

Interference Management in Impulse-Radio Ultra-Wide Band Networks

THÈSE N° 4119 (2008)

PRÉSENTÉE LE 11 JUILLET 2008

À LA FACULTE INFORMATIQUE ET COMMUNICATIONS
LABORATOIRE POUR LES COMMUNICATIONS INFORMATIQUES ET LEURS APPLICATIONS 2
PROGRAMME DOCTORAL EN INFORMATIQUE, COMMUNICATIONS ET INFORMATION

ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE

POUR L'OBTENTION DU GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES

PAR

Ruben MERZ

ingénieur en systèmes de communication diplômé EPF
de nationalité suisse et originaire de Domat/Ems (GR)

acceptée sur proposition du jury:

Prof. A. Martinoli, président du jury
Prof. J.-Y. Le Boudec, directeur de thèse
Prof. R. Knopp, rapporteur
Prof. A. Molisch, rapporteur
Dr J. Zory, rapporteur



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Suisse
2008

Abstract

We consider networks of impulse-radio ultra-wide band (IR-UWB) devices. We are interested in the architecture, design, and performance evaluation of these networks in a low data-rate, self-organized, and multi-hop setting.

IR-UWB is a potential physical layer for sensor networks and emerging pervasive wireless networks. These networks are likely to have no particular infrastructure, might have nodes embedded in everyday life objects and have a size ranging from a few dozen nodes to large-scale networks composed of hundreds of nodes. Their average data-rate is low, on the order of a few megabits per second. IR-UWB physical layers are attractive for these networks because they potentially combine low-power consumption, robustness to multipath fading and to interference, and location/ranging capability.

The features of an IR-UWB physical layer greatly differ from the features of the narrow-band physical layers used in existing wireless networks. First, the bandwidth of an IR-UWB physical layer is at least 500 MHz, which is easily two orders of magnitude larger than the bandwidth used by a typical narrow-band physical layer. Second, this large bandwidth implies stringent radio spectrum regulations because UWB systems might occupy a portion of the spectrum that is already in use. Consequently, UWB systems exhibit extremely low power spectral densities. Finally IR-UWB physical layers offer multi-channel capabilities for multiple and concurrent access to the physical layer. Hence, the architecture and design of IR-UWB networks are likely to differ significantly from narrow-band wireless networks. For the network to operate efficiently, it must be designed and implemented to take into account the features of IR-UWB and to take advantage of them. In this thesis, we focus on both the medium access control (MAC) layer and the physical layer. Our main objectives are to understand and determine (1) the architecture and design principles of IR-UWB networks, and (2) how to implement them in practical schemes.

In the first part of this thesis, we explore the design space of IR-UWB networks and analyze the fundamental design choices. We show that interference from concurrent transmissions

should not be prevented as in protocols that use mutual exclusion (for instance, IEEE 802.11). Instead, interference must be managed with rate adaptation, and an interference mitigation scheme should be used at the physical layer. Power control is useless. Based on these findings, we develop a practical PHY-aware MAC protocol that takes into account the specific nature of IR-UWB and that is able to adapt its rate to interference. We evaluate the performance obtained with this design: It clearly outperforms traditional designs that, instead, use mutual exclusion or power control. One crucial aspect of IR-UWB networks is packet detection and timing acquisition. In this context, a network design choice is whether to use a common or private acquisition preamble for timing acquisition. Therefore, we evaluate how this network design issue affects the network throughput. Our analysis shows that a private acquisition preamble yields a tremendous increase in throughput, compared with a common acquisition preamble. In addition, simulations on multi-hop topologies with TCP flows demonstrate that a network using private acquisition preambles has a stable throughput. On the contrary, using a common acquisition preamble exhibits an effect similar to exposed terminal issues in 802.11 networks: the throughput is severely degraded and flow starvation might occur.

In the second part of this thesis, we are interested in IEEE 802.15.4a, a standard for low data-rate, low complexity networks that employs an IR-UWB physical layer. Due to its low complexity, energy detection is appealing for the implementation of practical receivers. But it is less robust to multi-user interference (MUI) than a coherent receiver. Hence, we evaluate the performance of an IEEE 802.15.4a physical layer with an energy detection receiver to find out whether a satisfactory performance is still obtained. Our results show that MUI severely degrades the performance in this case. The energy detection receiver significantly diminishes one of the most appealing benefits of UWB, specifically its robustness to MUI and thus the possibility of allowing for parallel transmissions. This performance analysis leads to the development of an IR-UWB receiver architecture, based on energy detection, that is robust to MUI and adapted to the peculiarities of IEEE 802.15.4a. This architecture greatly improves the performance and entails only a moderate increase in complexity.

