Optimisation of Throughput and Energy Efficiency in HIPERLAN Type 2 Networks

Combination of Transmit Power Control and Link Adaptation

Vom Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik
der Universität Hannover
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur

genehmigte Dissertation

von Dipl.-Ing. Markus Radimirsch

geboren am 16. November 1966 in Heilbronn

2004

1. Referent Prof. Dr.-Ing. Klaus Jobmann
2. Referent Prof. Dr.-Ing. Hermann Eul
Tag der Promotion: 26. Mai 2004

Hannoversche Beiträge zur Nachrichtentechnik

Band 2.9

Markus Radimirsch

Optimisation of Throughput and Energy Efficiency in HIPERLAN Type 2 Networks

Combination of Transmit Power Control
and Link Adaptation

Shaker Verlag
Aachen 2004

Bibliographic information published by Die Deutsche Bibliothek
Die Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data is available in the internet at http://dnb.ddb.de.

Zugl.: Hannover, Univ., Diss., 2004

Copyright Shaker Verlag 2004
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 3-8322-3174-9
ISSN 1616-5489

Shaker Verlag GmbH • P.O. BOX 101818 • D-52018 Aachen
Phone: 0049/2407/9596-0 • Telefax: 0049/2407/9596-9
Internet: www.shaker.de • eMail: info@shaker.de

Preface

As everybody who has passed his or her Ph.D defense, I am relieved that this step has been taken. It is a big step in everybody's live, requiring extraordinary discipline, precision, hard work and a lot of time. Even though it has been me who has achieved the results in this thesis, I am well aware that this has become possible only with the support of those persons who spend many hours with me or crossed my lifeline only for short periods of time. I am very grateful to my colleagues at the Institut für Allgemeine Nachrichtentechnik who were a source of knowledge, experience and inspiration in all periods of my work. Michael Meincke and Isaac Kwame Adusei have contributetd significantly to the quality of the dissertation by careful proof reading. Silke Feldmann has spend hours to read and understand my dissertation and gave precious hints for improvement. Prof. Jobmann has been my supervisor for more than four years during my time at the University of Hannover. He has given support whenever requested and has provided me with the environment to work in already established fields, but also the freedom to define new projects and to walk unknown paths. His constant believe in my capabilities and his encouraging support have been an important aid in achieving my scientific goals.

As engineers, we permanantly encounter the problem that we cannot explain what exactly it is we work on. A colleague at my first employer, who was developing and testing ISDN exchange offices, told me that he has stopped explaining the contents of his job in detail. Instead, he would say: "I am building telefones". Although this may not be quite wrong, it catches only little of the variety of tasks and challenges to be met day by day. This is a situation which many of my colleages, including me, suffer from. It excludes those with whom we spend most of our lives from the things we do during working hours. My wive Julia has uttered this feeling of separation and her regret that she has not been able to contribute to my scientific work many times. Even though this may be true with respect to the contents of this thesis, it would never have been possible for me to finish it without her constant encouragement and support. She gives me the continuity in live which has been, is and will be the necessary background for happiness in life and professional success. I am very grateful that she is always by my side.

Abstract

The main motivation for this thesis is the difference between wireless voice and data networks. The user satisfaction in voice networks is modelled by a threshold of the signal to interference ratio (SIR) at the receiver. The transition between high and low user satisfaction in data networks, especially for best effort services, is often smooth and spread over a range of SIR values and, therefore, the methods to engineer wireless voice networks are not always suited for wireless data networks. The goals of this thesis are to find appropriate utility measures for best effort services in wireless data networks, to develop methods to optimise the utilities and to investigate their performance.

The example system is HIPERLAN type 2 (H2), which has schemes for transmission power control (TPC) and link adaptation (LA). LA is the ability to adapt transmission rates, called Phy modes, to the channel conditions. Both, LA and TPC, depend strongly on the SIR at the receiver and, hence, this thesis deals with the combination of the two.

The first utility investigated is the user throughput, which can be modelled as a function of the SIR. LA always selects the Phy mode, which results in the highest useful throughput for a given SIR. The throughput is a monotonously increasing function over SIR, suggesting that, without considering interference, the maximum throughput is achieved at maximum transmission powers.

To answer the question, which transmit power combination yields maximum thoughput, three theoretical models have been developed in this thesis for fixed transmission powers but with LA as described in the previous paragraph. The basic principle is to calculate the probability density of the SIR for high load cases and to compute the expected value of the throughput, taking into account the scheduling algorithm. The author is not aware of any open literature using this or a similar principle.

Results of the theoretical models are presented and compared with results from a simulation model for H2 networks. The results from both models agree quite well with each other. The results suggest that, if interfering cells are present, the maximum thoughput is achieved at transmission powers below the maximum adjustable values. The optimum transmission powers increase with increasing distance between cells. Maximum throughput and optimum transmission power are almost constant for constant ratio of distance between cells and cell radius.

