

Joint Communication and Positioning based on Interleave-Division Multiplexing

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften
(Dr.-Ing.)
der Technischen Fakultät
der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

vorgelegt von

Kathrin Schmeink

Kiel 2012

Tag der Einreichung: 29. Mai 2012
Tag der Disputation: 9. November 2012

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Peter Adam Höher
Prof. Dr.-Ing. Reinhold Häb-Umbach

Digital Communications

Kathrin Schmeink

**Joint Communication and Positioning
based on Interleave-Division Multiplexing**

Shaker Verlag
Aachen 2012

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Zugl.: Kiel, Univ., Diss., 2012

Copyright Shaker Verlag 2012

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-1546-1

ISSN 1860-7535

Shaker Verlag GmbH • P.O. BOX 101818 • D-52018 Aachen

Phone: 0049/2407/9596-0 • Telefax: 0049/2407/9596-9

Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

Abstract

Interest in joint communication and positioning is steadily increasing because the combination of both techniques offers a wide range of advantages. On the one hand, synergy effects between communication and positioning like enhanced resource allocation can be exploited. On the other hand, new applications are enabled. Examples comprise a wide area of interest and include the automated localisation of emergency calls, tracking and guiding fire fighters or policemen on a mission, monitoring people with special needs in a hospital or a nursing home, asset tracking, location-based services and so forth. However, it is a challenging task to combine communication and positioning because their prerequisites are quite different. On the one hand, high data rates with little training overhead and low bit error rate are desirable for communication. On the other hand, localisation aims at precise position estimates. Much training is typically spent for that purpose. Given a single transmit signal supporting communication as well as positioning, it is very difficult to fulfil all requirements at the same time. Hence, a flexible configuration is desirable for a joint communication and positioning system with a unified signal structure in order to adjust the tradeoff between both parts to the instantaneous needs.

In this thesis, a new system concept for joint communication and positioning with a unified signal structure is proposed and investigated. The system concept is based on interleave-division multiplexing (IDM) in combination with pilot layer aided channel estimation (PLACE) and multilateration via the time of arrival (TOA). On the one hand, IDM seems to be a suitable candidate for a joint communication and positioning system because of its flexible but simple transmitter structure. On the other hand, multilateration via the TOA enables precise localisation. The connection between the communication and the positioning part is accomplished via an enhanced PLACE unit. Through the incorporation of a channel parameter estimator, not only the channel coefficients of the equivalent discrete-time channel model, that are needed for data detection, but also parameters of the physical channel, that are required for positioning, can be estimated. A priori information about pulse shaping and receive filtering is exploited for that purpose.

The main aim of this thesis is to show the feasibility of the proposed joint communication and positioning system. Hence, a fundamental system setup is analysed systematically. Since many applications of joint communication and positioning are located in urban or indoor environments, a very high positioning accuracy in the centimetre region is desirable. Unfortunately, positioning is most challenging in these environments due to severe multipath propagation. In order to achieve the required accuracies, the positioning part of the proposed system concept can be complemented by other localisation sources like GPS/Galileo and/or motion sensors via sensor fusion. However, the stand-alone per-

formance of the proposed joint communication and positioning system is evaluated by means of Monte Carlo simulations in this thesis. The achieved results are compared to performance limits in terms of Cramer-Rao lower bounds. In order to improve the overall system performance and to enable sensor fusion, soft information with respect to the parameter as well as the position estimates is taken into account. The accuracy of the soft information is analysed with the help of curvature measures. Altogether, promising results are obtained.

Keywords: communication, positioning, navigation, radiolocation, parameter estimation, channel estimation, optimisation, interleave-division multiplexing, pilot layer aided channel estimation, time of arrival, multilateration, soft information.

