

Thomas Deckert

Orthogonal Frequency Division Multiplexing-based
Medium Access under Rate Constraints

Beiträge aus der Informationstechnik

Thomas Deckert

**Orthogonal Frequency Division Multiplexing-based
Medium Access under Rate Constraints**

 VOGT

Dresden 2007

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

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

Zugl.: Dresden, Techn. Univ., Diss., 2007

Die vorliegende Arbeit stimmt mit dem Original der Dissertation „Orthogonal Frequency Division Multiplexing-based Medium Access under Rate Constraints“ von Thomas Deckert überein.

Besuchen Sie uns im Internet:
www.vogtverlag.de

© Jörg Vogt Verlag 2007
Alle Rechte vorbehalten.

Gesetzt vom Autor
Printed in Germany

ISBN 978-3-938860-08-3

Jörg Vogt Verlag
Voglerstr. 20 · 01277 Dresden
Telefon: 0351-31403921
Telefax: 0351-31403918
Email: info@vogtverlag.de

Technische Universität Dresden

Orthogonal Frequency Division Multiplexing-based Medium Access under Rate Constraints

Thomas Deckert

der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität Dresden

zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktoringenieurs

(Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. habil. Leon Urbas

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Gerhard Fettweis
Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Kühn
Prof. Dr.-Ing. habil. Adolf Finger

Tag der Einreichung: 05.02.2007

Tag der Verteidigung: 05.07.2007

Abstract

Modern communications systems like wireless local area networks provide high nominal data rates on the physical layer. However, it is often a challenge to exploit these data rates efficiently on higher system layers. In this context, it is important to consider the interaction between such key factors as the *data traffic* that the system transmits, the *medium access* scheme and the available *physical resources* (time, bandwidth, transmit power).

The major objective of this thesis is to analyze the impact that the choice of a medium access scheme has on the capacity. First the relevant parameters of the data traffic and the physical resources are characterized. Two important side constraints that restrict the network throughput are derived from that: The first limits the *maximum rate* that an individual user can exploit. The second reflects that the traffic is not uniform but composed of different traffic classes. The constraint describes the *average relative traffic volume* of these classes. Both constraints are applied in an information-theoretic analysis of a wireless local area network. The uplink sum rate is analyzed in a one-cell scenario. The system is assumed to use an orthogonal frequency division multiplexing air interface with a large number of sub-carriers. This models future networks of that kind.

One main conclusion to be drawn from this work is that purely time-multiplexing based medium access methods, the state of the art today, are severely limited in the considered scenario. These schemes allocate the physical resources to the individual users with coarse granularity. Therefore, they only achieve low sum rates compared to the nominal physical layer data rate. This thesis discusses two alternatives: Frequency multiplexing, and superimposing the transmissions of individual users in time and frequency. In both cases the granularity in the allocation process is reduced and the physical resources can be exploited much more efficiently. The achievable sum rate is drastically improved with these alternative schemes.

In this thesis, guidelines on when to frequency-multiplex and when to superimpose individual user transmissions are derived. The latter is appropriate whenever the receive diversity is large compared to the transmit diversity, i. e. if the number of antennas at the access point is large compared to the number of antennas of individual users. Furthermore, the average resource allocation that is needed to achieve the maximum sum rates is discussed for each scheme.

Finally, a specific receiver design for the superimposed transmission concept is discussed that is capable of separating the overlaid signals. The results obtained with this receiver design support significant aspects of the theoretical claims.

Kurzfassung

Diese Arbeit geht der Frage nach, wie nominell hohe Datenraten, die von der physikalischen Übertragungsschicht eines Funknetzwerks angeboten werden, effizient den höheren Kommunikationsschichten zur Verfügung gestellt werden können. Von besonderem Interesse ist hierbei das grundlegende Design der Medienzugriffsschicht.

Wichtige Faktoren für diese Aufgabe sind die Eigenschaften des zu übermittelnden Datenverkehrs und der dafür vorgesehenen physikalischen Ressourcen (Zeit, Bandbreite, Sendeleistung). Zusammen führen diese auf zwei Randbedingungen für den Kanalzugriff: Die einzelnen Nutzer fordern nur beschränkte *maximale Raten* an, und zwischen verschiedenen Verkehrsklassen ist im Mittel ein bestimmtes Verhältnis der transportierten Datenmengen zu garantieren.

