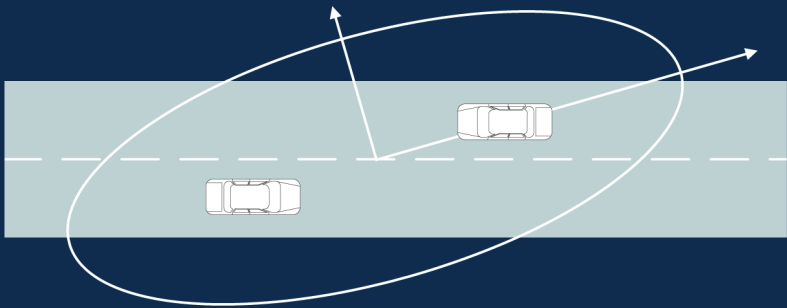


Michael Walter

Scattering in Non-Stationary Mobile-to-Mobile Communications Channels



Michael Walter

**Scattering in Non-Stationary Mobile-to-Mobile
Communications Channels**

Herbert Utz Verlag · München 2016

Kommunikationstechnik
Band 24

Ebook (PDF)-Ausgabe:
ISBN 978-3-8316-7211-0 Version: 1 vom 05.04.2016
Copyright© Herbert Utz Verlag 2016

Alternative Ausgabe: Softcover
ISBN 978-3-8316-4551-0
Copyright© Herbert Utz Verlag 2016



Scattering in Non-Stationary Mobile-to-Mobile Communications Channels

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grads eines

DOKTOR-INGENIEURS (DR.-ING.)

der Fakultät für Ingenieurwissenschaften,
Informatik und Psychologie der Universität Ulm

von

**Michael Walter
aus Ulm**

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Robert Fischer
Prof. Dr.-Ing. Uwe-Carsten Fiebig
Amtierende Dekanin: Prof. Dr. Tina Seufert

Ulm, 01. Dezember 2015

Michael Walter

Scattering in Non-Stationary Mobile-to-Mobile Communications Channels

Herausgegeben von

**Prof. Dr.-Ing. Jörg Eberspächer
Lehrstuhl für Kommunikationsnetze
Technische Universität München**

in der Reihe

Kommunikationstechnik



Herbert Utz Verlag · München

Kommunikationstechnik

Band 24

Zugl.: Diss., Ulm, Univ., 2015

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

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.
Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die
der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von
Abbildungen, der Wiedergabe auf fotomechanischem
oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Daten-
verarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugs-
weiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH · 2016

ISBN 978-3-8316-4551-0

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München
089-277791-00 · www.utz.de

Vorwort

*„Φύσις κρύπτεσθαι φιλεί.“
- Ἡράκλειτος*

Gerade weil sich die Natur gerne verbirgt, macht die Erforschung derselben sehr viel Spaß. Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Kommunikation und Navigation des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt in Oberpfaffenhofen. Die Grundlage für die Ergebnisse dieser Dissertation bilden eine Fahrzeug-Fahrzeug und eine Flugzeug-Flugzeug Messkampagne. Für die Gelegenheit solch komplexe und interessante Messkampagnen mitzugestalten und auch für die Unterstützung während meiner Promotion, möchte ich mich deshalb bei meinen Gruppenleitern Dr. Michael Schnell und Dr. Armin Dammann bedanken.

Der aeronautische Teil der Arbeit basiert zu großen Teilen auch auf Ergebnissen aus einem Drittmittelprojekt mit der Firma Rohde & Schwarz. Für die erfolgreiche Zusammenarbeit und die Erlaubnis, die hier gezeigten Messdaten in der Dissertation verwenden zu können, bedanke ich mich.

Für die Betreuung der Dissertation sowie die hilfreichen Kommentare geht mein Dank an Prof. Robert Fischer, der mir ermöglichte an der Uni Ulm zu promovieren. Des Weiteren bedanke ich mich bei Prof. Uwe-Carsten Fiebig, der in seiner Funktion als Abteilungsleiter und Zweitgutachter mit fachlichen Diskussionen zur Entwicklung des Themas beigetragen hat. Für die Einladung und Zusammenarbeit während eines dreimonatigen Forschungsaufenthaltes am Georgia Institute of Technology in Atlanta würde ich gerne Prof. Alenka Zajić meinen Dank aussprechen. Ebenso bedanke ich mich bei Prof. Fleury für den Aufenthalt und die fruchtbaren Diskussionen an der Universität Aalborg sowie bei Priv.-Doz. Thomas Zemen für die Einladung ans Telekommunikationsforum des FTW und der TU Wien als auch für die gute Zusammenarbeit bei den Publikationen.

