

Dennis Wieruch

Compressive Sensing based Dynamic Spectrum Access for Interference-Networks

Band 10

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



Compressive Sensing based Dynamic Spectrum Access for Interference-Networks

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

vorgelegt dem Fachbereich 1 (Physik/Elektrotechnik)

der Universität Bremen

von

Dipl.-Ing. Dennis Wieruch

Tag des öffentlichen Kolloquiums:	25. Juni 2021
Gutachter der Dissertation:	Prof. Dr.-Ing. A. Dekorsy Prof. Dr.-Ing. A. Sezgin
Weitere Prüfer:	Prof. Dr. A. Förster Dr. rer. nat. P. Jung, Guest Prof.



Universität
Bremen

Berlin, August 2021

Dissertationen aus dem Arbeitsbereich Nachrichtentechnik der
Universität Bremen

Band 10

Dennis Wieruch

**Compressive Sensing based Dynamic Spectrum
Access for Interference-Networks**

D 46 (Diss. Universität Bremen)

Shaker Verlag
Düren 2021

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., 2021

Copyright Shaker Verlag 2021

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 978-3-8440-8208-1

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

Vorwort

Diese Arbeit ist meinem Vater gewidmet.

Die vorliegende Dissertation entstand unter anderem während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Drahtlose Kommunikation und Netze am Fraunhofer Heinrich-Hertz-Institut.

Mein besonderer Dank gilt Dr. rer. nat. Peter Jung, der mich nicht nur in das Forschungsfeld von Compressive Sensing einführte, sondern mich auch während meiner Forschungsarbeit immer unterstützte, und zum Abschluss als Prüfer fungierte. Weiterhin gilt mein besonderer Dank Prof. Dr.-Ing. Armin Dekorsy, der mir ermöglichte im Arbeitsbereich Nachrichtentechnik an der Universität Bremen als externer Doktorand zu promovieren, und mir besonders in den letzten Zügen meiner Arbeit durch detailliertes und konstruktives Feedback zu der jetzt vorliegenden Fassung verhalf.

Außerdem möchte ich auch Prof. Dr.-Ing. Aydin Sezgin von der Ruhr-Universität Bochum für sein Interesse an meiner Forschungsarbeit und die Übernahme des Zweitgutachtens danken. Prof. Dr. Anna Förster bin ich für ihre Tätigkeit als Prüfer verbunden.

Weiterhin möchte ich allen Weggefährten am Fraunhofer HHI sowie im Arbeitsbereich Nachrichtentechnik an der Universität Bremen für den konstruktiven und fachlichen Austausch sowie das freundschaftliche Arbeitsumfeld danken. Besonders hervorheben möchte ich dabei meinen langjährigen Kollegen und Freund Bernd Holfeld. Der Austausch und die zahlreichen fachlichen Diskussionen haben meine Arbeit sehr bereichert.

Abschließend möchte ich meiner gesamten Familie, insbesondere meinen beiden Kindern Liana und Nevian, meiner Frau Lisa und meiner Mutter, danken, welche mich immer unterstützt und an mich geglaubt haben. Ohne deren Unterstützung und Rückhalt wäre ich heute nicht da, wo ich jetzt bin.

Berlin, August 2021

Dennis Wieruch

Contents

Contents	VII
1 Introduction	1
1.1 Objectives	2
1.2 Thesis Structure and Contributions	3
1.3 Notation	6
2 Dynamic Spectrum Access	9
2.1 Overview and Contributions	9
2.2 Spectrum Sensing	10
2.3 Channel Models	13
2.4 Transmission Model	17
2.5 Binary Hypothesis Testing	20
2.5.1 Neyman-Pearson Lemma	23
2.5.2 Karlin-Rubin Theorem	24
2.5.3 Constant False Alarm Rate Property	26
2.6 Signal Detection	27
2.6.1 Simple Log-Likelihood Ratio Test	32
2.6.2 One-Sided Composite Log-Likelihood Ratio Test . . .	36
2.7 Summary	41
3 Compressed Sensing	43
3.1 Overview and Contributions	43
3.2 Sparsity	44
3.3 Linear Systems	46
3.4 Recovery Criteria	50
3.4.1 Null Space Property	52
3.4.2 Mutual Coherence	54
3.4.3 Restricted Isometry Property	54
3.5 Estimation Algorithms	56

3.5.1	Reduced-Rank Least Squares	56
3.5.2	Basis Pursuit Denoising	61
3.5.3	Orthogonal Matching Pursuit	64
3.6	Partial Fourier Measurements	66
3.6.1	Pilot-Based Channel Estimation	69
3.6.2	Amplitude-Based Channel Estimation	72
3.7	Summary	80
4	Gray Space Detection	83
4.1	Overview	83
4.1.1	Main Contributions	83
4.1.2	Structure	85
4.2	System Model	86
4.3	Detection Procedure	90
4.3.1	Step 1: Energy Detection	93
4.3.2	Step 2: Amplitude-Based Channel Estimation	95
4.3.3	Step 3: Log-Likelihood Ratio Test	99
4.4	Simulation Setup	104
4.5	Performance Evaluation	105
4.5.1	Receiver Operating Characteristic	106
4.5.2	Impact of SNR	108
4.5.3	Impact of System Load	109
4.5.4	Impact of Blocksize	110
4.5.5	Impact of Threshold Estimation	111
4.6	Practical Channel	114
4.6.1	Measurement Campaign	114
4.6.2	Representative Channel Models	118
4.6.3	Impact of Channel Model	121
4.7	Summary	122
5	Allocation Map Retrieval	125
5.1	Overview	125
5.1.1	Main Contributions	125
5.1.2	Structure	126
5.2	System Model	127
5.2.1	Channel Transfer Function Measurements	132
5.2.2	Spectral Channel Power Measurements	133
5.2.3	General Measurements	134
5.3	Combinatorial Complexity	137
5.4	Problem Analysis	141
5.4.1	Unlabeled Sensing	143

5.4.2	Related Subproblems	147
5.4.3	Unlabeled Selection Sensing	148
5.4.4	Problem of Multiple Selections	149
5.5	Objective Function	150
5.5.1	Exchange of Arbitrary Element	151
5.5.2	Mixing of Sparse Signals	153
5.5.3	Joint Estimate	154
5.6	Simulative Analysis	155
5.6.1	BPDN	157
5.6.2	OMP	159
5.6.3	Noisy Measurements	161
5.6.4	Spectral Channel Power Measurements	163
5.7	Structured Allocation Map	165
5.8	Results	168
5.9	Summary	173
6	Summary	175
A	Probability Distributions	181
A.1	Normal Distribution	183
A.2	Complex Normal Distribution	185
A.3	Circularly-Symmetric Complex Normal Distribution	186
A.4	Chi Distribution	186
A.5	Rayleigh Distribution	187
A.6	Chi-Squared Distribution	188
A.7	Gamma Distribution	190
A.8	Non-Central Chi-Squared Distribution	194
A.9	Scaled Non-Central Chi-Squared Distribution	195
	Acronyms	201
	Notation	205
	List of Symbols	207
	Own Publication List	215
	Bibliography: Books	219
	Bibliography	231
	Index	233