azimutauflösung) in einem SAR-Bild ist gegeben durch

$$\Delta y \approx \frac{0.64 \cdot c}{2\Delta\theta f_c} \quad (2)$$

Dabei ist der Integrationswinkel der synthetischen Apertur, d.h. der genutzte Winkelbereich der Antennenöffnung, die Mittenfrequenz des Radars. Der Faktor 0.64 definiert den Zweiweg-Öffnungswinkel der Radar-Antenne.

Üblicherweise ist es wünschenswert, dass ein SAR-System in beiden Bilddimensionen eine ähnliche Auflösung erzielen soll.

2.3 Der CARABAS-Sensor

Der wohl bekannteste VHF-SAR ist der schwedische CARABAS-II-Sensor, der aus einer seit den 80er Jahren laufenden Entwicklung hervorgegangen ist. Der Radar wurde gemeinsam von FOI (einer schwedischen Forschungseinrichtung) und der Aktiengesellschaft Ericsson Microwave entwickelt. Das System wird auf einem Geschäftsflugzeug montiert und verfügt über zwei auf beiden Seiten unterhalb des Cockpits montierte, fünf Meter lange Antennen (siehe Abb. 1). Die typische Flughöhe beträgt 3000-5000 Meter über Grund und der Radar überstreicht den HF/VHF-Frequenzbereich zwischen 20 und 90 MHz. Um ein Gebiet abbilden zu können, ist eine minimale Flugpfadlänge von 30 km erforderlich! Die Flugzeugposition wird dabei mit Hilfe von differentielltem GPS (Global Positioning System) laufend vermessen. Die Sendeleistung entspricht etwa derjenigen einer mittleren Mobilfunkantenne (rund 500 Watt).

Weil der Radiowellen-Frequenzbereich stark von Funkdiensten besetzt ist, werden verschiedene Methoden eingesetzt, um sich nicht gegenseitig zu stören. Beispielsweise sendet CARABAS nicht auf Frequenzen von Funkdiensten und unterdrückt die von Funkdiensten ausgestrahlten Signalfrequenzen für eine möglichst rausch-arme Bildherstellung.

Während einer Befliegung werden riesige Mengen von Daten produziert – für eine typische Szene von 4 x 15 km² rund 5 GByte – die zuerst auf eine Festplatte geschrieben und später auf Magnetband kopiert werden. Die Verarbeitung der unzähligen Radarechos geschieht auf Workstations oder auch auf handelsüblichen PCs. Für die automatische Bildherstellung vergehen einige Stunden. Dafür können tieffrequente Radarbilder generiert werden, die über eine räumliche Auflösung von 2.5 m verfügen.

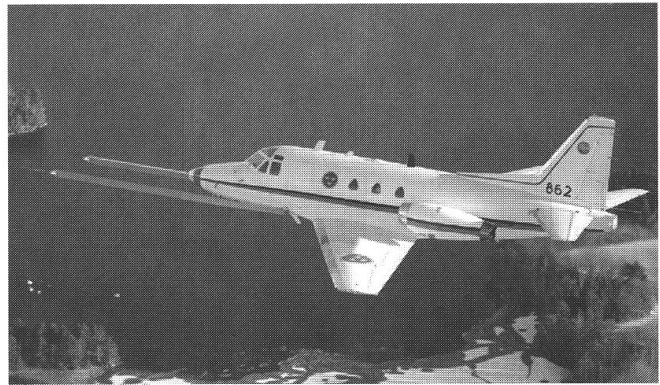


Abb. 1: Der schwedische CARABAS-II HF/VHF-Sensor

The Swedish CARABAS-II HF/VHF sensor

Le capteur suédois HF/VHF CARABAS-II

Foto: FMV, The Swedish Defence Material Administration, Stockholm, Schweden

Zahlreiche Systemparameter können nicht hinreichend genau im Labor gemessen werden. Deshalb ist es erforderlich, dass im abzubildenden Gebiet Referenzreflektoren stehen, um die Geometrie und Signalstärke exakt kalibrieren zu können. Diese Reflektoren sind im Falle von CARABAS drei metallische Platten mit jeweils fünf Metern Seitenlänge, die rechtwinklig montiert werden, und deren Achse in Richtung des Sensors zeigt (vgl. Abb. 2 als Beispiel eines kleineren Reflektors, wie er für die Space Shuttle Mission SRTM verwendet wurde). Alleine für die Montage eines dieser Kolosse im Gelände sind zwei Personen mehrere Stunden beschäftigt. Der Einsatz dieses Sensors bedarf momentan also noch eines recht hohen personellen wie auch technischen Aufwandes.