The second utility measure is energy efficiency, i.e. the number of useful bits, that can be transmitted with a portion of energy. This is particularly important for battery driven devices operating in the uplink. The methods applied are borrowed from game theory, which deals with situations, where two or more actors compete for a limited resource. A utility function as a measure of the energy efficiency is developed. Due to the piecewise utility function over SIR, it is not possible to analyse the game analytically. This is done with a virtual continuous utility function, that is close to the real utility. It turns out that a Nash equilibrium exists in the virtual game for a wide range of transmission powers.

The investigation of the actual game under high load happens with the simulator used previously. The algorithm is a Cournot adjustment process, which tries to find the equilibrium by learning rather than by deduction. The results suggest that a stable equilibrium exists in the real game. The parameters of the utility function can be used to trade off energy efficiency and throughput, where the energy efficiency gain compared to the maximum throughput case increases with decreasing cell radius together with a decrease of throughput loss. Parameters of the utility function exist, which lead to slightly higher throughput than in the case of fixed transmission powers at moderately lower energy efficiency.

Finally, a slightly modified simple method for partial load is compared with the game theoretic model. It turns out that the simple method yields higher energy efficiency at low load, whereas the game theoretic scheme is superior in high load situations.

The major achievements of this thesis are

- The development of a new paradigm to analyse the achievable throughput in wireless data networks with smooth transition of the user's utility
- The proof that using maximum transmission powers does not necessarily lead to maximum throughput in the presence of interference
- The application of game theory to combined LA and TPC in H2 networks, which allows to trade off throughput and energy efficiency
- Quantitative results, that are an indicator for the optimisation of real-world H2 network installations

Kurzfassung

Die hauptsächliche Motivation für diese Dissertation ist der Unterschied zwischen drahtlosen Sprach- und Datennetzen. Die Zufriedenheit der Nutzer in Sprachnetzen wird meist als harte Schwelle des Signal-Störabstandes (SIR) modelliert. Der Übergang zwischen hoher und niedriger Nutzerzufriedenheit in drahtlosen Datennetzen erstreckt sich insbesondere für Best Effort Dienste oft über einen größeren SIR-Bereich, so dass die Methoden zur Dimensionierung von Sprachnetzen für viele Datennetze ungeeignet sind. Die Ziele der Arbeit sind die Entwicklung geeigneter Nutzenfunktionen für Best Effort Dienste in drahtlosen Datennetzen, der Entwurf geeigneter Verfahren zur Nutzenoptimierung und die Untersuchung der Verfahren auf ihre Leistungsfähigkeit.

Als Beispielsystem wird HIPERLAN Typ 2 (H2) verwendet, das Verfahren zur Leistungsregelung (TPC) und zur Link Adaptation (LA) beinhaltet. LA beschreibt die Möglichkeit, die Bruttodatenrate auf der physikalischen Schicht, Phy Modus genannt, der Funkkanalqualität anzupassen. Sowohl LA als auch TPC sind Funktionen des SIR und voneinander abhängig, so dass diese Arbeit sich mit deren Kombination beschäftigt.

Zunächst wird der Durchsatz als Nutzenfunktion betrachtet. Der Nettodurchsatz ist eine Funktion des SIR. Das LA-Verfahren wählt denjenigen Phy Modus aus, der bei gegebenem SIR den Durchsatz maximiert. Der Durchsatz ist eine monoton steigende Funktion des SIR, so dass es nahe liegt, dass ohne Interferenz maximale Sendeleistung zu maximalem Durchsatz führt.

Um die Frage zu beantworten, welche Sendeleistungen zu maximalem Durchsatz führen, wurden im Rahmen der Arbeit drei theoretische Modelle für feste Sendeleistungen unter Verwendung des beschriebenen LA-Verfahrens entwickelt. Das Grundprinzip ist die Berechnung der Wahrscheinlichkeitsdichte des SIR für den Hochlastfall unter Berücksichtigung des Bedienalgorithmus und schließlich die Berechnung des Erwartungswertes des Nettodurchsatzes. Dem Autor sind keine Veröffentlichungen mit ähnlichen Ansätzen bekannt.

Ergebnisse aus dem theoretischen Modell werden präsentiert und verglichen mit Resultaten eines Simulationsmodells für H2-Netzwerke. Die Ergebnisse beider Modelle stimmen gut überein. Die optimalen Sendeleistungen für maximalem Nettodurchsatz liegen unterhalb der maximalen Sendeleistungen. Es zeigt sich, dass die optimale Sendeleistung mit zunehmendem Abstand zwischen Funkzellen zunimmt. Bei gleichbeibendem Verhältnis von Zellabstand und Zellradius bleiben der Durchsatz und die optimalen Sendeleistungen nahezu konstant.

Als zweites wird die Engergieeffizienz, d.h. die Anzahl Bits, die mit einer bestimmten Energiemenge erfolgreich übertragen werden kann, als Nutzenfunktion betrachtet. Die Energieeffizienz ist besonders wichtig für Endgeräte mit lokalem Energiespeicher, die im Uplink arbeiten. Die angewandten Methoden sind der Spieltheorie entlehnt, die sich mit Situationen beschäftigt, in denen zwei oder mehr Beteiligte um ein begrenztes Gut konkurrieren. Eine Nutzenfunktion als Maß der Energieeffizienz wurde im Rahmen der Arbeit

entwickelt. Allerdings erlaubt deren stückweise Definition keine mathematische Analyse. Die Analyse eines ähnlichen virtuellen Spiels mit kontinuierlicher Nutzenfunktion zeigt, dass das virtuelle Spiel ein Nash-Gleichgewicht für weite Bereiche der Sendeleistung besitzt.

