

**Cross-Layer, Cognitive, Cooperative
Pulse Rate Control for
Autonomous, Low Power, IR-UWB Networks**

Von der Fakultät für Elektrotechnik und Informatik
der Universität Hannover
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieurin
(Dr.-Ing.)

genehmigte

Dissertation

von

Ingeniera Superior de Telecomunicación

María Dolores Pérez Guirao

geboren am 28. Juli 1977 in Cieza

2009

Referent: Prof. Dr.-Ing. Klaus Jobmann
Korreferentin: Prof. Dr. Maria Gabriella di Benedetto
Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Jörn Ostermann

Tag der Promotion: 12. Dezember 2008

Hannoversche Beiträge zur Nachrichtentechnik

Band 2.18

María Dolores Pérez Guirao

**Cross-Layer, Cognitive, Cooperative
Pulse Rate Control for Autonomous, Low Power,
IR-UWB Networks**

Shaker Verlag
Aachen 2009

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.: Hannover, Leibniz Univ., Diss., 2008

Copyright Shaker Verlag 2009

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 978-3-8322-8034-5

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 • e-mail: info@shaker.de

Acknowledgements

This thesis is the result of my research as a scientific assistant at the Institut of Communications Technology (IKT) at the Leibniz Universität Hannover. I want to express my most sincere thanks to my supervisor Prof. Dr.-Ing. Klaus Jobmann. His constant believe in my capabilities and his encouraging support have been the decisive aid in achieving my scientific goals. To Prof. M. Gabriella di Benedetto, I am immensely indebted for agreeing to be the second supervisor of my thesis. It is a pleasure for me to express my appreciation for her support and guiding.

I am also very grateful to my colleagues at the IKT and my short-term colleagues at the ACTS Lab at the INFO-COM Department of the University of Rome La Sapienza for the friendly working environment, and for being a continuous source of knowledge, experience and inspiration. Special thanks go to Kim Bartke for her careful proof reading. In this sense, many thanks to my friend Cristina Ordonez who patiently read the manuscript even though she lacked the technical background to understand the material.

Throughout this time my partner, Lars, my parents and my sister have been a source of love, support, and encouragement. It is doubtful that I would have made it without your support - thank you!

Hannover, im Dezember 2008

María Dolores Pérez Guirao

Abstract

Since the Federal Communication Commission (FCC) changed its spectrum management policy to encourage dynamic spectrum sharing, the demand for autonomous, cognitive wireless networks where devices opportunistically share the spectrum with minimal coordination and infrastructure has significantly increased. Particularly, in the context of low data rate (LDR), low power communications Impulse Radio Ultra Wideband (IR-UWB) is a key technology for such networks.

From a protocol design perspective, the main benefit of IR-UWB over narrowband radio technologies is the possibility to allow concurrent transmissions by using different pseudo-random, time hopping (TH) codes. However, TH codes are not perfectly orthogonal, and even if, due to asynchronicity between sources and multipath fading, Multi User Interference (MUI) is an issue.

Concerning MUI mitigation, the design of the MAC layer plays a very important role. When maximizing rates in LDR networks, the prevalent mind in the research community indicates that MUI should be combated by means of scheduling and rate adaptation. Particularly, for low power networks the optimal MAC layer design should follow an “all at once” scheduling and adapt the transmission rates to interference.

In IR-UWB networks, rate control can be achieved by adapting the channel coding rate, the modulation order or the processing gain. Regarding processing gain adaptation, and assuming that the energy per transmitted pulse is the same for all users, the reduction of the signal’s duty cycle by extending the “dead time” between pulses is preferable than to increase the number of pulses transmitted per symbol.

The main research effort in this thesis consists of the design of a novel, cross-layer, cognitive and cooperative approach for impulsive interference management. This enables concurrent transmissions at full power, while allows each source to independently adapt its pulse rate (transmitted pulses per second) to mitigate MUI. The design is independent of a particular modulation scheme or receiver technique. Furthermore, it can be combined with conventional adaptive channel coding. The approach is motivated by the fact that the distributed adaptation of IR-UWB processing gain has not been sufficiently addressed in the literature before. Existing approaches rely on the presence of a central authority or assume a definite receiver technique. This thesis focuses on autonomous networks; although hierarchical structures are not ruled out here, they are not required and therefore adaptation schemes must be performed at the end users.

In order to study the pulse rate control approach, game theory, in its classical as well as in its evolutionary view, has been applied. Analytical and simulative results show that pulse rate control is an appropriate means for impulsive interference management and network throughput optimisation in highly loaded IR-UWB networks.

