

Multi-Dimensional Channel Estimation for MIMO-OFDM

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften
(Dr.-Ing.)
der Technischen Fakultät
der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

vorgelegt von

Christopher Kniesel

Kiel 2014

Tag der Einreichung: 28.10.2013

Tag der Disputation: 02.07.2014

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Peter Adam Höher
Prof. Dr. Sc. Techn. Bernard H. Fleury
Prof. Dr.-Ing. Armin Dekorsy

Digital Communications

Christopher Knievel

**Multi-Dimensional Channel Estimation
for MIMO-OFDM**

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.: Kiel, Univ., Diss., 2014

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 978-3-8440-3070-9

ISSN 1860-7535

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 Imke, Joona und Levi

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Arbeitsgruppe für Informations- und Codierungstheorie der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Adam Höher, der diese Arbeit betreut hat und mir die Freiheit in der Ausgestaltung der Forschungsschwerpunkte gegeben hat. Für das Interesse an dieser Arbeit und die Übernahme des Korreferats danke ich Herrn Prof. Dr. Sc. Techn. Bernard H. Fleury und Herrn Prof. Dr.-Ing. Armin Dekorsy. Ebenso danke ich dem Vorsitzenden der Promotionskommission Prof. Dr.-Ing. habil Thomas Meurer sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Werner Rosenkranz.

Insbesondere bedanke ich mich bei Dr. Gunther Auer der mir in vielen Diskussionen wertvolle Anregungen gab, die diese Arbeit nachhaltig beeinflusst haben. Ferner danke ich Dr. Alexander Tyrrell, Dr. Petra Weitkemper und Dr. Hidekazu Taoka für die fachlichen Diskussionen, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen und zu vielen fruchtbaren Ideen geführt haben.

Weiterhin möchte ich mich bei allen Kollegen der Arbeitsgruppe für Informations- und Codierungstheorie und der Arbeitsgruppe für Digital Signal Processing and System Theory bedanken, die zu einer angenehmen Arbeitsatmosphäre beigetragen haben. Besonders hervorzuheben sind Meelis Noemm, Rebecca Adam, Dr. Kathrin Schmeink, Gilbert Forkel und Christian Lütke, die sich bei dieser Arbeit und Veröffentlichungen die Zeit genommen haben, diese zu lesen und Korrekturen einzubringen.

Schließlich danke ich in besonderer Weise meinen Eltern, die mir das Studium der Elektrotechnik ermöglicht haben und mich immer nach besten Kräften unterstützt haben, meinem Bruder Lennart für das Lesen der Arbeit, sowie meiner Frau Imke für ihre stete Unterstützung.



Kiel, im August 2014

Christopher Knievel

Kurzfassung

DIE DIGITALE drahtlose Kommunikation begann in den 1990er Jahren mit der zunehmenden Verbreitung von GSM. Seitdem haben sich Mobilfunksysteme drastisch weiterentwickelt. Aktuelle Mobilfunkstandards nähern sich dem Ziel eines omnipräsenten Kommunikationssystems an und erfüllen damit den Wunsch mit jedem Menschen zu jeder Zeit an jedem Ort kommunizieren zu können. Heutzutage ist die Akzeptanz von Smartphones und Tablets immens und das mobile Internet ist die zentrale Anwendung. Ausgehend von dem momentanen Wachstum wird das Datenaufkommen in Mobilfunk-Netzwerken im Jahr 2020, im Vergleich zum Jahr 2010, um den Faktor 1000 gestiegen sein und 100 Exabyte überschreiten.

Unglücklicherweise ist die verfügbare Bandbreite beschränkt und muss daher effizient genutzt werden. Schlüsseltechnologien, wie z.B. Mehrantennensysteme (multiple-input multiple-output, MIMO), orthogonale Frequenzmultiplexverfahren (orthogonal frequency-division multiplexing, OFDM) sowie weitere MIMO Codierverfahren, vergrößern die theoretisch erreichbare Kanalkapazität und kommen bereits in der Mehrheit der Mobilfunkstandards zum Einsatz. Auf der einen Seite verspricht MIMO-OFDM erhebliche Diversitäts- und/oder Kapazitätsgewinne. Auf der anderen Seite steigt die Komplexität der optimalen Maximum-Likelihood Detektion exponentiell und ist infolgedessen nicht haltbar. Zusätzlich wächst der benötigte Mehraufwand für die Kanalschätzung mit der Anzahl der verwendeten Antennen und reduziert dadurch die Bandbreiteneffizienz. Iterative Empfänger, die Datendetektion und Kanalschätzung im Verbund ausführen, sind potentielle Wegbereiter um den Mehraufwand des Trainings zu reduzieren und sich gleichzeitig der maximalen Kapazität mit geringerem Aufwand anzunähern.

