

Advanced Receiver Structures for Vehicular Communications

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

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften

von

Robert Budde

Dortmund, 2015

Tag der mündlichen Prüfung: 24.04.2015

Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Kays
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Andreas Czylwik

Dortmunder Beiträge zur Kommunikationstechnik

Band 12

Robert Budde

**Advanced Receiver Structures
for Vehicular Communications**

D 290 (Diss. Technische Universität Dortmund)

Shaker Verlag
Aachen 2015

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., 2015

Copyright Shaker Verlag 2015

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 978-3-8440-3810-1

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.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Andreas Czyliwki, Leiter des Fachgebiets Nachrichtentechnische Systeme an der Universität Duisburg-Essen, danke ich für sein Interesse an dieser Arbeit und für die Übernahme des Korreferats. Darüber hinaus möchte ich mich bei allen Kollegen, studentischen Hilfskräften und allen anderen Studierenden am Lehrstuhl bedanken, die durch ihren Einsatz, durch interessante Diskussionen und nicht zuletzt durch das jederzeit sehr gute Arbeitsklima den Raum für ein erfolgreiches Arbeiten geschaffen haben. Die Arbeit am Lehrstuhl wurde so zu einer wichtigen, wertvollen Erfahrung.

Mein besonderer Dank gilt meiner Familie. Allen voran meiner Frau Ina, die neben unseren zwei Kindern, der eigenen Berufstätigkeit und dem zwischenzeitlichen Hausbau mir die Motivation und Zeit gab, meine Arbeit zu vollenden, ebenso meinen zwei Töchtern Johanna und Emma, deren Fröhlichkeit der stärkste Antrieb war. Zudem möchte ich meinen Eltern danken, die mich stets auf meinem Werdegang begleitet und unterstützt haben.

Dortmund, im Juni 2015

Robert Budde

Contents

Notation	ix
Abstract	xv
Kurzfassung	xvii
1 Introduction	1
1.1 Motivation	1
1.2 Outline	3
2 Car-2-X Communication	7
2.1 Applications	7
2.1.1 Reliability Requirements	8
2.2 ITS G5 Access Layer	9
2.2.1 Physical Layer Parameters	10
2.2.2 Channel Estimation	12
2.2.3 Demapping and Decoding	14
2.2.4 Data Link Layer	15
2.3 Vehicular Channel	17
2.3.1 Scenarios	18
2.3.2 Channel Modeling	20
2.3.3 Channel Characteristics	29
3 Algorithms for Wireless Communications	33
3.1 Channel Estimation	33
3.1.1 Shortcomings of IEEE 802.11p	34
3.1.2 Alternative Pilot Patterns	34
3.1.3 Decision-Directed Estimation	36
3.1.4 Decision Feedback Estimation	38
3.1.5 Differential Encoding	39
3.2 Filtering	39
3.2.1 Pilot Interpolation	39
3.2.2 Noise Reduction	43
3.3 Spatial Diversity	45
3.3.1 Combining Strategies	46
3.4 Improved Forward Error Correction	48

4 Advanced Receiver Structures	49
4.1 Design Considerations	49
4.1.1 Standard Compatibility	49
4.1.2 Computational Complexity	51
4.1.3 Energy Efficiency	52
4.2 Decision Feedback Design	52
4.2.1 Delayed Decision Feedback Estimation	56
4.3 Adaptive Filtering	58
4.3.1 Complexity Optimization	62
5 Performance Evaluations	63
5.1 Simulation Environment	63
5.1.1 Channel Modeling	66
5.2 Evaluation Metrics	69
5.2.1 Packet Error Ratio	69
5.2.2 Mean Squared Error	69
5.3 Decision Feedback Equalization	70
5.3.1 AWGN	73
5.3.2 Channel Model CM1	75
5.3.3 Channel Model CM3	79
5.4 Varying Vehicular Channels and Data Rates	81
5.4.1 Vehicular Channel Models	82
5.4.2 Mandatory Data Rates	83
5.5 Adaptive Noise Reduction	84
5.6 Delayed Decision Feedback and Turbo Estimation	89
5.7 Spatial Diversity	92
5.8 Proposed Receiver Structure	97
6 Summary and Conclusion	101
6.1 Outlook	103
Bibliography	105
List of Publications	111
A Additional Results	113
A.1 Complementary Results	113
A.2 Time Domain Filtering	113
A.3 Alternative Pilot Patterns	119