Finally, we present the architecture of an IR-UWB physical layer implementation in ns-2, a well-known network simulator. This architecture is generic and allows for the simulation of several multiple-access physical layers. In addition, it comprises a model of packet detection and timing acquisition. Network simulators also need to have efficient algorithms to accurately compute bit or packet error rates. Hence, we present a fast algorithm to compute the bit error rate of an IR-UWB physical layer in a network setting with MUI. It is based on a novel combination of large deviation theory and importance sampling.

Keywords

Ultra-wide band, UWB, impulse-radio, medium-access control, cross-layer design, multi-user interference, impulsive interference, interference mitigation, energy detection, IEEE 802.15.4a, ns-2, large deviation, importance sampling.

Résumé

Le travail de cette thèse a pour but d'étudier les réseaux sans-fils basés sur une radio impulsive à bandes ultra-larges (ULB). Notre intérêt se porte sur l'architecture, la conception, ainsi que l'évaluation de performance des ces réseaux pour des applications bas-débits, nécessitant un comportement auto-organisés et des relais multiples.

Les radios impulsives ULB sont intéressantes pour les réseaux de capteurs et les réseaux sans-fils omniprésents. De tels réseaux ne nécessitent pas forcément une infrastructure fixe et sont souvent intégrés aux objets de la vie courante. Leur besoin en débit est faible, de l'ordre du mégabit par seconde, et leur taille peut varier, allant d'une douzaine à plusieurs centaines de noeuds pour les réseaux les plus vastes. L'attrait pour l'utilisation de radios impulsives ULB pour ces réseaux provient du fait qu'elles combinent à la fois une faible consommation, une bonne résistance aux phénomènes multi-trajet et à l'interférence, ainsi qu'une aptitude pour la localisation.

Les caractéristiques d'une radio impulsive ULB sont très différentes d'une radio traditionnelle à bandes étroites largement utilisées dans les réseaux sans fils existants. Tout d'abord, la bande passante est au minimum 500 MHz, ce qui représente environ dix à cent fois la largeur de la bande passante utilisée par les radios traditionnelles. Avec une telle bande passante, un système ULB risque d'empiéter sur des parties du spectre radio réservées à d'autres systèmes. Pour pallier à ce problème, les systèmes ULB ont une densité spectrale de puissance très faible. Enfin, les radio impulsives ULB offrent d'excellentes possibilités pour l'accès multiple au canal. De ce fait, l'architecture et la conception de réseaux basés sur une radio impulsive ULB diffèrent probablement largement des réseaux sans-fils à bandes étroites. Dans cette thèse, nous nous concentrons à la fois sur l'accès au médium et sur la couche physique. Notre objectif principal est de comprendre et déterminer (1) l'architecture et les principes régissant la conception de réseaux basés sur une radio impulsive ULB, et (2) comment implémenter cette architecture et ces principes en pratique.

Dans la première partie de ce manuscrit, nous montrons pour les réseaux basés sur une ra-

dio impulsive ULB que, contrairement aux réseaux à bande étroite, l'interférence créée par les autres émetteurs ne doit pas être gérée par un protocole d'exclusion, mais par une adaptation du débit et l'utilisation d'un mécanisme d'atténuation de l'interférence au niveau de la couche physique. Les transmissions en parallèles par plusieurs émetteurs sont autorisées. Le contrôle de puissance d'émission n'est de plus pas nécessaire. Nous avons développé un protocole d'accès au médium basé sur ces principes et avons évalué sa performance qui s'avère être largement supérieure à celle obtenue avec des protocoles plus classiques qui utilisent le contrôle de puissance ou l'exclusion. Un aspect très important pour les réseaux basés sur une radio impulsive ULB est la synchronisation nécessaire pour la réception de chaque paquet. Cette synchronisation utilise un préambule au début de chaque paquet. Ce préambule peut être unique pour tout le réseau, ou alors, unique pour chaque récepteur du réseau. Nous avons évalué l'impact sur le débit du réseau de ces deux possibilités. Notre analyse montre que le débit obtenu avec un préambule unique par récepteur est très supérieur à celui obtenu avec un préambule unique pour tout le réseau. De plus, des simulations avec TCP sur un réseau à relais multiples montre qu'un débit stable est obtenu avec un préambule unique par récepteur, ce qui n'est pas le cas du débit obtenu avec un préambule unique pour tout le réseau.

