

Yalei Ji

# Joint PHY and MAC Layer Perspective for Compressed Sensing in Wireless Communications

Band 11

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



# Joint PHY and MAC Layer Perspective for Compressed Sensing in Wireless Communications

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

*Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)*

vorgelegt dem Fachbereich 1 (Physik/Elektrotechnik)

der Universität Bremen

von

M.Sc. Yalei Ji

Tag des öffentlichen Kolloquiums: 23. März 2022  
Gutachter der Dissertation: Prof. Dr.-Ing. Armin Dekorsy  
Prof. Dr. Rodrigo C. de Lamare  
Weitere Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Martin Schneider  
Prof. Dr.-Ing. Steffen Paul



München, April 8, 2022



Dissertationen aus dem Arbeitsbereich Nachrichtentechnik der  
Universität Bremen

Band 11

**Yalei Ji**

**Joint PHY and MAC Layer Perspective for  
Compressed Sensing in Wireless Communications**

D 46 (Diss. Universität Bremen)

Shaker Verlag  
Düren 2022

**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., 2022

Copyright Shaker Verlag 2022

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 978-3-8440-8595-2

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](http://www.shaker.de) • e-mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

# Preface

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

Zuerst möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. A. Dekorsy herzlich dafür danken, dass er meine Promotion in einem überaus interessantem Thema ermöglicht hat. Hierbei sind die hilfreiche Betreuung während meiner Zeit im Arbeitsbereich sowie die zahlreichen Diskussionen und wertvollen Anregungen hervorzuheben. Ausdrücklicher Dank gilt auch Herrn Prof. Dr. Rodrigo C. de Lamare von der Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro für die Übernahme des Zweitgutachtens und seine wertvollen Anmerkungen dieser Arbeit. Ebenfalls herzlich bedanken möchte ich mich bei den Herrn Prof. Dr.-Ing. Martin Schneider und Prof. Dr.-Ing. Steffen Paul für ihre Tätigkeit als Prüfer.

Für das sehr freundschaftliche und konstruktive Arbeitsumfeld am Arbeitsbereich Nachrichtentechnik über die Jahre 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 hilfreiche Vorschläge und neue Richtungen zeigte. Zusätzlich möchte ich den Herrn Dr.-Ing. Henning Schepker, Dr.-Ing. Fabian Monsees und Dr.-Ing. Meng Wu dafür danken für zahlreiche fachliche Diskussionen und Anregungen. Darüber hinaus danke ich der Europäischen Union (EU) für die Finanzierung meiner Forschungstätigkeit.

Zuletzt möchte ich mich herzlichst bei meiner Familie und meinen Eltern bedanken. Ohne ihren Rückhalt hätte ich die Promotion bestimmt nicht geschafft. Mein großer Dank gilt meiner Frau M. Xiang, die mich meiner

Doktorarbeit immer unverzichtbar unterstützte.

München, April 8, 2022

Yalei Ji

# Contents

<b>Preface</b>	<b>III</b>
<b>1 Introduction</b>	<b>1</b>
1.1 State-of-the-Art and Motivation . . . . .	1
1.2 Thesis Origin and Main Focus . . . . .	3
1.3 Main Contributions . . . . .	3
1.4 Thesis Structure . . . . .	5
1.5 Conventions and Nomenclature . . . . .	7
<b>2 Fundamentals and Preliminaries</b>	<b>9</b>
2.1 Overview . . . . .	9
2.1.1 Main Contribution of this Chapter . . . . .	9
2.1.2 Chapter Structure . . . . .	9
2.2 Machine Type Communication . . . . .	10
2.2.1 Background . . . . .	10
2.2.2 Characteristics of mMTC . . . . .	10
2.2.3 Direct Random Access . . . . .	12
2.3 System Configurations and Assumptions . . . . .	14
2.3.1 MAC Layer Configuration . . . . .	15
2.3.2 Downlink Transmission . . . . .	16
2.3.3 Uplink Transmission . . . . .	17
2.4 Compressed Sensing Multi-User Detection . . . . .	22
2.4.1 Basic Principle . . . . .	23
2.4.2 Reconstruction Algorithms . . . . .	23
2.5 Chapter Summary . . . . .	25
<b>3 Analysis of CS-MUD towards mMTC Characteristics</b>	<b>27</b>
3.1 Overview . . . . .	27
3.1.1 Main Contribution of this Chapter . . . . .	27
3.1.2 Chapter Structure . . . . .	29