Für die vielseitige Unterstützung bei der Vorbereitung und Durchführung der zwei Messkampagnen danke ich den DLR Forschungsflugabteilungen in Braun-

schweig und Oberpfaffenhofen, Rücker Aerospace und allen daran beteiligten Personen, insbesondere Thomas Jost, dem Meister der Messkampagnen. Ohne die Unterstützung aller involvierten Kollegen wären solche aufwändigen Messkampagnen nicht möglich gewesen!

Besonderer Dank gilt Ulrich Epple, meinem Bürokollegen, für die schöne gemeinsame Zeit in unserem Büro sowie Dmitriy Shutin, der viele theoretische Herleitungen mit mir zusammen erarbeitet hat. Ferner danke ich Nicolas Schneckenburger, Christian Gentner, Snježana Gligorević, Martin Frassl, Michael Lichtenstern, María García Puyol, Sinja und Kai Wendlandt, Nico Franzen, Michael Angermann und Seunghwan Kim für die fachlichen Diskussionen und Aufmunterungen ebenso wie für das angenehme Arbeitsumfeld während der Promotionszeit.

Abschließend möchte ich mich bei meinen Eltern und meinem Bruder für deren ununterbrochene Unterstützung auf meinem bisherigen Lebensweg bedanken. Da meine Eltern meine nicht enden wollenden Fragen im Kindesalter unermüdlich beantworteten, ist die Neugier auf die Geheimnisse der Natur bereits früh geweckt worden.

Gilching im Februar 2016,

Michael Walter

Kurzfassung

Das Ziel dieser Dissertation ist Einführung eines nicht-stationären Modells für Kanäle zwischen zwei mobilen Teilnehmern. Durch den Fortschritt in der drahtlosen Nachrichtentechnik, werden Kommunikationssysteme für die Informationsübertragung zwischen Basisstation und mobilen Teilnehmern durch solche für die Informationsübertragung zwischen mobilen Teilnehmern untereinander komplementiert.

Im Automobilsektor werden Kommunikationssysteme zwischen zwei mobilen Teilnehmern dazu verwendet intelligente Verkehrssysteme zu entwickeln. Eine solche Technologie zielt darauf ab den Verkehr sicherer und effizienter zu gestalten, indem Sensordaten zwischen Fahrzeugen übertragen werden. Im aeronautischen Sektor überträgt ein Kommunikationssystem zwischen zwei mobilen Teilnehmern z.B. die Positions- und Geschwindigkeitsinformationen der Teilnehmer untereinander, so dass der Flugverkehr enger gestaffelt werden und somit eine höhere Verkehrsdichte erreicht werden kann.

Stochastische Modelle für Kanäle zwischen Basisstation und mobilen Teilnehmern basieren auf der Annahme, dass der Kanal im weiteren Sinne stationär ist und unkorreliertes Streuverhalten besitzt. Es wurde jedoch gezeigt, dass viele Kanäle zwischen zwei mobilen Teilnehmern kein solches Verhalten zeigen, insbesondere der Fahrzeug-Fahrzeug- und der Flugzeug-Flugzeug-Kanal. Der Bedarf für neue Modelle ist daher auf die Tatsache zurückzuführen, dass die Kanäle zwischen Basisstation und mobilem Teilnehmer fundamentale Unterschiede zu den Kanälen zwischen zwei mobilen Teilnehmern besitzen.