2.4 Verarbeitungskette

Tieffrequente SAR-Sensoren produzieren das Ultra-Breitband aus einer Reihe von schmalbandigen Pulsen, weil elektronische Komponenten für Ultra-Breitband Radar entweder sehr teuer oder technisch (noch) nicht genau genug realisierbar sind. Die oberste Zeile im Flussdiagramm in Abbildung 3 repräsentiert diese numerische Breitband-Konstruktion.

Anschliessend müssen die Störsignale durch externe Funkquellen detektiert und unterdrückt werden (Radio Frequency Interference, RFI). Ist dieser Verarbeitungsschritt erfolgreich durchgeführt worden, liegen störungsfreie Ultra-Breitband-Daten zu Verfügung. Ohne diese Korrekturen könnte kein brauchbares Radarbild hergestellt werden, weil der Rauschanteil das Nutzsignal vollständig überlagert (ULANDER et al. 1999).

Die nachfolgende Fokussierung entlang der langen synthetischen Apertur verlangt eine Vielzahl von

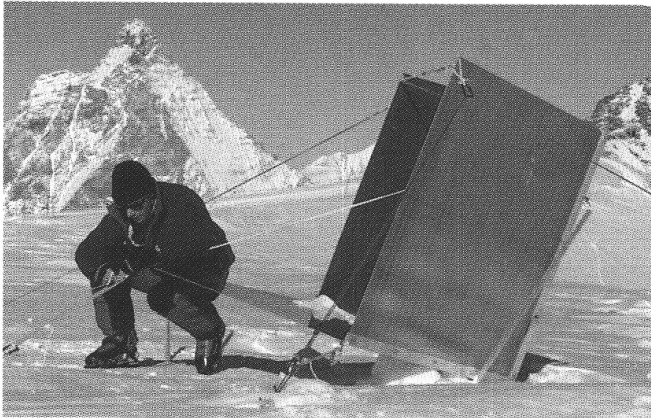


Abb. 2: Beispiel eines 1.25 m Reflektors vor dem Matterhorn

Example of a 1.25 m corner reflector in front of the Matterhorn

Exemple d'un réflecteur polyédrique de 1.25 m devant le Mont Cervin

Foto: A. BARMETTLER

genau bekannten Parametern: Einerseits ist die auf Dezimeter genaue Position des Radarsensors notwendig, andererseits muss dem variablen Ausbreitungsmedium Luft Rechnung getragen werden (BARMETTLER et al. 2001).

Die Sensorposition wird anhand einer rechnerischen Verschmelzung aus genauen Satellitennavigationsdaten und Messwerten des hochfrequenten Trägheitsmesssystems (Inertial Measurement Unit, IMU) gewonnen. Ebenfalls muss die Verschiebung und Rotation des Hebelarms zwischen Navigationsgeber und der Antenne berücksichtigt werden.

Weil die Distanz vom CARABAS-Sensor zu einem Geländepunkt um bis zu einem Faktor drei variieren kann, muss die tatsächliche geometrische Distanz anhand eines Atmosphärenmodells aus den gemessenen Zeitverzögerungen der Radarechos bestimmt werden (die Differenz zwischen gemessener und geometrischer Distanz kann im Falle von CARABAS rund 10 m ausmachen). Die Genauigkeitsanforderung liegt dabei bei rund einem Dezimeter und deshalb wird eine von der Wetterlage abhängige Höhenschichtung des Brechungsindex berechnet. Momentan sind Untersuchungen im Gange das Modell basierend auf Wetterballonsondierungen zu verbessern.

