

Channel Measurement and Modeling for Mobile Radio Based Positioning

Kanalmessung und Modellierung zur mobilfunkbasierten Positionierung

**Der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg
zur
Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.**

vorgelegt von

Wei Wang

aus Hubei, VR China

Als Dissertation genehmigt
von der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der mündlichen Prüfung:

31. März 2014

Vorsitzender des Promotionsorgans:

Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing Wolfgang Koch

Prof. Dr.-Ing Uwe-Carsten Fiebig

Erlanger Berichte aus Informations- und Kommunikationstechnik

Band 34

Wei Wang

**Channel Measurement and Modeling
for Mobile Radio Based Positioning**

D 29 (Diss. Universität Erlangen-Nürnberg)

Shaker Verlag
Aachen 2014

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.: Erlangen-Nürnberg, Univ., Diss., 2014

Copyright Shaker Verlag 2014

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 978-3-8440-2917-8

ISSN 1619-8506

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

Acknowledgements

First of all, I would like to thank Prof. Dr. Wolfgang Koch from the University Erlangen-Nuremberg for providing me a chance to pursue my doctoral degree and for his encouragement and support during the past years. Furthermore, I would like to thank Prof. Dr. Uwe-Carsten Fiebig from the German Aerospace Center (DLR) for being the co-referee of this thesis, for offering me a working position in his department and for his patient and fruitful discussions on my research topic. Particularly, I would like to express my appreciation to him for the financial supports for attending international conferences.

Additionally, my special thanks go to Dr. Thomas Jost, whom I have been tightly working with for a long period. He has significantly inspired me on scientific works. I thank him for numerous discussions which leads to several joint publications. Furthermore, I would like to thank all my colleagues, particularly Dr. Ronald Raulefs, Dr. Stephan Sand, Dr. Christian Mensing, Christian Gentner, Siwei Zhang and Emanuel Staudinger, from the Mobile Radio Transmission group in DLR for their discussions and assistances during the channel measurement campaigns. Also I thank Dr. Andreas Lehner and Dr. Alexander Steingass for discussions on the DLR LMS channel model and providing the software. I thank my group leader Dr. Armin Dammann for his kind encouragement and brilliant ideas for my researches. Furthermore, I also thank Prof. Fernando Perez-Fontan from the University Vigo and Prof. Bernard Henry Fleury from the University Aalborg for their illuminating discussions.

Finally, I would like to thank my wife Xiaoying and my parents for their patients and supports during my long term working and study life.

Gilching, April 2014

Abstract

Global Navigation Satellite Systems (GNSSs) provide an accurate positioning solution as long as line-of-sight (LoS) conditions between satellites and receiver prevail. However, in critical scenarios like urban canyons, the position accuracy by GNSSs deteriorates due to shadowing, diffraction, and reflection of satellite signals. In indoor environment GNSS receivers suffer from severe multipath effects and signal blockage resulting in very low receive power, handicapping the tracking of satellite signals. Augmenting the GNSS based positioning by terrestrial mobile radio signals in critical environments can significantly improve the position accuracy compared to a GNSS-only solution.

The performance of mobile radio based positioning strongly depends on the delay estimation accuracy of the LoS path between transmitter and receiver. Multipath propagation of mobile radio signals may drastically influence the delay estimation of the LoS path and, thus, the performance of the mobile radio based positioning. Furthermore, in none-LoS (NLoS) scenario the delay offset of the first detectable path to the geometrical LoS introduces an additional ranging error. This delay offset is defined as the NLoS bias. For tracking applications, not only the channel at a certain time instant is of interest, but also time evolution of individual multipath components (MPC) plays an important role since it affects tracking performances. For realistic developments of positioning algorithms, the exact knowledge of the channel is of significant importance. The more accurately the channel is known, the more realistic the simulation results are. Thus, the propagation channel model becomes an essential part in simulation tools. However, mobile radio channel models covering the critical scenarios, like the WINNER channel model, have been developed only for communication applications. Therefore, not all requirements for the channel model in positioning applications are satisfied: the NLoS bias and MPC evolution with time are missing.