Die Untersuchung des eigentlichen Spiels unter Hochlast wird mit Hilfe des oben erwähnten Simulators durchgeführt. Als Algorithmus wird ein Cournot-Anpassungsprozess verwendet, der das Gleichgewicht durch Lernen anstatt durch Deduktion bestimmt. Die Ergebnisse deuten auf die Existenz eines stabilen Gleichgewichts hin. Mit den Parametern der Nutzenfunktion können Nettodurchsatz und Energieeffizienz ausbalanciert werden. Dabei steigt die relative Energieeffizienz bei schrumpfenden Zellradien massiv an bei gleichzeitig geringerem Durchsatzverlust. Es gibt Parameterkombinationen der Nutzenfunktion mit höherem Nettodurchsatz und gleichzeitig etwas geringerer Energieefiizienz als mit festen Sendeleistungen möglich.

Schließlich wird ein einfaches Verfahren für Teillastfälle mit dem spieltheoretischen Modell verglichen. Es zeigt sich, dass das einfache Verfahren bei geringer Last eine höhere Energieeffizienz als das spieltheoretische Verfahren aufweist, während sich die Situation bei zunehmender Last umkehrt.

Die wesentlichen Ergebnisse dieser Arbeit sind:

- Die Entwicklung eines neuen Ansatzes, um den erzielbare Nettodurchsatz in drahtlosen Datennetzen mit weichem Übergang der Nutzenfunktion zu berechnen
- Der Nachweis, dass maximale Sendeleistungen bei Anwesenheit interferenzgenerierender Funkzellen nicht notwendigerweise zu maximalem Nettodurchsatz führen
- Die Anwendung von Spieltheorie auf die Kombination von LA und TPC in H2 Netzwerken führt zur Ausbalancierung von Durchsatz und Energieeffizienz
- Quantitative Ergebniss, die als Indikatoren für die Optimierung realer H2-Netzinstallationen dienen können

Key words:

Wireless communication, HIPERLAN type 2, link adaptation, power control, game theory

Schlagworte:

Drahtlose Kommunikation, HIPERLAN Typ 2, Link Adaption, Leistungsregelung, Spieltheorie

Contents

List of Symbols **xi**

List of Abbreviations **xv**

List of Figures **xviii**

List of Tables **xix**

1 Introduction **1**

1.1 Motivation and Goals 2

1.2 Outline of the Thesis 3

2 Wireless Data Networks - Background and Scenarios **5**

2.1 Wireless Data networks 5

2.1.1 Technology overview 5

2.1.2 Engineering Wireless Voice and Data Networks 6

2.1.3 Link Adaptation 7

2.1.4 Transmission Power Control 9

2.1.5 Joint Transmission Power Control and Link Adaptation 10

2.2 HIPERLAN Type 2 11

2.2.1 HIPERLAN type 2 Scheduling 13

2.2.2 Transmission Power Control and Link Adaptation 13

2.3 Fundamental Models 15

2.3.1 Investigated Scenarios 15

2.3.2 Movement Model 16

2.3.3 Physical Layer Model 16

2.3.4 Model of the Radio Channel 17

2.3.5 Simulation model 18

3 Throughput Model in a Cellular Data network **21**

3.1 Throughput calculation for a single radio cell 23

3.2 Model for two radio cells 27

3.3 Model for a network of cells 30

4 Optimisation of Throughput **33**

4.1 Plausibility of results 33

4.2 Results on maximum throughput 36

4.2.1 Distance D between APs 37

4.2.2 Maximum transmission power of MTs 41

4.2.3 Ratio D/R 42

4.2.4 Traffic distribution between UL and DL and asymmetric load . . 44

4.2.5 Application of results to LA and TPC scheme 46

4.3 Discussion of Results 47

5 Increasing Energy Efficiency with Game Theory **49**

5.1 Basics of Game Theory 50

5.1.1 Definition of a game 50

5.1.2 Nash Equilibrium 51

5.1.3 Supermodular Games 52

5.1.4 Efficieny of Nash Equilibrium 53

5.2 Virtual LA and TPC Game 54

5.3 Non-Cooperative LA and TPC Game 58

5.3.1 Utility function 58

5.3.2 Proposed algorithm 63

5.4 Numerical Results 65

5.4.1 Existence of an equilibrium 66

5.4.2 Parameters k_p and Δp 66

5.4.3 Parameters D and R 71

5.4.4 Traffic distribution and asymmetric traffic load 77

5.4.5 Partial load 78

5.5 Discussion of Results 82

6 Conclusions **85**

A Proofs **95**

A.1 Proof of Lemma 1 95

A.2 Proof of NDD in the Virtual Game 96