

Concepts for Reliable and Time-critical Industrial Communication Based on IR-UWB Systems

von der Fakultät

Elektrotechnik und Informationstechnik

der Technischen Universität Dortmund

genehmigte

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften

von

Rafael Reinhold

Dortmund, 2015

Tag der mündlichen Prüfung: 09.12.2015

Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Kays

Korreferent: Prof. Dr.-Ing Rolf Kraemer

Dortmunder Beiträge zur Kommunikationstechnik

Band 13

Rafael Reinhold

**Concepts for Reliable and Time-critical Industrial
Communication Based on IR-UWB Systems**

D 290 (Diss. Technische Universität Dortmund)

Shaker Verlag
Aachen 2016

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 2016

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 978-3-8440-4232-0

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

Diese Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Kommunikationstechnik der Technischen Universität Dortmund im Zeitraum von 2009 bis 2015. Die Arbeit beinhaltet Forschungsergebnisse, die ich während dieses Zeitraums gewonnen habe.

An erster Stelle möchte ich meinen besonderen Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. R. Kays aussprechen, der diese Arbeit ermöglicht, betreut und begutachtet hat. Die vielen wertvollen Diskussionen haben maßgeblich zum Gelingen dieser Dissertation beigetragen.

Des Weiteren bedanke ich mich bei Rolf Kraemer, Inhaber des Lehrstuhls Systeme des Instituts für Informatik an der BTU Cottbus-Senftenberg und Abteilungsleiter System Design des Leibniz-Instituts für innovative Mikroelektronik (IHP) in Frankfurt (Oder), für das Interesse an meiner Arbeit und für die Übernahme des Korreferats.

Zudem bedanke ich mich bei allen Kolleginnen und Kollegen, studentischen Hilfskräften und weiteren Studierenden des Lehrstuhls für Kommunikationstechnik, die durch ihren Einsatz, durch fachliche Diskussionen sowie durch ein hervorragendes Arbeitsklima zu der Entstehung dieser Arbeit beigetragen haben.

Mein besonderer Dank gilt meiner Freundin Vera für ihre Geduld und ihre Unterstützung während der Durchführung dieser Arbeit sowie meiner Mutter, die mir mein Studium ermöglicht und mich stets unterstützt hat.

Rafael Reinhold

Contents

1	Introduction	1
1.1	Outline	3
2	Application Scenario and Requirements	5
2.1	Overview on the Application Scenario	5
2.2	Requirement Analysis	8
2.3	Evaluation Methodology	9
2.3.1	Evaluation Criteria	9
2.3.2	Parametrization of the MAC and PHY Evaluation	12
2.3.3	Evaluation Scenario	13
3	Fundamentals and Basic Concepts	15
3.1	State-of-the-Art Wireless Transmission Systems for Industrial Automation	15
3.1.1	IEEE 802.15.4-based Systems	16
3.1.2	IEEE 802.15.1-based Systems	16
3.1.3	Additional Proprietary Systems	17
3.2	Characterization of the UWB Transmission Channel in Industrial Environments	17
3.2.1	Channel Models	18
3.2.2	Channel Measurements	21
3.3	Ultra-Wideband Systems	30
3.3.1	UWB Definition	30
3.3.2	Regulation Requirements	31
3.3.3	UWB Signaling Techniques	31
3.3.4	IEEE 802.15.4 IR-UWB System	34
3.3.5	Basic Receiver Concepts	43
3.4	Media Access Procedures	55
3.4.1	Random Access	55
3.4.2	Polling	57
3.4.3	Reservation	58
3.4.4	Hybrid Access	58
3.4.5	MAC for UWB	59
3.4.6	Conclusion	60

4	System Enhancements and Optimizations of the IEEE 802.15.4 IR-UWB Physical Layer	61
4.1	Related Work	62
4.2	System Verification	64
4.3	Evaluation of the Standard-compliant PHY in Case of the AWGN Channel	66
4.3.1	Sliding Correlation Receiver	69
4.3.2	Soft-Decision Correlation Receiver	69
4.4	Synchronization Procedures	71
4.4.1	2-Stage Synchronization Procedure	71
4.4.2	Preselection of the Synchronization Window based on CAMDF	73
4.4.3	Synchronization Based on a Clean Template	80
4.5	Conclusion and Outlook	85
5	Enhanced Frequency Hopping Transceiver at the 5.8 GHz Band	89
5.1	Regulation Requirements	89
5.2	System Architecture	90
5.3	eFHSS Algorithm	91
5.4	Evaluation of the Proposed FHSS System at 5.8 GHz	93
5.4.1	Theoretical Analysis of the Performance	94
5.4.2	Evaluation Results	95
5.4.3	Comparison with the IEEE 802.15.4 IR-UWB PHY	98
5.5	Conclusion and Outlook	100
6	Real-time Capable Media Access	103
6.1	Related Work	103
6.2	Temporal Analysis of the IEEE 802.15.4 Standard	105
6.2.1	IEEE 802.15.4 IR-UWB PHY	105
6.2.2	IEEE 802.15.4e LLDN MAC	108
6.3	Aggregated Low Latency MAC	111
6.3.1	Adjustment of the Operating Point in the Evaluation	112
6.4	Conception of the Registration	113
6.4.1	Evaluation	116
6.5	Conception of the Standard Operation	119
6.5.1	Partial Aggregation	122
6.5.2	Retransmission Mechanism	124
6.5.3	Evaluation	125
6.6	Conception of the Emergency Stop Mechanism	132
6.6.1	Evaluation	133
6.7	Conclusion and Outlook	136
7	Conclusion and Outlook	139

A Annex	143
A.1 MATLAB Simulation Environment	143
A.1.1 Integration of the IEEE 802.15.4a Channel Model in the Simulation Environment	145
List of Abbreviations	149
List of Operators, Functions and Symbols	155
Bibliography	167
Author's Publications	183
Author's Supervised and Relevant Theses	185
Curriculum Vitae	187