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein graphenbasierter Empfänger für iterative Datendetektion und Kanalschätzung entwickelt. Der vorgeschlagene multidimensionale Faktor Graph führt sogenannte Transferknoten ein, die die Korrelation benachbarter Kanalkoeffizienten in beliebigen Dimensionen, z.B. Zeit, Frequenz und Raum, ausnutzen. Hierdurch wird eine einfache und flexible Empfängerstruktur realisiert mit deren Hilfe weiche Kanalschätzung und Datendetektion in mehrdimensionalen, dispersiven Kanälen mit beliebiger Modulation und Codierung durchgeführt werden kann. Allerdings weist der Faktograph suboptimale Schleifen auf. Um die maximale Performance zu erreichen, wurde neben dem Ablauf des Nachrichtenaustausches und des Vorgangs zur Kombination von Nachrichten auch die Initialisierung speziell angepasst. Im Gegensatz zu herkömmlichen Methoden, bei denen mehrere Knoten zur Vermeidung von Schleifen zusammengefasst werden, verringern die vorgeschlagenen Methoden die leistungsmindernde Effekte von Schleifen, erhalten aber zugleich die geringe Komplexität des Empfängers. Zusätzlich wird ein neuartiger Detektionsalgorithmus vorgestellt, der baumbasierte Detektionsalgo-

rithmen mit dem sogenannten Gauss-Detektor verknüpft. Der resultierende baumbasierte Gauss-Detektor (Gaussian tree search detector) lässt sich ideal in das graphenbasierte Framework einbinden und verringert weiter die Gesamtkomplexität des Empfängers. Zusätzlich wird Particle Swarm Optimization (PSO) zum Zweck der initialen Kanalschätzung untersucht. Der biologisch inspirierte Algorithmus ist insbesondere wegen seiner schnellen Konvergenz zu einem akzeptablen MSE und seiner vielseitigen Abstimmungsmöglichkeiten auf eine Vielzahl von Optimierungsproblemen interessant. Da PSO keine a priori Informationen benötigt, ist er speziell für die Initialisierung geeignet. Sowohl ein kooperativer Ansatz für PSO für Antennensysteme mit extrem vielen Antennen als auch ein multi-objective PSO für Kanäle, die in Zeit und Frequenz dispersiv sind, werden evaluiert.

Die Leistungsfähigkeit des multidimensionalen graphenbasierten iterativen Empfängers wird mit Hilfe von Monte Carlo Simulationen untersucht. Die Simulationsergebnisse werden mit denen eines dem Stand der Technik entsprechenden Empfängers verglichen. Es wird gezeigt, dass ähnliche oder bessere Ergebnisse mit geringerem Aufwand erreicht werden.

Eine weitere ansprechende Eigenschaft von iterativen semi-blinden Kanalschätzern ist, dass der mögliche Abstand von Trainingssymbolen die Grenzen des Nyquist-Shannon Abtasttheorem überschreiten kann. Im Rahmen dieser Arbeit wird eine Beziehung zwischen dem Trainingsabstand und dem Kanalcode formuliert. In Abhängigkeit des gewählten Kanalcodes und der Coderate folgt der maximale Trainingsabstand der vorgeschlagenen “coded sampling bound”.

Stichwörter: Drahtlose Kommunikation, MIMO, OFDM, Graphentheorie, Belief propagation, baumbasierte Detektion, Kanalschätzung, Evolutionäre Algorithmen, Particle Swarm Optimization, Abtasttheorem

Abstract

DIGITAL wireless communication started in the 1990s with the wide-spread deployment of GSM. Since then, wireless systems evolved dramatically. Current wireless standards approach the goal of an omnipresent communication system, which fulfils the wish to communicate with anyone, anywhere at anytime. Nowadays, the acceptance of smartphones and/or tablets is huge and the mobile internet is the core application. Given the current growth, the estimated data traffic in wireless networks in 2020 might be 1000 times higher than that of 2010, exceeding 127 exabyte.

Unfortunately, the available radio spectrum is scarce and hence, needs to be utilized efficiently. Key technologies, such as multiple-input multiple-output (MIMO), orthogonal frequency-division multiplexing (OFDM) as well as various MIMO precoding techniques increase the theoretically achievable channel capacity considerably and are used in the majority of wireless standards. On the one hand, MIMO-OFDM promises substantial diversity and/or capacity gains. On the other hand, the complexity of optimum maximum-likelihood detection grows exponentially and is thus, not sustainable. Additionally, the required signaling overhead increases with the number of antennas and thereby reduces the bandwidth efficiency. Iterative receivers which jointly carry out channel estimation and data detection are a potential enabler to reduce the pilot overhead and approach optimum capacity at often reduced complexity.

