



Forschungsberichte

Herausgeber: Prof. Dr. techn. Josef A. Nossek

Andreas Winterstein

**Design, analysis and demonstration of
a hybrid analog/digital retro-directive
antenna system for satellite
communications**

Technische Universität München
Lehrstuhl für Netzwerktheorie und Signalverarbeitung

Design, analysis and demonstration of a hybrid analog/digital retro-directive antenna system for satellite communications

Andreas R. T. Winterstein

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr. sc. nat. Christoph Günther

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr. techn. Josef A. Nossek
2. Prof. Dr.-Ing. Marcos V. T. Heckler

Die Dissertation wurde am 30.08.2018 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik am 27.01.2019 angenommen.

Berichte aus dem Lehrstuhl für Netzwerktheorie und
Signalverarbeitung der Technischen Universität München

Andreas Winterstein

**Design, analysis and demonstration of a hybrid
analog/digital retro-directive antenna system
for satellite communications**

Shaker Verlag
Düren 2019

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 2019

Copyright Shaker Verlag 2019

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6642-5

ISSN 1433-1446

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Phone: 0049/2421/99011-0 • Telefax: 0049/2421/99011-9

Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

Abstract

The goal of this thesis is to propose and validate a retro-directive antenna (RDA) system which is applicable for satellite communications. RDAs have been suggested at the end of the 1950s and their usage in satellite communications was proposed shortly thereafter. Inherent properties of RDAs are automatic self-tracking of mobile terminals, low complexity and power consumption, good scalability and the lack of complex digital signal processing (DSP). Although these are appealing features, there are no commercial RDAs in use up to the present time. This is due to the additional requirements imposed on antenna systems for satellite communications. We begin this thesis by introducing the retro-directive principle, the so-called phase conjugation, and its advantages. We contrast these properties with the demands in satellite communications. These are the need for different frequency bands for transmit and receive, the use of the antenna gain which plays a crucial role in the link budget, and the ability to operate in full duplex, i.e. to simultaneously receive and transmit. By an extensive literature review, we show that conventional RDAs are not able to fulfill these requirements.

From the demands of satellite communications, we deduce requirements for an ideal retro-directive transceiver for such applications. Using these requirements, we design an analog/digital hybrid system architecture. In contrast to conventional RDAs, the key idea is the separation of analog receiver (Rx) and transmitter (Tx) paths. Information between these paths is exchanged solely via a low-cost DSP unit. This unit processes slowly varying phase information and thus realizes the desired retro-directive behavior of the system. The data carrying signals with high bandwidths are processed exclusively by analog components. Thus we omit the necessity of high speed DSP which is a vital feature of RDAs. Using digital hardware to perform phase conjugation between the Rx and Tx paths, we enable the retro-directive principle for full-duplex, dual frequency operation.

In the following, we focus our analysis on the receiver path which performs the crucial task of extracting the necessary geometric phase information. The proposed receiver system is thereby described by phase transfer functions in the Laplace domain. We propose an optimization technique for the dynamic behavior which aims at improving the location of the slowest system pole. The receiver performance and the effect of the optimization are analyzed by continuous time domain simulations of a C-band example system using Simulink. We find that the receiver is suitable for phase detection down to a signal-to-noise ratio (SNR) of 3 dB. Additionally, we show the capability for phase modulation where we predict a data rate of up to 700 kbit/s.

In order to validate the proposed system architecture, we implement it in digital hardware. For this, we transfer the analytic continuous time system model to the discrete time domain. We show similarity between the continuous and discrete time models both analytically and by simulations. Additionally, we realize the discrete time system on a field-programmable gate array (FPGA) and validate the predicted phase detection performance with errors lower than $\pi/32$ rad. The digital hardware implementation is then used in combination with analog Rx and Tx front-ends as well as an eight element uniform linear array (ULA) to form a complete RDA demonstrator. We characterize this system with antenna measurements in an anechoic chamber where we show direction-of-arrival (DoA) estimation capability with errors smaller than 2.0° over a field-of-view (FoV) of 135° . Finally, we prove the retro-directive capability of our demonstrator system by monostatic and bistatic measurements. We achieve monostatic

behavior using 5.8 GHz Rx and 7.0 GHz Tx frequencies. The variations in the returned Tx power are smaller than 5 dB over a FoV of 113° .

