

Matthias Woltering

Factor Graph-based Receivers for Multi-Carrier Transmission in Two- Way Relaying and Massive Machine Type Communications

Band 7

Dissertationen aus dem
Arbeitsbereich Nachrichtentechnik
der Universität Bremen
Prof. Dr.-Ing. Armin Dekorsy



Factor Graph-based Receivers for Multi-Carrier Transmission in Two-Way Relaying and Massive Machine Type Communications

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

vorgelegt dem Fachbereich 1 (Physik/Elektrotechnik)

der Universität Bremen

von

Dipl.-Ing. Matthias Woltering

Tag des öffentlichen Kolloquiums: 22. Okt. 2019

Gutachter der Dissertation: Prof. Dr.-Ing. A. Dekorsy
Prof. Dr.-Ing. T. Kaiser

Weitere Prüfer: Prof. Dr.-Ing. K.-D. Kammeyer
Prof. Dr.-Ing. M. Schneider



Bremen, Okt. 28, 2019

Dissertationen aus dem Arbeitsbereich Nachrichtentechnik der
Universität Bremen

Band 7

Matthias Woltering

**Factor Graph-based Receivers for Multi-Carrier
Transmission in Two-Way Relaying and
Massive Machine Type Communications**

D 46 (Diss. Universität Bremen)

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.: Bremen, 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 978-3-8440-7050-7

ISSN 2366-276X

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

Danke für dein Lächeln!

07.07.2019

Preface

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Arbeitsbereich Nachrichtentechnik des Instituts für Telekommunikation und Hochfrequenztechnik der Universität Bremen.

Mein ausdrücklicher Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Armin Dekorsy dafür, dass er mir die Promotion ermöglichte und mich stets dabei unterstützte. Hierbei sind die vorbildliche Betreuung während meiner Zeit im Arbeitsbereich und die zahlreichen Hinweise und Vorschläge während meiner Arbeit hervorzuheben.

Ebenfalls herzlich bedanken möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Thomas Kaiser von der Universität Duisburg für die Erstellung des Zweitgutachtens und seine wertvollen Anmerkungen zu dieser Arbeit sowie bei den Herren Prof. Dr.-Ing. Karl-Dirk Kammeyer und Prof. Dr.-Ing. Martin Schneider für ihre Tätigkeit als Prüfer.

Für das angenehme, freundschaftliche und familiäre Arbeitsklima über Jahre danke ich sämtlichen Kollegen. Den Herren Dr.-Ing. Dirk Wübben, Dr.-Ing. Carsten Bockelmann, Dr.-Ing. Florian Lenkeit und Dr.-Ing. Fabian Monsees gilt mein ganz besonderer Dank für zahlreiche fachliche Diskussionen und Anregungen, die diese Arbeit in nicht unerheblichem Maße beeinflusst haben. Ganz besonders gilt mein Dank den beiden letztgenannten, denen ich fachlich sowie privat sehr viel zu verdanken habe.

Ihnen sowie Dipl.-Ing. Ban-Sok Shin und M.Sc. Johannel Demel bin ich weiterhin verbunden für die sorgsame Durchsicht des dieser Arbeit zugrunde liegenden Manuskripts.

Darüber hinaus danke ich der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die teilweise Finanzierung meiner Forschungstätigkeit.

Zuletzt möchte ich mich herzlichst bei meiner Familie und insbesondere meinem Vater und meiner Mutter bedanken, die immer hinter mir standen und standen. Ihre bedingungslose Unterstützung in meiner bisherigen Karriere und gerade in der letzten Phase der Fertigstellung dieser Arbeit hatte einen

großen Anteil am Gelingen meiner Promotion. Ohne ihren Rückhalt wäre diese Arbeit nicht zustande gekommen.

