

User Pairing for Mobile Communication Systems with OSC and SC-FDMA Transmission

**Benutzerpaarung für Mobilkommunikationssysteme mit
OSC und SC-FDMA Übertragung**

Der Technischen Fakultät der
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
zur Erlangung des Doktorgrades

Doktor-Ingenieur

vorgelegt von

Michael Alexander Ruder

aus Nürnberg

Als Dissertation genehmigt von der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU)

Tag der mündlichen Prüfung:	07.11.2014
Vorsitzende des Promotionsorgans:	Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein
Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Gerstacker Prof. Dr.-Ing. Peter Adam Höher

Erlanger Berichte aus Informations- und Kommunikationstechnik

Band 35

Michael Ruder

**User Pairing for Mobile Communication Systems
with OSC and SC-FDMA Transmission**

Benutzerpaarung für Mobilkommunikationssysteme
mit OSC und SC-FDMA Übertragung

D 29 (Diss. Universität Erlangen-Nürnberg)

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.: Erlangen-Nürnberg, Univ., Diss., 2014

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 978-3-8440-3290-1

ISSN 1619-8506

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

Acknowledgment

First of all, I would like to give my deepest gratitude to my supervisor Prof. Wolfgang Gerstacker, for his patient guidance in my time as his Ph.D. student, his advice and suggestions in uncountable precious discussions, and his prompt responds to all my queries and questions. Furthermore, I am deeply indebted to Prof. Robert Schober for his constant advice, his scientific collaboration during my time as a Ph.D. student, and for providing me with the possibility to work at the Institute for Digital Communications. I would also like to thank Prof. Wolfgang Koch for arousing my interest in wireless communications, his advice in many aspects and for giving me the opportunity to pursue my Ph.D. at the Chair for Mobile Communications. I would like to give thanks to Prof. Peter Adam Höher for his interest in my work.

I gratefully acknowledge the help and advice of the Com-Research team, namely Raimund Meyer, Hans Kalveram, and Frank Obernosterer, for their continuous support of my work and the fruitful discussions. Furthermore, special thanks goes to all my colleagues at the Telecommunications Laboratory for the joyful time I had at the lab, and in particular to Uyen Ly Dang, Andreas Lehmann, Christian Rohde, and Armin Schmidt for numerous discussions.

I dedicate this thesis to my beloved wife Christina and my children Sarah and Johanna, and to my parents for their constant support.

Abstract

The main subject of this thesis is user pairing for mobile communication systems. User pairing in general describes a user selection process, where we choose the users that should transmit on the same time and frequency resource in the same cell. Typically, user pairing is optimized for a prescribed performance criterion, like bit error rate (BER) or achievable data rate. The spectral efficiency of a communication system employing user pairing is thereby increased compared to a system without coordinated pairing. In this thesis, user pairing is considered for two systems and the spectral efficiency gains compared to randomly chosen pairs are shown to be impressive.

The first part of this thesis focuses on downlink transmission with orthogonal sub-channels (OSC). The evolution of the Global System for Mobile Communications (GSM) led to the standardization of Voice services over Adaptive Multi-user channels on One Slot (VAMOS). The aim of VAMOS is to double the spectral efficiency of GSM voice transmission by deliberately transmitting two Gaussian minimum-shift keying (GMSK) signals on the same time and frequency resource in the same cell, while guaranteeing backward compatibility for legacy receivers. The phase of the signal of the second user is rotated by 90° compared to that of the first user, which is referred to as OSC transmission. In this work, downlink OSC transmission is considered, where different transmit powers can be assigned to the two users of an OSC pair.

Advanced receiver architectures are necessary to improve the separability of the users of one pair. Therefore, algorithms for channel estimation, equalization, and interference cancellation for an OSC downlink transmission are investigated in this thesis. Two novel algorithms for joint estimation of the channel and the power imbalance between the users, i.e., the subchannel power imbalance ratio (SCPIR), are proposed. The Cramer-Rao lower bound (CRB) w.r.t. the mean-squared error (MSE) of the joint estimation is derived for the first time for this estimation scenario. A comparison of the MSE of the suggested algorithms with the lower bound given by the CRB exhibits their excellent performance. Moreover, several equalization and interference cancellation algorithms are developed and evaluated via simulations. Furthermore, a novel asynchronous co-channel interference cancellation technique,

based on modeling the equalizer metric by a Generalized Gaussian probability density function (pdf), is proposed.