Zusammenfassung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist, ein retrodirektives Antennensystem (RDA) vorzuschlagen und zu validieren, das in der Satellitenkommunikation verwendet werden kann. Erste RDAs wurden bereits Ende der 1950er Jahre erforscht und auch für Raumfahrtanwendungen vorgeschlagen. Die Grundeigenschaften von RDAs sind automatische Nachverfolgung von sich bewegenden Terminals, niedrige Systemkomplexität und Leistungsaufnahme, gute Skalierbarkeit und das Fehlen von komplexer digitaler Signalverarbeitung. Obwohl diese Eigenschaften sehr attraktiv sind, gibt es bis heute keine kommerziell verwendeten RDAs in der Satellitenkommunikation, da dort zusätzliche Anforderungen an die verwendeten Antennensysteme gestellt werden. In der vorliegenden Arbeit wird zunächst das Funktionsprinzip retrodirektiver Systeme, die sogenannte Phasenkonjugation, und deren Vorteile erklärt. Diese Erkenntnisse werden den Anforderungen an Satellitenkommunikationssysteme gegenübergestellt. Letztere sind zum einen die Notwendigkeit, verschiedene Frequenzbänder beim Senden und Empfangen zu verwenden, zum anderen die Ausnutzung des Antennengewinns, der eine entscheidende Rolle in der Leistungsbilanz der Übertragung spielt. Schließlich muss das System in der Lage sein, im Vollduplexbetrieb zu arbeiten, d.h. gleichzeitig zu senden und zu empfangen. Herkömmliche RDAs können diese Anforderungen nicht umsetzen, was mittels eines Überblicks der relevanten Fachliteratur gezeigt wird.

Aus den Randbedingungen, die Satellitenkommunikationssysteme erfüllen müssen, werden Anforderungen für ein ideales retrodirektives Sende- und Empfangssystem abgeleitet. Unter Berücksichtigung dieser Anforderungen wird daraus eine analog/digitale, hybride Systemarchitektur entwickelt. Im Gegensatz zu herkömmlichen RDAs werden dabei Empfangs- und Sendepfad nicht direkt miteinander verbunden, sondern tauschen über eine kostengünstige digitale Signalverarbeitungseinheit Informationen aus. Diese Digitaleinheit verarbeitet hierbei ausschließlich langsam veränderliche Richtungsinformationen und realisiert dadurch das retrodirektive Verhalten des Systems. Im Gegenzug werden alle datentragenden Signale ausschließlich von breitbandig ausgelegten analogen Systemteilen verarbeitet. Dadurch wird die Notwendigkeit von hochratigen digitalen Systemen vermieden, was eine der wichtigsten Eigenschaften von RDAs ist. Durch die Nutzung digitaler Komponenten für die Phasenkonjugation zwischen Empfangs- und Sendepfad, wird retrodirektives Verhalten im Vollduplexbetrieb auf unterschiedlichen Frequenzen ermöglicht.

Es folgt eine detaillierte Analyse des Empfangszugs, in dem die relevante Phaseninformation gewonnen wird. Das vorgeschlagene Empfangssystem wird dafür mit Hilfe von Phasenübertragungsfunktionen im Laplace Bereich beschrieben. Zur Optimierung des dynamischen Verhaltens wird eine Methode vorgeschlagen, die die Lage der langsamsten Polstelle des Systems verbessert. Die Leistungsfähigkeit des Empfängers und die Auswirkungen der Optimierung werden daraufhin anhand eines C-Band-Beispielsystems in Simulink numerisch untersucht. Dabei zeigt sich, dass der Empfänger bis zu einem Signal-Rausch-Verhältnis von 3 dB Phasenunterschiede erfolgreich detektieren kann. Zudem wird der Nachweis erbracht, dass eine Phasenmodulation der Empfangssignale von bis zu 700 kbit/s direkt verarbeitet werden kann.

Um die vorgeschlagene Systemarchitektur zu validieren, wird eine Implementierung in digitaler Hardware vorgenommen. Dafür wird das zuvor beschriebene zeitkontinuierliche analoge Systemmodell in den diskreten Zeitbereich überführt. Hierbei wird die Ähnlichkeit der kontinuierlichen und diskreten Modelle sowohl analytisch als auch in Simulationen ge-

zeigt. Anschließend wird das zeitdiskrete System auf einem Field Programmable Gate Array (FPGA) implementiert, um die Güte der Phasendetektion zu untersuchen. Dabei werden Abweichungen kleiner als $\pi/32$ rad nachgewiesen. Die digitale Implementierung wird schließlich mit analogen Empfangs- und Sendemodulen sowie einem Linienarray aus acht Antennen zu einem funktionsfähigen retrodirektiven Demonstrationssystem kombiniert. In einer Antennenmesskammer kann mittels der Phasendetektion eine Richtungsschätzung mit Fehlern kleiner $2,0^\circ$ über einen Winkelbereich von 135° gezeigt werden. Schließlich wird das retrodirektive Verhalten des Gesamtsystems durch monostatische und bistatische Messungen mit einer Empfangsfrequenz von 5,8 GHz und einer Sendefrequenz von 7,0 GHz nachgewiesen. Die dabei zurückgestrahlte Sendeleistung variiert um weniger als 5 dB in einem Sichtbereich von 113° .

