## Generalized Frequency Division Multiplexing in the Two-Way-Relay Channel

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.) der Fakultät für Informatik und Elektrotechnik der Universität Rostock

vorgelegt von

Stephan Schedler geb. am 18.06.1986 in Rostock

Rostock, den 03.03.2016

#### Stephan Schedler

Generalized Frequency Division Multiplexing in the Two-Way-Relay Channel

Tag der Einreichung: 03.03.2016 Tag der öffentlichen Verteidigung: 15.07.2016

#### Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Kühn Universität Rostock, Fakultät für Informatik und Elektrotechnik

Prof. Dr.-Ing. habil. Tobias Weber Universität Rostock, Fakultät für Informatik und Elektrotechnik

Prof. Dr.-Ing. Armin Dekorsy Universität Bremen, Arbeitsbereich Nachrichtentechnik

### Universität Rostock

Institut für Nachrichtentechnik Fakultät für Informatik und Elektrotechnik Richard-Wagner-Str. 31, Haus 8 18057 Rostock (Warnemünde) Berichte aus der Elektrotechnik

Stephan Schedler

### Generalized Frequency Division Multiplexing in the Two-Way-Relay Channel

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.: Rostock, Univ., Diss., 2016

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 978-3-8440-4793-6 ISSN 0945-0718

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 für einen Freund, der viel zu früh ging

### ABSTRACT

The increasing demand for data traffic has driven the development of current mobile communication standards 3G and 4G. Future mobile radio standards might have additional demands, e.g. influenced by *Internet of Things*. Even if the objectives of the 5G have not yet been defined, there is an increasing demand for even larger data rates, much larger number of devices, longer battery life-time, increased robustness, and significantly reduced latency. The methods to meet such requirements are currently discussed. Due to the strong sensitivity to distortions, many research projects propose to abandon conventional orthogonal multi carrier schemes. Instead, non-orthogonal waveforms might be utilized. Even if non-orthogonal schemes lead to additional interference, a proper choice of non-orthogonal prototype filters and an appropriate scheme to treat interference can outperform conventional orthogonal schemes.

Within this thesis the fundamental benefit of the good localization of the Gaussian waveform in cooperative wireless networks has been addressed. The application of the Gaussian impulse shape is proposed to decrease the susceptibility to synchronization offsets in cooperative wireless networks with more than two nodes. Considering interference as additional noise, mutual information for the multiple access phase of a physical layer network coding system is analyzed for Gaussian as well as discrete input alphabets, and different detection schemes at the relay. Afterwards it is shown for the point-to-point as well as the two way relay channel that the impact of carrier frequency and timing offsets in an orthogonal system can be reduced significantly if the Gaussian waveform is used instead of a rectangular prototype filter. If the non-orthogonal system is disturbed by synchronization offsets, the robustness of the Gaussian waveform ensures that the degradation of the system performance is significantly smaller than in the orthogonal system. However, the gain in robustness comes at the expense of a performance degradation in the synchronized case. To improve the performance of the non-orthogonal system basically three approaches are considered.

First, additional interference caused by the nonorthogonal waveform is treated by a linear equalizer at the receiver. As significant interference is restricted to direct neighbors, the application of a small equalizer is suggested to treat only the interference that is caused by direct neighbors. The second approach allocates transmit powers according to instantaneous channel conditions such that the rate is maximized subject to feasibility and individual power constraints. Even if the primal optimization problem is non-convex, several approaches are presented that convert the problem into a series of convex optimization problems that again can be solved by dual decomposition or general purpose solvers. Based on results found by the power allocation, a third strategy is motivated. In general, the system performance of the non-orthogonal system is limited by the interference caused by neighboring impulses. The basic idea is to limit the interference in the first place by adjusting the spacing in time and frequency such that the system is no longer interference limited. Contrary to the orthogonal system, where impulse positions in the time frequency grid are implicitly given by the shape of the impulse, positions can be chosen almost arbitrarily for the Gaussian waveform. Compared to laborious optimization of power allocation, computational effort to adjust the impulse positions is significantly lower. Finally, the combination of the optimization of impulse positions, power allocation that ignores interference, as well as a (small) linear equalizer leads to most promising results.

