

Reihe 10

Informatik/
Kommunikation

Nr. 867

Dipl.-Math. techn. Aron Sommer,
Hannover

Backprojection Autofocus of Large Ships with Arbitrary Motion for Synthetic Aperture Radar



Institut für Informationsverarbeitung
www.tnt.uni-hannover.de

Backprojection Autofocus of Large Ships with Arbitrary Motion for Synthetic Aperture Radar

Von der Fakultät für Elektrotechnik und Informatik
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur

genehmigte

Dissertation

von

Dipl.-Math. techn. Aron Sommer

geboren am 7. November 1986 in Berlin

2019

Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. J. Ostermann
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. J. Ender
Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. B. Rosenhahn

Tag der Promotion: 06. September 2019

Fortschritt-Berichte VDI

Reihe 10

Informatik/
Kommunikation

Dipl.-Math. techn. Aron Sommer,
Hannover

Nr. 867

Backprojection
Autofocus of Large
Ships with Arbitrary
Motion for Synthetic
Aperture Radar



Institut für Informationsverarbeitung
www.tnt.uni-hannover.de

Sommer, Aron

Backprojection Autofocus of Large Ships with Arbitrary Motion for Synthetic Aperture Radar

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 10 Nr. 867. Düsseldorf: VDI Verlag 2019.

136 Seiten, 59 Bilder, 16 Tabellen.

ISBN 978-3-18-386710-3, ISSN 0178-9627,

€ 52,00/VDI-Mitgliederpreis € 46,80.

Keywords: Synthetic aperture radar (SAR) – inverse synthetic aperture radar (ISAR) – backprojection – fast factorized backprojection – imaging of moving objects – phase errors – autofocus – regularization – spotmode – stripmap-mode

Radar images of the open sea taken by airborne synthetic aperture radar (SAR) show typically several smeared ships. Due to their non-linear motions on a rough sea, these ships are smeared beyond recognition, such that their images are useless for classification or identification tasks. The ship imaging algorithm presented in this thesis consists of a fast image reconstruction using the fast factorized backprojection algorithm and an extended autofocus algorithm of large moving ships. This thesis analysis the factorization parameters of the fast factorized backprojection algorithm and describes how to choose them near-optimally in order to reconstruct SAR images with minimal computational costs and without any loss of quality. Furthermore, this thesis shows how to estimate and compensate for the translation, the rotation and the deformation of a large arbitrarily moving ship in order to reconstruct a sharp image of the ship. The proposed autofocus technique generates images in which the ship type can be recognized, which was not possible by state-of-the-art autofocus techniques before.

Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter www.dnb.de abrufbar.

Bibliographic information published by the Deutsche Bibliothek

(German National Library)

The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie (German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at www.dnb.de.

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2019

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Fotokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, im Internet und das der Übersetzung, vorbehalten.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 0178-9627

ISBN 978-3-18-386710-3

VORWORT

Diese Dissertation habe ich während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Informationsverarbeitung der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover verfasst.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Jörn Ostermann für seine engagierte Betreuung meiner Arbeit. Durch seine konstruktiven Anregungen und kritischen Fragen in fachlichen Diskussionen sowie durch seine freundliche Unterstützung hat er maßgeblich zur Realisierung dieser Arbeit beigetragen. Zudem möchte ich mich bei ihm für die hervorragenden Arbeitsbedingungen am Institut bedanken.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Joachim Ender danke ich sehr herzlich für die fachliche Betreuung, seinen kritischen und anregenden Fragen sowie für die Übernahme des Korreferats. Für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Bodo Rosenhahn.

Bei der Firma Hensoldt Sensors GmbH bedanke ich mich für die angenehme Zusammenarbeit sowie die Bereitstellung der Radardaten, die für die Entwicklung und die Evaluation der Algorithmen unabdingbar waren. Insbesondere gilt mein Dank Herrn Dr.-Ing. Martin Kirscht und Herrn Klaus Hoffmann für den förderlichen wissenschaftlichen Austausch und die konstruktive Zusammenarbeit mit Hensoldt Sensors GmbH und Airbus Defence and Space.

Frau Dr.-Ing. Ulrike Pestel-Schiller und Frau Dr.-Ing. Minh Phuong Nguyen danke ich sehr herzlich für die anregenden Gespräche und Diskussionen am Institut für Informationsverarbeitung.

Herrn Prof. Dr. Andreas Helfrich-Schkarbanenko danke ich dafür, dass er mich bei zukunftsweisenden Fragen strategisch beraten und unterstützt hat.

Mein Dank gilt darüber hinaus allen Kolleginnen und Kollegen am Institut für Informationsverarbeitung für die bereichernde Zeit und die ständige Hilfsbereitschaft. Für die technische sowie administrative Unterstützung möchte ich mich ausdrücklich bei den Administratoren und

den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Office bedanken.

Diese Dissertation wäre nicht ohne die Unterstützung meiner Freundin Ruth Schröder und meiner Eltern Gabriele Pfeiffer-Sommer und Günther Sommer sowie meinen Freunden möglich gewesen. Für das Mitfeiern und die erbrachte Geduld bedanke ich mich bei ihnen herzlich.