Danksagung

Zuallererst möchte ich Professor Josef A. Nossek dafür danken, dass er meine Doktorarbeit betreut hat, obwohl ich nie am Lehrstuhl für Netzwerktheorie und Signalverarbeitung der Technischen Universität München studiert oder gearbeitet habe. Auch wenn mein Thema an seinem Lehrstuhl eine Ausnahme bildete, hat Professor Nossek meine Arbeit von Anfang an unterstützt. Die fachlichen Diskussionen mit ihm haben mir stets weiter geholfen. Besonders möchte ich auch Professor Marcos V. T. Heckler danken, dass er sich als Prüfer meiner Arbeit zur Verfügung gestellt hat und dafür die weite Reise von Alegrete nach München unternommen hat.

Die Rahmenbedingungen für meine Forschungstätigkeit wurden durch die Verantwortlichen am Institut für Kommunikation und Navigation des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) geschaffen. Daher möchte ich mich zunächst beim Leiter der Antennen-Gruppe, Dr. Achim Dreher bedanken. Dr. Dreher hat mein Promotionsvorhaben von Anfang an begleitet. Regelmäßige Treffen, das Korrekturlesen meiner Publikationen und angeregte Diskussionen haben mein Vorhaben wesentlich vorangebracht. Mein Dank gilt außerdem dem Leiter der Abteilung Navigation, Professor Michael Meurer, dafür, dass ich das Nischenthema Satellitenkommunikation in seiner Abteilung bearbeiten konnte.

Ohne die Unterstützung meiner Kollegen wäre diese Arbeit nie geschrieben worden. Zuallererst möchte ich Dr. Lukasz Greda danken, mit dem ich von Anfang an eng zusammenarbeiten durfte. Lukasz hat essenziell zu meiner Doktorarbeit beigetragen: Neben ausführlicher fachlicher Beratung hat er die Organisation der Kooperation mit der brasilianischen UNIPAMPA und die Projektleitung bei Vorhaben wie DLR@Uni und RADIANT übernommen. Innerhalb dieser Randbedingungen hatte ich stets die Möglichkeit, mich auf die wissenschaftlich-technischen Arbeiten zu konzentrieren und meine Forschung voranzutreiben.

Besonders viel Freude hat mir dabei das Arbeiten mit Hardware und Messgeräten bereitet. Die hier gezeigten Aufbauten und Messungen wären nicht entstanden ohne die Expertise und den unermüdlichen Einsatz meiner Kollegen Georg Buchner, Wahid Elmarissi und Korbini-an Zangl. Ihre Einsätze reichten von Fragen zur Messtechnik, Bestückung meiner Platinen, Gehäusefertigung und mechanische Aufbauten bis hin zu Notfall-Reparaturen meiner Versuchsaufbauten kurz vor wichtigen Terminen. Ebenso möchte ich die Entwicklungsarbeiten meiner beiden brasilianischen Studenten, Marcelo Pereira Magalhães und Daniel Lima Lemes, hervorheben, die wesentlich zum Aufbau der Sendefrontends beigetragen haben. Auch Bernd Gabler vom Institut für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme möchte ich für seine Unterstützung und die Durchführung der gezeigten Antennenmessungen danken. Ebenfalls bedanken möchte ich mich bei Lothar Kurz für seine Hilfe bei Fragen zu digitaler Hardware und VHDL-Programmierung sowie für das Bereitstellen des Strahlformungsmoduls für meinen retrodirektiven Demonstrator. Abschließend gilt mein Dank allen übrigen Kollegen der Abteilung Navigation, insbesondere Anja Grosch, Veenu Kamra, Lothar Kurz, Monika Eiber, Stefano Caizzone, Manuel Cuntz, Emilio Perez Marcos, Manuel Appel und Friederike Fohlmeister.

Außerhalb meiner Arbeitsstelle bedanke ich mich bei meinen Freunden für ihre Geduld und ihr Verständnis gerade während der Schreibphasen. Besonders möchte ich dabei die Pfadfinder vom DPSG Parsbergstamm Germering erwähnen, allen voran meine Vorstandskollegin Sylvia Wauthier. Meine Dankbarkeit gilt außerdem meinen Eltern, die früh mein

Interesse für Technik geweckt und gefördert haben. Ihrer Unterstützung konnte ich mir von der Schulzeit über Studium und Beruf bis heute immer sicher sein. Auch bei meinem Bruder möchte ich mich für die aufmunternden Gespräche bedanken.

