



Doctoral Thesis

Communication and Localization in UWB Sensor Networks A Synergetic Approach

Author(s):

Lücken, Heinrich

Publication Date:

2013

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-007610733> →

Rights / License:

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

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. ETH No. 20776

Communication and Localization in UWB Sensor Networks

A Synergetic Approach

A dissertation submitted to the
ETH ZURICH

for the degree of
Doctor of Sciences

presented by
HEINRICH LÜCKEN
Dipl.-Ing., RWTH Aachen
born May 20, 1981
citizen of Germany

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Armin Wittneben, examiner
Prof. Dr. Lutz Lampe, co-examiner

2012

Abstract

In this thesis, a novel sensor network paradigm is proposed and studied, inspired by the fusion of wireless communication, localization and imaging. Wireless sensor networks will open a fascinating world of ubiquitous and seamless connectivity not only between individuals but also between devices and objects in our daily life. The key to this vision is a universal low-power, low-complexity and low-cost transceiver unit that provides scalable data communication as well as location and environmental information. Ultra-Wideband (UWB) technology with its rich design space can meet the challenging requirements of future wireless sensor networks. This is the consequence of a paradigm shift compared to narrowband communication: due to the huge bandwidth available, we can trade off bandwidth efficiency against other figures of merit. The major design criterion is not data rate anymore, but rather power consumption and hardware complexity. Within the group of hardware-aware system designs, UWB impulse radio with energy detection receivers are of particular relevance and well known for their efficient implementation. The contribution of this thesis is the comprehensive study of sensor networks with generalized energy detection receivers, where we focus on innovative and efficient approaches for communication and localization and their synergy.

The first part of this thesis develops a framework for location-aware optimization of data transmission with generalized energy detection receivers. This framework is based on a Signal-to-Interference-plus-Noise-Ratio expression. It covers receiver as well as transmitter optimization, where narrowband interference suppression is also taken into account. Conventional approaches attempt to adapt the transceiver directly to the channel state. They require the knowledge of the channel state over the full transmission bandwidth. Due to the huge bandwidth of UWB, the estimation and dissemination of channel state information requires high complexity and is very expensive and power hungry. To circumvent this problem, we propose adjusting the transceiver to the node position. This is done by modeling the channel impulse response as a random process with location dependent parameters, which can be estimated in an off-line training phase. The data transmission is then optimized based on the position of the node – a more accessible type of information in UWB networks that

may already be available. In the next step, we extend the optimization to multiuser transmission. This leads to an increase in the sum data rate, while maintaining the low complexity of the nodes. We conclude from performance evaluations that location information can improve the performance of low complexity and low power UWB communication.

The second part of this thesis is dedicated to localization. We focus on the estimation of the travel time of the radio signal, which is related to the distance and, thus, to the location of the node. Many existing approaches for time of arrival (ToA) estimation of UWB signals require high speed sampling of at least twice the bandwidth of the received signal. This leads to high power consumption and high hardware complexity. We propose to perform ToA estimation at the output of an energy detection receiver. This allows the sampling rates to be much lower keeping the complexity and the power consumption low. In order to achieve high performance, we derive the maximum likelihood timing estimator for the generalized energy detection receiver. We again model the channel impulse response as a random process and show that location-aware a-priori knowledge of its distribution can increase the performance significantly. Approximations of the maximum likelihood estimator lead to a family of low-complexity timing estimators that trade lower estimation accuracy for lower computing time. Additionally, we analyze spectral timing estimation at the energy detector output. We derive the accuracy in a multipath channel analytically, which provides an insight into the fundamental performance scaling of the estimation error in multipath.

So far, we show that location-aware a-priori channel knowledge is beneficial for communication as well as position estimation. However, this requires a database that maps positions to channel characteristics. The training phase to acquire this database can be difficult to implement, time-consuming and may require many training samples. The solution to this problem is imaging. In the third part of this thesis, we present radar imaging based channel prediction. Using this method, the channel characteristics can be obtained for every position in a stationary environment from just a few training samples. An extensive measurement campaign proves the practicality of the presented approach. Finally, we draw conclusions and give an outlook on future research in UWB communication, localization and imaging.

Kurzfassung

Inspiziert durch die Verschmelzung der drahtlosen Kommunikation, Ortung und Bildgebung wird in dieser Arbeit ein neuartiges Sensornetzwerk-Konzept vorgeschlagen und untersucht. Zukünftige drahtlose Sensornetze werden eine faszinierende Welt eröffnen, die allgegenwärtige und nahtlose Vernetzung ermöglicht und das nicht nur zwischen einzelnen Personen, sondern auch zwischen den Geräten und Gegenständen in unserem täglichen Leben. Der Wegbereiter zu dieser Vision ist ein universeller Funk-Baustein, der sich durch geringen Stromverbrauch, geringe Komplexität und geringe Kosten auszeichnet und sowohl skalierbare Datenübertragung erlaubt als auch Positions- und Umgebungsinformationen zur Verfügung stellt. Ultra-Wideband (UWB) Technik kann durch den vielfältigen Designraum den hohen Anforderungen der zukünftigen drahtlosen Sensornetze gerecht werden. Dies ist insbesondere die Folge eines Paradigmenwechsels im Vergleich zur herkömmlichen schmalbandigen Kommunikation: Durch die große frei verfügbare Bandbreite können wir Bandbreiteneffizienz gegen andere Kenngrößen abwägen. Somit sind die wichtigsten Entwurfsziele nicht mehr die Datenrate und Reichweite, sondern Stromverbrauch und Hardware-Komplexität. Innerhalb der hardwareeffizienten Systementwürfe ist UWB Impulsfunk mit Energy-Detection-Empfängern von besonderer Bedeutung und für eine effiziente Implementierung bekannt. Der Beitrag dieser Arbeit ist die umfassende Analyse von Sensornetzen, die auf verallgemeinerten Energy-Detection-Empfängern basieren. Dabei wird der Fokus auf innovative und effiziente Methoden zur Kommunikation und Ortung sowie deren Synergie gerichtet.

