

Zentrale und Dezentrale Estimationsverfahren in Multi-Sensorsystemen und deren Anwendung am Beispiel hochgenauer Positionsbestimmung

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

Doktor der Ingenieurwissenschaften
(Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von

Diplom-Ingenieur Holger Nies

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. O. Loffeld

2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. J. Ender

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

Tag der mündlichen Prüfung: 07.02.2006

ZESS-Forschungsberichte

Nr. 23

Holger Nies

Zentrale und Dezentrale Estimationsverfahren in Multi-Sensorsystemen und deren Anwendung am Beispiel hochgenauer Positionsbestimmung

Universität Siegen
Zentrum für Sensorsysteme
Paul-Bonatz-Straße 9-11
57068 Siegen
Tel.: 0271 / 740-3323
Fax: 0271 / 740-2336
e-mail: gs@zess.uni-siegen.de
Internet: <http://www.zess.uni-siegen.de/>

Siegen 2006

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., 2006

Copyright Shaker Verlag 2006

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

Printed in Germany.

ISBN-10: 3-8322-5486-2

ISBN-13: 978-3-8322-5486-5

ISSN 1433-156X

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 Dissertationsschrift entstand während meiner Tätigkeit im Projektbereich 2 „Optimale Signalverarbeitung, Datenfusion, Remote Sensing - SAR“ des Zentrums für Sensorsysteme (ZESS).

Mein Dank gilt ausdrücklich meinem Doktorvater und Erstgutachter, Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Otmar Löffeld, der mich während meiner wissenschaftlichen Arbeit mit Ideen versorgte und immer wieder Zeit fand, meine Ergebnisse und Vorgehensweisen kritisch zu begutachten. Weiterhin möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Haring Bolivar für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission herzlich bedanken.

Ebenso gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Joachim Ender von der Forschungsgesellschaft für angewandte Naturwissenschaften e.V. (FGAN) mein herzlicher Dank für seine Arbeit als zweiter Gutachter dieser Schrift.

An dieser Stelle möchte ich allen meinen Kollegen im ZESS danken, welche mich fortwährend in fachliche Diskussionen verwickelt haben und mir die Arbeit im ZESS sehr angenehm gestaltet haben.

Namentlich erwähnen möchte ich meine jetzigen und ehemaligen Kollegen aus dem von Prof. Löffeld geleiteten Projektbereich 2, nämlich Dr.-Ing. Stefan Knedlik, Dipl.-Ing. Ulrich Gebhardt, Dipl.-Ing. Valerij Peters, Priv.-Doz. Dr.-Ing. Christoph Arndt, Dr.-Ing. Achim Hein und Dr.-Ing. Dirk Balzer, welche alle einen Betrag zu meiner Entwicklung geleistet haben.

Ganz lieben Dank auch M.Sc. Koba Natroshvili, Ing. de Telecomunicación Amaya Medrano Ortiz und M.Sc. Anthony Amankwah aus der SAR-Gruppe des International Postgraduate Programme (IPP) Multi Sensorics.

Den Mitarbeitern der FGAN danke ich für die Bereitstellung der SAR-Rohdaten und GPS-Spuren ihres bistatischen Flugexperiments.

Ebenso gilt mein Dank Dipl.-Ing. Marc Kalkuhl für die Generierung realitätsnaher Orbitdaten. Als wichtigster Person in meinem Leben danke ich vor allem meiner Frau Varina, die mir vielerlei Arbeit abgenommen und durch ihre Ermutigung meine Arbeit immer unterstützt hat. Sie musste letzter Zeit viel Geduld aufbringen.