Kurzfassung

Das Interesse an gemeinsamer Kommunikation und Positionierung nimmt aufgrund vieler Vorteile stetig zu: Durch die Kombination beider Techniken können Synergieeffekte wie beispielsweise eine verbesserte Ressourcenverteilung ausgenutzt werden. Des Weiteren werden neue Anwendungen in den unterschiedlichsten Bereichen ermöglicht: Notrufe können automatisch lokalisiert werden, Feuerwehrmänner und Polizisten im Einsatz können durch eine Verfolgung ihrer Position und gegebenenfalls eine Überwachung ihrer Vitalwerte besser angeleitet und koordiniert werden, Patienten mit speziellen Bedürfnissen in Krankenhäusern können durch ein effizientes Monitoring besser versorgt werden, Ein- und Auslagerungsprozesse in Warenhäusern können erleichtert werden, positionsbezogene Dienste können realisiert werden und vieles anderes mehr. Aufgrund der verschiedenen Anforderungen von Kommunikations- und Positionierungsdiensten ist es schwierig, diese beiden Bereiche zu vereinen. Einerseits sollen große Datenraten mit geringem Trainingsaufwand als auch geringen Bitfehlerraten erreicht werden. Andererseits ist eine hohe Positionierungsgenauigkeit erwünscht, die einen großen Trainingsaufwand erfordert. In einem Systementwurf mit einer einheitlichen Signalstruktur ist es schwer, alle Anforderungen gleichzeitig zu erfüllen. Daher ist ein flexibler Systementwurf von Vorteil, um den Abtausch zwischen Kommunikation und Positionierung an die aktuellen Bedürfnisse anpassen zu können.

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein neues gemeinsames Kommunikations- und Positionierungssystem mit einer einheitlichen Signalstruktur vorgeschlagen und untersucht. Der Systementwurf basiert auf Interleave-Division Multiplexing (IDM) in Kombination mit einer Pilotlayer basierten Kanalschätzung und Multilateration mit Hilfe der Signalankunftszeit, im Folgenden Time of Arrival (TOA) genannt. Einerseits ist IDM aufgrund seiner flexiblen, jedoch einfachen Senderstruktur gut für ein gemeinsames Kommunikations- und Positionierungssystem geeignet. Andererseits ermöglicht eine Multilateration mit Hilfe der TOA hohe Positionierungsgenauigkeiten. Die Verbindung zwischen beiden Komponenten wird durch eine erweiterte Pilotlayer basierte Kanalschätzung erreicht: Durch die Verwendung eines Kanalparameterschätzers können sowohl die Kanalkoeffizienten des äquivalenten zeitdiskreten Ersatzkanalmodells, die für die Datendetektion benötigt werden, als auch Parameter des physikalischen Kanals, die für die Lokalisierung erforderlich sind, geschätzt werden. A priori Information bezüglich des Pulsformungs- und Empfangsfilters werden hierfür ausgenutzt.

Das Hauptziel dieser Arbeit ist es, die Realisierbarkeit des vorgeschlagenen gemeinsamen Kommunikations- und Positionierungssystems zu zeigen. Daher wird ein grundlegender Systementwurf systematisch analysiert. Da viele Anwendungen von gemeinsamer

Kommunikation und Positionierung innerhalb von Städten oder Gebäuden angesiedelt sind, ist eine sehr hohe Positionierungsgenauigkeit im Zentimeter-Bereich wünschenswert. Unglücklicherweise ist es in diesen Gebieten aufgrund von starker Mehrwegeausbreitung besonders schwer, die Position eines Objektes zu bestimmen. Allerdings kann die Positionierungskomponente durch andere Lokalisierungsquellen wie beispielsweise GPS/Galileo und/oder Bewegungssensoren mittels Sensorfusion ergänzt werden, um die erforderlichen Genauigkeiten zu erreichen. In Rahmen dieser Arbeit wird jedoch nur die eigenständige Leistungsfähigkeit des vorgeschlagenen Systementwurfs mit Hilfe von Monte Carlo Simulationen untersucht. Die Simulationsergebnisse werden mit Leistungsgrenzen in Form von Cramer-Rao Untergrenzen verglichen. Dabei wird Zuverlässigkeitsinformation bezüglich der geschätzten Parameter und der geschätzten Position berücksichtigt, um die gesamte Systemleistung zu verbessern und Sensorfusion zu ermöglichen. Die Genauigkeit der Zuverlässigkeitsinformation wird mit Hilfe von Krümmungsmaßen analysiert. Insgesamt werden vielversprechende Ergebnisse erzielt.

