

Signalstärkebasierte UWB-Ortung bei unbekannter Sendeleistung

Von der Fakultät für Elektrotechnik und Informatik
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur
(Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Waldemar Gerok

geboren am 04.04.1980
in Kalinkowitschi, Weißrussland

2017

1. Referent: Prof. Dr.-Ing. Heyno Garbe, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
 2. Referent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kyandoghere Kyamakya, Alpen-Adria-Universität Klagenfurt
- Vorsitz: Prof. Dr. Jürgen Peissig, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
- Tag der Promotion: 16.12.2016

Berichte aus der Hochfrequenztechnik

Waldemar Gerok

**Signalstärkebasierte UWB-Ortung
bei unbekannter Sendeleistung**

Shaker Verlag
Aachen 2017

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Hannover, Leibniz Univ., Diss., 2016

Copyright Shaker Verlag 2017

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5287-9

ISSN 0945-0793

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

VORWORT

Hiermit möchte ich dem gesamten Institut für Kommunikationstechnik der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover für die ausgezeichnete Arbeitsatmosphäre danken. Für die Hilfsbereitschaft danke ich dem Institut für Grundlagen der Elektrotechnik und Messtechnik sowie dem Institut für Hochfrequenztechnik und Funkssysteme der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover.

Ein ganz besonderer Dank gilt Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kyandoghere Kyamakya für die wertvollen Ratschläge, Diskussionen und die Unterstützung. Bedanken möchte ich mich bei Ihnen ganz herzlich auch für die Begeisterung für das Thema „Ortung“. Die an der Leibniz Universität Hannover angebotene Vorlesung „Ortungsbasierte Dienste und Systeme“ hatte in mir das Interesse und die Begeisterung für dieses Gebiet geweckt und beeinflusste meinen Lebensweg wesentlich. Dafür danke ich Ihnen sehr.

Ganz herzlich möchte ich mich beim Herrn Prof. Dr.-Ing. Heyno Garbe für die Unterstützung bedanken.

Ganz besonders bedanke ich mich beim Herrn Prof. Dr. Jürgen Peissig für die Übernahme des Vorsitzes.

Ich danke sehr Herrn Prof. Dr.-Ing. Thomas Kaiser und Herrn Prof. Dr.-Ing. Markus Fidler für die Ermöglichung der Arbeit am Institut.

Für die finanzielle Unterstützung danke ich der Minna-James-Heinemann Stiftung.

Ganz besonders möchte ich mich bei meinen Eltern und Freunden zum einen für die Geduld, zum anderen aber auch für die Rücksicht bedanken.

Rosenheim, im Mai 2017

Waldemar Gerok

KURZFASSUNG

Ein wichtiges Anwendungsgebiet von Ultra-Breitband (UWB) ist die Lokalisierung in Gebäuden. Der Fokus der Forschungstätigkeiten ist dabei oft auf die laufzeitbasierte Ortung gelegt, vergleichsweise wenige Arbeiten finden sich im Bereich der reinen signalstärkebasierten Ortung. Die signalstärkebasierte Ortung stellt hierbei einerseits eine etwas günstigere Alternative zu laufzeitbasierten Ansätzen dar, andererseits ist die Anforderung an die Zeitsynchronisierung nicht so hoch. Nachteilig ist jedoch die oft geringere Genauigkeit der Positionsbestimmung.

Der klassische Received Signal Strength (RSS)-Ansatz geht von bekannter Sendeleistung des zu ortenden Objektes aus. In praktischen Anwendungen sind jedoch auch andere Randbedingungen zu erwarten, bei welchen die Sendeleistung unbekannt bzw. variabel sein kann. Eine attraktive Methode, bei welcher die Sendeleistung des zu ortenden Objektes in der Positionsberechnung nicht benutzt wird, ist die sogenannte Received Signal Strength Difference (RSSD)-basierte Ortung. Diese wird in anderen Technologien wie z.B. Wireless Local Area Network oder Mobilfunk bereits erfolgreich angewandt, im UWB-Bereich finden sich nur ungenügende Untersuchungen. Viele fundamentale Fragen der Ortung, wie erreichbare Genauigkeiten in verschiedenen Szenarien, Einfluss zusätzlicher Schätzparameter auf die Ortung usw. waren nicht beantwortet und stellten eine wesentliche Lücke im wissenschaftlichen Kenntnisstand im Bereich der UWB-Technologie insgesamt dar. Diese Arbeit widmet sich dieser Fragestellung und liefert zahlreiche wichtige unter anderem auch grundlegende Ergebnisse bzw. Erkenntnisse auf dem Gebiet der UWB-basierten RSSD-Ortung. Hierbei wurden mehrere Aspekte beleuchtet, welche im Folgenden kurz erläutert werden.

In der Arbeit werden sowohl die RSSD-basierte Ortung mittels statistischen Kanalmodells als auch die Fingerprintingmethode untersucht.