3.2	Investigation of Traffic Models . . . . .	29
3.2.1	Problem Formulation . . . . .	30
3.2.2	Sparsity Aware Sphere Detector . . . . .	34
3.2.3	Numerical Evaluation . . . . .	44
3.3	Coping with Imperfect CSI . . . . .	49
3.3.1	Baseline Scenario . . . . .	52
3.3.2	Joint Estimation with Successive IC . . . . .	53
3.3.3	Numerical Evaluation . . . . .	56
3.4	Physical Layer Performance Approximation of CS based MUD . . . . .	59
3.4.1	Physical Layer System Description . . . . .	59
3.4.2	Problem Description . . . . .	61
3.4.3	Replica Symmetric Decoupling with Finite Alphabet . . . . .	62
3.4.4	Tuning for non-Gaussian Matrix $\mathbf{T}$ . . . . .	64
3.4.5	Activity & Data Estimation . . . . .	65
3.4.6	Numerical Evaluation . . . . .	66
3.5	Chapter Summary . . . . .	72
<b>4</b>	<b>Joint Analysis of CS-MUD and Coded Slotted ALOHA</b> . . . . .	<b>73</b>
4.1	Overview . . . . .	73
4.1.1	Main Contribution of this Chapter . . . . .	73
4.1.2	Chapter Structure . . . . .	74
4.2	Extended System Model . . . . .	75
4.3	Capture Effect in Joint CS-MUD based PHY and Coded SA based MAC . . . . .	76
4.3.1	Capture Effect of CS-MUD based PHY Layer . . . . .	76
4.3.2	And-Or Evaluation of Coded SA with CS-MUD based Capture Effect . . . . .	82
4.3.3	Numerical Evaluation . . . . .	88
4.4	Link Level Verification of CS-MUD based PHY Layer with Coded SA . . . . .	89
4.4.1	Transmission and Reception . . . . .	91
4.4.2	Numerical Evaluation . . . . .	95
4.4.3	Performance Results . . . . .	103
4.5	Chapter Summary . . . . .	107
<b>5</b>	<b>Performance Evaluation of CS-MUD with One-Stage Access</b> . . . . .	<b>109</b>
5.1	Overview . . . . .	109
5.1.1	Relevant Publications and Contributions . . . . .	110
5.1.2	Chapter Structure . . . . .	110
5.2	System Configuration . . . . .	110
5.2.1	Extended System Model . . . . .	111

---

5.2.2	Parameterizations . . . . .	111
5.3	Combining CS-MUD with One-Stage Access Protocol . . . . .	113
5.3.1	Slotted ALOHA based One-Stage Access with CS-MUD	115
5.4	Numerical Evaluation . . . . .	116
5.4.1	Key Performance Metrics . . . . .	116
5.4.2	Methodology . . . . .	117
5.4.3	Performance Results . . . . .	119
5.5	Chapter Summary . . . . .	124
<b>6</b>	<b>Summary</b>	<b>125</b>
<b>A</b>	<b>Basics of Related Topics</b>	<b>129</b>
A.1	Multi-User Detection . . . . .	129
A.1.1	Maximum A Posteriori . . . . .	129
A.1.2	Linear Detectors . . . . .	131
A.1.3	Nonlinear Detector . . . . .	132
A.2	Compressed Sensing . . . . .	136
A.2.1	Sparse Signals . . . . .	136
A.2.2	Basic Principle . . . . .	136
A.2.3	Sparse Signal Recovery . . . . .	137
A.3	Coded Slotted ALOHA . . . . .	140
A.4	Replica Analysis under Large System Limit . . . . .	141
A.4.1	Replica Analysis of MAP Estimation . . . . .	143
	<b>Acronyms</b>	<b>149</b>
	<b>List of Symbols</b>	<b>153</b>
	<b>Bibliography</b>	<b>158</b>
	<b>Index</b>	<b>167</b>