Additionally, radio resource allocation (RRA) performed by the base station (BS) is considered for OSC transmission. Power allocation as well as user pairing, i.e., the decision which pairs transmit in the same time slot and frequency resource, have to be optimized with the aim to maximize the network capacity. A practical RRA algorithm for OSC transmission is proposed and evaluated by network simulations for a GSM VAMOS network.

Simulation results reveal significant frame error rate (FER) performance gains for the proposed downlink OSC receivers compared to state-of-the-art receiver architectures. Furthermore, simulations of a GSM VAMOS network employing the proposed RRA algorithm jointly with the novel receiver algorithms exhibit a network capacity gain of about 100 % compared to non-OSC transmission.

The second part of this thesis considers the uplink of Long Term Evolution (LTE). In contrast to the downlink of LTE Release 8, where orthogonal frequency-division multiple access (OFDMA) and single user multiple-input multiple-output (MIMO) transmission are employed, the first release of LTE specifies only a single transmit antenna single-carrier frequency-division multiple access (SC-FDMA) transmission for the uplink. To enhance the spectral efficiency in the uplink, a virtual MIMO (V-MIMO) transmission can be employed, where multiple users transmit on the same time and frequency resource. Here, multiple receive antennas at the BS facilitate a separation of the signals of a user pair. By employing the proposed V-MIMO transmission, the spectral efficiency is impressively improved compared to a single-input multiple-output (SIMO) transmission.

Various receiver algorithms for a V-MIMO SC-FDMA transmission are proposed in this thesis to separate the signals of the users of each pair. An algorithm for reference signal based channel interpolation and prediction, which is necessary to obtain channel state information (CSI) for RRA, is presented and an MSE expression for the channel acquisition error is derived. Furthermore, power allocation and beamforming (BF) with quality of service (QoS) requirements are studied for a V-MIMO SC-FDMA transmission and closed form solutions for zero-forcing (ZF) equalization at the receiver are obtained. Simulation results for random user pairs exhibit significant transmit power savings for the BF algorithm compared to constant power allocation for all subcarriers.

Finally, several joint user pairing/grouping and RRA algorithms for SC-FDMA V-MIMO transmission are proposed and studied. First, different criteria for user grouping are introduced. Then user pairing in time and frequency direction are considered. For the latter, we investigate joint user grouping and frequency allocation.

The combinatorial optimization problems for the considered scenarios are stated and novel suboptimal algorithms with reduced complexity are proposed. Furthermore, user pairing with QoS constraints, minimizing the required sum transmit power with or without BF, is investigated. A study of the influence of inaccurate CSI on the user pairing performance concludes the thesis. All proposed algorithms are evaluated via simulation of a V-MIMO SC-FDMA transmission. It is shown that significant performance gains are achieved compared to random user pairing. An exhaustive search would be needed to find the optimal solution to the joint user pairing and frequency allocation problem. However, the proposed suboptimal algorithms provide a close-to-optimum performance as well as a low computational complexity.

Zusammenfassung (in German)

Das zentrale Thema der vorliegenden Arbeit ist die Benutzerpaarung für Mobilkommunikationssysteme. Unter Benutzerpaarung versteht man einen Zuordnungsprozess, bei dem diejenigen Benutzer ausgewählt werden, die zur selben Zeit auf derselben Frequenzressource in derselben Zelle übertragen. Typischerweise wird durch den Einsatz von Benutzerpaarung ein vorgegebenes Gütekriterium, z.B. Bitfehlerwahrscheinlichkeit (BER) oder individuell erreichbare Datenrate optimiert. Die spektrale Effizienz eines Kommunikationssystems das Benutzerpaarung einsetzt kann dabei im Vergleich zu einem System ohne Koordinierung der Benutzer gesteigert werden. In dieser Arbeit wird Benutzerpaarung für zwei unterschiedliche Systeme betrachtet und es werden beachtliche Gewinne bezüglich spektrale Effizienz im Vergleich zu zufälliger Benutzerpaarung nachgewiesen.