CONTENTS

1	INTRODUCTION	1
1.1	Synthetic Aperture Radar	2
1.2	Fast Factorized Backprojection	7
1.3	Autofocus of Large Ships	9
1.4	Structure of the Thesis	12
2	BASICS OF BACKPROJECTION IMAGE RECONSTRUCTION	13
2.1	Fundamentals of Synthetic Aperture Radar	13
2.2	Signal Model of a Static Scene	18
2.3	Global Backprojection	24
2.4	Image Quality Metrics	27
2.5	Backprojection Autofocus	31
2.6	Real Data Example	36
3	OPTIMIZATION OF FAST FACTORIZED BACKPROJECTION	40
3.1	Fast Factorized Backprojection	41
3.2	Computational Costs	44
3.3	Exact Range Error Computation	46
3.4	Image Error Estimation	51
3.5	Parameter Analysis and Optimization	53
3.6	Optimal Parameter Choice Rule	57
3.7	Experimental Results and Evaluation	59
3.7.1	Narrow Swath SAR using Gotcha data	60
3.7.2	Squinted SAR using SmartRadar data	69
4	AUTOFOCUS OF LARGE SHIPS WITH ARBITRARY MOTION	75
4.1	Ship Detection and Location Estimation	77
4.2	Signal Model of a Moving Ship	79
4.3	Effects of Arbitrary Motion on SAR Images	81
4.4	Optimal Focus Using True Motion	85
4.5	State-of-the-Art Autofocus of Ships	87
4.6	Extended Autofocus Algorithm of Large Ships	90
4.7	Experimental Results and Evaluation	97
4.7.1	Autofocus of a Large Tanker	98
4.7.2	Autofocus of a Large Bulk Carrier	101
4.7.3	Autofocus of a Self-Discharging Bulk Carrier	103
4.7.4	Autofocus of a Static Scene with Low-Cost INS	107
5	CONCLUSIONS	112
A	APPENDIX	117
	BIBLIOGRAPHY	119

ACRONYMS

ACC	Adaptive Cruise Control
ADC	Analog to Digital Converter
AIS	Automated Identification System
APC	Antenna Phase Center
ATC	Air Traffic Control
CFAR	Constant False Alarm Rate (Detector)
CPI	Coherent Processing Interval
DEM	Digital Elevation Map
FBP	Fast Factorized Backprojection
FFT	Fast Fourier Transform
FPGA	Field Programmable Gate Array
GBP	Global Backprojection
GMTI	Ground Moving Target Indication
GPS	Global Positioning System
ICBT	Image-Contrast-Based Technique
IMU	Inertial Measurement Unit
INS	Inertial Navigation System
ISAR	Inverse Synthetic Aperture Radar
ISLR	Integrated Side Lobe Ratio
PGA	Phase Gradient Autofocus
PPP	Prominent Point Processing
PRF	Pulse Repetition Frequency
PSLR	Peak Side Lobe Ratio
SAR	Synthetic Aperture Radar
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
WGS84	World Geodetic System 1984

ABSTRACT

Radar images of the open sea taken by airborne *synthetic aperture radar* (SAR) show typically several smeared ships. Due to their non-linear motions on a rough sea, these ships are smeared beyond recognition, such that their images are useless for classification or identification tasks. The ship imaging algorithm presented in this thesis consists of a fast image reconstruction using the fast factorized backprojection algorithm and an extended autofocus algorithm of large ships with arbitrary motion.

In order to reconstruct a SAR image by the fast factorized backprojection algorithm with low computational costs and without any loss of quality, the factorization parameters must be set near-optimally. In this thesis, a rule for the choice of the factorization parameters is presented, which in the first step computes the exact range errors, which are the reason for the quality loss, instead of estimating them as in state-of-the-art rules. In the second step, the resulting maximum image error is estimated from the exact range errors. This precise estimation enables the evaluation of the factorization parameters with regard to the resulting costs and image quality before the algorithm is executed and thus to determine the near-optimal parameters. The evaluation using real X-band SAR data shows that the proposed parameter choice rule allows a significantly faster image reconstruction than current rules, where the resulting image quality loss is almost not visible.

This SAR image is used for the detection and the localization of all ships in the image. A local image is generated for each ship, which is smeared due to its non-linear motion on the rough sea. In order to compensate for the smearing and to reconstruct a sharp image, the developed autofocus technique estimates the motion of the ship and includes it into the reconstruction algorithm. For this motion estimation, the SAR image is divided into several subimages and a radial motion of each subimage, which maximizes image sharpness, is estimated. An iterative Gauss-Newton method is used for the estimation, which includes dependencies between the individual subimages by means of an additional regularization. This motion estimation of all subimages enables a robust estimation of the non-linear motion and deformation of a ship and a reconstruction of a sharp SAR image. It is shown by three real data examples that the presented autofocus technique provides significantly sharper images and better results than current SAR autofocus methods. State-of-the-art autofocus techniques lead to images in which the type of

the ship cannot be recognized. The proposed extended autofocus method provides SAR images where even the bollards on the deck of a large ship can be counted.