Diese Randbedingungen begrenzen den Durchsatz eines Netzwerk. Das Hauptziel dieser Arbeit ist daher, die genannten Ratenbeschränkungen in die Kapazitätsanalyse einzubeziehen. Dadurch wird die Betrachtung der Netzwerkkapazität aus der Sicht der physikalischen Übertragungsschicht um verkehrsbezogene Komponenten erweitert. Die Ratenbeschränkungen werden in einer informationstheoretischen Analyse auf die Summenrate in der Aufwärtsstrecke in einem Ein-Zell-Netzwerk angewendet. Konkret wird ein Funknetzwerk für Datenübertragung im Nahbereich (WLAN = wireless local area network) betrachtet, welches orthogonalen Frequenzmultiplex (OFDM = orthogonal frequency division multiplex) einsetzt. Angelehnt an Vorstellungen für zukünftige derartige Systeme wird von einer großen Anzahl, einige hundert, an Unterträgern ausgegangen.

Ein wichtiges Ergebnis dieser Arbeit ist, dass es für einen rein zeitgeteilten Medienzugriff in diesem Szenario zu starken Durchsatzbeschränkungen kommen muss. Diese Art des Medienzugriffs ist in heutigen Varianten implementiert. Sie leidet an der groben Granularität, mit der ein solches Verfahren die Ressourcen den einzelnen Nutzern zuteilt. Erfolgt der Kanalzugriff der Nutzer im Frequenzmultiplex oder durch die zeitlich und spektral überlagerte Übertragung der entsprechenden Signale, wird die Granularität reduziert. In diesem Fall ist es möglich, die Ressourcen effizient auszunutzen. Dadurch liegt die mit diesen Verfahren zu erzielende Summenrate deutlich über der des zeitgeteilten Medienzugriffs.

In dieser Arbeit wird angegeben, wann ein frequenzgeteilter Medienzugriff sinnvoll ist und wann es günstiger ist, die einzelnen Nutzersignale zu überlagern. Letzteres ist immer dann geeignet, wenn mehr Empfangs- als Sendediversität vorherrscht, d.h. wenn der zentrale Empfänger mehr Antennen besitzt als die sendenden Nutzer. Weiterhin wird die Ressourcenzuteilung abgeleitet, die im Mittel nötig ist, um die angegebenen maximalen Summenraten zu erreichen.

Schließlich wird die Praktikabilität des Überlagerungsverfahrens demonstriert. Dazu

wird für ein konkretes Basisbandmodells auf eine geeignete Empfängerstruktur eingegangen und ein Bezug zu den theoretisch gewonnenen Erkenntnissen hergestellt.

Acknowledgements

This work is the result of my research while I was with the Vodafone Chair Mobile Communications Systems of the Technische Universität Dresden between 2002 and 2006. I am very grateful to my mentor, Prof. Gerhard Fettweis, for his support and guidance during these four years. He has provided me with the opportunity to work on interesting current scientific and engineering topics. He has also been a great source of motivation, never tiring to dispense my occasional doubts. Thank you, Gerhard!

I am also very grateful to Prof. Adolf Finger and Prof. Volker Kühn for acting as referees for this thesis.

Throughout my time at the Chair I could always count on my colleagues. Especially, I owe thanks to Dr. Wolfgang Rave. A demanding proponent of scientific clarity he has been my sincerest critic. His questions and advice helped me tremendously in setting misperceptions right. With his vast knowledge he is a most valuable scientific inspiration.

Furthermore, I am very grateful to Katja Schwieger for listening to my ideas and sharing her thoughts on them and office space with me. I highly appreciate that Ernesto Zimmermann shared his profound insight into capacity, MIMO transmission and many other things. I had many fruitful discussions with Ralf Irmer, Denis Petrovic and Ting-Jung Liang. I would also like to thank Steffen Bittner, René Habendorf, Sven Röhr and Peter Rost for their helpful comments on earlier versions of this work.

