

High Efficiency LDPC Coded Modulation

von der Fakultät
für Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität Dortmund
genehmigte

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften

von
Stefan Neuhaus, geb. Nowak
Dortmund, 2013

Tag der mündlichen Prüfung: 09. Oktober 2013

Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Kays

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Joachim Speidel

Dortmunder Beiträge zur Kommunikationstechnik

Band 9

Stefan Neuhaus

High Efficiency LDPC Coded Modulation

D 290 (Diss. Technische Universität Dortmund)

Shaker Verlag
Aachen 2014

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.: Dortmund, Technische Univ., Diss., 2013

Copyright Shaker Verlag 2014

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 978-3-8440-2551-4

ISSN 1863-9054

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 Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Kommunikationstechnik der Technischen Universität Dortmund.

Dem Inhaber des Lehrstuhls, Herrn Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Kays, möchte ich an dieser Stelle einen besonderen Dank dafür aussprechen, dass er diese Arbeit ermöglicht, betreut und begutachtet hat. Durch seine fachlichen Hinweise und seinen menschlichen Rat hat er in vielen anregenden Diskussionen erheblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Des Weiteren danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Joachim Speidel vom Institut für Nachrichtenübertragung an der Universität Stuttgart für das Interesse an dieser Arbeit und die Übernahme des Korreferats.

Ich bedanke mich außerdem bei allen Kolleginnen und Kollegen, studentischen Hilfskräften und allen weiteren Studierenden am Lehrstuhl, die durch ihren Einsatz und ihre Hilfsbereitschaft, durch fachliche Diskussionen und nicht zuletzt durch ein tolles Arbeitsklima in nicht unerheblichem Maße zum Entstehen dieser Arbeit beigetragen haben. Sie alle haben meine Tätigkeit am Lehrstuhl zu einer unvergesslichen Zeit gemacht.

Ich bedanke mich bei meiner Mutter Susanne und meinem leider viel zu früh verstorbenen Vater Volker dafür, dass sie stets an mich geglaubt und mich auf meinem Werdegang begleitet und unterstützt haben.

Mein ganz besonderer Dank gilt an dieser Stelle meiner Frau Elena, auf deren Unterstützung ich in guten wie in schlechten Zeiten vertrauen konnte. Ich danke ihr für die unermessliche Geduld und das Verständnis während der Anfertigung dieser Arbeit.

Dortmund, im Oktober 2013

Stefan Neuhaus

Das Gefährlichste an der Technik ist,
dass sie ablenkt von dem,
was den Menschen wirklich ausmacht,
von dem, was er wirklich braucht.

ELIAS CANETTI (1905-1994)

Contents

Notation	xv
Abstract	xxix
Kurzfassung	xxxi
1 Introduction	1
1.1 Motivation	1
1.2 A Short History of Coding for Reliable Communication . .	3
1.3 Outline and Contributions	7
2 Fundamentals and Basic Concepts	9
2.1 System Model	9
2.1.1 Digital Communication System	9
2.1.2 Channel Model	10
2.1.3 Channel Capacity	15
2.2 Channel Coding	19
2.2.1 Block Codes	19
2.2.2 Performance Figures	20
2.2.3 Decision Rules	21
2.3 Approaches to Coded Modulation	23
2.3.1 Trellis-Coded Modulation	23
2.3.2 Multilevel Coding	25
2.3.3 Bit-Interleaved Coded Modulation	28
2.3.4 Demapper Equations for BICM(-ID)	31
2.3.5 Discussion	35
2.4 Properties of Higher-Order Modulation	36
2.5 Conclusion	38
3 Low-Density Parity-Check Codes	39
3.1 Basics	39
3.2 Graphical Representation	41
3.3 Degree Distributions	43
3.4 Code Classification and Construction	45
3.4.1 Irregular Repeat-Accumulate Codes	46
3.4.2 Quasi-Cyclic LDPC codes	48
3.4.3 Progressive Edge Growth Algorithm	49
3.4.4 ACE algorithm	51