Abschließend gilt mein größter Dank meiner Frau, Dr. Franziska Winterstein, die mein gesamtes Promotionsvorhaben von Anfang an mit allen Höhen und Tiefen begleitet hat. Im Gegensatz zu mir hat sie immer an den erfolgreichen Abschluss geglaubt und mich zum Weitermachen ermutigt. Dafür werde ich dir immer dankbar sein.

Germering, im März 2019.

Contents

1	Introduction	1
1.1	The retro-directive principle	1
1.1.1	Phase conjugation	2
1.1.2	Antenna array signal model	2
1.1.3	The van Atta array	4
1.1.4	The phase-conjugating mixer	4
1.2	Satellite communication applications	6
1.2.1	Frequency allocations	6
1.2.2	Link budget considerations	7
1.3	Contribution	8
2	State-of-the-art	11
2.1	Purely retro-reflective systems	11
2.1.1	Corner reflectors	11
2.1.2	Van Atta arrays	11
2.1.3	Waveguide structures	13
2.2	Active analog retro-directive systems	14
2.2.1	Phase-conjugating mixer	14
2.2.2	PLL based retro-directive systems	17
2.2.3	Architectures using direct phase detection	19
2.3	Digital retro-directive systems	20
2.4	Multi-user and multipath environments	21
2.5	Textbooks and overview articles	21
2.6	Summary	22
3	Analog/digital hybrid system concept	25
3.1	System overview	25
3.2	Receiver channel architecture and modeling	27
3.2.1	Qualitative working principle	27
3.2.2	System component modeling	28
3.2.3	Receiver signal model	31
3.3	Receiver design and dynamic behavior	35
3.3.1	General phase transfer functions	36
3.3.2	Fourth order system	36
3.3.3	Second order approximations	37
3.3.4	Design goals	40
3.3.5	C-band example system	41
3.3.6	Summary	49

3.4	Verification by time domain simulation	49
3.4.1	Phase detection performance	50
3.4.2	Intermediate frequency signal time constant	52
3.4.3	Phase modulation rate	54
3.4.4	Receiver proof-of-concept	55
3.5	Multiple user capability	57
3.5.1	Signal model for multiple users	57
3.5.2	Two-user case with isotropic antennas	58
3.5.3	General multiple user case	62
4	Digital system implementation	65
4.1	Receiver design	65
4.1.1	Details of digital components	66
4.1.2	Receiver phase transfer function	70
4.1.3	Phase detection	70
4.1.4	Parameterization	72
4.2	Receiver hardware simulations	76
4.2.1	Initial IF sum signal behavior	76
4.2.2	Phase detection output	79
4.3	Transceiver hardware implementation	81
4.3.1	Functional description	81
4.3.2	Hardware loop experiments	84
4.4	Summary	88
5	Experimental validation	89
5.1	Demonstrator measurement setup	89
5.1.1	Analog signal processing	89
5.1.2	Compact test range setup	90
5.1.3	Monostatic and bistatic measurements	96
5.2	Receiver performance	97
5.3	Retro-directive system performance	97
5.3.1	Monostatic characteristic	98
5.3.2	Bistatic patterns	99
5.4	Summary	100
6	Conclusion and outlook	103
	Appendices	105
A	Function definitions and analytical models	107
A.1	Definition of mathematical functions	107
A.1.1	Modulo operator	107
A.1.2	Sign function	107
A.1.3	Arctangent with two arguments	107
A.2	Linear phase-frequency detector assumption	107
A.2.1	Flip-flop based architecture	108

A.2.2	Analytic input signal model	109
A.2.3	Output signal for equal input frequencies	109
A.3	Time domain model of the fourth order system	110
A.3.1	Analog loop filter	110
A.3.2	System equations	111
A.3.3	Long term system behavior	112
A.3.4	Transient system behavior	113
A.4	Error of second order system approximations	113
A.5	Second order PLL synthesizer	114
A.6	Arctangent of sine over cosine	115
B	Details on simulation models	117
B.1	Simulink receiver model	117
B.1.1	Dual channel receiver simulations	118
B.1.2	Eight channel receiver simulations	119
B.2	Discrete time system implementation	120
B.3	Analytic monostatic array characteristics	120
C	Demonstrator system hardware	123
C.1	Dual-band antenna array	123
C.2	Analog transmitter front-ends	123
C.3	Analog receiver front-ends	125
C.4	Graphical user interface	129
C.5	Transmitter path calibration setup	130
C.6	Transmitter performance	130
	Acronyms	135
	Symbols	139
	Bibliography	145