Bremen im Oktober 2019

Matthias Woltering

Contents

1	Introduction	1
1.1	Motivation and Focus	1
1.2	Thesis Origin and Objectives	4
1.3	Contribution and Thesis Structure	7
1.4	Notation and Conventions	10
2	Fundamentals and Preliminaries	13
2.1	Overview	13
2.2	Channel Coding	14
2.3	Symbol Mapping	17
2.4	Multi-Carrier Transmit Signal	20
2.5	Transmission over Doubly-Disturbed Channels	21
2.6	Receiver Structure	26
2.7	Summary	27
3	Multi-Carrier Transmission Schemes	29
3.1	Overview	29
3.2	Multi-Carrier Transmission	30
3.2.1	Transmit Signal	31
3.2.2	Receive Signal of a Multi-Carrier Transmission	35
3.3	Classification of Multi-Carrier Schemes	45
3.3.1	Orthogonal Multi-Carrier Transmissions Schemes	46
3.3.2	Non-Orthogonal Multi-Carrier Transmission Schemes	65
3.3.3	Multi-Carrier Schemes Summary	72
3.4	Chapter Summary	74
4	Transmissions over Two-Way Relaying Channels	75
4.1	Overview	75
4.2	TWRC: General Scenarios	78

4.3	System Model and Detection Methods of Two-Phase TWRC Transmissions	84
4.3.1	Overview	84
4.3.2	TWRC Detectors	91
4.4	Channel Impacts on TWRC Detectors	101
4.4.1	Performance Analysis of the PLNC Detection Schemes in Orthogonal Transmissions	102
4.4.2	Performance Analysis of the PLNC Detection Schemes in Interference-Affected Transmissions	105
4.5	Equalizer	110
4.5.1	Factor Graph-based Equalizer	110
4.5.2	Additional Linear Pre-Equalizer	120
4.5.3	Soft Interference Cancellation	125
4.6	Performance Analysis	126
4.7	Chapter Summary	138
5	Multi-Carrier Compressed Sensing Multi-User Detection	141
5.1	Overview	141
5.2	System Scenario	144
5.2.1	Basics of CS-MUD	146
5.2.2	Error Classification	152
5.3	Multi-Carrier Compressed Sensing Multi-User Detection: The Concept	154
5.3.1	General Idea	154
5.3.2	The MCSM Concept	155
5.3.3	MCSM Node Processing	157
5.3.4	MCSM Detection Model	159
5.3.5	Frequency Hopping and Channel Coding	162
5.3.6	Spreading Sequences	163
5.4	New Concepts for MCSM	163
5.4.1	Differential vs. Non-differential Symbol Mapping	164
5.4.2	MCSM with Timing and Carrier Frequency Offsets	165
5.4.3	Channel Estimation using Spread and Waveform Filtered Pilots	170
5.4.4	Resource Efficient Mapping	173
5.4.5	General Multi-Carrier in MCSM	175
5.4.6	Overview of System models	177
5.5	New Concepts for Base-Station Processing	178
5.6	Monte Carlo Performance Evaluation	182
5.6.1	Key Performance Indicators	182
5.6.2	Synchronized Transmission	184

5.6.3	Asynchronous Transmission	187
5.7	Chapter Summary	188
6	Summary	191
A	Multi-Carrier Transmission Schemes	197
A.1	Effective Channel Coefficient	197
A.2	Orthogonality in Multi-Carrier Schemes	199
A.3	Mirabbasi and EGF Waveform	202
A.4	Circulant Matrices	203
A.5	Windowed-OFDM	204
A.5.1	Non-overlapping w-CP-OFDM	204
A.5.2	Overlapping w-CP-OFDM	206
A.6	Colored Noise	207
A.7	Effective Channel Matrix	210
B	Estimators	215
B.1	Brief Recapitulation of General Estimators	215
B.1.1	Minimum Mean Square Error Estimation	216
B.2	Graph based Estimation in a Communication System	217
B.2.1	Factorization the Underlying Structure	220
C	Two-Way Relaying	229
C.1	TWRC Signals	229
D	Multi-Carrier Compressive Sensing Multi-User Detection	233
D.1	General Waveform in MCSM	233
D.1.1	Error Estimate of CP-FBMC	233
	Acronyms	239
	List of Symbols	247
	Bibliography	255
	Index	281