

Performance-Guaranteed Resource Allocation in Wireless Communication Systems

Von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der
Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Diplom-Mathematiker
Simon Matthias Görtzen

aus Aachen

Berichter: Universitätsprofessor Dr.-Ing. Anke Schmeink
Universitätsprofessor Dr.-Ing. Gerd Ascheid

Tag der mündlichen Prüfung: 15. Dezember 2014

Berichte aus der Kommunikationstechnik

Simon Görtzen

**Performance-Guaranteed Resource Allocation
in Wireless Communication Systems**

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.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 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 978-3-8440-3432-5

ISSN 0945-0823

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 Arbeit ist während meiner Zeit am Lehr- und Forschungsgebiet „Informationstheorie und Systematischer Entwurf von Kommunikationssystemen“ der RWTH Aachen entstanden. Ich bin vielen Menschen in Dankbarkeit verbunden, einerseits aufgrund der erfahrenen Unterstützung, andererseits weil ich so vieles von ihnen lernen durfte.

Meine Promotion wurde durch die Betreuung durch Prof. Dr.-Ing. Anke Schmeink ermöglicht. Für das mir entgegengebrachte Vertrauen, die produktive Zusammenarbeit und die wohlwollende Unterstützung bedanke ich mich herzlich. Ich danke Prof. Dr.-Ing. Gerd Ascheid für seine Rolle als Zweitgutachter und dem damit verbundenen Aufwand. Ebenfalls dankbar bin ich Prof. Dr. rer. nat. Rudolf Mathar, von dem ich insbesondere im Rahmen der Lehrtätigkeit viel gelernt habe.

Mein besonderer Dank gilt Grit Claßen und Alexander Fanghänel für die konstruktiven Gespräche, wertvollen Hinweise und das Korrekturlesen dieser Arbeit. Ich danke meinen Kolleginnen und Kollegen vom UMIC Research Centre und am Lehrstuhl für Theoretische Informationstechnik für die gute Zusammenarbeit in angenehmer Atmosphäre. Die gemeinsamen Projekte und der inhaltliche Austausch haben mir viel bedeutet.

Meinen Eltern danke ich für die bedingungslose Unterstützung, die ich erfahren habe, sowie die Förderung meiner Stärken und Interessen. Ich danke meiner engen und erweiterten Familie für ihren Rückhalt, auf den ich mich immer verlassen konnte. Die Dankbarkeit meiner Frau Claudia gegenüber ist schwer in Worte zu fassen. Es ist unsere sinnstiftende Verbundenheit, die gleichzeitig mein Leben bereichert und mein Schaffen motiviert.

Zu guter Letzt danke ich meinem Freundeskreis für die vielfältige Unterstützung in den letzten Jahren. Ich schätze mich glücklich, von so vielen Menschen umgeben zu sein, die meine Interessen und Leidenschaften teilen.

Aachen, im Januar 2015

Simon Görtzen

Contents

1	Introduction	1
1.1	Related Work	2
1.2	Outline	4
2	Mathematical Preliminaries	7
2.1	Notation	7
2.2	Convexity	8
2.2.1	Convex Sets	9
2.2.2	Convex Functions	9
2.3	Mathematical Optimization	9
2.3.1	Convex Optimization Problems	11
2.3.2	Duality Theory	11
2.3.3	Slater's Condition	11
2.3.4	Karush-Kuhn-Tucker Conditions	12
2.3.5	Linear Programs and Integer Linear Programs	13
2.3.6	Duality Theorem for Linear Programs	13
2.3.7	Solution Space of Linear Programs	14
3	Orthogonal Resource Allocation	15
3.1	Problem Formulation	15
3.1.1	Problem Domain	16
3.1.2	Problems with Linear Objective	16
3.1.3	Problems with Min-Max Objective	17
3.2	Exemplary Problems	18
3.2.1	Weighted Sum Rate Maximization	18
3.2.2	Weighted Sum Power Minimization	21
3.2.3	Fairness-Constrained Rate Maximization	23
3.2.4	Heterogeneous User Rate Maximization	27
4	Resource Allocation for Discrete Rate Functions	31
4.1	Integer Linear Program Formulation	33
4.2	Resource Allocation as a Multidimensional Multiple-Choice Knapsack Problem	36
4.3	Dual Problem for Discrete Rate Functions	38

4.4	Dual Methods and Rounding Methods	40
4.5	Feasibility and Performance	48
4.6	Integrality Gap Estimation for Discrete Rate Functions	52
4.7	Problem-Specific Analysis for Discrete Rate Functions	57
4.7.1	Weighted Sum Rate Maximization with Global Power Budget	57
4.7.2	Weighted Sum Rate Maximization with Individual Power Budgets	60
4.7.3	Weighted Sum Power Minimization with Global Rate Demand	62
4.7.4	Weighted Sum Power Minimization with Individual Rate Demands	63
4.7.5	Fairness-Constrained Rate Maximization	65
4.7.6	Heterogeneous Rate Maximization	67
4.8	Asymptotic Performance for Discrete Rate Functions	70
4.8.1	Asymptotic Performance of Weighted Sum Rate Maximization for Discrete Rate Functions	71
4.8.2	Asymptotic Performance of Weighted Sum Power Minimization for Discrete Rate Functions	72
4.8.3	Asymptotic Performance of Fairness-Constrained Rate Maximization and Heterogeneous Rate Maximization for Discrete Rate Functions	73
5	Resource Allocation for Concave Rate Functions	77
5.1	Mixed Integer-Continuous Formulation	79
5.2	Dual Problem for Concave Rate Functions	85
5.3	Mixed Integer-Continuous Rounding Methods	88
5.4	Integrality Gap Estimation for Concave Rate Functions	91
5.5	Problem-Specific Analysis for Concave Rate Functions	93
5.5.1	Weighted Sum Rate Maximization with Global Power Budget	93
5.5.2	Weighted Sum Rate Maximization with Individual Power Budgets	97
5.5.3	Weighted Sum Power Minimization with Global Rate Demand	102
5.5.4	Weighted Sum Power Minimization with Individual Rate Demands	107
5.5.5	Fairness-Constrained Rate Maximization	110
5.5.6	Heterogeneous Rate Maximization	111
5.6	Asymptotic Performance for Concave Rate Functions	113
6	Capacity-Achieving Weighted Subcarrier Allocations	119
6.1	System Model and Problem Formulation	121
6.2	Optimality Analysis of Allocations	124
6.3	Optimality Polyhedron	127
6.4	Weighted Subcarrier Allocations and their Properties	132

6.5	Line Search Maximization with Unknown Denominator	135
6.6	Neighboring Weighted Subcarrier Allocations	141
6.7	Capacity-Achieving Waterlevel Algorithms	144
6.8	Simulation Results and Conclusion	146
7	Conclusions	149
7.1	Summary	149
7.2	Contributions and Discussion	150
7.3	Future Research Directions	155
	List of Acronyms	159
	List of Symbols and Notation	161
	Bibliography	169
	Index	177