Key words

Cross layer MAC-PHY, IR-UWB, MUI, interference management, uncoordinated medium sharing, link adaptation, game theory

Kurzfassung

Die Anwendungen der IR-UWB-Technologie sind vielfältig. Sie können überall dort eingesetzt werden, wo über Distanzen bis zu wenigen zehn Metern Steuerungs- und Messinformation oder Medieninformation (Sprache, Bilder, Streams, Files) kontakt- und leitungslos übertragen werden sollen. Solche Anwendungen finden wir in stark gestörten Industrieumgebungen ebenso wie in der Signalversorgung für Multimedia-Anwendungen im häuslichen Bereich oder sogar in Kraftfahrzeugen. Im industriellen Bereich liegen die Vorteile in der Störunanfälligkeit gegen Fremdsignale, während in der häuslichen Umgebung oder im Kraftfahrzeug der bedeutende Vorteil im Fortfall der andernfalls notwendigen Verkabelung liegt. In allen Fällen ist zu erwarten, dass die Kapazitätsgrenzen eines auf dem IEEE802.11- Standard (W-LAN) basierten Systems deutlich überschritten werden können.

Aus Sicht der Protokollentwicklung hat der Einsatz von IR-UWB einen wesentlichen Vorteil gegenüber dem Einsatz schmalbandiger Funktechnologien. Er ermöglicht die gleichzeitige Übertragung mehrerer Nutzer durch die Auswahl passender pseudo-zufälliger time hopping (TH) Sequenzen. In Systemen mit niedrigen Bitraten genügt das TH-Verfahren als Mehrfachzugriffssteuerung. Die vergleichsweise geringe Sendehäufigkeit der Netzknoten erlaubt es, jedem Nutzer einen bestimmten Zeitrahmen zum Senden bereitzustellen. Bei steigender Belegung des Kanals, durch eine Erhöhung der Bitraten und/oder der Anzahl an Nutzern, können destruktive Überlappungen von Pulsen (engl: Multi-User Interference (MUI)) nicht ausgeschlossen werden.

Das Design der Medienzugriffssteuerungsschicht (engl: MAC) spielt im Hinblick auf die Kompensation der MUI eine wesentliche Rolle. Der gängigste Ansatz, um eine Maximierung der Datenraten zu erreichen, ist die Kombination von Scheduling und Datenraten-Anpassung an die Link-Qualität. Insbesondere in Funknetzen mit niedriger Sendeleistung wird vorwiegend ein $0\text{-}P_{max}$ Scheduling eingesetzt. Möglichkeiten zur Anpassung der Datenraten in IR-UWB Funknetzwerken umfassen die Adaptation der Modulationsordnung, des Codegewinns und/oder des Prozessgewinns. Im letztgenannten Fall und angenommen dass, die Energie pro gesendetem Puls für alle Sender gleich ist, erweist sich eine Verringerung der Pulssendehäufigkeit als besseres Mittel gegen Übertragungsfehler, als eine Erhöhung der mittleren Sendeleistung durch die Verwendung mehrerer Pulse pro Symbol.

Als Motivation dieser Arbeit dient die Tatsache, dass die in der Literatur vorhandenen Ansätze zur Anpassung des Prozessgewinns auf die Existenz einer zentralen, übergeordneten und koordinierenden Instanz oder auf eine bestimmte Art von Empfängerstruktur angewiesen sind. Wenngleich in autonomen Funknetzwerken hierarchische Strukturen nicht ausgeschlossen sind sind sie nicht erforderlich. Aus diesem Grund wird im Rahmen dieser Arbeit die Entwicklung eines verteilten Ansatzes verfolgt.

Die Anwendung von Spieltheorie, sowohl in der klassischen, als auch in der evolutionären Variante, führt zu der Entwicklung eines neuartigen verteilten Ansatzes zur Steuerung der Häufigkeit der Pulsaussendungen. Das wesentliche Ergebnis dieser Arbeit ist der Nachweis der Eignung dieser neuartigen entwickelten Ansatzes zur impulsiven MUI - Unterdrückung und Netzdurchsatzoptimierung in autonomen IR-UWB Funknetzwerken mit verteilter Steuerung. Weitere Vorzüge des Ansatzes sind die Kombinationsmöglichkeit mit der Kanalcodierung und die Unabhängigkeit gegenüber besonderer Modulationsverfahren oder Empfängerstrukturen.

