

Bistatisches SAR –
Signaltheoretische und experimentelle Untersuchung der
bistatischen Radarbildgebung

Vom Fachbereich Elektrotechnik und Informatik
der Universität Siegen
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften

(Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Ingo Walterscheid

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Otmar Löffel
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Joachim Ender

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Peter Haring Bolivar

Tag der mündlichen Prüfung: 21. Dezember 2007

FHR-Schriftenreihe

Ingo Walterscheid

**Bistatisches SAR –
Signaltheoretische und experimentelle
Untersuchung der bistatischen Radarbildgebung**

Shaker Verlag
Aachen 2008

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Siegen, Univ., Diss., 2007

Copyright Shaker Verlag 2008

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-7224-1

ISSN 1866-6760

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen des internationalen Promotionsprogramms „IPP Multi Sensorics“ am Zentrum für Sensorsysteme (ZESS) der Universität Siegen und meiner Tätigkeit am Forschungsinstitut für Hochfrequenzphysik und Radartechnik (FHR) der Forschungsgesellschaft für Angewandte Naturwissenschaften (FGAN) in Wachtberg.

Für die Aufnahme ins IPP Multi Sensorics und die Betreuung meiner Dissertation möchte ich mich ganz herzlich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. O. Löffeld von der Universität Siegen bedanken. Mein ganz besonderer Dank gilt ebenfalls dem Direktor des FHR, Prof. Dr.-Ing. J. H. G. Ender, der durch überaus engagierte Anregungen und wertvolle Diskussionen ganz wesentlich die Entstehung dieser Arbeit unterstützte und das Korreferat gerne übernommen hat.

Ein besonderer Dank gilt dem Leiter der Abteilung „Array-gestützte Radarbildung“, Herrn Dr.-Ing. A. Brenner, der es mir ermöglichte bistatische SAR Experimente mit den flugzeug-getragenen Systemen AER-II und PAMIR durchzuführen. Durch seinen Einsatz und die Arbeit vieler Mitarbeiter der Abteilung konnte im Herbst 2003 eine Flugkampagne mit einer Transall C-160 und einer Dornier Do-228 durchgeführt werden. Für die Hilfe bei der Erweiterung und Umbau der SAR-Systeme möchte ich mich nochmal ausdrücklich bei vielen meiner Arbeitskollegen bedanken, die durch ihr kollegiales und freundschaftliches Verhalten zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. An der erfolgreichen Durchführung der Experimente waren nicht zuletzt auch die Angestellten der Wehrtechnischen Dienststelle (WTD 61) in Manching beteiligt, die engagiert beim Einbau und Inbetriebnahme der SAR Sensoren mitgearbeitet haben.

Mein ganz besonderer Dank gilt meiner Frau Heike sowie meiner Familie, die mich während der Zeit dieser Arbeit moralisch unterstützt und mir jederzeit mit Rat und Tat zur Seite gestanden haben.

Neunkirchen, im Dezember 2007

Ingo Walterscheid

Kurzfassung

Bi- oder multistatische SAR-Systeme gelten aktuell als ein neues, vielversprechendes Konzept auf dem Gebiet der SAR-Sensorik, SAR-Signalverarbeitung und SAR-Interferometrie. Im Gegensatz zum klassischen monostatischen SAR werden Sender und Empfänger auf unterschiedlichen Plattformen (Luftfahrzeugen und/oder Satelliten) betrieben, was eine Vielzahl neuer Anwendungsmöglichkeiten erschließt.

In Krisengebieten könnte der aktive Sender in sicherer Entfernung auf einem Satelliten untergebracht sein, während die rein passiv arbeitenden Empfänger direkt vor Ort operieren. Durch die Wahl geeigneter Geometrien können interessante Objekte in der Szene besser sichtbar gemacht werden, während die Überstrahlung durch den Di- und Polyhedraleffekt vermindert wird. SAR-Aufnahmen in oder entgegen der Flugrichtung sind im Unterschied zu monostatischen Systemen ebenfalls möglich. Weiterhin können die rein passiv arbeitenden Empfangssysteme kostengünstiger hergestellt werden, da die teure Sendeelektronik entfällt.