Im ersten Teil der Arbeit liegt der Fokus auf der Orthogonal Sub-Channels (OSC) Übertragung im Downlink. Die Weiterentwicklung des Global System for Mobile Communications (GSM) führte zur Standardisierung von Voice Services over Adaptive Multi-user Channels on One Slot (VAMOS). Das Ziel von VAMOS ist die Verdoppelung der spektralen Effizienz durch die gezielte Übertragung von zwei Gaussian Minimum-Shift Keying (GMSK) Signalen zur selben Zeit, auf der gleichen Frequenzressource und in derselben Zelle, wobei die Abwärtskompatibilität für bestehende Empfänger gewährleistet werden muss. Die Phase des Signals des zweiten Benutzers wird dafür um 90° im Vergleich zur Phase des ersten Benutzers verschoben; dieses Verfahren wird als OSC Übertragung bezeichnet. In dieser Arbeit wird OSC Übertragung im Downlink betrachtet, bei der den beiden Benutzern eines Pairs unterschiedliche Sendeleistungen zugewiesen werden können.

Weiterentwickelte Empfängerarchitekturen sind nötig um die Trennbarkeit der Benutzer eines Pairs zu verbessern. Aus diesem Grund werden in dieser Arbeit Algorithmen zur Kanalschätzung, Entzerrung und Interferenzauslöschung für eine OSC Übertragung im Downlink untersucht. Es werden zwei neue Algorithmen für die gemeinsame Kanalschätzung und Schätzung des Leistungsunterschieds der beiden Benutzer, der Subchannel Power Imbalance Ratio (SCPIR), vorgeschlagen. Die untere Schranke für den mittleren quadratischen Schätzfehler (MSE), die Cramer-Rao Bound (CRB), wird für die gemeinsame Kanal- und SCPIR-Schätzung

erstmalig für dieses Schätzproblem hergeleitet. Ein Vergleich des MSE der vorgeschlagenen Algorithmen mit der unteren Schranke in Form der CRB zeigt deren exzellente Leistungsfähigkeit. Des Weiteren werden mehrere Entzerrungs- und Interferenzauslöschungsalgorithmen ausgearbeitet und mit Hilfe von Simulationen evaluiert. Es wird außerdem eine neuartige Interferenzauslöschungstechnik für asynchrone Gleichkanalinterferenz vorgeschlagen, die auf der Modellierung der Entzerrerrzeugmetrik durch eine verallgemeinerte Gaußsche Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (pdf) basiert.

Darüber hinaus wird die Zuweisung der Funkressourcen (Radio Resource Allocation, RRA), welche von der Basisstation (BS) durchgeführt wird, für eine OSC Übertragung betrachtet. Leistungszuweisung und Benutzerpaarung, das heißt die Entscheidung, welche Paare im gleichen Zeitschlitz und auf der gleichen Frequenzressource übertragen, müssen dahingehend optimiert werden, dass die Netzkapazität maximiert wird. Ein praktisch umsetzbarer RRA Algorithmus für eine OSC Übertragung wird vorgeschlagen und mittels Netzwerksimulationen eines GSM VAMOS Netzes evaluiert.

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass mit den vorgeschlagenen Downlink OSC Empfängern beachtliche Gewinne bezüglich der Rahmenfehlerraten (Frame Error Rate, FER) im Vergleich zu Empfängern vom aktuellen Stand der Technik erzielt werden können. Des Weiteren zeigt eine GSM VAMOS Netzsimulation, bei der die vorgeschlagenen RRA Algorithmen zusammen mit den neuen Empfängeralgorithmien verwendet werden, einen Kapazitätsgewinn von ca. 100 % auf im Vergleich zu einer Übertragung ohne OSC.

Der zweite Teil dieser Arbeit betrachtet den Uplink von Long Term Evolution (LTE). Im Gegensatz zum Downlink von LTE Release 8, bei dem Orthogonal Frequency-Division Multiple Access (OFDMA) zusammen mit Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) Übertragung für einen Benutzer verwendet wird, spezifiziert das erste Release von LTE nur eine Single-Carrier Frequency-Division Multiple Access (SC-FDMA) Übertragung mit einer Sendeantenne für den Uplink. Um die spektrale Effizienz im Uplink zu steigern, kann eine Virtuelle Multiple Input Multiple Output (V-MIMO) Übertragung verwendet werden, bei der mehrere Benutzer auf derselben Zeit- und Frequenzressource übertragen. Dabei ermöglichen mehrere Empfangsantennen an der BS eine Trennung der Signale einer Benutzergruppe. Durch die Verwendung der vorgeschlagenen V-MIMO Übertragung wird die spektrale Effizienz im Vergleich zu einer Single-Input Multiple-Output (SIMO) Übertragung in beeindruckender Weise gesteigert.

