

Novel low duty cycle schemes from ultra wide band to ultra low power

Doctoral Thesis

Author(s):

Troesch, Florian

Publication date:

2009

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-006011166>

Rights / license:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#)

Originally published in:

Series in Wireless Communications 8

Diss. ETH No. 18688

Novel Low Duty Cycle Schemes: From Ultra Wide Band to Ultra Low Power

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY
ZURICH

for the degree of
Doctor of Sciences

presented by

FLORIAN TROESCH

Dipl. El.-Ing. ETH Zurich

born May 30, 1978

citizen of Thunstetten (BE) and Bern (BE), Switzerland

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. A. Wittneben, examiner

Prof. Dr. K. Witrisal, co-examiner

2009

Abstract

Electronic devices steadily penetrate almost every area of life and transform our surrounding more and more into a dense heterogeneous wireless network. To enable the potential of such a network, a wireless technology with high scalability potential is required supporting devices with ultra low power consumption as well as high data rates. Ultra wideband (UWB) is a promising technology inherently supporting such a system scalability. However, ultra low power communication is still a major challenge.

A rigorous low duty cycle operation of UWB impulse radio (UWB-IR) transceivers seems a potential key to ultra low power communication. Thereby, two different approaches are possible. Low pulse rate (LPR) systems realize the low duty cycle by a large pulse repetition period. High pulse rate (HPR) systems achieve the low duty cycle by burst-wise transmission at high peak data rate. Analysis and optimization of these two approaches is the main contribution of this thesis.

National authorities impose hard constraints on peak and average transmit power of UWB devices, which makes transmit power an important optimization parameter. Therefore, the impact of peak and average power constraints on UWB-IR signals is analyzed with focus on the Federal Communications Commission's (FCC) regulations. A joint maximization of peak and average transmit power leads then to modified LPR and HPR schemes with important gains in link margin, coverage and performance.

The modified LPRs correspond to a novel type of UWB-IR schemes directly derived from the FCC peak power constraint. They are especially suited for rich scattering environments and drastically increase the TX/RX-scalability in the sense of a tunable trade-off between transmitter and receiver complexity. Moreover, for energy detectors (ED) with a fixed, sufficiently large

integration window, the modified LPRs minimize the bit error rate (BER) under the FCC power constraints even in case of full channel state information at the transmitter (CSI-T).

While the burst-wise transmission of HPR systems allows simple hardware realizations, due to the high peak data rate, even a moderate delay spread can lead to inter-symbol interference (ISI) and major performance degradation. In particular, this is true for EDs, which seem the best suited receivers for ultra low power communication. Therefore, a low complexity post-detection based on maximum likelihood sequence estimation (MLSE) is proposed for non-linear ED frontends and binary pulse position modulation (BPPM). The MLSE is realized by a Viterbi algorithm which operates at symbol rate and works with very limited CSI and number of states. In parallel to ISI cancelation, the proposed MLSE can also be used for efficient symbol synchronization in practical ultra low power receivers. Optimal MLSE metrics based on different levels of CSI are evaluated as benchmarks and highlight the potential of the proposed low complexity MLSE. As a further benchmark, the slightly more complex transmitted reference (TR) scheme is investigated, too. While TR and BPPM with energy detection (BPPM-ED) show the same BER performance in absence of ISI, it is shown that TR is much more robust to ISI than BPPM-ED and for a certain setup even benefits from moderate ISI.

To prove the presented concepts in practice, the more attractive HPR scheme is integrated into an ultra low power modem design. With an MLSE post-detection for ISI cancelation and symbol synchronization in parallel, an ISI robust ultra low power modem design is achieved. Based on a meta study of currently available devices, the power consumption of the modem supporting an average data rate of 500 kbps is estimated to about 1 mW, while its promising real time BER is demonstrated using an over-the-air testbed in a strongly ISI-limited environment with many scattering objects.

Kurzfassung

Schritt für Schritt dringen elektronische Geräte in sämtliche Bereiche unseres Lebens vor und verwandeln unsere Umgebung immer mehr in ein dichtes, drahtloses Netzwerk aus vielen, sehr heterogenen Knoten. Um das Potential eines solchen Netzwerks vollumfänglich auszuschöpfen, wird eine drahtlose Technologie mit grossem Skalierungspotential benötigt, welche Geräte mit extrem niedrigem Stromverbrauch gleichermassen unterstützt wie solche mit sehr hohen Datenraten. Ultrabreitband (UWB, engl. ultra-wideband) ist eine vielversprechende Technologie, die eine solche Skalierbarkeit von Natur aus mit sich bringt. Der extrem niedrige Stromverbrauch stellt aber immer noch eine grosse Herausforderung dar.

