

Diss. ETH No. 17259

# **A SYSTEM CONCEPT FOR ULTRA WIDEBAND (UWB) BODY AREA NETWORKS**

A dissertation submitted to the  
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
ZURICH

for the degree of  
Doctor of Sciences

presented by  
THOMAS ZASOWSKI  
Dipl.-Ing., Saarland University  
born December 14, 1975  
citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. A. Wittneben, examiner  
Prof. Dr. D. Dahlhaus, co-examiner

Dr. S. Launer, co-examiner

2007

# Abstract

Wireless body area networks have recently gained a lot of interest due to multiple possible applications such as wireless health monitoring or wearable computing. Because of the rather simple hardware realizations and the energy efficiency, ultra wideband (UWB) communication has become one promising technology for the use in wireless body area networks (BAN). After pointing out the motivation of this work and highlighting its contribution, a definition of body area networks is presented as well as a brief introduction on UWB. There, the main promises of UWB communications are presented as well as the principles of some typical receiver structures for UWB.

Since UWB communication at the human body is a brand new topic, channel measurements at the human body are performed. The frequency range for these measurements is chosen from 2 to 8 GHz. Based on 1100 channel measurements a channel model for the UWB BAN is derived. Using the Akaike information criterion (AIC) it is shown that the channel decays over the time and that the channel taps are log-normal distributed. The channel at the head is of particular interest as most human communication organs such as mouth, ears, and eyes are located there. Therefore, the ear-to-ear link, which can be regarded as a worst case scenario at the head due to the missing line-of-sight component, is considered to specify the impact of the channel on the system design. When considering the ear-to-ear link it is shown by means of theory, simulations, and measurements that the direct transmission through the head is attenuated so much that it is negligible. Therefore, antennas should be designed in a way that they do not radiate into the body but away from it or along its surface. Moreover, it is shown that the channel is robust

against distance variations between the antenna and the skin, and that reflections and absorptions are caused by the body. For the ear-to-ear link the antennas should be placed behind the ears to get the smallest channel attenuations. From the measurements it can also be observed that the main energy of the channel impulse response is contained in a very small time window. Thus, non-coherent receivers with a short integration duration can capture almost the whole energy of the channel.

Since UWB systems are a secondary spectrum user, the impact of existing wireless services on UWB is investigated as well. Due to the low transmit power not only the in-band but also the out-of-band interferers are harmful for UWB transmission. Based on frequency-domain and time-domain measurements it is shown that interference not close to the UWB device can be handled by using filters. However, this is not sufficient enough if an interferer is in close vicinity of the UWB device. Therefore, the temporal cognitive medium access is presented to avoid the interference from burst-wise transmitting devices. There, the UWB system listens if the channel is occupied by an interferer and it transmits only in case that no other system is active at the same time. For such a temporal cognitive MAC an expression is given to calculate the optimum UWB packet length. Assuming different interference scenarios, the packet lengths are evaluated. Moreover, it is shown that reasonable usable idle times can be achieved, which the UWB device can use for transmission, and strict latency time requirements can be met. ALOHA, 1-persistent CSMA, and non-persistent CSMA are considered as access schemes for the performance evaluation of the temporal cognitive MAC. For evaluation, two different cases are distinguished, with and without bandpass filter at the UWB receiver. It is shown that a UWB device with bandpass filter that uses the temporal cognitive MAC in conjunction with non-persistent CSMA has low packet error rates below  $10^{-2}$  for up to about 15 active UWB links.

