

Analysis and Optimization of Wireless Control Networks for Smart Home Applications

von der Fakultät

Elektrotechnik und Informationstechnik

der Technischen Universität Dortmund

genehmigte

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften

von

Nils Ottomar Langhammer

Dortmund, 2012

Tag der mündlichen Prüfung: 26.09.2012

Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Kays

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Christian Wietfeld

Dortmunder Beiträge zur Kommunikationstechnik

Band 6

Nils Langhammer

**Analysis and Optimization of Wireless Control
Networks for Smart Home Applications**

D 290 (Diss. Technische Universität Dortmund)

Shaker Verlag
Aachen 2012

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Dortmund, Technische Univ., Diss., 2012

Copyright Shaker Verlag 2012

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-1413-6

ISSN 1863-9054

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 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 im Zeitraum von 2007 bis 2012. Ich freue mich mit dieser Arbeit einen Beitrag zu dem Anwendungsgebiet der Hausautomatisierung und der dazugehörigen Vernetzung liefern zu können. Die Arbeit beinhaltet die Ergebnisse meiner Forschungsaktivitäten, die ich während dieses Zeitraumes gewonnen habe.

Ich möchte Herrn Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Kays dafür danken, dass er diese Arbeit ermöglicht, betreut und begutachtet hat. Die jederzeit sehr wertvollen Diskussionen haben maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Insbesondere möchte ich sein immer sehr schnelles Feedback zu neuen Ideen und Ergebnissen hervorheben.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Christian Wietfeld vom Lehrstuhl für Kommunikationsnetze danke ich sehr für das Interesse an meiner Arbeit und für die Übernahme des Korreferates.

Des Weiteren möchte ich mich bei allen Kollegen, studentischen Hilfskräften und allen anderen Studierenden am Lehrstuhl bedanken, die durch ihren Einsatz, durch anregende Diskussionen und ein jederzeit sehr gutes Arbeitsklima ebenfalls zu der Entstehung dieser Arbeit beigetragen haben.

Mein besonderer Dank gilt meiner Frau Kerstin für ihr Verständnis und die Geduld während der Anfertigung meiner Arbeit. Zudem möchte ich meinen Eltern danken, dass sie mir das Studium ermöglicht haben und mich jederzeit in allen Belangen unterstützt haben.

Nils Langhammer

Contents

Vorwort	iii
Notation	xv
Definitions	xix
Abstract	xxi
Kurzfassung	xxiii
1. Introduction	1
1.1. Outline	2
2. Application Scenario and Requirements	3
2.1. Overview on the Application Scenario	3
2.1.1. Smart Grid Energy Systems	4
2.1.2. Smart Home Communication Architecture	5
2.2. Smart Home and Home Automation Network Requirements	7
2.3. Evaluation Scenarios	10
2.3.1. Flat	10
2.3.2. Multi Dwelling Unit	12
2.3.3. Two Story Detached House	14
2.4. Regulatory Requirements	17
3. Basic Aspects of Wireless Data Transmission	19
3.1. General Evaluation Model	19
3.2. Generic Data Transmission Chain	21
3.3. Indoor Coverage Range	22
3.4. Wireless Indoor Channel	24
3.4.1. Indoor Channel Model	24
3.4.2. Modeling of Slow Fading in Residential Indoor Environments	25
3.4.3. Model Comparison and Verification	32
3.4.4. Impact of the Transmission Frequency	34
3.5. Multiplex and Use of Spectrum	35
3.5.1. Single Carrier (SC) Data Transmission	36
3.5.2. Spread Spectrum Data Transmission	37
3.6. Modeling Timing and Transceiver Energy Consumption	39

3.6.1.	Wireless Transceiver Energy and Timing Model	40
3.6.2.	Generic I/Q Transceiver Architecture	42
3.6.3.	Generic FSK Transmitter Architecture	44
3.6.4.	Relationship between Transmission Power and Power Amplifier	45
3.6.5.	Relationship between Transmission Power, Power Consumption and Coverage Range	47
3.7.	Derivation of an Objective Performance Comparison Metric	49
3.8.	Packet Length	51
4.	Wireless State-of-the-Art Technologies and Systems	53
4.1.	Overview on Available Systems and Standards	53
4.2.	IEEE 802.15.4	54
4.3.	Konnex-RF and Wireless M-Bus	59
4.4.	Bluetooth Low Energy (LE)	64
4.5.	IEEE 802.11g / WLAN	67
4.6.	Summary of PHY and MAC Parameters	69
4.7.	Electrical Characteristics of State-of-the-Art Wireless Transceivers	71
4.7.1.	Energy Consumption during Transceiver States	71
4.7.2.	Efficiency of Power Amplifier	73
5.	Performance Evaluation	75
5.1.	Simulation Methodology	75
5.2.	Coverage Range	77
5.2.1.	Free Space Transmission	77
5.2.2.	Reliable Indoor Coverage Range under Multipath Propagation	79
5.3.	Energy Consumption	81
5.3.1.	Systems operating at 868 MHz	81
5.3.2.	Systems operating at 2.4 GHz	83
5.4.	Scenario Evaluation	85
5.4.1.	Flat	86
5.4.2.	Multi Dwelling Unit	87
5.4.3.	Two Story Detached House	89
5.5.	Impact of Duty-Cycle Requirements	91
5.6.	Conclusion	92
6.	Optimization and Enhancements	95
6.1.	General Analysis of DSSS and FHSS Operation in the 2.4 GHz ISM Band	95
6.2.	PHY Modifications of IEEE 802.11g	98
6.2.1.	General System Architecture	98
6.2.2.	Proposed PHY Modifications	101
6.2.3.	Transmitter Implementation Concepts	103
6.2.4.	Receiver Implementation Concepts	104
6.2.5.	Evaluation and Discussion	106
6.2.6.	Conclusion	109

6.3. Reliable Interconnection of Low Power Smart Home Devices	111
6.3.1. General Functionality and Device States	111
6.3.2. Enhanced Frequency Hopping (eFHSS)	114
6.3.3. Evaluation and Comparison with Bluetooth LE	118
6.3.4. Evaluation in Dynamic Indoor Channels	121
6.3.5. Connection Setup and Synchronization Concepts	126
6.3.6. Conclusion and Future Work	133
7. Summary and Conclusion	137
7.1. Outlook and Future Work	139
Bibliography	141
Author's Publications	149
A. Evaluated Wireless Transceiver Chipsets	151
B. Additional Simulation Results	153
C. Demodulation of 2-FSK	155
C.1. General Characteristics of 2-FSK	155
C.2. Noncoherent Demodulation of 2-FSK	157
C.3. Synchronous Demodulation of 2-FSK	161
C.4. Noncoherent Demodulation of 2-FSK with wM-Bus S-mode Parameters .	163
Curriculum Vitae	165