Ein möglicher Schlüssel für den erwünschten, extrem niedrigen Stromverbrauch scheint ein UWB Impulse Radio (UWB-IR) System mit sehr kurzen Wachzyklen (LCD, engl. low duty cycle) zu sein. Dabei sind zwei Ansätze möglich: Systeme mit sehr niedriger Pulsrate (LPR, engl. low pulse rate) realisieren den LDC über eine sehr grosse Pulsperiodendauer. Systeme mit hoher Pulsrate (HPR, engl. high pulse rate) erreichen den LDC durch blockweises Senden und langen Pausen zwischen den Blöcken. Der Hauptbeitrag dieser Arbeit ist die Analyse und die Optimierung dieser beiden LDC-Verfahren.

Sowohl die momentane als auch die durchschnittliche Sendeleistung von UWB-IR Geräten sind von staatlichen Behörden mittels Maximalwerten streng begrenzt. Prominentestes Beispiel bildet die Regulierung der amerikanischen Bundesbehörde für Kommunikation, der Federal Communications Commission (FCC). Dies motiviert eine genaue Analyse des Zusammenspiels zwischen maximal erlaubter Sendeleistung und UWB-IR Sendesignal unter Berufung auf die Regulierung der FCC. Die gleichzeitige Optimierung von momentaner und durchschnittlicher Sendeleistung führt zu angepassten LPR- und HPR-Systemen mit deutlich grösseren Reserven

im Linkbudget, besserer Abdeckung und höhere Leistungsfähigkeit.

Die optimierten LPR-Systeme stellen eine neue UWB-IR Variante dar, die direkt aus der Regulierung der momentanen Sendeleistung resultiert. Sie ist besonders geeignet für Umgebungen mit sehr vielen Streuungsobjekten und erhöht massgeblich die TX/RX-Skalierbarkeit eines UWB-IR Systems im Sinne eines verstellbaren Kompromisses zwischen Sender- und Empfängerkomplexität. Unter Berücksichtigung der FCC-Regulierung minimieren diese optimierten LPR-Systeme die Bitfehlerrate (BER, engl. bit error rate) eines Energiedetektors (ED) mit fixem, genügend grossem Integrationsfenster. Dies trifft auch im Falle von vollständiger Kanalzustandsinformation am Sender (CSI-T, engl. channel state information at the transmitter) zu.

Während die blockweise Kommunikation der HPR-Systeme sehr einfache Hardwarerealisierungen erlaubt, führt die benötigte, hohe Pulsrate schon bei moderater Spreizung der Kanalverzögerung zu Intersymbolinterferenz (ISI) und einer starken Reduktion der Leistungsfähigkeit des Empfängers. Dies gilt ganz besonders für den ED, der ansonsten die beste Lösung zur Realisierung eines niedrigen Stromverbrauchs zu sein scheint. In dieser Arbeit wird daher ein einfacher Maximum-Likelihood-Sequenzschätzer (MLSE, engl. maximum-likelihood sequence estimator) für nichtlineare ED-Eingangsstufen und binärer Pulspositionsmodulation (BPPM, engl. binary pulse position modulation) vorgeschlagen. Dieser ist als Viterbi Algorithmus realisiert und arbeitet mit Symbolrate, limitierter Kanalzustandsinformation und wenigen Zuständen. Um die Empfängerkomplexität klein zu halten, kann der vorgestellte MLSE zusätzlich zur ISI-Auslöschung auch zur effizienten Symbolsynchronisation genutzt werden. Als Referenz für den vorgeschlagenen MLSE mit sehr niedriger Komplexität werden optimale MLSE-Metriken berechnet basierend auf unterschiedlichem Grad der Kanalzustandsinformation. Ein Vergleich zeigt das grosse Potential des vorgeschlagenen MLSE. Als weitere Referenz wird auch ein leicht komplexeres System namens Transmitted-Reference (TR) betrachtet. Während TR und BPPM mit ED (BPPM-ED) bei interferenzfreier Kommunikation die gleiche BER aufweisen, wird gezeigt, dass TR wesentlich robuster gegenüber ISI ist und unter gewissen Umständen sogar von moderatem ISI profitieren kann.

Um die Gültigkeit der vorgestellten Konzepte in der Praxis zu beweisen, wird das attraktivere

HPR-System in ein Modemdesign mit extrem niedrigem Stromverbrauch integriert. Verwendet man den MLSE-Schätzer sowohl zur ISI-Auslöschung als auch zur Symbolsynchronisation, so erhält man ein ISI-robustes Modemdesign mit immer noch sehr niedrigem Stromverbrauch. Basierend auf einer Meta-Studie über zurzeit erhältliche Geräte, wird die Leistungsaufnahme des Modemdesigns mit 500 kbps unter 1 mW geschätzt. Zur Verifikation dessen Leistungsfähigkeit wird das Modemdesign in eine Testumgebung integriert, welche die Kommunikation über die Luft in Echtzeit ermöglicht. Die Testumgebung wird dann in einem Raum mit vielen Streuungsobjekten betrieben, welche starke Interferenz erzeugen und damit die Kommunikation massiv erschweren. Trotz der starken Intersymbolinterferenz demonstriert das vorgestellte Modemdesign sehr vielversprechende Bitfehlerraten in Echtzeit.