Im Falle der Fingerprintingmethode setzt die Arbeit auf ein experimentelles Test-Bed. Dieses besteht aus einem digitalen Phosphorosziloskop, welches Aufgaben des Empfängers übernimmt, einem sogenannten Arbitrary Waveform Generator, welcher als Sender dient, die Steuerung des Systems und die Datenverarbeitung erfolgt mithilfe eines Computers. Ein wichtiger Bestandteil des Test-Beds sind die verwendeten Antennen. Hierbei wurden bekannte Antennenstrukturen für die vorgesehenen Ortungsaufgaben mittels des Simulationsprogramms CST Microwave Studio optimiert und anschließend an der Leibniz Universität Hannover hergestellt. Bei den Antennen handelt es sich um eine gerichtete Vivaldi-Antenne und eine rotationssymmetrische omnidirektionale monokonische Antenne. Hierbei lag das primäre Interesse an den realisierbaren Genauigkeiten im Falle der omnidirektionalen und gerichteten Empfangsantennen. Das Ergebnis zeigte, dass die reine RSSD-basierte Ortung in beiden untersuchten Fällen für die

meisten indoor-spezifischen Aufgaben genügt.

Eine etwas höhere Ortungsgenauigkeit ließ sich, wie in der Arbeit gezeigt, durch zusätzliche Implementierung nur einer Time Difference of Arrival (TDOA)-Schätzung realisieren. Dies ist ein weiterer wichtiger Punkt dieser Arbeit, bei welchem zwei Messgrößen wie RSSD und TDOA unter Berücksichtigung der Spezifik der UWB-Technologie in einem hybriden Verfahren kombiniert werden.

Im Falle der Ortung mittels statistischen Kanalmodells war insbesondere der Einfluss gerichteter Antennen von Interesse, da die für die reine RSSD-basierte Ortung wichtigen Kanalparameter stark von verwendeten Empfangs- und Sendeantennen abhängig sind. Dieses Phänomen war im Ortungskontext mittels RSSD und dynamisch orientierbaren Empfangsantennen zu untersuchen. Einerseits war zu erwarten, dass der durch den Funkkanal induzierte Ortungsfehler vermindert wird, andererseits könnte der Einsatz gerichteter Empfangsantennen durch Ungenauigkeiten in der dynamischen Antennenausrichtung den Ortungsfehler erhöhen. Um diese Frage zu beantworten, wurde eine Simulationsumgebung in Matlab erstellt. Die Simulationsergebnisse zeigten, dass das verfolgte Konzept dynamisch orientierbarer Empfangsantennen die Ortungsgenauigkeit wesentlich erhöht.

Stichwörter: Ultra-Breitband, UWB, Ortung, RSSD, TDOA.

ABSTRACT

An important application of ultra-wideband (UWB) is the indoor-localization. The research work in this area is often focused on time of flight based localization, relatively few work is done on the pure signal strength based positioning. The signal strength based localization is a cheaper alternative to time of flight based approaches additionally having lower requirements to the time synchronization. A disadvantage of the signal strength based localization is often the lower positioning accuracy.

The classical received signal strength (RSS) approach requires the knowledge of the power of the transmitted signal. In the practical applications the transmission power is not always available or can vary. An attractive localization technique which does not utilize the transmission power of the object to be localized is the received signal strength difference (RSSD) based localization. This technique is already applied to technologies like wireless local area network or cellular networks, the analysis of the RSSD-technique in the area of UWB is not sufficient though. Many fundamental research questions were not answered, those are e. g. positioning accuracy in different scenarios or influence of additional estimation parameters on the localization. This work is focusing on this research questions and shows a lot of important often fundamental results in the area of UWB-based RSSD localization. Many aspects are demonstrated, short summary is given in the following.

This work is considering both the statistical channel based positioning and the fingerprinting based approach for the RSSD localization. In the case of the fingerprinting based approach an experimental test bed is utilized. It consists of a digital phosphor oscilloscope which receives the signals, an arbitrary waveform generator which is used as a transmitter, the control of the system and the signal processing is done using a computer. An important part of the system are the utilized antennas. Well known antenna structures were optimized for the planned localization experiments using the simulation tool CST Microwave Studio and were built at the Leibniz Universität Hannover. The antennas are the directional Vivaldi antenna and the omni directional monoconical antenna. The primary interest was the achievable localization accuracy in the case of the directional and omni-directional antennas. The result shows that in both cases the accuracy of the pure RSSD based localization is sufficient for the most indoor-specific applications.

As shown in the work, the localization accuracy can be improved by consideration of only one additional time difference of arrival (TDOA) estimation. This is an important point in which RSSD and TDOA estimations are fused in a hybrid approach which considers the properties of the UWB technology.