Um diese neuen Anwendungsmöglichkeiten zu erschließen, sind noch viele technologische Probleme zu lösen. Vor allem aber müssen auch neue Methoden und Verfahren in der bistatischen SAR-Signalverarbeitung entwickelt und verifiziert werden. In den letzten Jahren wurde weltweit mit der Entwicklung bi- oder multistatischer SAR-Prozessoren begonnen und verschiedene Ansätze im Zeit- und Frequenzbereich untersucht.

In der vorliegenden Arbeit werden zunächst die Grundlagen zu dem in der Literatur noch wenig behandelten Thema der bistatischen Radarbildgebung erläutert. Anschließend erfolgt die signaltheoretische Untersuchung der bistatischen SAR-Bildgebung, wobei ein besonderer Schwerpunkt auf den Range-Migration-Algorithmus gelegt wird. Angepasst auf den bistatischen Fall, hat er eine hohe numerische Effizienz und nahezu optimale Eigenschaften. Die Leistungsfähigkeit des entwickelten Algorithmus wird mit simulierten als auch realen Daten verifiziert. Hierzu wurden bistatische Experimente mit den X-Band SAR-Sensoren AER-II und PAMIR des FHR während einer Flugkampagne im Oktober 2003 erfolgreich durchgeführt.

Abstract

Bi- or multistatic SAR are currently considered to be a new and promising concept in the area of SAR sensor systems, SAR image processing and SAR interferometry. In contrast to monostatic SAR systems, transmitters and receivers are operated on different platforms (aircraft and/or satellite), which open up a multitude of new applications.

In conflict areas, the active transmitter could be mounted on a satellite in a safe distance, while the passive receivers could operate on site. By choosing suitable geometries, the visibility of interesting objects in the scene could be improved, while strong interferences due to the di- and polyhedral effect are reduced. In contrast to monostatic systems, forward- and backward-looking SAR imaging is also possible. Furthermore, the passive receive systems are very cost-efficient, because the expensive transmit electronics can be omitted.

To develop these new applications, many technological problems need to be solved. Most importantly, new methods and techniques concerning the bistatic SAR signal processing have to be developed and verified. In recent years the development of bi- and multistatic SAR processors has been started world-wide and different processing approaches in the time and frequency domain have been investigated.

This thesis starts off with basics of bistatic radar imaging, as there is not much literature on this subject. Subsequently, the bistatic SAR processing will be examined in a signal theoretical way, where the main focus will be on the bistatic range migration algorithm. Adapted to the bistatic case, this processor possesses a high numerical efficiency and nearly optimal properties. The performance of the developed algorithm will be verified with simulated and real bistatic SAR data. For this purpose bistatic experiments with the X-band SAR sensors AER-II and PAMIR have been successfully conducted during a flight campaign in October 2003.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	i
Kurzfassung	iii
Abstract	v
1 Einleitung	1
1.1 Monostatische SAR-Bildgebung	3
1.1.1 Prinzip und Grundlagen	3
1.1.2 Anwendungen	6
1.2 Bistatische SAR-Bildgebung	9
1.2.1 Motivation und Vorteile	10
1.2.2 Problemstellung	13
1.3 Stand der Forschung	15
1.3.1 Historischer Überblick	15
1.3.2 Raumgestützte bi- und multistatische SAR-Systeme	16
1.3.3 Luftgestützte bistatische SAR-Experimente	17
1.3.4 Bistatische SAR-Prozessierung	18
1.4 Zielsetzung der Arbeit	19
2 Grundlagen für bistatisches SAR	21
2.1 Geometrische Beschreibung des bistatischen Systems	21
2.1.1 Lineare Flugtrajektorien	21
2.1.2 Bistatische Entfernungsvariation	22
2.1.3 Erste Ableitung der Entfernungsvariation	23
2.2 Punktzielauflösung	25
2.2.1 Das bistatische Abbildungsgitter	25
2.2.2 Bistatische Auflösungszelle	27
2.2.3 Entfernungsauflösung	27
2.2.4 Laterale Auflösung	31
2.3 Einführung in den k-Raum und Darstellung der bistatischen k-Fläche	33
2.3.1 Der k-Raum	34
2.3.2 Rekonstruktion eines eindimensionalen Reflektivitätsprofils	34

