

Fabian Monsees

Signal Processing for Compressed Sensing Multiuser Detection

Band 5

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



Signal Processing for Compressed Sensing Multiuser Detection

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

vorgelegt dem Fachbereich 1 (Physik/Elektrotechnik)

der Universität Bremen

von

Fabian Monsees M.Sc. B.Sc.

Tag des öffentlichen Kolloquiums: 20. Oktober 2017

Gutachter der Dissertation:

Prof. Dr.-Ing. Armin Dekorsy

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. Norbert Görtz

Weitere Prüfer:

Prof. Dr.-Ing. Karl-Dirk Kammeyer

Prof. Dr.-Ing. Anna Förster



Universität
Bremen

Bremen, March 5, 2018

Dissertationen aus dem Arbeitsbereich Nachrichtentechnik der
Universität Bremen

Band 5

Fabian Monsees

**Signal Processing for
Compressed Sensing Multiuser Detection**

D 46 (Diss. Universität Bremen)

Shaker Verlag
Aachen 2018

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., 2017

Copyright Shaker Verlag 2018

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 978-3-8440-5877-2

ISSN 2366-276X

Shaker Verlag GmbH • P.O. BOX 101818 • D-52018 Aachen

Phone: 0049/2407/9596-0 • Telefax: 0049/2407/9596-9

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

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Arbeitsbereich Nachrichtentechnik an der Universität Bremen.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Armin Dekorsy, der mir die Promotion in einem überaus interessantem Thema ermöglichte. Zweifelsohne boten mir die durch ihn anvertrauten Forschungsvorhaben viel Potential innovative Ideen umzusetzen. Ich bedanke mich dafür, dass mir bei der Umsetzung dieser Ideen stets große Eigenverantwortung übertragen wurde. Ganz besonders hervorzuheben sind die zahlreichen Diskussionen sowie die wertvollen Anregungen, die mir dabei halfen, meine eigenen Forschung voranzutreiben. Auch für die Unterstützung, meine Forschungsergebnisse in renommierten internationalen Konferenzen zu präsentieren, bedanke ich mich. Es freut mich ganz besonders, dass Prof. Dr.-Ing. Armin Dekorsy in den richtigen Momenten die Initiative ergriff, Teile dieser Arbeit zum Patent anzumelden.

Besonderer Dank gilt auch Herrn Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. Norbert Görtz von der Technischen Universität Wien für das rege Interesse an meiner Arbeit und für die Übernahme des Zweitgutachtens. Herrn Prof. Dr.-Ing. Karl-Dirk Kammeyer und Frau Prof. Dr.-Ing. Anna Förster bin ich für ihre Tätigkeit als Prüfer verbunden.

Für das überaus freundschaftliche und konstruktive Arbeitsumfeld am Arbeitsbereich Nachrichtentechnik bedanke ich mich bei meinen ehemaligen Kollegen. Ganz besonders hervorzuheben ist dabei die Verbindung zu Dr.-Ing. Carsten Bockelmann, der mein Arbeit fachlich begleitete. Er war es, der mir in zahlreichen Diskussionen immer wieder neue Impulse und Richtungen zeigte. Darüberhinaus nahm er sich bei allen Fragen stets die nötige Zeit, diese präzise und umfänglich zu beantworten. Den Herren Matthias Woltering und Dr.-Ing. Florian Lenkeit gilt mein ganz besonderer Dank für die zahlreichen fachlichen Diskussionen, die meine Arbeit zweifelsohne bereicherten. Ganz besonders hervorzuheben ist dabei die freundschaftliche

Zusammenarbeit mit Herrn Matthias Woltering, auf der ein wesentlicher Teil dieser Arbeit aufbaut. Ihm sowie Herrn Yalei Ji, Herrn Ban-Sok Shin sowie Herrn Tobias Schnier verdanke ich die sorgsame Durchsicht dieser Arbeit. Darüberhinaus bedanke ich mich bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Finanzierung meiner Forschungstätigkeit.

Ohne den Rückhalt, den ich durch meine Familie und Freunde erfahren habe, wäre ich nicht dort, wo ich nun stehe. Ihnen verdanke ich zu einem großen Teil das Gelingen meiner Dissertation. Großer Dank gilt dabei meiner Frau Julia, die mich gerade zum Ende meiner Dissertation unverzichtbar unterstützte.