### KURZFASSUNG

Die zunehmende Nachfrage nach immer höheren Datenraten hat die Entwicklung der aktuellen mobilen Kommunikationsstandards 3G und 4G angetrieben. Zukünftige Mobilfunkstandards haben möglicherweise zusätzliche Anforderungen, beeinflusst z.B. durch *Internet of Things* (engl. Internet der Dinge). Selbst wenn die tatsächlichen Ziele von 5G noch nicht definiert worden sind, gibt es einen steigenden Bedarf nach noch größere Datenraten, einer viel größeren Anzahl von Geräten, längeren Akkulaufzeiten, erhöhter Robustheit und erheblich reduzierter Latenz. Die Methoden, um diese Anforderungen zu erfüllen werden zur Zeit diskutiert. Durch die starke Empfindlichkeit gegenüber Störungen, schlagen viele Forschungsprojekte vor auf herkömmliche orthogonale Mehrträgerverfahren zu verzichten. Stattdessen könnten nicht orthogonale Impulsformen verwendet werden. Auch wenn nicht orthogonale Systeme zu zusätzlicher Interferenz führen, können nicht orthogonale Ansätze klassische orthogonale Verfahren durch eine geeignete Wahl von Sendefiltern und durch die geeignete Behandlung der zusätzlichen Interferenz übertreffen.

Diese Arbeit befasst sich mit dem grundlegenden Vorteil der guten Lokalisierung des Gaußimpulses in kooperativen drahtlosen Netzwerken. Die Verwendung des Gaußimpulses wird vorgeschlagen, um die Anfälligkeit für Synchronisationsoffsets in kooperativer drahtlosen Netzwerken mit mehr als zwei Knoten zu verringern. Durch die Betrachtung von Interferenz als zusätzliches Rauschen, wird die Transinformation der Mehrfachzugriffsphase in einem Physical-Layer-Network-Coding System für gaußverteilte und diskrete Modulationsalphabete, sowie für verschiedene Detektionsschemas am Relay untersucht. Anschließend wird sowohl für eine Punkt-zu-Punkt-Verbindung als auch für den Zwei-Wege-Relay-Kanal gezeigt, dass die Auswirkungen von Trägerfrequenzoffsets und zeitlichen Offsets deutlich reduziert werden kann, wenn ein Gaußimpuls anstelle eines rechteckigen Sendefilters verwendet wird. Verglichen mit einem orthogonalen System, ermöglicht die gesteigerte Robustheit durch den Gaußimpuls eine deutlich geringere Verschlechterung der Leistungsfähigkeit durch Synchronisierungsfehler. Die verbesserte Robustheit geht jedoch zu Lasten der Leistungsfähigkeit im perfekt synchronisierten Fall. Zur Verbesserung der Leistungsfähigkeit des nicht orthogonalen Systems werden im Wesentlichen drei Ansätze betrachtet.

Zunächst wird die zusätzliche Interferenz der nicht orthogonalen Impulsform durch einen linearen Entzerrer am Empfänger behandelt. Da sich die signifikante Interferenz auf benachbarte Impulse beschränkt, wird die Verwendung eines Entzerrers geringer Komplexität vorgeschlagen, sodass nur die Störungen, welche durch direkte Nachbarn hervorgerufen wurden, behandelt werden. Der zweite Ansatz ist die Allokation der Sendeleistungen in Abhängigkeit von den momentanen Kanalbedingungen, sodass die Summenrate für individuellen Leistungsbeschränkungen maximiert wird. Selbst wenn das eigentliche Optimierungsproblem nicht-konvex ist, werden mehrere Ansätze vorgestellt, die das eigentliche Problem in eine Reihe von mehreren konvexen Optimierungsproblemen zerlegen. Diese wiederum können dann durch die duale Methode oder durch die Verwendung von Standart-Algorithmen gelöst werden. Basierend auf den Ergebnissen der Leistungsallokation, wird eine dritte Strategie motiviert. Grundsätzlich ist die Leistungsfähigkeit des nicht orthogonalen Systems durch die Interferenz durch benachbarter Impulse begrenzt. Die Grundidee ist daher, die Impulsabstände in Zeit und Frequenz derart zu wählen, dass das System gerade nicht länger interferenzbegrenzt ist. Im Gegensatz zum orthogonalen System in welchem die Impulspositionen implizit durch die Impulsform vorgegeben werden, können die Impulspositionen im nicht orthogonalen System nahezu beliebig gewählt werden. Im Vergleich zu der aufwendigen Optimierung der Leistungsallokationen, ist der Rechenaufwand die optimalen Impulspositionen zu bestimmen deutlich geringer. Abschließend wird daher die Kombination aus der Optimierung der Impulspositionen, einer Leistungsallokation welche Interferenzen ignoriert und eines (kleinen) linearen Entzerrers für das nicht orthogonale System vorgeschlagen, welche zu den vielversprechendsten Ergebnissen führt.