2.3.3	Mehrdimensionale räumliche Fouriertransformation	36
2.3.4	Die k -Menge für bistatisches SAR	37
2.4	Bistatische Radargleichung	40
2.4.1	Bistatische Radargleichung für ein flächenhaftes Objekt	40
2.4.2	Bistatische Radargleichung bei SAR-Systemen	42
2.4.3	Rauschäquivalentes σ_b^0	43
3	Bistatische SAR-Prozessierung	45
3.1	Signalmodell	45
3.1.1	Sendesignal	46
3.1.2	Signalübertragung	47
3.1.3	Angepasstes Empfangsfilter	50
3.1.4	Inverses Filter	52
3.1.5	Signalbeschreibung bei einer ausgedehnten Reflektivitätsverteilung	53
3.2	Bistatische SAR-Prozessoren	54
3.2.1	Matched-Filter Prozessor	54
3.2.2	Rückprojektion	55
3.2.3	Modifizierter monostatischer Range-Doppler Prozessor	56
3.2.4	Numerischer SAR-Prozessor	58
3.2.5	Verarbeitungsansatz aus der Geophysik	58
3.2.6	Bistatischer ISFT Prozessor	59
3.2.7	Nichtlinearer Chirp-Scaling Algorithmus	62
3.2.8	Range-Migration Prozessor	62
3.3	Range-Migration Prozessor	63
3.3.1	Monostatischer Range-Migration Prozessor	63
3.3.2	Bistatischer Range-Migration Prozessor	65
3.3.3	Linearisierung der Phase mit Hilfe einer physikalischen Referenz	72
3.4	Validierung des Range-Migration Prozessors im Rahmen einer Simulationsstudie	75
4	Bistatische flugzeuggetragene SAR-Experimente	83
4.1	Der Sender AER-II	84
4.1.1	Sensorbeschreibung	84
4.1.2	Anpassung und Erweiterung des Systems für den bistatischen Sendebetrieb	84
4.2	Der Empfänger PAMIR	88
4.2.1	Sensorbeschreibung	88
4.2.2	Anpassung der Aufnahmesteuerung für den bistatischen Empfangsbetrieb	89
4.3	Positions- und Lagebestimmung	90
4.3.1	Differentielles GPS-System	91

4.3.2	Inertiales Navigationssystem	92
4.3.3	Realisierung der Lage- und Positionsbestimmung bei AER-II und PAMIR	93
4.4	Flugplanung und Beschreibung der Experimente	95
5	Auswertung der experimentellen Daten	97
5.1	Vorverarbeitung der aufgezeichneten PAMIR-Daten	97
5.2	Anwendung des Range-Doppler-Prozessors auf reale Daten	98
5.2.1	Beschreibung der Aufnahme	98
5.2.2	Auswertung der DGPS Daten zur Schätzung der Flugtrajek- torien	98
5.2.3	Verarbeitungsschritte	99
5.2.4	Ergebnis	101
5.3	Anwendung des Range-Migration Prozessors auf reale Daten	101
5.3.1	Beschreibung der Aufnahme	101
5.3.2	Verarbeitungsschritte	103
5.3.3	Ergebnis	103
6	Zusammenfassung und Ausblick	107
A	Methode der stationären Phase	109
B	Berechnung der Integrationsdauer	113
	Abkürzungen	115
	Symbole und Formelzeichen	116
	Literaturverzeichnis	125