Unterschiedliche Empfängeralgorithmien für die Trennung der Benutzersignale jedes Paares werden für eine V-MIMO SC-FDMA Übertragung in dieser Arbeit

vorgeschlagen. Zudem wird ein Algorithmus zur referenzsignalbasierten Kanalinterpolation und Kanalprädiktion, welche man zur Erlangung der Kanalzustandsinformation (CSI) für die RRA benötigt, wird vorgestellt. Ein Ausdruck für den MSE des Fehlers der Kanalzustandsinformation hergeleitet. Des Weiteren werden Leistungsregelung und Beamforming (BF) mit Quality of Service (QoS) Anforderungen für eine V-MIMO SC-FDMA Übertragung analysiert und eine geschlossene Lösung für Zero Forcing (ZF) Entzerrung am Empfänger hergeleitet. Simulationsergebnisse für zufällige Benutzerpaare zeigen, dass eine deutliche Sendeleistungsreduktion mit Hilfe von BF erzielt werden kann im Vergleich zu konstanter Sendeleistung für alle Subträger.

Abschließend werden mehrere Benutzerpaarungs-/Benutzergruppierungs-Algorithmen vorgeschlagen, welche zusammen mit der RRA für eine V-MIMO SC-FDMA Übertragung optimiert werden. Zunächst werden unterschiedliche Kriterien zur Benutzergruppierung eingeführt. Dann werden Benutzerpaarung in Zeitrichtung und gemeinsame Benutzergruppierung und Frequenzzuweisung betrachtet. Die kombinatorischen Optimierungsprobleme werden für die betrachteten Szenarien formuliert und neue suboptimale Algorithmen mit reduzierter Komplexität werden vorgeschlagen. Des Weiteren wird Benutzerpaarung mit QoS Anforderungen untersucht, bei dem die benötigte Summensendeleistung für den Fall mit BF als auch den Fall ohne BF minimiert wird. Eine Untersuchung des Einflusses von ungenauer CSI auf die Leistungsfähigkeit der Benutzerpaarung schließt diese Arbeit ab. Alle vorgestellten Algorithmen werden mit Hilfe der Simulation einer V-MIMO SC-FDMA Übertragung evaluiert. Es wird gezeigt, dass im Vergleich zu zufälliger Benutzerpaarung beeindruckende Gewinne erzielt werden. Eine Vollsuche wäre nötig, um die optimale Lösung der gleichzeitigen Optimierung von Benutzerpaarung und Frequenzzuweisung zu finden. Die vorgeschlagenen suboptimalen Algorithmen bieten sowohl eine nahezu optimale Leistungsfähigkeit als auch eine niedrige Rechenkomplexität.

Contents

Abstract	v
Zusammenfassung (in German)	ix
1 Introduction	1
1.1 Motivation	1
1.2 Outline of Thesis and Contributions	3
I OSC Downlink Transmission	7
2 System Model	9
2.1 Introduction	9
2.2 Fundamentals of GSM	10
2.3 Transmission Model	13
3 Downlink Receiver Architectures	19
3.1 Channel and SCPIR Estimation	19
3.1.1 Joint ML Estimation of Channel Impulse Response and SCPIR	20
3.1.2 Blind Estimation of SCPIR	20
3.1.3 Complexity Comparison	21
3.1.4 CRB for Channel and SCPIR Estimation	23
3.1.4.1 Conventional GSM Transmission	23
3.1.4.2 VAMOS Transmission	24
3.1.5 Simulation Results	28
3.2 Equalization and Interference Cancellation	32
3.2.1 Joint Maximum-Likelihood Sequence Estimation (MLSE) . . .	32
3.2.2 Mono Interference Cancellation (MIC)	33
3.2.3 MIC Receiver with Successive Interference Cancellation . . .	34
3.2.4 Enhanced VAMOS-MIC (V-MIC)	35
3.2.5 Simulation Results	38
3.2.6 Link-to-System Mapping	40
3.3 L_β -Norm Detection for ACCI	41
3.3.1 System Model for ACCI	42
3.3.2 Analysis of ACCI	44
3.3.3 L_β -Norm Metric	47
3.3.4 Confidence Analysis	49
3.3.5 Simulation Results	49
3.4 Summary	52