Stichwörter: Kommunikation, Positionierung, Navigation, Parameterschätzung, Kanalschätzung, Optimierungsverfahren, Interleave-Division Multiplexing, Pilotlayer basierte Kanalschätzung, Signalankunftszeit, Time of Arrival, Multilateration, Zuverlässigkeitsinformation.

Contents

1	Introduction	1
1.1	Motivation	1
1.2	Scope and Aim	2
1.3	Thesis Outline	3
2	The Mobile Radio Channel	5
2.1	Fundamentals on Linear Time-Variant Systems	6
2.2	Large-Scale Channel Modelling	9
2.3	Small-Scale Channel Modelling	10
2.3.1	Wide-Sense Stationary Uncorrelated Scattering	13
2.3.2	Classification of Small-Scale Channel Models	14
2.3.3	Realisations of the Channel Weight Function	18
2.4	Equivalent Discrete-Time Channel Model	18
2.5	Specific Channel Models Applied in this Thesis	22
2.5.1	LOS Channel Model	24
2.5.2	Two-Path Channel Models	24
2.5.3	WINNER Channel Models	25
2.6	Chapter Summary	29
3	System Proposal for Joint Communication and Positioning	31
3.1	Positioning Part: Multilateration via the Time of Arrival	32
3.2	Communication Part: Interleave-Division Multiplexing	36
3.2.1	Transmitter Structure of Interleave-Division Multiplexing	37
3.2.2	Receiver Structure of Interleave-Division Multiplexing	40
3.3	Connection Between Both Parts: Pilot Layer Aided Channel Estimation	45
3.4	Chapter Summary	47
4	Channel Parameter Estimation	49
4.1	Fundamentals	50
4.2	Maximum-Likelihood Estimator	53
4.2.1	Metric with Received Samples	54
4.2.2	Metric with Pre-Stage Channel Estimates	55
4.2.3	Relation Between Both Metrics	55
4.3	Performance Limits: Cramer-Rao Lower Bound	59
4.3.1	Metric with Received Samples	60

4.3.2	Metric with Pre-Stage Channel Estimates	61
4.3.3	Comparison of CRLBs for Different Channel Models	62
4.4	Optimisation Algorithms for the ML Estimator	75
4.4.1	Local Optimisation Algorithms	77
4.4.2	Global Optimisation Algorithms	85
4.4.3	Performance Comparison of the Proposed Optimisation Algorithms	93
4.5	Soft Information for Channel Parameter Estimation	129
4.5.1	Definition of Soft Information	130
4.5.2	Confidence Regions	130
4.5.3	Proposed Methods to Obtain Soft Information	132
4.5.4	Accuracy Analysis of Proposed Methods based on Curvature Measures	133
4.6	Chapter Summary	138
5	Position Estimation	143
5.1	Fundamentals	143
5.2	Performance Limits: CRLB and Geometric Dilution of Precision	144
5.3	Positioning Algorithms	146
5.3.1	Taylor-Series Algorithm	146
5.3.2	Weighted Least-Squares Algorithm	147
5.3.3	Performance Comparison of the Proposed Positioning Algorithms	148
5.4	Soft Information for Position Estimation	160
5.5	Chapter Summary	165
6	Overall System Performance	167
6.1	LOS Channel Model	172
6.2	Two-Path Channel Models	177
6.3	WINNER Channel Models	180
6.4	Chapter Summary	183
7	Summary and Outlook	185
A	Acronyms and Abbreviations	191
B	Notation	195
C	Supplementary Results	203
	Bibliography	215
	List of Figures	227
	List of Tables	233
	List of Algorithms	235