Due to complexity reasons non-coherent receivers are the most promising solution for the use in UWB devices. Hence, the focus in this thesis lies on the energy detector and the transmitted reference receiver, which have both the same performance. Furthermore, the maximum likelihood receivers in the presence of inter-symbol interference are derived for binary pulse position modulation and transmitted reference pulse amplitude modulation assuming partial

channel state information. The maximum likelihood receivers in the presence of a co-channel interference are calculated for the transmitted reference PAM as well. A family of maximum likelihood receivers is also derived for the transmitted reference pulse interval amplitude modulation, which is a combination of pulse position modulation and transmitted reference pulse amplitude modulation. The performance of all these receiver structures is evaluated by means of bit error rate simulations. The simulations are performed by using channels with independent and identically-distributed channel taps and exponential decaying channels as well as by using the BAN channel model. For all these receiver families a trade-off between performance and complexity is observed. Assuming a higher level of channel state information the performance improves while the complexity increases. The receiver structures with knowledge of the average power delay profile are recommended for the use in wireless BAN. These receiver structures exhibit for most channels better performance than the ones without channel state information, however, they require only moderately higher complexity. Furthermore, the receivers with knowledge of the average power delay profiler are less sensitive to the chosen integration duration, since the weighting can be regarded as choosing a variable integration duration.

Finally, recommendations for a UWB BAN system are given and conclusions are presented.

# Kurzfassung

Aufgrund einer Vielzahl möglicher Anwendungen, wie z.B. der drahtlosen Patientenüberwachung oder in Kleidungsstücken integrierten Computern, haben drahtlose Körperbereichsnetze in der letzten Zeit eine grosse Beachtung erfahren. Ultrabreitband (UWB, engl. Ultrawideband)-Kommunikation ist eine vielversprechende Technologie für die Verwendung in Körperbereichsnetzen, weil Schaltungen relativ einfach realisiert werden können und zudem noch energieeffizient sind. Beginnend mit einer Motivation dieser Arbeit wird anschliessend eine Definition zu Körperbereichsnetzwerken präsentiert und eine kurze Einleitung in UWB gegeben. Dabei werden sowohl die besonderen Eigenschaften von UWB als auch einige typische UWB-Empfängerstrukturen präsentiert.

UWB-Kommunikation am menschlichen Körper ist ein ganz neues Forschungsgebiet. Aus diesem Grund werden Kanalmessungen am menschlichen Körper durchgeführt. Der Frequenzbereich für diese Messungen ist von 2 bis 8 GHz gewählt. Basierend auf 1100 Kanalmessungen wird ein Kanalmodell für UWB Körperbereichsnetzwerke entwickelt. Unter Verwendung des Akaike Informationskriteriums (AIC, engl. Akaike Information Criterion) wird gezeigt, dass die Abtastwerte der Kanalimpulsantworten log-normal verteilt sind. Der Kanal am menschlichen Kopf ist von besonderem Interesse, da sich die meisten menschlichen Kommunikationsorgane, wie z.B. Mund, Ohren und Augen, am Kopf befinden. Deswegen wird die Ohr-zu-Ohr-Verbindung, welche aufgrund der fehlenden direkten Komponente als ungünstigster Fall gesehen werden kann, verwendet, um den Einfluss auf den Systementwurf zu spezifizieren. Für die Ohr-zu-Ohr-Verbindung wird mittels Theorie, Simulation und Messungen gezeigt, dass der

direkte Pfad durch den Kopf so stark gedämpft ist, dass er vernachlässigt werden kann. Aus diesem Grund sollten Antennen so konstruiert werden, dass sie nicht in den Kopf strahlen, sondern dass die Strahlung entweder von ihm weg oder entlang seiner Oberfläche erfolgt. Ausserdem wird gezeigt, dass der Kanal robust gegenüber unterschiedlichen Distanzen zwischen Antenne und Haut ist und dass Reflexionen und Absorptionen durch den Körper verursacht werden. Für die Ohr-zu-Ohr Verbindung sollten die Antennen hinter den Ohren platziert werden, um die Dämpfung möglichst gering zu halten. Anhand der durchgeführten Messungen kann ausserdem beobachtet werden, dass der Hauptteil der Energie einer Kanalimpulsantwort in einem sehr kurzen Zeitfenster enthalten ist. Somit können inkohärente Empfängerstrukturen mit einer kurzen Integrationszeit fast die gesamte Energie sammeln, welche im Kanal vorhanden ist.