Dans la seconde partie du manuscrit, nous nous intéressons à un récent standard, IEEE 802.15.4a, pour les réseaux à bas-débit et faible complexité utilisant une radio impulsive ULB. Étant donné l'importance d'une faible complexité, les récepteurs basés sur le principe de détection d'énergie sont séduisants. Malheureusement, ils sont très sensibles à l'interférence multi-utilisateur. Dans un premier temps, nous avons donc évalué la performance d'un récepteur à détection d'énergie classique pour le standard IEEE 802.15.4a en présence d'interférence multi-utilisateur. La performance est sévèrement diminuée par la présence d'interférence multi-utilisateur. Partant de ce constat, nous avons développé un récepteur pour radios impulsives ULB, toujours basé sur la détection d'énergie, mais qui premièrement, est robuste et résistant à l'interférence multi-utilisateur, et qui deuxièmement, est adapté à la modulation spécifique de la couche physique du standard 802.15.4a. Avec ce récepteur, dont la complexité reste raisonnable, nous obtenons un gain de performance considérable.

Enfin, nous présentons l'architecture d'une implémentation d'une radio impulsive ULB pour le simulateur de réseaux ns-2. Cette architecture est suffisamment générale pour pouvoir simuler d'autres couches physiques à accès multiple et inclut un modèle pour la synchronisation. Les simulateurs de réseaux ont également besoin d'algorithmes à la fois efficaces et précis pour calculer les taux d'erreurs des paquets ou des bits. C'est pourquoi nous présentons également un algorithme rapide pour calculer le taux d'erreur des bits d'une radio impulsive ULB,

dans un environnement réseau, avec de l'interférence multi-utilisateur. Cet algorithme est basé sur une nouvelle combinaison d'éléments de la théorie des grands écarts et d'échantillonnage par importance.

Mots clés

Ultra-large bande, ULB, radio impulsive, contrôle d'accès au médium, design multi-couche, interférence multi-utilisateur, interférence impulsive, atténuation de l'interférence, détecteur d'énergie, IEEE 802.15.4a, ns-2, grands écarts, échantillonnage par importance.

Contents

Abstract	i
Résumé	iv
Acknowledgments	viii
1 Introduction	1
1.1 Motivations	1
1.2 Dissertation Outline	3
1.2.1 Physical Layer Aware MAC Protocols for IR-UWB Networks	3
1.2.2 Robust Receivers for IEEE 802.15.4a Networks	5
1.2.3 Simulation of IR-UWB networks	6
1.3 Contributions	7
2 IR-UWB Networks: System Model and Assumptions	9
2.1 Network Model and Assumptions	9
2.1.1 Network Assumptions	9
2.2 Physical Layer Model and Assumptions	10
2.2.1 IR-UWB with Time-Hopping	10
2.2.2 From Rake Receivers to Energy Detection Receivers	13
2.2.3 IR-UWB as a Multi-Channel Physical Layer	15
2.2.4 Interference in IR-UWB Networks	16
2.2.5 Packet Detection and Timing Acquisition	18
2.2.6 IEEE 802.15.4a Physical Layer	19
2.2.7 Rate-Compatible Punctured Convolutional Codes	21
2.2.8 Physical Layer Assumptions	21

3	Related Work	25
3.1	The IR-UWB Physical Layer	25
3.2	Rake Receivers and Energy Detection Receivers for IR-UWB	27
3.3	IR-UWB Networks	29
3.3.1	Characterization of Interference in IR-UWB Networks	29
3.3.2	Computing Bit Error Rates in IR-UWB Networks	30
3.3.3	Interference Mitigation	30
3.3.4	Optimal Organization of IR-UWB Networks	32
3.3.5	MAC Protocols for IR-UWB Networks	33
3.3.6	Modeling of IR-UWB Networks	35
3.3.7	Simulation of IR-UWB Networks	35
I	Physical layer Aware MAC Protocols for IR-UWB Networks	37
4	How to Design a PHY-Aware MAC for IR-UWB Networks: a Trade-offs Analysis	39
4.1	The Design Space of PHY-Aware MAC Protocols	40
4.1.1	What Functions Should a PHY-Aware MAC Provide ?	40
4.1.2	How Can the Functions of a PHY-Aware MAC be Implemented ?	41
4.1.3	Which Building Blocks are Used by Existing Designs ?	45
4.2	Performance Analysis of the Different Design Choices	48
4.2.1	Energy Consumption Model	49
4.2.2	Performance Metrics and Simulation Parameters	50
4.2.3	Conclusion From the Performance Analysis: Guidelines for the Opti- mal Design	50
4.3	Discussion and Conclusion	57
5	DCC-MAC: a PHY-Aware MAC Layer for IR-UWB Ad Hoc Networks	59
5.1	Taming the Exclusion Region With Interference Mitigation	60
5.1.1	Performance Metric and Simulation Parameters	60
5.1.2	Computing the Size of the Exclusion Region	61
5.1.3	Replacing Exclusion by Interference Mitigation	62
5.2	The DCC-MAC Protocol	64
5.2.1	Rate Adaptation: Dynamic Channel Coding with Incremental Redun- dancy	64