In the case of the statistical channel model the interest was especially on

the directional antennas, since the propagation constants of the channel depend strongly on the utilized receiving and transmitting antennas and have an influence on the localization performance. The phenomena had to be analyzed in the context of RSSD based localization and directional antennas with dynamical orientation. On the one hand it can be expected that the error induced by the channel is reduced, on the other hand the misorientation of the dynamically orientational directional antennas can increase the error of the position estimation. A simulation environment in Matlab was set up to answer this question. The simulation results show that the concept of dynamically orientational directional antennas increases the localization accuracy significantly.

Keywords: ultra-wideband, UWB, localization, RSSD, TDOA.

INHALTSVERZEICHNIS

Vorwort	iii
Kurzfassung	v
Abstract	vii
Abbildungsverzeichnis	xi
Tabellenverzeichnis	xv
Abkürzungsverzeichnis	xvii
1 EINFÜHRUNG	1
1.1 Motivation und allgemeiner Kontext	1
1.2 Problemdefinition	3
1.3 Forschungsfragen und Zielsetzung der Arbeit	8
1.4 Zusammenfassung der wichtigsten Beiträge der Arbeit	10
1.4.1 Wissenschaftliche Relevanz der Arbeit	12
1.4.2 Praktische Relevanz der Arbeit	12
1.4.3 Publikationsliste	13
1.5 Struktur der Arbeit	14
2 EINFÜHRUNG IN UWB UND LOKALISIERUNG	17
2.1 Vergleich der Ortungstechniken	17
2.2 Laufzeitbasierte Ortung	17
2.2.1 TOA	18
2.2.2 TDOA	21
2.3 Signalstärkebasierte Ortung	22
2.4 Grundlagen Ultra-Breitband	24
3 VERWENDETE ANTENNEN	25
3.1 Grundlagen der Antennentechnik	25
3.1.1 Schmalband- und Breitbandantennen	25
3.1.2 Modellierung von UWB-Antennen	27
3.1.3 Bestimmungsmöglichkeiten	29
3.2 Omnidirektionale Antenne	30
3.2.1 Breitbandige Dipolantenne	30
3.2.2 Verwendete Antenne	31
3.3 Gerichtete Antenne	32
3.3.1 Vivaldi-Antenne	34
3.3.2 Verwendete Antenne	35
4 VERGLEICH DER TDOA- UND RSSD- BASIERTEN INDOOR-ORTUNG	39
4.1 Bewertungskriterien eines Ortungssystems	39
4.2 Spezifika der Indoor-Ortung	40
4.3 Genauigkeit der Ortung	41
4.3.1 Verbreitete Metriken zur Genauigkeitsbewertung ei- nes Ortungssystems	41
4.3.2 Relative Genauigkeit	43
4.4 Robustheit der Ortung	46
4.5 Wirtschaftliche Aspekte	50

4.6	Schlussfolgerungen	51
5	BESCHREIBUNG DES TEST-BEDS	53
5.1	Systemarchitektur des Test-Beds	53
5.1.1	Beschreibung der Hardware	53
5.1.2	Beschreibung der Signalverarbeitung	54
5.1.3	Sendesignal	57
5.2	Experimentdurchführung	58
5.2.1	Messaufbau	61
5.2.2	Messergebnisse	62
6	ORTUNG MITTELS STATISTISCHEN KANALMODELLS	63
6.1	Realisierungen der RSSD-basierten Ortung in der Literatur	63
6.1.1	Outdoor-Ortung	64
6.1.2	Indoor-Ortung	65
6.2	Betrachteter Kontext und Anwendungsbeispiele	66
6.3	Wichtige Faktoren der Ortungsperformance im betrachteten Kontext	68
6.3.1	Laufzeitschätzung	68
6.3.2	Ausbreitungskonstanten	68
6.4	TDOA-unterstützte RSSD-basierte Ortung mit gerichteten Antennen	69
6.4.1	Nutzung der TDOA-Schätzung	69
6.4.2	Nutzung gerichteter Antennen	70
6.5	Konzeptüberprüfung	72
6.5.1	Beschreibung der Simulationsumgebung für das erweiterte Simulationsszenario	72
6.5.2	Simulationsergebnisse	74
6.5.3	Diskussion der Ergebnisse	79
7	ORTUNG MITTELS FINGERPRINTING	81
7.1	Fingerprinting im UWB-Bereich	81
7.1.1	Übersicht der verbreiteten Fingerprints in der Literatur	81
7.1.2	Motivation zur Verwendung von RSSD-Fingerprints in realistischen Szenarien	82
7.1.3	Gegenstand der Untersuchung	84
7.2	Messaufbau	85
7.3	Messung mit dem Referenzsystem	87
7.4	Fingerprintingmessung	88
7.4.1	Messung mit Vivaldi-Antennen	89
7.4.2	Vergleich der Ergebnisse	93
7.5	Schlussfolgerungen und Diskussion der Ergebnisse	95
8	ZUSAMMENFASSUNG	99
	Literaturverzeichnis	101
	Schrifttumsverzeichnis und Lebenslauf	111