Bremen, November 2017

Fabian Monsees

Contents

1	Introduction	1
1.1	State of the Art and Open Challenges	3
1.2	Objectives of this Thesis	5
1.3	Contribution and Structure of this Thesis	6
1.4	Notation	9
2	M2M Communication and Compressed Sensing Multiuser Detection	11
2.1	Overview	11
2.2	Sporadic Machine to Machine Uplink Communication	12
2.2.1	Augmented Modulation alphabet and Traffic Model	12
2.2.2	Channel and Wireless Transmission Model	14
2.3	Compressed Sensing Multiuser Detection	16
2.3.1	Direct Random Access	16
2.3.2	Resource Efficiency	17
2.3.3	Compressed Sensing Basics	19
2.3.4	Compressed Sensing for Communications	22
2.4	Activity Errors in CS-MUD	23
2.4.1	Definition of Error Measures	23
2.4.2	Definition of Bit and Frame Error Rate	25
2.4.3	Impact of Activity Errors	25
2.4.4	The False Alarm SNR Loss	27
2.5	Chapter Summary	28
3	Optimal Activity Error Rate Control	31
3.1	Overview	31
3.2	Relevant Publications and Scientific Classification	33
3.3	The Activity Log-Likelihood Ratio	34
3.3.1	Setup	34
3.3.2	Symbol-By-Symbol Activity Log Likelihood Ratio	34

3.3.3	Frame-Based activity Log-Likelihood Ratio	37
3.4	Activity LLR based Decision Rules	39
3.4.1	The Maximum-a-Posteriori Decision Rule	39
3.4.2	The Bayes-Risk Decision Rule	42
3.4.3	Impact on Subsequent Data Detection	47
3.4.4	The Neyman-Pearson Decision Rule	49
3.5	Tree Search Algorithms for Finite Alphabet Compressed Sensing	57
3.5.1	Tree Search for Under-Determined Systems	61
3.5.2	Performance Evaluation	63
3.5.3	Complexity Analysis	65
3.6	Chapter Summary	69
4	Graphical Models for CS-MUD	71
4.1	Overview	71
4.2	Relevant Publications and State of the Art	73
4.3	Message Passing	75
4.3.1	Transmission and Node Model	75
4.3.2	The Multiuser Detector	75
4.3.3	The Approximated Multiuser Detector	80
4.3.4	The Frame Belief Propagation	83
4.3.5	Repetition Code Decoder and Data Detection	90
4.3.6	Data Detection and Activity Estimation	91
4.3.7	Sparsity Pattern Equalization and Channel Code	92
4.4	Performance Evaluation	96
4.4.1	Pareto Optimality of the Activity LLRs	99
4.4.2	Random Sequence vs. Direct Sequence Spreading	100
4.5	Chapter Summary	101
5	Multiuser Energy Detection	103
5.1	Overview	103
5.2	Problem Statement and State of the Art	105
5.2.1	Energy Detection	106
5.2.2	Multiple Measurement Vector Compressed Sensing	107
5.3	Multiuser Energy Detection	108
5.4	Concepts for Multiuser Energy Estimation	110
5.4.1	Matrix Matching Pursuit	110
5.4.2	Multiple Signal Classification (MUSIC)	111
5.4.3	Approximate MAP Energy Estimation	114
5.5	Performance Evaluation	121
5.5.1	Performance in AWGN Channels	122
5.5.2	Performance in Fading Channels	126

5.6	Chapter Summary	132
6	Multi-Carrier Compressed Sensing Multiuser Detection	133
6.1	Overview	133
6.2	Relevant Publications and State of the Art	134
6.3	Problem Statement	135
6.4	The MCSM System Concept	136
6.4.1	Key Technology Components	137
6.4.2	Specification of MCSM Node Processing	139
6.4.3	Resource Efficient Time-Frequency Mapping	141
6.4.4	Base-Station Processing	142
6.4.5	Robustness to Asynchronous Transmissions	144
6.4.6	MCSM Parametrization	146
6.5	Simulative Performance Verification	148
6.5.1	Phase Transition Diagrams	150
6.5.2	Performance over the SNR	150
6.5.3	Time-Frequency Diversity	154
6.5.4	The Data-Rate Bandwidth Trade-Off	157
6.5.5	Asynchronous Transmissions	158
6.6	Verification via Lyrtech Hardware Platform	160
6.6.1	Lyrtech Hardware Demonstration Platform	160
6.6.2	Description of the Testbed	161
6.6.3	Measurement Setup	163
6.6.4	Results and Discussion	164
6.7	Chapter Summary	170
7	Summary	171
A	Appendix	177
A.1	Proof of the Bayes-Risk	177
A.2	Proof of the Neyman Pearson Problem	179
A.2.1	Convergence	180
A.3	Mean and Variance of Θ	181
	Acronyms	185
	List of Symbols	189
	Bibliography	193