Schlagworte

Cross Layer MAC-PHY, IR-UWB, MUI, Interferenz Management, unkoordinierte Mediumzugriffssteuerung, Link Adaptation, Spieltheorie

Contents

List of Abbreviations	V
1 Introduction	1
1.1 Motivation and Goals	2
1.2 Outline of the Thesis	3
2 Impulse Radio UWB Networks - Background and Scenarios	5
2.1 Technology Background	5
2.1.1 Power Limits and Emission Mask	6
2.1.2 Impulse Radio UWB	6
2.1.2.1 Generation of TH-PPM Signals	7
2.1.3 The UWB Channel and Receiver	8
2.1.4 BER Modeling	9
2.1.5 MAC Layer Design	10
2.2 Autonomous Networks	12
2.3 Investigated Scenarios	13
2.3.1 Cluster-based Network Model	13
2.3.2 Peer-to-Peer Network Model	14
2.4 Fundamental Models	15
2.4.1 Radio Channel	15
2.4.2 Physical Layer	16
2.4.3 Simulation Model	17
2.4.3.1 Packet Error Modeling	18
2.4.3.2 Air Interface	20

3	Cross-Layer, Cognitive, Cooperative Interference Management	23
3.1	Link Adaptation in IR-UWB Networks	24
3.2	Interference Management in IR-UWB Networks	26
3.2.1	Enforcing Cooperation in Autonomous Networks: A Game Theoretic Perspective	27
3.3	Basics of Game Theory	28
3.3.1	Asynchronous, Myopic, Repeated Games	28
3.3.2	Nash Equilibrium	30
3.3.3	Desirability of Nash Equilibrium	30
3.3.4	Potential Games	31
4	Distributed Interference Compensation by Pulse Rate Control	33
4.1	General Problem Formulation	34
4.2	Pulse Rate Control Game	36
4.2.1	Pricing in the Cluster-based Network Model	37
4.2.2	Pricing in the Peer-to-Peer Network Model	39
4.2.2.1	Interpretation of Prices as Lagrange Multipliers	41
4.3	Pulse Rate Control Algorithm	43
4.4	Nash Equilibrium and Globally Optimum Solution	44
4.4.1	Cluster-based Network Model	45
4.4.1.1	Existence of an Equilibrium	45
4.4.1.2	Uniqueness of the Equilibrium	47
4.4.2	Peer-to-Peer Network Model	49
4.4.2.1	Existence of an Equilibrium	49
4.5	Analytical Numerical Examples	50
4.5.1	Two-Players Game - Cluster-based Network Model	50
4.5.2	Two-Players Game - Peer-to-Peer Network Model	52
4.6	Simulative Numerical Results	53
4.6.1	Cluster-based Network Model	53
4.6.1.1	Existence of an Equilibrium	54
4.6.1.2	Variation of the Offered Load	57

4.6.1.3	Performance Comparison with IEEE 802.14.5a MAC	59
4.6.2	Peer-to-Peer Network Model	61
4.6.2.1	Existence of an Equilibrium	62
4.6.2.2	Performance Comparison with ACC	65
4.7	Discussion of Results	67
5	Joint Link Adaptation and Pulse Rate Control	69
5.1	Problem Formulation	69
5.2	Joint LA and PRC Game	70
5.2.1	Existence of an Equilibrium	71
5.3	LA-PRC Algorithm	74
5.4	Simulative Numerical Results	77
5.4.1	Existence of an Equilibrium	77
5.4.1.1	Influence of the Subgradient Step Size	80
5.4.2	Performance Comparison with ACC	82
5.5	Discussion of Results	83
6	Towards Minimum Complexity Algorithms	85
6.1	Evolutionary Networking Approaches	86
6.1.1	Evolutionary Games	87
6.2	Evolutionary Algorithm	87
6.2.1	Evolutionary PRC Two-Players Game	88
6.3	Simulative Numerical Results	89
6.3.1	Cluster-based Network Model	90
6.3.2	Peer-to-Peer Network Model	93
6.4	Discussion of Results	94
7	Summary and Outlook	97
	List of Tables	101
	List of Figures	103
	Bibliography	105
		III

A	Simulative MUI Modeling	117
B	First and Second Order Conditions	121
B.1	First Order Conditions	121
B.1.1	Cluster-based Network Model	121
B.1.2	Peer-to-Peer Network Model	121
B.2	Second Order Conditions	122
B.2.1	Cluster-based Network Model	122
B.2.2	Peer-to-Peer Network Model	122
B.2.2.1	Two-Players Network	122
C	Proofs	123
C.1	Two-Players Ordinal Potential Game	123
C.2	Quasi-Concavity of $v_i(\mathbf{prf})$	123
C.3	Strict Quasi-Concavity of $v_i(\mathbf{prf})$	124