3.4.5	Further Code Designs	52
3.5	Decoding	54
3.5.1	Sum-Product Algorithm	54
3.5.2	Min-Sum Algorithm	56
3.5.3	Algorithmic Summary	57
3.5.4	Evaluation and Comparison	59
3.6	Analysis and Optimization of LDPC Codes	60
3.6.1	Basic Principle	61
3.6.2	Density Evolution	61
3.6.3	EXIT Charts	64
3.6.4	Code Optimization	70
3.6.5	Area Property of EXIT Charts	72
3.7	Finite-Length Issues	73
3.7.1	Cycles and Iteration Numbers	74
3.7.2	Near Codewords, Trapping Sets, Pseudocodewords	75
3.8	Unequal Error Protection Properties	79
3.9	System Examples	82
3.9.1	DVB-x2	82
3.9.2	IEEE 802.11n	84
3.9.3	Exemplary LDPC Matrices	86
3.10	Conclusion	91
4	EXIT Charts for LDPC Coded Higher-Order Modulation	93
4.1	Introduction	93
4.1.1	Related Work	93
4.2	Bit-Level Capacities	96
4.3	Elementary EXIT Functions and Mapping Distributions	97
4.4	Mapping Distributions	99
4.5	Analysis of Trivial Interleavers	101
4.5.1	Trivial Interleavers	101
4.5.2	Analysis and Discussion	106
4.6	Conclusion	109
5	Bit-Interleaved LDPC Coded Modulation	111
5.1	Introduction	111
5.2	From Trivial Interleavers to a Heuristic Approach	113
5.2.1	Variable Node Connectivity Metric	114
5.2.2	Heuristic Approach	114
5.2.3	Results	116
5.3	Optimized Mapping Distributions for Short LDPC Codes	117
5.3.1	Short LDPC codes	117
5.3.2	Undetected Codeword Errors	119
5.3.3	Optimization Approach	121
5.3.4	Results	122

5.4	Interleaver Design for Bit-Interleaved LDPC Coded Modulation	126
5.4.1	Model Deviation	126
5.4.2	Optimization Approach	128
5.4.3	Results	129
5.5	Conclusion	131
6	Symbol-Based LDPC Coded Modulation	135
6.1	Introduction	135
6.2	LDPC Codes over $GF(2^s)$	135
6.2.1	Overview	135
6.2.2	Construction	136
6.2.3	Decoding	137
6.2.4	Regular and Irregular Parity-Check Matrices	137
6.3	Mapping and Demapping Strategies	138
6.3.1	Symbol-Based Mapping	139
6.3.2	Symbol-Based Demapping	140
6.4	Results and Discussion	141
6.4.1	Exemplary LDPC codes	141
6.4.2	System Model	143
6.4.3	Discussion	144
6.5	Conclusion	149
7	Approaches to High Efficiency LDPC Coded Modulation	151
7.1	Iterative Demapping	152
7.1.1	Application of LDPC codes	152
7.1.2	Suitable Bit Mappings	153
7.1.3	Iterative Demapping of Higher-Order Modulation	155
7.1.4	Accuracy of the EXIT Chart Analysis	156
7.1.5	Adapted Interleaver Optimization	157
7.1.6	Iteration Schedules	159
7.2	Signal Shaping	161
7.2.1	Maximum Shaping Gain	161
7.2.2	Approaches to Signal Shaping	161
7.2.3	Non-Uniform Signal Constellations	162
7.2.4	Bit-Level Capacity	165
7.3	Capacity Considerations	165
7.4	Results and Discussion	166
7.4.1	Competitive Approaches to LDPC Coded Modulation	167
7.4.2	Evaluation and Discussion	167
7.5	Conclusion	179
8	Conclusion and Outlook	181

References	185
-------------------	------------

Curriculum Vitae	203
-------------------------	------------