

Tobias Schnier

Acquisition and Reconstruction of Compressed Signals with Applications in Wireless Neural Systems

Band 6

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



Acquisition and Reconstruction of Compressed Signals with Applications in Wireless Neural Systems

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

vorgelegt dem Fachbereich 1 (Physik/Elektrotechnik)

der Universität Bremen

von

M.Sc. Tobias Schnier

Tag des öffentlichen Kolloquiums:	February 8, 2019
Gutachter der Dissertation:	Prof. A. Dekorsy Prof. E. J. King
Weitere Prüfer:	Prof. P. Maass Prof. A. Garcia-Ortiz



Bremen, February 24, 2019

Dissertationen aus dem Arbeitsbereich Nachrichtentechnik der
Universität Bremen

Band 6

Tobias Schnier

**Acquisition and Reconstruction of Compressed
Signals with Applications in Wireless Neural Systems**

D 46 (Diss. Universität Bremen)

Shaker Verlag
Aachen 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 978-3-8440-6593-0

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

Preface

Diese Arbeit ist im Rahmen meiner Tätigkeit als Doktorand am Arbeitsbereich Nachrichtentechnik an der Universität Bremen entstanden.

Zuerst möchte ich mich bei meinem Doktorvater Prof. Dr. Armin Dekorsy herzlich für die Ermöglichung der Promotion bedanken. Insbesondere das hohe Interesse an meiner wissenschaftlichen Arbeit war nicht selbstverständlich und hat mir immer das Gefühl gegeben, einen echten Mehrwert für die Wissenschaft zu erreichen. Als zweites möchte ich mich bei meiner Zweitgutachterin Prof. Dr. Emily King aus dem Zentrum für Technomathematik für die mathematische Überprüfung meiner Arbeit bedanken. Den Herrn Prof. Dr. Maass und Prof. Dr. Garcia-Ortiz bin ich für ihre Tätigkeit als Prüfer verbunden. Ich danke der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die finanzielle Unterstützung meiner Promotion.

Ich möchte meinen Kollegen im Arbeitsbereich Nachrichtentechnik für die angenehme Arbeitsatmosphäre und viele anregende wissenschaftliche Gespräche danken. Insbesondere danke ich Dr. Carsten Bockelmann durch seine herausragende Betreuung und sein tiefes Verständnis der wissenschaftlichen Inhalte meiner Arbeit. Aufgrund zahlreicher Diskussionen mit Herrn Bockelmann sind viele neue Ideen entstanden und die daraus resultierenden Publikationen massgeblich verbessert worden. Des Weiteren bedanke ich mich für den Ideen-Austausch mit Dr. Fabian Monsees, Dr. Henning Schepker und M.Sc. Yalei Ji, die alle im Feld Compressed Sensing gearbeitet haben.

Zuletzt möchte ich meiner Familie und Ehefrau danken, die durch finanzielle und emotionale Unterstützung die tatsächliche Fertigstellung dieser Promotion erst möglich gemacht haben.

Februar 2019

Tobias Schnier

Contents

1	Introduction	1
1.1	Motivation	1
1.2	Goals and Main Contribution	4
1.3	Structure	6
1.4	Notation	7
2	Mathematical Introduction	9
2.1	Overview/Motivation	9
2.1.1	Introduction	9
2.1.2	Structure	9
2.2	Compressed Sensing	10
2.2.1	Introduction	10
2.2.2	Mathematical Basis	10
2.3	Finite Rate of Innovation	15
2.3.1	Introduction	15
2.3.2	Mathematical Basics	15
2.3.3	Common Signals of FRI	16
2.4	Dictionary Learning	18
2.4.1	Introduction	18
2.4.2	Mathematical Basics	18
2.5	Conclusion	21
3	Joint Sparsity Models	23
3.1	Overview/Motivation	23
3.1.1	Introduction	23
3.1.2	Main Contribution of this Chapter	24
3.1.3	Structure	24
3.2	State of the Art Models	24
3.2.1	Sparse Common Component Plus Innovations	25
3.2.2	Common Sparse Support (MMV)	27

3.2.3	Time Delay	28
3.3	Multi Channel Model	29
3.3.1	Coherence	33
3.3.2	Restricted Isometry Property	35
3.4	Neural Joint Sparsity Model	38
3.4.1	CS System Model	40
3.4.2	FRI System Model	46
3.4.3	Formal Definition	48
3.5	Conclusion	50
4	CS Algorithms	51
4.1	Overview/Motivation	51
4.1.1	Introduction	51
4.1.2	Main Contribution of this Chapter	52
4.1.3	Structure	52
4.2	State of the Art Algorithms	52
4.2.1	OMP	53
4.2.2	IHT	53
4.2.3	SL0	54
4.3	RSCS	55
4.3.1	Main Algorithm Design	55
4.3.2	Comparison to Other CS Algorithms	62
4.4	Conclusion	66
5	FRI Algorithms	67
5.1	Overview/Motivation	67
5.1.1	Introduction	67
5.1.2	Main Contribution of this Chapter	67
5.1.3	Structure	68
5.2	State of the Art Algorithms	68
5.2.1	Annihilating Filter	68
5.2.2	Dealing With Noise	71
5.2.3	Reconstruction of Periodic Streams of Diracs	72
5.2.4	Reconstruction of Polynomial Splines	73
5.3	Reconstruction of Exponential and Sinusoidal Splines	75
5.3.1	Main Algorithm Design	75
5.3.2	Comparison to Other FRI Algorithms	81
5.4	Connection Between FRI And CS	86
5.5	Conclusion	86
6	Dictionary Learning Algorithms	87
6.1	Overview/Motivation	87

6.1.1	Introduction	87
6.1.2	Main Contribution of this Chapter	88
6.1.3	Structure	89
6.2	State of the Art Algorithms	89
6.2.1	MOD	89
6.2.2	K-SVD	90
6.2.3	ERSpuD	93
6.2.4	Analysis Side Algorithms	95
6.3	SparkDict	95
6.3.1	Main Algorithm Design	95
6.3.2	Numerical Issues	100
6.3.3	Comparison to Other DL Algorithms	100
6.4	Compressive Dictionary Learning	105
6.4.1	Main Algorithm Design	105
6.4.2	Comparison to Standard DL Algorithms	110
6.5	Conclusion	113
7	Joint Reconstruction	115
7.1	Overview/Motivation	115
7.1.1	Introduction	115
7.1.2	Main Contribution of this Chapter	116
7.1.3	Structure	116
7.2	Adaption of RSCS to State of the Art Joint Sparsity Models	117
7.2.1	JSM-2	117
7.2.2	JSM-1	117
7.2.3	Time Delay	118
7.3	Reconstruction of the Neural Joint Sparsity Model	118
7.3.1	Compressed Sensing	118
7.3.2	Localization	119
7.3.3	Finite Rate of Innovation	122
7.4	Numerical results	126
7.4.1	Introduction	126
7.4.2	Compressed Sensing	126
7.4.3	Finite Rate of Innovation	131
7.4.4	Comparison of CS and FRI	134
7.4.5	Inclusion of Dictionary Learning	137
7.5	Conclusion	137
8	Summary	139
8.1	Open questions	141
	List of Symbols	143

List of Figures	145
Acronyms	151
Bibliography	152