Die Methode der nun in der Verarbeitungskette folgenden Fokussierung der Radardaten beruht auf einer Basistechnik der Computer Tomografie, der sogenannten gefilterten Rückprojektion. Mit diesem Algorith-

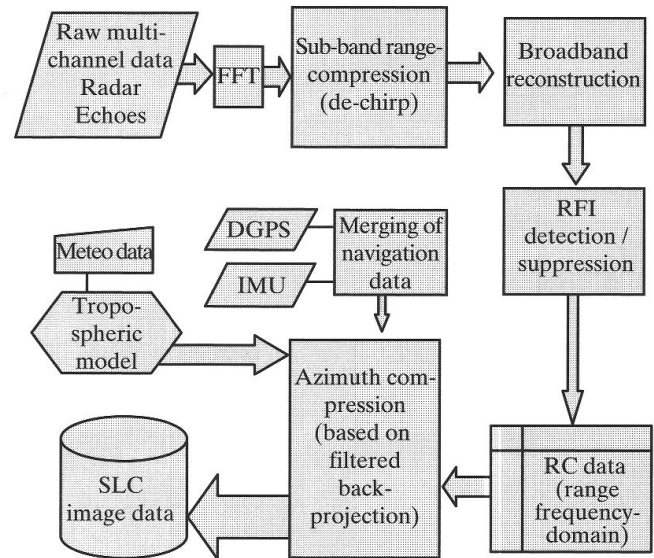


Abb. 3: Die SAR-Datenverarbeitungskette für die Generierung von Ultra-Breitband SAR Bildern

Processing chain for generation of low-frequency ultra-wideband images

Chaîne de traitement pour la génération d'images à basse fréquence ultra-bande large

(eigener Entwurf)

mus wird das Bild aus der Sequenz von entlang des definierten Flugpfades um das Objekt gemessenen Linienintegralen rekonstruiert. Die Messungen werden von diesem bekannten Pfad aus in eine Bildebene rückprojiziert, wo diese genau am Ort des Bildpunktes kohärent aufsummieren und an allen anderen Orten destruktiv interferieren. Ein aus rückprojizierten Daten hergestelltes Bild ist in Abbildung 4 dargestellt.

3 Anwendungen

3.1 Kartierung

Für die thematische Kartierung und Klassifikation von Fernerkundungsdaten – die qualitative und quantitative Erfassung von Landnutzungsparametern, die nicht auf physikalischen Eigenschaften basieren – steht mit CARABAS ein weiteres Frequenzband zur Verfügung.

Waldkartierungen, insbesondere die Klassifikation verschiedener Waldtypen (Mischwald, Nadel- oder Laubwald), lassen sich bereits mit einer hohen Genauigkeit mit SAR durchführen und übertreffen teilweise sogar die mit optischen Sensoren erreichbare Klassiergenauigkeit.