The primary contribution of this thesis is an outdoor-to-indoor geometry-stochastic based channel model (GSCM) fulfilling the requirements for simulations of mobile radio based positioning algorithms. In the proposed channel model every individual MPC, either received by single-bounce or multiple-bounce propagation, is characterized by a single-bounce equivalent scatterer (ES). A MPC can be characterized by an ES, or particularly by the path from the transmitter to the ES to the receiver, in terms of propagation distance and angle of arrival. While the receiver moves, the location of the ES may change. Within the channel model, the trajectory of an ES is described with help of a fixed point, the so called fixed scatterer (FS). The location of the FS is determined at the path initialization based on statistics of the ES. In the proposed channel model, three different types of MPCs are individually modeled according to

their characteristics. All necessary statistics to parameterize the channel model are extracted from channel measurement data at S- and C-band. A novel algorithm to estimate the time variant channel parameters is used. As one of the most essential parameters relevant to positioning applications, the time variant absolute delay for each MPC is accurately modeled which implicitly includes the NLoS bias. The time variant number of MPCs is simulated based on a two-step approach: First, the number of disappeared MPCs is determined according to path life or opening angle. Second, the number of appeared MPCs is statistically generated. Another time variant parameter, the amplitude fast fading process of individual MPC, is also considered in the channel model. Finally, a validation shows the reliability of the proposed channel model for mobile radio based positioning algorithms.

Another contribution of this thesis is a channel model for mobile radio based positioning for urban canyon scenarios. In such a scenario for terrestrial mobile radio signals, blockage of the LoS path occurs very often. Thus, the NLoS bias is significant in the channel model. Also exact modeling the MPC is a very important task for the channel model, especially for navigation applications. To fulfill the requirements for channel models in positioning systems, an extension of the WINNER channel model is performed based on a physical-statistical approach. Two components are individually modeled: First, the direct component, consisting of the LoS path and diffracted paths caused by building facades and lampposts, is deterministically calculated in an artificial scenery. Thus, the NLoS bias is obtained in the channel model. Second, MPCs are statistically modeled based on the WINNER channel model. Statistics used to model MPCs are based on the WINNER channel model and, therefore, on a large number of measurement campaigns. By using the same modeling approach as the outdoor-to-indoor channel model, time variant parameters of each MPC are deterministically calculated. Furthermore, a coherent channel model is proposed for positioning applications using both satellite signals and mobile radio signals. The proposed channel model relies on a coherent combination of the extended WINNER channel model and the German Aerospace Center (DLR) land mobile satellite channel model.

Zusammenfassung

Globale Satellitennavigationssysteme ermöglichen eine sehr genaue Positionierung, sofern eine direkte Sichtverbindung zwischen dem Empfänger und den Satelliten besteht. In kritischen Szenarien wie z. B. Häuserschluchten wird die Positionierungsgenauigkeit durch Abschattung, Beugung und Reflektion der Satellitensignale stark vermindert. Innerhalb von Gebäuden ist die Empfangsleistung aufgrund der Abschattung durch das Gebäude noch geringer, so dass Satellitensignale nur noch schwer oder gar nicht mehr empfangen werden können. Zusätzlich wird die Positionierungsgenauigkeit durch erhöhte Mehrwegeausbreitung gestört. Besonders in solchen Szenarien kann die satellitengestützte Positionslösung durch die Verwendung von terrestrischen Mobilfunksignalen verbessert werden.

Die Qualität der Schätzung der Ausbreitungszeit des direkten Pfades zwischen Sender und Empfänger beeinflusst die Genauigkeit der Positionslösung mit terrestrischen Mobilfunksignalen. Mehrwegeausbreitung kann die Schätzung der Ausbreitungszeit des direkten Pfades drastisch beeinflussen. Zusätzlich entsteht in Szenarien ohne direkte Sichtverbindung zwischen Sender und Empfänger (NLoS) ein systematischer Fehler, da der erste erkennbare Signalpfad länger als der direkte Weg zwischen Sender und Empfänger ist. Dieser systematische Fehler wird als "NLoS Bias" bezeichnet. Werden innerhalb des Empfängers Nachführalgorithmen (sogenannte "tracking"-Algorithmen) eingesetzt, ist nicht nur die Kanalimpulsantwort zu einem bestimmten Zeitpunkt von Interesse, sondern auch die zeitliche Veränderung der Parameter von individuellen Mehrwegekomponenten, da diese einen wesentlichen Einfluss auf die Güte der Algorithmen haben. Umso genauer die Übertragungscharakteristiken bekannt sind, umso genauer können diese in einer Simulationsumgebung abgebildet werden, wodurch die Simulation selbst realistischer wird. Demnach ist ein Kanalmodell ein wesentlicher Teil einer Simulationsumgebung. Gängige Kanalmodelle, welche kritische Positionierungsszenarien abbilden können, wie z.B. das WINNER-Kanalmodell sind mit Bezug auf Kommunikationsanwendungen entwickelt worden. Dadurch bleiben verschiedene Anforderungen mit Bezug auf Positionierungsanwendungen unberücksichtigt wie die Einbeziehung des NLoS Bias und die zeitliche Veränderung der Parameter individueller Mehrwegekomponenten.