4	Radio Resource Allocation	55
4.1	Problem Formulation	55
4.2	Radio Resource Allocation Mapping Table	57
4.3	Power Allocation and Pairing Algorithm	57
4.4	Determination of Number of Paired Users	59
4.5	Simulation Results	60
4.6	Summary	70
II	SC-FDMA Uplink Transmission	71
5	System Model	73
5.1	Introduction	73
5.2	Fundamentals of LTE	75
5.3	Transmission Model	77
5.3.1	Time-Domain Transmission Model	78
5.3.2	Frequency-Domain Transmission Model	83
6	SC-FDMA Receiver Algorithms	87
6.1	ZF Receiver	87
6.2	MMSE Receiver	88
6.3	SIC Receiver	90
6.4	Other Receivers	93
6.4.1	Trellis-Based Receiver	93
6.4.2	DFE Receiver	94
6.5	Summary	95
7	Channel Acquisition, Power Allocation, and Beamforming	97
7.1	Channel Acquisition	97
7.1.1	Sounding Reference Signals in LTE	98
7.1.2	Interpolation in Frequency Direction	100
7.1.3	Prediction in Time Direction	102
7.1.4	MSE Analysis	104
7.2	Power Allocation with QoS Requirements	107
7.3	Beamforming	110
7.3.1	Beamforming with QoS Requirements	111
7.3.2	Simulation Results	116
7.4	Summary	118
8	User Pairing/Grouping and Radio Resource Allocation	121
8.1	Criteria for User Pairing/Grouping and Time/Frequency Allocation	122
8.1.1	Random Grouping and Time/Frequency Allocation	123
8.1.2	Capacity Grouping	123
8.1.3	Bit Error Rate Grouping	124
8.1.4	Power Minimization with QoS Constraints Grouping	126
8.1.5	Achievable Data Rate with Fairness Constraints Grouping	127

8.2	User Pairing in Time Direction	127
8.2.1	User Pairing Algorithm	128
8.2.2	Simulation Results	129
8.3	Joint User Grouping and Frequency Allocation	131
8.3.1	Problem Formulation	132
8.3.2	Full Search	133
8.3.3	Hungarian Algorithm	134
8.3.4	Binary Switching Algorithm	135
8.3.5	Hungarian Algorithm & Binary Switching Algorithm	136
8.3.6	Complexity Analysis	137
8.3.7	Simulation Results	138
8.3.8	Conclusions	143
8.4	Codebook Aided User Pairing	144
8.4.1	Preliminaries	144
8.4.2	Pairing Proposal Algorithm	145
8.4.3	Global Vector Quantization Algorithm	145
8.4.4	Simulation Results	149
8.4.5	Conclusions	151
8.5	Power Allocation and QoS	152
8.5.1	Overall Optimization	152
8.5.2	Algorithms	153
8.5.2.1	Joint Optimal	153
8.5.2.2	Best SIMO and Best Pair (BSBP) Algorithm	153
8.5.2.3	Hungarian Algorithm and Binary Switching (HABS)	156
8.5.3	Simulation Results	157
8.5.4	Conclusions	161
8.6	Beamforming and QoS	161
8.6.1	Joint User Pairing, Frequency Allocation, and BF	162
8.6.1.1	Overall Optimization	162
8.6.1.2	Algorithms	163
8.6.2	Simulation Results	163
8.6.3	Conclusions	167
8.7	Fair Data Rate Maximization & Influence of Erroneous CSI	167
8.7.1	Joint User Pairing and Frequency Allocation	168
8.7.1.1	Problem Formulation	168
8.7.1.2	Algorithms	169
8.7.2	Simulation Results	170
8.7.3	Conclusions	175
8.8	Summary	175
9	Conclusion	177
A	Combinatorial Optimization	181
A.1	Combinatorial Optimization	181
A.2	Graphs	182
A.3	Matching Problems	184

A.4	Weighted Matching Problems	185
A.4.1	Assignment Problems	186
A.4.2	Nonbipartite Weighted Matching Problems	187
A.5	Multi-Dimensional Matching Problems	189
A.6	Summary	190
B	Channel Model	191
B.1	Discrete-Time SISO Channel Model	191
B.1.1	Multipath Fading	191
B.1.2	Shadowing and Propagation Loss	196
B.2	GMSK as Filtered Version of BPSK	197
B.3	MIMO Channel Model	198
C	Author's Publication List	199
	Glossary	203
Abbreviations		203
Operators		206
Symbols		207
	List of Figures	221
	List of Tables	225
	Bibliography	227