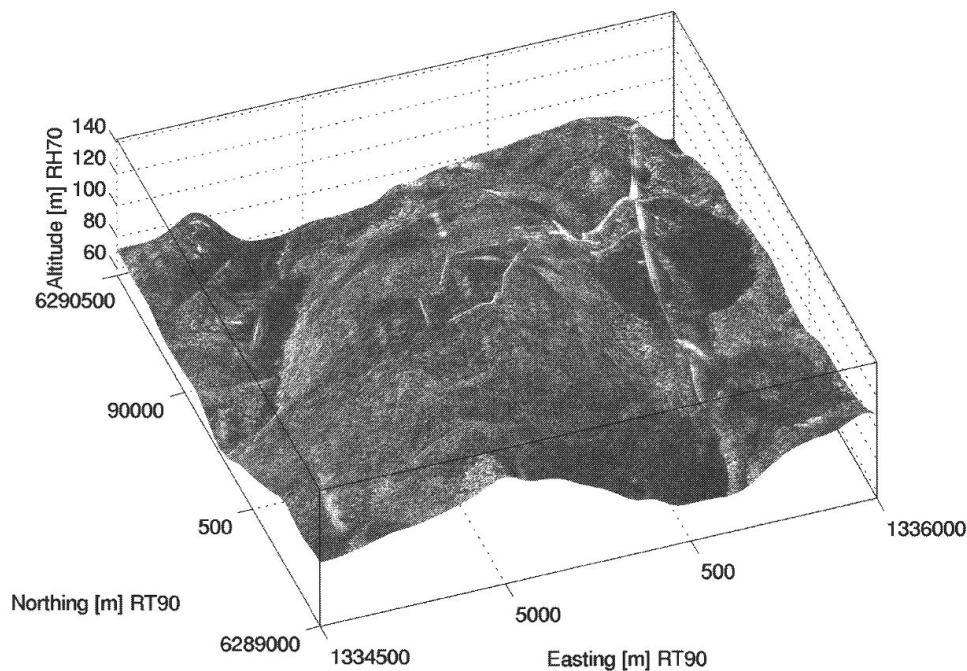


Abb. 4: Geokodierte CARABAS-Radarkarte eines schwedischen Testgebietes in Schrägansicht. Schwarze Flächen repräsentieren offene, vorwiegend vegetationslose Gebiete. Helle linienförmige Signaturen stammen von metallischen Leitungen.

Geocoded radar map of a Swedish test site produced from CARABAS-II data, oblique view. Dark areas represent open areas with little vegetation. Bright, linear features are caused by metallic telephone lines.

Carte géocodée d'un site de test suédois produite à partir de données CARABAS-II, vue oblique. Les zones sombres représentent des régions ouvertes avec peu de végétation. Les traits clairs et linéaires sont dus aux câbles téléphoniques en métal.

Die heute existierenden SAR-Sensoren im X/C/L- und P-Band liefern bereits zahlreiche Klassierungsmerkmale. Wir beurteilen allerdings die Erweiterung des Informationsspektrums um das VHF-Frequenzband für die thematische Klassierung von offenem Gelände als gering, v.a. unter Berücksichtigung der noch notwendigen Grundlagenforschung im Bereich der Streumechanismen.

Allerdings ist der oberflächenspezifische Informationsgehalt ausserhalb von Wäldern gering und die verschiedenen Oberflächen zeigen wenig charakteristische Unterschiede. Selbst Strassen lassen sich praktisch nicht auf Radiowellen-Radarbildern erkennen. Dafür eignen sich Radiowellen gut für die Abbildung von Leitungen und Zäunen, Baumgruppen und Gebäuden.

Trotz der praktisch ungehinderten Durchdringung von Vegetation lässt sich Wald mit Hilfe von VHF-Wellen anhand der Einzelbaum-Echos recht differen-

ziert klassieren. Insbesondere kann die Baumdichte und die Stammgrösse als Klassierungsmerkmal extrahiert werden.

Digitale Terrain-Modelle (DTM), welche die Höhe der Oberfläche unter der Vegetation beschreiben, können vielseitig eingesetzt werden, beispielsweise bei der Planung von Mobilfunkzellen, der topographischen Kartierung und auch für vegetationspezifische Studien. Im Gegensatz zu digitalen Oberflächen-Modellen (Digital Surface Model, DSM) repräsentieren DTMs die tatsächliche Erdoberfläche und nicht nur die oberste Schicht der Vegetation. Mittels SAR-Interferometrie steht ein Hilfsmittel zu Verfügung, welches die Extraktion der Geländehöhe erlaubt. Hierzu wird die Phaseninformation von zwei oder mehr SAR-Bildern ausgenutzt. Durch einen auch nur geringfügigen Distanzunterschied zu einem Bodenpunkt zwischen den SAR-Bildern lässt sich die Höhe fast auf die Wellenlänge genau berechnen (FRÖLIND 1998).