Der Hauptbeitrag dieser Dissertation besteht aus der Entwicklung eines geometrisch-stochastischen Kanalmodells. Dieses Kanalmodell kann die Wellenausbreitung von einer außerhalb eines Gebäudes liegenden Basisstation zu einem innerhalb eines Gebäudes befindlichen Empfänger simulieren. Das Kanalmodell erfüllt die Anforderungen zur Simulation von Positionierungsalgorithmen mit terrestrischen Mobilfunksignalen. In dem beschriebenen Kanalmodell werden Mehrwegekomponenten,

die durch einfache oder mehrfache Interaktion mit Objekten entstehen, durch sogenannte äquivalente Streuer (ES) charakterisiert. Ein beliebiger Mehrwegepfad kann mit Hilfe eines ES, genauer gesagt durch den Pfad vom Sender über den ES zum Empfänger, in seiner Pfadlänge und dem Ankunftswinkel am Empfänger dargestellt werden. Bewegt sich der Empfänger in einer statischen Umgebung, so muss sich unter Umständen auch die Position des ES verändern. Bei der Simulation eines bewegten Empfängers bzw. der zeitvarianten Kanalimpulsantwort wird innerhalb des beschriebenen Kanalmodells die Trajektorie des ES mit Hilfe eines Fixpunktes, einem sogenannten festen Streuer (FS), dargestellt. Die Position des FS wird bei der Pfadinitialisierung basierend auf Statistiken des ES generiert. Innerhalb des Kanalmodells werden drei verschiedene Typen von Mehrwegekomponenten mit ihren individuellen Charakteristiken modelliert. Die benötigten Statistiken zur Parametrisierung des Kanalmodells wurden aus den Daten einer Messkampagne im S- und C-Band extrahiert. Dabei wurde auch ein neuartiger Algorithmus zur hochauflösenden Parameterschätzung eingesetzt. Für eine realistische Simulation von Positionierungsalgorithmen wird der zeitvariante NLoS Bias implizit durch die zeitvariante Ausbreitungszeit der Mehrwegekomponenten simuliert. Die sich ändernde Anzahl der Mehrwegekomponenten wird in einem zweistufigen Verfahren berücksichtigt. Dabei wird in einer ersten Stufe die Anzahl der verschwindenden Mehrwegekomponenten über die Lebensdauer bzw. den Öffnungswinkel der individuellen Pfade bestimmt. In einer zweiten Stufe wird eine stochastisch erzeugte Anzahl von neuen Mehrwegekomponenten generiert. Zusätzlich zu den bereits dargestellten Parametern wird auch die Amplitude einer Mehrkomponente als zeitvarianter Parameter modelliert, so dass auch der schnelle Mehrwegeschwund in der Simulation berücksichtigt wird. Eine Validierung des Kanalmodells zeigt die Verlässlichkeit für die Simulation von Positionierungsalgorithmen, die auf terrestrischen Mobilfunksignalen basieren.

Ein weiterer Beitrag dieser Dissertation ist ein weiteres Kanalmodell mit Bezug zur Positionierungsanwendung, das es ermöglicht, die Wellenausbreitung von einer Basisstation zu einem mobilen Empfänger in einer Häuserschlucht zu simulieren. Da in einem solchen Szenario eine direkte Sichtverbindung zwischen dem Sender und dem Empfänger zumeist nicht vorhanden ist, ist eine realistische Simulation des NLoS Bias ein signifikanter Faktor für ein Kanalmodell. Ebenso ist eine exakte Nachbildung der Mehrwegekomponenten in dem Simulationsmodell ein wichtiges Merkmal, besonders wenn es für Positionierungsanwendungen verwendet werden soll. Das Kanalmodell erweitert das bekannte WINNER-Kanalmodell mit einem physikalisch-statistischem Ansatz, um die Anforderungen für eine realistische Simulation von Positionierungsalgorithmen zu erfüllen. Innerhalb des Kanalmodells werden zwei Teile unabhängig voneinander simuliert. Als ein erster Teil werden die direkten Komponenten, die aus dem direkten Pfad zwischen Sender und Empfänger und Pfaden, die durch Beugung an Häuserfronten bzw. Laternen hervorgerufen werden, einbezogen. Die direkten Komponenten werden anhand eines künstlichen Szenarios mit Hilfe von deterministischen Methoden simuliert, wodurch das Kanalmodell den NLoS Bias implizit beinhaltet. Für die Mehrwegekomponenten, als zweiter Teil, werden Statistiken des WINNER-Kanalmodells, die auf einer großen Anzahl von Messkampagnen beruhen, verwendet. Um zeitvariante Kanalimpulsantworten zu simulieren werden die gleichen Ansätze, wie in dem oben beschriebenen Kanalmodell zur Positionierung innerhalb von Gebäuden, verwendet. Weitergehend wird zur Simulation der Empfängergüte in Städten