In this thesis, a graph-based receiver is developed, which iteratively performs joint data detection and channel estimation. The proposed multi-dimensional factor graph introduces transfer nodes that exploit correlation of adjacent channel coefficients in an arbitrary number of dimensions (e.g. time, frequency, and space). This establishes a simple and flexible receiver structure that facilitates soft channel estimation and data detection in multi-dimensional dispersive channels, and supports arbitrary modulation and channel coding schemes. However, the factor graph exhibits suboptimal cycles. In order to reach the maximum performance, the message exchange schedule, the process of combining messages, and the initialization are adapted. Unlike conventional approaches, which merge nodes of the factor graph to avoid cycles, the proposed message combining methods mitigate the impairing effects of short cycles and retain a low computational complexity. Furthermore, a novel detection algorithm is presented, which combines tree-based MIMO detection with a Gaussian detector. The resulting detector, termed Gaussian tree search detection, integrates well within the factor graph framework and reduces further the overall complexity of the receiver. Additionally, particle swarm optimization (PSO) is investigated for the purpose of initial channel estimation. The bio-inspired algorithm is particularly interesting because of its fast convergence to a reasonable MSE and its versatile adaptation to a variety of optimization problems. It is especially suited

for initialization since no a priori information is required. A cooperative approach to PSO is proposed for large-scale antenna implementations as well as a multi-objective PSO for time-varying frequency-selective channels.

The performance of the multi-dimensional graph-based soft iterative receiver is evaluated by means of Monte Carlo simulations. The achieved results are compared to the performance of an iterative state-of-the-art receiver. It is shown that a similar or better performance is achieved at a lower complexity.

An appealing feature of iterative semi-blind channel estimation is that the supported pilot spacings may exceed the limits given by the Nyquist-Shannon sampling theorem. In this thesis, a relation between pilot spacing and channel code is formulated. Depending on the chosen channel code and code rate, the maximum spacing approaches the proposed “coded sampling bound”.

Keywords: Wireless communications, MIMO, OFDM, graph theory, belief propagation, tree-based detection, channel estimation, evolutionary algorithms, particle swarm optimization, sampling theorem

Contents

1	Introduction	1
1.1	Motivation	1
1.2	Thesis Outline	4
2	Wireless Multi-Antenna Multi-Carrier Technologies	7
2.1	Time-Varying Linear Channels	8
2.1.1	Channel Correlation Functions and Power Spectra	9
2.1.2	Example Correlation Functions	12
2.2	WINNER Channel Model	16
2.3	MIMO Wireless Communications	18
2.3.1	Narrowband MIMO Model	20
2.3.2	Codebook-based Beamforming	21
2.3.3	Large-Scale MIMO Implementations	23
2.4	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing	24
3	State-of-the-Art Receivers for Wireless Systems	27
3.1	Iterative MIMO Detection	28
3.1.1	QR-Based Detection	30
3.1.2	Gaussian Detection	33
3.1.3	Gaussian Tree Search Detection	34
3.1.4	Performance/Complexity Trade-Off	36
3.2	Channel Estimation	40
3.3	Pilot Allocation for MIMO-OFDM Systems	43
3.3.1	Multi-Dimensional Sampling Theorem	43
3.3.2	Pilot Grids for MIMO-OFDM	45
3.4	Combining of Correlated Random Measures	46
3.4.1	Combination of Multiple Correlated Observations	47
3.4.2	Combination of Multiple Correlated Variables	49
3.5	Chapter Summary	53
4	Particle Swarm Optimization	55
4.1	General Overview	56
4.1.1	PSO	57
4.1.2	Cooperative PSO	60
4.1.3	Bare Bones PSO	61

4.1.4	Multi-Objective PSO	62
4.2	Performance Evaluation	66
4.2.1	Flat-Fading Channel	66
4.2.2	Time-Varying Frequency-Selective Channel	70
4.3	Complexity Analysis	79
4.4	Chapter Summary	86
5	Graph-based Soft Iterative Receiver	87
5.1	Receiver Structure and Associated Factor Graph	88
5.1.1	Preliminary Remarks	88
5.1.2	Receiver Structure	89
5.1.3	Soft Channel Estimation	94
5.1.4	Transfer Nodes	96
5.1.5	Information Exchange at Coefficient Nodes	102
5.1.6	Soft Data Detection	103
5.2	Cycles & Scheduling	104
5.3	Correlated Combining	110
5.4	Convergence, Initialization, and Robustness	116
5.4.1	EXIT Chart Analysis	117
5.4.2	Influence of Pilot Grid	124
5.4.3	Influence of A Priori Information	126
5.5	Performance Evaluation of MD-GSIR	129
5.6	Codebook-based Beamforming	134
5.7	Chapter Summary	140
6	Coded Sampling Bound	143
6.1	Fundamentals of Iterative Channel Estimation	145
6.2	Decomposition of the MSE	148
6.3	Maximum Pilot Spacing for Noniterative PACE	149
6.4	Maximum Pilot Spacing for Iterative SBCE	152
6.4.1	MSE Analysis	153
6.4.2	EXIT Chart Analysis	157
6.4.3	Implications for Receiver Design	161
6.5	Chapter summary	163
7	Summary and Conclusions	165
A	Notation	171
B	Parameters of WINNER Channel Models	179
C	Codebook-Based Beamforming	183
D	Own Publications Related to the Thesis	187
	Bibliography	189