Im ersten Teil der Arbeit wird ein Grundgerüst entwickelt, das die ortsabhängige Optimierung der Datenübertragung mit verallgemeinerten Energy-Detection-Empfängern ermöglicht. Dieses Framework basiert auf einem Störabstandskriterium und umfasst sowohl Interferenzunterdrückung als auch Sender- und Empfängeroptimierung. Herkömmliche Ansätze versuchen, die Sender und Empfänger unmittelbar an den Übertragungskanal anzupassen. Dazu muss der Übertragungskanal über die komplette Bandbreite bekannt sein. Durch die hohe Bandbreite von UWB wird die Schätzung und Verteilung der Kanalinformation sehr komplex, teuer und verbraucht viel Strom. Um dieses Problem zu umgehen, schlagen wir

vor, die Übertragung basierend auf der Position des Funkknotens anzupassen. Dazu modellieren wir die Kanalimpulsantwort als Zufallsprozess mit ortabhängigen Parametern, welche in einer offline Trainingsphase geschätzt werden können. Die Datenübertragung wird dann anhand der Knotenposition optimiert – einer leicht zugänglichen Information in UWB Netzwerken, die ohnehin schon verfügbar sein mag. Im nächsten Schritt betrachten wir die Optimierung für Mehrbenutzer-Systeme. Dadurch kann die Summendatenrate erhöht werden unter Beibehaltung der geringen Komplexität der Empfangsknoten. Anhand von Simulationsergebnissen wird gezeigt, dass die UWB Kommunikation mit der Positionsinformation optimiert werden kann, um Stromverbrauch und Komplexität gering zu halten.

Der zweite Teil dieser Arbeit widmet sich der Ortung von Funkknoten. Insbesondere untersuchen wir das Schätzproblem der Signallaufzeit, das in Bezug zur Entfernung und dadurch zur Position des Funkknotens steht. Viele bestehende Ansätze zur Time-of-Arrival (ToA) Schätzung erfordern sehr schnelles Abtasten mit mindestens doppelter Bandbreite des Empfangssignals. Dies führt zu einem hohen Stromverbrauch und einer hohen Hardware-Komplexität des Empfängers. Unser Vorschlag ist es, die ToA Schätzung am Ausgang des Energy-Detection-Empfängers durchzuführen. Dies ermöglicht wesentlich geringere Abtastraten und hält damit die Komplexität und den Stromverbrauch niedrig. Um dennoch eine hohe Genauigkeit zu erreichen, leiten wir den Maximum-Likelihood Timing-Schätzer für den generalisierten Energy-Detection-Empfänger her. Dazu modellieren wir die Kanalimpulsantwort wieder als Zufallsprozess und zeigen, dass Kenntnis über die ortsabhängige Wahrscheinlichkeitsverteilung die Schätzgenauigkeit wesentlich verbessern kann. Näherungen des Maximum-Likelihood Schätzers führen zu einer Familie von Timing-Schätzern mit geringerer Komplexität, die einen Trade-Off zwischen Genauigkeit und Rechenaufwand ermöglichen. Zusätzlich analysieren wir die spektrale Timing-Schätzung am Energy-Detector-Ausgang. Durch die Herleitung eines expliziten Ausdrucks für die Genauigkeit wird ein Einblick zum fundamentalen Verhalten des Schätzfehlers in Mehrwegeausbreitungskanälen gegeben.

Soweit wird gezeigt, dass ortsabhängiges Kanalwissen sehr nützlich ist für die Kommunikation und Ortung. Allerdings wird dazu eine Datenbank benötigt, die Positionen auf Kanaleigenschaften abbildet. Die Trainingsphase, um diese Datenbank zu erstellen, kann möglicherweise kompliziert und zeitaufwändig sein und eine große Anzahl an Stichproben benötigen. Einen Lösungsansatz zu diesem Problem finden wir in der Bildgebung: Im dritten Teil dieser Arbeit präsentieren wir ein Radar-basiertes Verfahren zur Kanalvorhersage. Mit dieser Methode können die Kanaleigenschaften für beliebige Positionen durch Kenntnis einiger weniger Stichproben abgeleitet werden. Eine umfangreiche Messkampagne belegt die Pra-

xistauglichkeit des vorgestellten Ansatzes. Schließlich ziehen wir Schlussfolgerungen und geben einen Ausblick auf die zukünftige Forschung zur UWB Kommunikation, Lokalisierung und Bildgebung.