Inhalt

Kurzfassung	III
Abstract	III
Verzeichnis häufig verwendeter Abkürzungen und Formelzeichen	IV
1 Einleitung	1
2 Motivation	3
2.1 SAR-Grundlagen	3
2.1.1 Funktionsweise des SAR	4
2.1.2 SAR-Verarbeitungsschritte	5
2.1.3 Weitere SAR-Moden	10
2.2 Bistatisches SAR	10
2.2.1 Vorteile formationsfliegender Satellitenanordnungen	11
2.2.2 Bistatische Prozessierung	12
3 Estimationstheoretische Grundlagen	17
3.1 Grundbegriffe	17
3.2 Kombination von Wahrscheinlichkeitsinformation	18
3.3 Informationsmaße	20
4 Zentrale Filter	23
4.1 Kalman-Filter	23
4.1.1 Die Rekursion	24
4.1.2 Die Initialisierung	25
4.2 Das Informationsfilter	26
4.3 Das Extended Kalman-Filter	29
5 Dezentrale Filter	33
5.1 Ein Überblick	33
5.1.1 Zentrale Filterung	33
5.1.2 Hierarchische Filterung	35
5.1.3 Dezentrale Filterung	36
5.2 Das dezentrale Informationsfilter	39
5.3 Herleitung dezentraler Kalman-Filter	41
5.3.1 Das dezentrale Extended Kalman-Filter	43
5.4 Vergleich: Zentraler – dezentraler Algorithmus	43
6 Formationsfliegende Satellitenkonstellationen	47
6.1 Das interferometrische Cartwheel	48
6.1.1 Verlauf der Empfängerbahnen	49
6.1.2 Bestimmung des Cartwheelmittelpunktes	51
6.1.3 Beschreibung der Cartwheelellipse	56
6.1.4 Transformation vom Orbital- ins Cartwheelkoordinatensystem (CCS)	58
6.1.5 Betrachtung der Baselines im CCS	62
6.2 Das interferometrische Pendulum	67
6.3 Eine Kombination beider Konstellationen (CarPe)	69
7 Verbesserung von Satellitenpositionsmesswerten durch Kalman-Filter	71

7.1	Erzeugung der Orbitdaten	71
7.1.1	Flugdatensätze basierend auf idealen Keplerbahnen	71
7.2	Das vorverarbeitende Kalman-Filter	73
7.2.1	Erzeugung der Messdaten für das vorverarbeitende Filter	74
7.2.2	Das Vorwärtsfilter	79
7.2.3	Das Rückwärtsfilter	83
7.2.4	Der Fraser-Potter-Smoother	85
7.3	Die Schätzung der Positionen	86
7.4	Verarbeitungsergebnisse	88
7.5	Verbesserung der Genauigkeiten durch zusätzliche Messungen	89
7.6	Verarbeitung realitätsnaher Orbits	93
8	Dezentrale Verarbeitung der Cartwheelpositionsmessdaten	97
8.1	Die lokale Prädiktion	98
8.2	Die partielle Messwertkorrektur	99
8.3	Der Informationsaustausch der Satelliten	99
8.3.1	Der Algorithmus	99
8.3.2	Verarbeitungsergebnisse	102
9	Positionsmesswertkorrektur bei flugzeuggestützten Systemen	107
9.1	GPS/INS-Integration	107
9.1.1	Stand der Technik	108
9.1.2	Dezentrale Datenfusion	110
9.2	Datenfusionsansatz bei flugzeuggestütztem SAR	111
9.2.1	Das bistatische Flugexperiment	111
9.2.2	Der Filteralgorithmus	116
9.2.3	Verarbeitung von INS Messwerten im erdfesten Koordinatensystem	118
9.3	Anwendung des Algorithmus	122
9.3.1	Die Positionskorrektur	122
9.3.2	Interpolation der Positionswerte	124
9.4	Berechnung der Parameter zur bistatischen SAR-Signalverarbeitung	126
9.4.1	Die Vorverarbeitung	126
9.4.2	Bewegungskompensation	129
9.4.3	Der Verlauf der bistatischen Parameter	134
9.4.4	SAR Prozessierungsergebnisse	135
10	Zusammenfassung der Ergebnisse	143
Anhang	145	
A	Koordinatensysteme	145
A.1	Initial Coordinate System (IN)	145
A.2	Earthfixed Earthcentered Coordinate System (EF)	146
A.3	North East Down Coordinate System (NED)	147
A.4	Orbital Coordinate System (OS)	148
A.5	Koordinatentransformation	149
B	Herleitung der Cartwheel Drehmatrix	151
C	Kalman Smoother	153
D	Global Positioning System (GPS)	156
E	Inertialnavigationssysteme (INS)	157
Literaturverzeichnis	159	