Langwellige Strahlen im UHF und VHF, welche in der Lage sind, die Vegetationsschicht zu durchdringen, ermöglichen die direkte Kartierung des Terrains unter der Vegetationsdecke. Die Genauigkeit der Kartierung wird durch die Bodeneindringung der VHF-Radarstrahlen in trockenen Gebieten allerdings beeinträchtigt. Ebenso wird die Terrainhöhe in schnee- und eisbedeckten Gebieten unterschätzt. Die physikalische Grenze für die geometrische Auflösung in der Höhe liegt bei CARABAS bei etwa 2 m.

3.2 Biomassenbestimmung

Für die kurz- und langfristige Planung in der Forstwirtschaft ist die Kenntnis von Parametern von Waldbeständen in guter räumlicher Auflösung notwendig. In globalem Masstab dient die Kenntnis der Biomasse zur Beobachtung der Entwicklung der CO₂-Bindung in der Vegetation, um z.B. Rückschlüsse auf eine Änderung des Weltklimas zu ermöglichen. Aktuelle Experimente mit SAR versuchen Baumtypen, Bodenfeuchtigkeit und Biomasse zu bestimmen und temporale Änderungen festzustellen, die durch (Ab-)Bautätigkeit, Waldbrände oder Sturmschäden entstanden sind.

Mit dem Radiowellen-SAR CARABAS-II wurden Experimente für die Forstwirtschaft durchgeführt. Bereits steht für diesen Sensor ein extensiver statistischer Datensatz zu Verfügung, mit dem bereits recht gut auf das Stammvolumen (m³/ha) und somit auf die Biomasse eines Gebietes geschlossen werden kann. Der Vorteil bei VHF-Frequenzen besteht darin, dass die Dämpfung durch die Vegetation gering ist. So ist es möglich, viel höhere Biomassen zu messen als mit anderen Methoden, welche höhere Frequenzen verwenden: In höheren Frequenzbändern findet eine Sättigung in der Relation zwischen Radarrückstreuung und Biomasse statt, so dass die für die globale Biomassenschätzung wichtigen tropischen Wälder nicht genügend genau bestimmt werden können (MELON et al. 1991; HELLSTEN & GUSTAVSSON 1996).

Bei den Radiowellen findet die Rückstreuung primär durch Mehrfachreflexionen zwischen Stamm und Boden statt – d.h. die Stämme bilden gemeinsam mit dem Boden einen Reflektor. Ein spezielles Problem hierbei bietet die Topographie und somit die Hangneigung, weil für eine optimale Reflexion der Stamm senkrecht auf dem Untergrund stehen sollte. Praktisch kann dieses Problem entschärft werden, indem das Gebiet aus verschiedenen Richtungen aufgenommen wird.

Moderne Verarbeitungsketten für die Biomassenbestimmung umfassen eine vollautomatische Geokodierung der Szenenausschnitte sowie eine halbautomatische Entfernung von störenden Bildinhalten

wie z.B. Stromleitungen und Eisenbahnschienen. Dies erfolgt anhand von existierenden Vektordaten und verschiedenen Techniken der Bildanalyse. Anhand von Geländemodellen wird ebenfalls versucht, den Einfluss der Topographie zu kompensieren. Ebenfalls sind Verarbeitungsverfahren in Entwicklung für die halbautomatische Detektion von Änderungen durch Sturmschäden bzw. Abholzung.

3.3 Bodeneindringung

VHF-Radiowellen können im trockenen Sand bis etwa 100 m tief eindringen, während von Salzwasser durchsetzter Boden praktisch die gesamte Strahlungsenergie absorbiert oder reflektiert (je nach Bodenschichtung). In trockenem Eis können Radiowellen bis 1000 m tief eindringen. Im folgenden sind einige sich daraus ergebende Anwendungen aufgelistet:

- Feststellung der Bodenfeuchtigkeit,
- Suche von Kabeln und Wasserleitungen im Boden,
- Lokalisierung von Stromleitungen auf Land und in salzarmen Seen,
- Suche nach unterirdischen, wasserführenden Schichten in Wüstengebieten,
- Bodenbeurteilung in der Landwirtschaft,
- Archäologische Untersuchungen,
- Untersuchung der Kryosphäre (Ausdehnung, Schichtung, Tiefe),
- Weitere geophysikalische Anwendungen (z.B. Schichtung, Salzgehalt, Bodenstruktur).