# CONTENTS

At	ostract / Kurzfassung	v
1.	Introduction	1
	1.1. Motivation	1
	1.2. Outline and Contributions	2
2.	Fundamentals of Digital Communication	5
	2.1. Basic Transmission System	5
	2.2. Multiple Access / Multiplexing	6
	2.3. Wireless Channel Model	7
	2.4. Relay Systems	8
3.	Generalized Frequency Division Multiplexing for the Point-to-Point Link	11
	3.1. System Model	12
	3.1.1. Matrix Representation	15
	3.1.2. Equalizer	16
	3.2. Waveforms	17
	3.3. Quality Indicator Functions	21
	3.4. Numerical Results	26
4.	Generalized Frequency Division Multiplexing for the Two-Way-Relay	31
	4.1. Two-Way-Relay Channel	31
	4.2. System Model	33
	4.3. Decode and Forward Relaying Strategies	36
	4.3.1. Parallel Separate Channel Decoding (PSCD)	37
	4.3.2. Successive Separate Channel Decoding (SSCD)	40
	4.3.3. Joint Channel decoding and Network Coding (JCNC)	41
	4.3.4. Generalized Joint Channel decoding and Network Coding (G-JCNC)	45
	4.4. Numerical Results	47
5.	Power Allocation in the Two-Way-Relay Channel	51
	5.1. Simplified Problem Description	53

5.2.	Maximize Signal to Interference and Noise Ratio (SINR)	55
	5.2.1. Minimum Signal to Interference and Noise Ratio (SINR)	55
	5.2.2. Average Signal to Interference and Noise Ratio (SINR)	56
5.3.	Maximize Mutual Information	60
	5.3.1. Generalized Power Allocation Problem	60
	5.3.2. Ignore Interference	62
	5.3.3. Iterative Interference	62
	5.3.4. Differential Convex Algorithm	64
	5.3.5. Signomial Programming	66
	5.3.6. Branch and Bound for Differential Convex Functions	70
	5.3.7. Gradient Descent Method	75
	5.3.8. Numerical Results for Simplified Channel Model	76
	5.3.9. Numerical Results for Dispersive TWR Channel	80
	5.3.10. Summary	85
5.4.	Power Allocation for Discrete Input Alphabets	85
	5.4.1. Ignore/Iterative Interference	86
	5.4.2. Gradient Descent Method	86
	5.4.3. Alternating Power Allocation	87
	5.4.4. Numerical Results	89
6. Latt	ice Spacing	91
6.1.	Influence of Lattice Spacing	91
	6.1.1. Point-to-Point	91
	6.1.2. Two-Way-Relay Channel	94
6.2.	Optimal Lattice Spacing	95
	6.2.1. Point-to-Point	96
	6.2.2. Two-Way-Relay Channel	103
6.3.	Summary	106
7. Con	clusions and Outlook	109
7.1.	Conclusions	109
7.2.	Outlook	111
		110
A. Line	ar Equalizer for the Two-Way-Relay	113
B. Tan	h Approximations for Joint Channel Decoding	115
C. Con	vex Optimization Problems	117
C.1.	Differential Convex Problem	118
C.2.	Ignore Interference	121
	C.2.1. Parallel Separate Channel Decoding	122
	C.2.2. Joint Channel decoding and Network Coding	123
	C.2.3. Generalized Joint Channel decoding and Network Coding	123

C.2.4. Mercury Waterfilling	124	
D. Separation of Interference Terms		
E. Approximation of Sum Power Series		
F. Optimal High SNR Spacing	131	
Bibliography		
Abbreviations		
Symbols		