5.2.2	The Private MAC: Resolving Contention at a Destination	65
5.3	Performance Evaluation	69
5.3.1	Performance Metric and Simulation Parameters	70
5.3.2	Simulation Results	71
5.4	Discussion and Conclusion	73
6	Performance Evaluation of IR-UWB Networks Using Common or Private Acquisition Preambles	75
6.1	A Saturation Throughput Analysis of an IR-UWB Network with Packet Detection and Timing Acquisition	78
6.1.1	Computing λ_0 and λ as a Function of p_{acq} : Modeling the DCC-MAC Protocol	79
6.1.2	Computing p_{acq} as a Function of λ_0 and λ : Modeling Packet Detection and Timing Acquisition	85
6.1.3	Summary of our Method to Compute the Saturation Throughput	91
6.2	Performance Evaluation	91
6.2.1	Scenarios and Parameters of the Performance Evaluation	91
6.2.2	Saturation Throughput of a Homogeneous IR-UWB Network	94
6.2.3	NS-2 Simulations	95
6.3	Discussion and Conclusion	98
6.4	Acknowledgements	101
7	An IR-UWB Software Radio Testbed with Multi-User Interference	103
7.1	Architecture of the Testbed	104
7.1.1	Implementation Challenges for a Testbed with Discrete Components	105
7.2	Timing Acquisition with Concurrent Transmitters	109
7.3	Discussion and Conclusion	110
7.4	Acknowledgements	110
II	Robust Receivers for IEEE 802.15.4a Networks	113
8	Performance Evaluation of IEEE 802.15.4a with an Energy Detection Receiver and Multi-User Interference	115
8.1	A Simple Energy Detection Receiver for IR-UWB with Channel Mask Estimation	116

8.1.1	Architecture of the Energy Detection Receiver	117
8.1.2	Coarse Timing Acquisition	118
8.1.3	Fine Timing Acquisition, Channel Mask Estimation, and SFD Detection	119
8.1.4	Decoding of the Payload	120
8.2	Performance Evaluation	120
8.2.1	Performance Metrics and Simulation Parameters	120
8.2.2	How to Evaluate and Compare the Performance with MUI	122
8.2.3	Performance Evaluation Results: Single-User Case	122
8.2.4	Performance Evaluation Results: Multiple Users Case	122
8.3	Discussion and Conclusion	130
8.4	Acknowledgments	130
9	An Energy Detection Receiver Robust to Multi-User interference for IEEE 802.15.4a Networks	133
9.1	Architecture of the Robust Receiver	135
9.1.1	Optimal and Approximated Decision Rules for Burst Transmissions . .	136
9.1.2	A Thresholding Mechanism to Reduce the Impact of MUI	136
9.1.3	Estimation of the Weighting Coefficients p_m	137
9.1.4	Robust Parameter Estimation Using Order Statistics	140
9.2	Performance Evaluation	140
9.2.1	Performance Metrics and Simulation Parameters	140
9.2.2	Performance Evaluation Results	143
9.3	Discussion and Conclusion	143
III	Simulation of IR-UWB Networks	145
10	An Architecture for the Simulation of IR-UWB Networks in ns-2	147
10.1	Adapting ns-2 for the Simulation of IR-UWB Physical Layers	149
10.1.1	Implementation Issues in the Wireless Physical Layer of ns-2	149
10.1.2	Key Features of our Modified Wireless Physical Layer Architecture . .	151
10.1.3	An IR-UWB Physical Layer for ns-2	153
10.2	End-to-End Path of a Packet Through the MAC and the Physical Layer	155
10.3	Simulations Examples	157
10.3.1	Performance Metric and Simulation Parameters	157

10.3.2	Simulation Results	158
10.4	Discussion and Conclusion	159
11	Bit Error Rate of an IR-UWB Channel with Multi-User Interference for a Network Simulator	163
11.1	A Fast and Efficient Method to Compute the BER	164
11.1.1	Modeling Assumptions	165
11.1.2	Expression for the BER	165
11.1.3	Distribution of the Interference Y_u	166
11.1.4	Computing the BER Using Large Deviation	167
11.1.5	BER Computation Using Importance Sampling	172
11.1.6	Our Proposed Method: a Combination of Large Deviation and Importance Sampling	176
11.2	Performance Evaluation	178
11.2.1	Performance Metric and Simulation Parameters	178
11.2.2	Performance Evaluation Results	179
11.3	Discussion and Conclusion	181
12	Conclusion	183
12.1	Future Work and Possible Extensions	185
12.2	What Can we Learn From IR-UWB Networks?	187
	Bibliography	188
A	Appendices for Part I	211
A.1	Simulations for rate-maximization and lifetime-maximization problems in Section 4.2.3	211
A.2	List of components used for the IR-UWB software radio testbed	212
	Publications	213
	Curriculum Vitae	215