Heute wird für viele dieser Anwendungen bodeneindringende Profil-Radar eingesetzt. Die direkt gegen unten gerichteten Sensoren werden dabei über die Oberfläche gezogen oder knapp über den Boden geflogen.

Neue Sensoren wie der schwedische CARABAS-II können helfen, den zweidimensionalen Profilen die dritte Dimension hinzuzufügen, so dass direkt ein tomografisches Bild erzeugt werden kann. Allerdings ist hier die Technik und Wissenschaft noch nicht so weit (REIGBER et al. 1999): Erst sendeleistungstärkere SAR-Sensoren können die SAR-Tomografie der bodennahen Schichten realisierbar machen.

4 Fazit

Die neue Technologie des Radiowellen-SAR wurde vorgestellt. Für neue Applikationen, v.a. im Bereich der Forstwirtschaft, öffnen sich mit dieser Technologie neue Tore. Auch in der Schweiz wurden in den letzten Jahren Grundlagen erarbeitet, die es erlauben, die Radardaten zu verarbeiten.

Im Vergleich zu Mikrowellen-SAR-Systemen verfügen die Radiowellen-SAR über verschiedene Vor- und

Nachteile: Im Radiowellen-Bereich ist die Signal-dämpfung kleiner und die Hintergrundsignale (*clutter*) sind generell schwächer. Reflexionen von Objekten in der Grössenordnung von 5-15 m sind generell stärker. Demgegenüber stehen die Nachteile einer viel längeren Integrationszeit, der schlechteren räumlichen Auflösung, einer wegen ihrer Grösse schwieriger zu montierenden Antenne, der Verzicht auf mehrere Polarisierungen und die Problematik der Störsender. Zusätzlich ist es schwierig, aus dem Signal auf die Art des Objektes zu schliessen. Ein ideales System würde von einer Kombination der Vorteile der Frequenzbereiche von Radio- und Mikrowellen profitieren. Tomografische Anwendungen verleihen dem Radiowellen-SAR ein grosses Zukunftspotential.

Literatur

- BARMETTLER, A., MEIER, E. & D. NÜESCH (2001): Development of an Ultra-Wideband SAR Processor. – In: Proceedings CEOS SAR Workshop 2001, 2.-5. April 2001, Tokyo, Japan.
- FRÖLIND, P.O. (1998): Processing of Ultra-Wideband VHF SAR for Interferometric Applications. – = Chalmers University of Technology Technical Report No. 299L, Göteborg, Schweden.
- HELLSTEN, H. & A. GUSTAVSSON (1994): CARABAS – the use of low frequency wide band SAR for ground imaging. – In: Proceedings PIERS'94 Symposium, Noordwijk, Niederlande, 11.-15. Juli 1994, ESA WPP-073: 2283-2287.
- HELLSTEN, H. & A. GUSTAVSSON (1996): CARABAS – Considerations on SAR imaging for land applications. – In: Proceedings RVK 96, Luleå, Schweden, 3.-6. Juni 1996.
- KLAUSING, H. & W. HOLPP (Hrsg.) (2000): Radar mit realer und synthetischer Apertur: Konzeption und Realisierung. – München, Wien: Oldenburg Verlag.
- KNOTT, E., SHAEFFER, J.F. & M.T. TULEY (1993): Radar Cross Section. – Norwood MA: Artech House, Inc.
- MELON, P., MARTINEZ, J.M., LE TOON, T., ULANDER, L.M.H. & A. BEAUDOIN (2001): On the Retrieving of Forest Stem Volume from VHF SAR Data: Observation and Modeling. – In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol 39, No 11, November 2001: 2364-2372.
- REIGBER, A., MOREIRA, A. & K.P. PAPATHANASSIOU (1999): First Demonstration of Airborne SAR Tomography using Multibaseline L-band Data. – In: Proceedings IEEE IGARSS'99, July 1999.
- SCHEFFLER, H. & H. ELSÄSSER (1990): Physik der Sterne und der Sonne. – Mannheim, Wien, Zürich: BI-Wissenschaftsverlag.
- ULANDER, L.H.M., FRÖLIND, P.O. & T. MARTIN (1999): Processing and Calibration of Ultra-Wideband SAR Data from CARABAS-II. – In: Proceedings of SAR Workshop of CEOS Committee on Earth Observation

Satellites Working Group on Calibration and Validation, Toulouse, Frankreich, 26.-29. Oktober 1999: 273-278.