During discussions with partners in the WIGWAM research project I learned a lot on medium access and higher layer challenges and solutions. In this context I especially appreciate the insight of Georgios Orfanos of RWTH Aachen.

I have also had the great pleasure of advising students on their Diploma theses and projects. In return their work provided me with valuable new points of view. Exemplarily, I would like to acknowledge the contributions of Marco Krondorf, Matthias Bauer and Sebastian Kaiser.

For introducing me to a researcher's life and making me pursue a doctoral degree I am thankful to Prof. Akbar Sayeed of the University of Madison – Wisconsin, and to Ashwin D'costa, Ke Liu, Jayesh Kotecha and Vasanthan Raghavan.

I owe special thanks to my parents for supporting me all the time throughout my life. Finally, I am deeply indebted to Vera Glaser who is last in this list but first in so many ways. I would have never finished the following pages without her loving care and restraint, her understanding and commitment.

Dresden, Februar 2007

Thomas Deckert

Contents

Abbreviations	ix
Symbols	xi
1 Introduction	1
1.1 Motivation	1
1.2 Related work	3
1.3 Outline	4
2 System Constraints	5
2.1 Rate and Spectral Efficiency	5
2.2 Network Requirements	6
2.3 Medium Access Principles	10
2.4 Physical Layer Constraints	14
2.5 Resource Allocation Model	21
2.6 Scenario Summary	26
3 Sum Rate of Orthogonal Medium Access	29
3.1 Time Division Multiple Access	29
3.2 Single-mode Orthogonal Frequency Division Multiple Access	31
3.2.1 Maximum Sum Rate and Constraints	31
3.2.2 Resource Allocation without Maximum Rate Constraints	32
3.2.3 Resource Allocation with Maximum Rate Constraints	35
3.2.4 Summary of Resource Allocation for a Single OFDMA Mode	36
3.3 Class-based Rate Region and Vertex Modes	37
3.4 Mode-switched Orthogonal Frequency Division Multiple Access	39
3.5 Numerical Case Study	41
3.5.1 Sum Rate	41
3.5.2 Resource Allocation	45
3.5.3 Multiple Antennas: Constrained Bulk Data Users	46
3.5.4 Mapping Losses	48
3.6 Summary	50
4 Sum Rate of Superimposed Transmission	53
4.1 Principles of Superimposed Transmission	53
4.2 Rate Regions	55
4.2.1 Instantaneous Rate Regions	55

4.2.2	Outage Rate Regions for Fixed Power Allocation	59
4.2.3	Common Decoding Success and Independent Boundary Constraints	61
4.2.4	Sum Rate for Joint Decoding and Successive Interference Cancellation	63
4.2.5	Rate Region Union	64
4.3	Multi-user Diversity and Spatial Multiplexing	65
4.3.1	Exploitation with Joint Decoding	65
4.3.2	Exploitation with Successive Interference Cancellation	68
4.4	Single-mode Superimposed Transmission	68
4.5	Mode-switched Superimposed Transmission	73
4.5.1	Analysis Side Constraints	73
4.5.2	Number of Users Required for Joint Decoding	74
4.5.3	Number of Users Required for Successive Interference Cancellation	77
4.5.4	Sum rate of mode-switched Superimposed Transmission	80
4.6	Summary	85
5	Receiver for Superimposed Transmission	87
5.1	System Description	87
5.1.1	Transmitter	87
5.1.2	Received signal	89
5.1.3	Receiver	89
5.1.4	Further Design Issues	95
5.2	Receiver Performance	97
5.3	Achievable Sum Rates	103
5.4	Summary	105
6	Conclusion	107
A	Offered Spectral Efficiency and OFDMA	111
A.1	Logarithmic Approximation of Offered Spectral Efficiency	111
A.2	Bandwidth Allocation for Active Maximum Rate Constraint	112
A.3	Mode-switched OFDMA Allocation For Unconstrained Bulk Data Class	113
A.4	Algorithm to Find Single-Mode OFDMA Parameterization	114
B	Notes on Superimposed Transmission	117
B.1	SNRs for equal SINRs per SIC decoding stage	117
B.2	Rates for 2 Users in Frequency-flat Rayleigh Fading	118
	Bibliography	119