Da UWB Systeme einen Zweitnutzer des Spektrums darstellen, wird auch der Einfluss bereits existierender drahtloser Systeme auf UWB untersucht. Wegen der niedrigen UWB-Sendeleistung sind nicht nur Störer im gleichen Frequenzband kritisch, sondern auch Störer ausserhalb dieses Bandes. Basierend auf Zeit- und Frequenzbereichsmessungen wird gezeigt, dass Störer, die sich nicht in direkter Nähe des UWB Empfängers befinden, durch ein Filter unterdrückt werden können. Dies genügt jedoch nicht bei Störern in direkter Nähe des Empfängers. Um Störungen von paketweiseübertragenden Systemen zu reduzieren, wird die sog. „temporal cognitive“ Kanalzugriffskontrolle (MAC, engl. Medium Access Control) eingeführt. Dabei hört das UWB System, ob der Kanal von einem Störer genutzt wird und sendet nur im Fall, dass kein anderes System gleichzeitig aktiv ist. Für ein solches Kanalzugriffsverfahren werden die optimalen Paketlängen sowie die optimalen UWB Paketlängen für unterschiedliche Interferenzszenarien bestimmt. Es wird gezeigt, dass bei Verwendung dieses Kanalzugriffsverfahrens strikte Latenzzeiten eingehalten werden können. ALOHA, 1-persistent CSMA und non-persistent CSMA werden bei der Evaluierung des „temporal cognitive“ MAC als Zugriffsverfahren verwendet. Weiter werden die beiden Fälle berücksichtigt, dass Störungen im UWB Empfänger nicht gefiltert werden und dass ein Bandpassfilter verwendet wird. Es wird gezeigt, dass ein UWB Gerät, welches non-persistent CSMA verwendet, eine Paketfehlerrate von weniger als  $10^{-2}$  aufweist, falls nicht mehr als fünfzehn andere UWB Verbindungen aktiv sind.

Aufgrund der geringen Komplexität sind inkohärente Empfänger besonders attraktiv für UWB

Systeme. Deswegen liegt der Fokus dieser Arbeit auf dem Energiedetektor und dem sog. Transmitted-Reference Empfänger, welche beide die gleiche Leistungsfähigkeit zeigen. Des Weiteren werden Maximum-Likelihood Empfänger unter Berücksichtigung von Intersymbolinterferenz für binäre Pulspositionsmodulation sowie für Transmitted-Reference Pulsamplitudenmodulation hergeleitet. Dabei wird auch ein unterschiedlicher Grad an Kanalzustandsinformation berücksichtigt. Für Transmitted-Reference Pulsamplitudenmodulation werden auch die Maximum-Likelihood Empfänger in Gegenwart eines gleichartigen Störers berechnet. Zusätzlich wird für Transmitted-Reference Pulsintervallamplitudenmodulation eine Familie von Maximum-Likelihood Empfängern hergeleitet. Die Leistungsfähigkeit dieser Empfängerstrukturen wird mittels Bitfehlerraten ausgewertet. Die Simulationen werden für drei verschiedene Arten von Kanälen durchgeführt. Dies sind Kanäle mit unabhängigen, gleichverteilten Abtastwerten der Kanalimpulsantwort, exponentiell abfallende Kanäle sowie das für den menschlichen Körper erstellte Kanalmodell. Für alle Empfängerfamilien kann ein Kompromiss zwischen Leistungsfähigkeit und Komplexität beobachtet werden. Mit höherer Kanalzustandsinformation nehmen sowohl die Leistungsfähigkeit als auch die Komplexität zu. Die Empfängerstrukturen mit Kenntnis des mittleren Leistungsleistungsdichtespektrums werden für den Einsatz in Körperbereichsnetzen empfohlen. Diese Empfängerstrukturen zeigen für die meisten Kanäle eine bessere Leistungsfähigkeit als die Empfängerstrukturen ohne Kanalzustandsinformation, benötigen aber nur geringfügig höhere Komplexität. Ausserdem sind diese Empfänger weniger sensibel gegenüber der gewählten Integrationsdauer, da die durchgeführte Gewichtung als variable Integrationsdauer betrachtet werden kann.

Schlussendlich werden Empfehlungen für ein UWB System für Körperbereichsnetzwerke ausgesprochen und eine Zusammenfassung präsentiert.