Zusammenfassung: Tieffrequente abbildende Radarsysteme. Ein neues Instrument in der Fernerkundung

Die neue Fernerkundungstechnologie Synthetisches Apertur Radar (SAR) mit Radiowellen hat ein grosses Potential in der Forstwirtschaft und der Klimafor-schung. Auch die heute noch nicht auszuschöpfende Möglichkeit der tomografischen Abbildung der Erdoberfläche verspricht interessante Anwendungen. An der Universität Zürich werden Daten des in VHF-Frequenzen arbeitenden schwedischen CARABAS Flugzeugsensors verarbeitet und Methoden für die SAR-Bildherstellung entwickelt. Im Artikel werden einige Grundlagen dieser Technologie vorgestellt, die entwickelten Verarbeitungsverfahren veranschaulicht und erste Resultate präsentiert.

Summary: Low-Frequency Imaging-Radar Systems.

A new instrument in remote sensing

Synthetic Aperture Radar (SAR) using radio waves is a new technology for remote sensing, particularly suitable for application in forestry and climate change research. Further, the tomographic imaging of the Earth's surface made possible by these systems looks promising. At the University of Zurich, data from the Swedish CARABAS sensor are being processed, and methods for low-frequency and ultra-wideband SAR image generation have been developed. This article introduces fundamental aspects of the technology and presents the processing chain developed by the author, as well as first results.

Résumé: Systèmes à Radar Imageur et à Basses Fréquences. Un nouvel instrument pour la télédétection

L'utilisation des ondes radio dans le domaine des Radars à Synthèse d'Ouverture (RSO) est une nouveauté dans la télédétection, avec des applications potentielles dans la gestion des forêts ainsi que dans la recherche sur l'évolution du climat. De plus, l'application de la technologie à la tomographie de la surface terrestre relève encore de nouvelles possibilités. A l'université de Zurich, le traitement de données du capteur suédois CARABAS est actuellement en cours, et des méthodes de génération d'images de ce radar ultra bande large à basse fréquence ont été mis au point. Cet article présente les principes essentiels de cette technologie et la chaîne de traitement développée par l'auteur, ainsi que les premiers résultats.

Didaktische Hinweise

- SAR wird auch als Abkürzung für Search and Rescue verwendet. Für welchen Begriff steht SAR in der Fernerkundung?

- Was sind die definierenden Unterschiede zwischen Mikrowellen- und Radiowellen-SAR? Wieso müssen tieffrequente SAR über eine grosse prozentuale Bandbreite verfügen?
- Weshalb liefert ein Mikrowellen-SAR für die Biomassenkartierung in den Tropen keine quantitativ exakten Resultate?
- Welche Vor- und Nachteile sind mit der Mikro- resp. Radiowellen-Fernerkundung verbunden?
- Für welche Gebiete eignet sich der Einsatz von Radiowellen-SAR?

Dipl. El.-Ing. ETH **Arnold Barmettler**, Dr. **Erich Meier** und Prof. Dr. **Daniel Nüesch**, Remote Sensing Laboratories RSL, Geographisches Institut der Universität Zürich, Winterthurerstrasse 190, CH 8057 Zürich.

e-mail:

barmettler@geo.unizh.ch

emeier@rsl.geo.unizh.ch

nuesch@geo.unizh.ch

*Manuskripteingang/received/manuscrit entré le
13.2.2003*

*Annahme zum Druck/accepted for publication/accepté
pour l'impression: 5.6.2003*