Additional experiments show that the developed autofocus technique is able to estimate and compensate large unknown changes in radial distance between the radar and the scene such that the use of expensive and highly accurate inertial navigation systems, which usually measure the flight path with high precision and thus enable the reconstruction of SAR images, is no longer necessary.

Keywords – Synthetic aperture radar (SAR), inverse synthetic aperture radar (ISAR), backprojection, fast factorized backprojection, imaging of moving objects, phase errors, autofocus, regularization, spotmode, stripmap-mode.

KURZFASSUNG

Radar-Luftbilder, welche mit einem flugzeuggestützten Radar mit synthetischer Apertur (*engl.* synthetic aperture radar (SAR)) über dem Meer aufgenommen wurden, zeigen typischerweise viele verschmierte Schiffe. Diese Schiffe werden wegen ihrer nichtlinearen Bewegungen bei rauer See bis zur Unkennlichkeit verschmiert abgebildet, weswegen deren Bilder für eine Klassifikation, bzw. eine Identifikation unbrauchbar sind. Das in dieser Arbeit vorgestellte Autofokus-Verfahren besteht aus einer schnellen Bildgenerierung mittels Fast Factorized Backprojection Algorithmus und einer erweiterten Autofokussierung aller im SAR-Bild detektierten Schiffe.

Damit der Fast Factorized Backprojection Algorithmus ein SAR-Bild schnell und ohne hohen Qualitätsverlust generieren kann, müssen die Faktorisierungsparameter optimal eingestellt werden. In dieser Arbeit wird eine Regel zur Wahl der Faktorisierungsparameter vorgestellt, welche im ersten Schritt die für den Qualitätsverlust verantwortlichen Rangfehler exakt berechnet anstatt diese wie im Stand der Technik zu schätzen. Im zweiten Schritt wird der entstehende maximale Bildfehler auf Basis der exakten Rangfehler geschätzt. Durch diese präzise Schätzung können vor der Ausführung des Algorithmus die Faktorisierungsparameter bzgl. der entstehenden Kosten und der entstehenden Bildqualität bewertet und damit die optimalen Parameter ermittelt werden. Die Evaluation mittels realer X-Band SAR-Daten zeigt, dass die vorgeschlagene Regel eine deutlich schnellere Bildgenerierung als aktuelle Regeln zur Wahl der Faktorisierungsparameter ermöglicht, wobei die resultierenden Bildfehler fast nicht sichtbar sind.

Dieses deutlich schneller generierte SAR-Bild wird im weiteren Verlauf des vorgestellten Autofokus-Verfahrens für die Detektion und Lokalisierung der sich im Bild befindenden Schiffe verwendet. Pro Schiff wird nun ein lokales Bild generiert, welches aufgrund der nichtlinearen Schiffsbewegung bei rauer See stark verschmiert ist. Um diese Verschmierung zu kompensieren und ein scharfes Bild zu generieren, schätzt die erweiterte Autofokussierung die Schiffsbewegung und bezieht diese in den Rekonstruktionsalgorithmus mit ein. Im Rahmen dieser Bewegungsschätzung wird das SAR-Bild in mehrere Teilbilder unterteilt und für jedes Teilbild eine radiale Bewegung geschätzt, welche eine Bildschärfemetrik maximiert. Bei der Schätzung kommt ein iteratives Gauß-Newton Verfahren zum Einsatz, das mittels zusätzlicher Regularisierung Abhängigkeiten

zwischen den einzelnen Teilbildern miteinbezieht. Diese Bewegungsschätzung aller Teilbilder ermöglicht robust nichtlineare Bewegungen und Deformationen des Schiffes zu ermitteln und scharfe Bilder zu generieren. Anhand von drei Beispielen wird gezeigt, dass die vorgestellte Autofokussierung in realen Einsatzszenarien deutlich schärfere Bilder und bessere Ergebnisse liefert als aktuelle SAR-Schiffsautofokusverfahren. Aktuelle Autofokussierungsverfahren führen zu Bildern, bei denen der Typ des Schiffes nicht erkannt werden kann, wohingegen das entwickelte Verfahren SAR-Bilder liefert, in denen sogar die Poller an Deck eines großen Schiffes gezählt werden können.

Zusätzlich zeigen Experimente, dass die entwickelte Schiffs-Autofokussierung sogar in der Lage ist derartig große unbekannte Abstandsänderungen zwischen Radar und Szene zu schätzen und zu kompensieren, dass der Einsatz von teuren und hochgenauen inertialen Navigationssystemen, welche normalerweise die Flugbahn mit hoher Präzision messen und damit eine SAR-Bildgenerierung erst ermöglichen, nicht mehr notwendig ist.

Stichworte – Radar mit synthetischer Apertur (SAR), Inverses Radar mit synthetischer Apertur (ISAR), Backprojection, Fast Factorized Backprojection, Bildgebendes Verfahren für sich bewegende Objekte, Phasenfehler, Autofokussierung, Regularisierung, Spotmodus, Stripmap-Modus.