eine kohärente Kombination des hier vorgestellten Kanalmodells mit dem Modell des landmobilen Satellitenkanals vorgeschlagen, dass am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt entwickelt wurde. Dadurch wird es möglich, Empfängeralgorithmien zu simulieren, die gleichzeitig Mobilfunksignale und Signale von globalen Satelliten-navigationsystemen zur Positionierung verwenden.

Contents

1	Introduction	1
1.1	Satellite Based Positioning	4
1.2	Mobile Radio Based Positioning	6
1.3	Channel Modeling for Positioning	8
1.4	Contributions of the Thesis	8
1.5	Structure of the Thesis	10
2	Time-Variant Mobile Radio Propagation Channel	13
2.1	System Functions of Time Variant Channels	13
2.2	Stochastic Characterizations of Time Variant Channels	14
2.2.1	Correlation Functions	14
2.2.2	WSSUS Assumption	15
2.3	Geometry-Based Stochastic Time Variant Channel Modeling	16
2.4	Different Requirements for Channel Models in Com. and Pos.	20
2.5	State-of-the-Art and Limits of Existing Channel Models	21
3	Outdoor-to-Indoor Channel Measurement Campaign	27
3.1	Measurement Scenarios	27
3.2	Measurement Setup	29
3.2.1	Broadband Radio Channel Sounding at 2.45 GHz and 5.2 GHz	29
3.2.2	Mobile Receiver Platform	34
3.2.3	Determination of Transmitter and Receiver Locations	36
3.2.4	Virtual Antenna Array Generation	37

4	Kalman Enhanced Super Resolution Tracking (KEST) Algorithm	45
4.1	Estimation of Number of MPCs	46
4.2	SAGE Algorithm for Channel Parameter Estimation	47
4.3	KEST Algorithm for Time-Variant Channel Parameter Estimation	48
5	Outdoor-to-Indoor Channel Characteristics	61
5.1	Large Scale Parameters	61
5.1.1	Received Power	61
5.1.2	Power Delay Profile Normalized to GLoS	63
5.1.3	Delay Bias and AoA of the First MPC	65
5.1.4	RMS Delay Spread and Mean Delay	69
5.1.5	Number of MPCs	70
5.1.6	Estimate of Virtual Scatterer	75
5.1.7	Delays and AoAs of MPCs	81
5.2	Small Scale Parameters	84
5.3	Spatial Distance Dependent Propagation Characteristics	89
5.3.1	Spatial Correlations	89
5.3.2	ES Movement Model	89
5.3.3	Path Life	92
5.4	Comparison of Propagation at 2.45 GHz and 5.2 GHz	94
5.4.1	Large Scale Parameters Based Comparison	96
5.4.2	Ranging Application Based Comparison	98
5.5	Channel Characteristics for Multiple Links	101
6	Outdoor-to-Indoor Channel Model	107
6.1	Geometry Based Time-Variant Modeling Approach	107
6.2	Implementation of the Channel Model	110
6.2.1	Time Variant CIR Generation	110
6.2.1.1	Initialization of MPCs	110
6.2.1.2	Update of MPCs	116
6.2.2	Channel Model Validations	117

7	Extended WINNER Channel Model for Urban Scenarios	125
7.1	Physical-Statistical Modeling Approach	125
7.1.1	Direct Component	126
7.1.2	MPC	127
7.2	Implementation of the Extended WINNER Channel Model	129
7.2.1	Direct Component Generation	131
7.2.2	MPC Generation	133
7.2.2.1	Statistical Initialization of MPCs	133
7.2.2.2	Update of MPCs	135
7.2.3	Example of Simulated Time Variant CIR	135
7.3	Combination of Extended WINNER and LMS Channel Model	137
8	Summary and Outlook	141
A	List of Abbreviations	145
B	List of Symbols	149
C	ES Location Determination	161
D	Frequency Domain SAGE Algorithm	163
E	Update ES Location by LM Method	167
F	List of Own Publications	169