Um die Einschränkungen der gegenwärtigen Kanalmodelle aufzuheben, wurden zwei Messkampagnen durchgeführt, um sowohl den Fahrzeug-Fahrzeug- als auch den Flugzeug-Flugzeug-Kanal zu charakterisieren. Die Messungen bestätigen, dass die Kanäle nicht stationär sind. Anschließend wird ein theoretisches Modell auf Basis der Messdaten entwickelt. Das verwendete Modell ist ein geometrisch-stochastisches Kanalmodell und damit aus zwei Teilen aufgebaut. Im geometrischen Teil werden mathematische Beschreibungen für Verzögerungszeit und Dopplereffekt hergeleitet. Im stochastischen Teil ermöglichen diese Beschreibungen ge-

geschlossene Lösungen für die benötigten Wahrscheinlichkeitsdichten zu berechnen. Das hier eingeführte Modell kann als Generalisierung des Modells mit den Annahmen zur Stationarität im weiteren Sinne und unkorreliertem Streuverhalten gesehen werden.

Da die Berechnungen der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen sehr zeitaufwändig sind, wird in der Folge die Verwendung eines anderen Koordinatensystems untersucht. Wir zeigen, dass eine Verkürzung der Rechenzeit durch die Benutzung eines rotationsellipsoiden Koordinatensystems verringert werden kann. Zusätzlich können andere wichtige Kanalparameter wie die mittlere Dopplerfrequenz sowie die Varianz der Dopplerfrequenz hergeleitet werden.

Das hier vorgestellte theoretische Kanalmodell wird mit Hilfe von Messdaten, die sowohl für den Fahrzeug-Fahrzeug- als auch den Flugzeug-Flugzeug-Kanal aufgenommen wurden, validiert. In beiden Fällen ergibt sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Messdaten und Kanalmodell. Das Modell passt außerdem zu Messdaten, die von anderen Institutionen für unterschiedlichen Szenarien aufgenommen wurden. Diese Flexibilität zeigt, dass unser Modell sehr generell gehalten ist und daher auf eine Vielzahl an Szenarien angewendet werden kann.

Abstract

The aim of this thesis is to introduce a non-stationary model for the scattering in mobile-to-mobile channels. Due to the evolution of wireless technology, fixed-to-mobile communications systems are nowadays complemented by mobile-to-mobile communications systems.

In the vehicular sector, mobile-to-mobile communications systems are used to enable intelligent transportation systems. Such systems aim to make transportation safer and more efficient by distributing sensor information among the cars. In the aeronautical sector, mobile-to-mobile communications systems will be used, for example, to exchange position, altitude, speed, and heading data between aircraft during flight thus allowing a reduced separation between them. Hence, these systems are necessary to further increase the air traffic density.

Stochastic channel models for the fixed-to-mobile channel are based on the assumption that the channel is wide-sense stationary and exhibits uncorrelated scattering behavior both in a stochastic sense. It has been shown that many mobile-to-mobile channels do not adhere to such assumptions, especially vehicle-to-vehicle and air-to-air channels. The need for new models is therefore due to the fact that mobile-to-mobile channels are fundamentally different from fixed-to-mobile channels.

To overcome the limitations of current channel models, two measurement campaigns to characterize both the vehicle-to-vehicle and the air-to-air channel as exemplary mobile-to-mobile channels were conducted. The measurements confirm the non-stationary behavior of those channels and subsequently, a theoretical model is created on the basis of the measurement data. The employed model is a geometry-based stochastic channel model, which means it consists of two parts. In the geometric part, new expressions for channel parameters, such as delay and Doppler frequency, are derived. In the stochastic part, those expressions enable us to determine closed-form solutions for the required time-variant probability density functions. The presented model can be seen as a generalization of the wide-sense stationary, uncorrelated scattering models.

Since the calculations of the probability density functions are time consuming, the application of a different coordinate system is investigated and we show that computational gains are achieved by using prolate spheroidal coordinates. Additionally, other important channel parameters, such as mean Doppler and Doppler spread, are derived.

The presented theoretical channel model is validated by the measurement data that has been recorded for both the vehicle-to-vehicle and the air-to-air channel. In each case, there is a remarkable agreement between measurement data and the channel model. The model also matches with measurement data recorded by other institutions that used different scenarios. This versatility allows the model to be very general and it can be applied to a wide range of scenarios.

Contents

Vorwort	iii
Kurzfassung	v
Abstract	vii
1 Introduction	1
2 Introduction to Channel Modeling	7
2.1 Overview	7
2.1.1 Propagation Mechanisms	7
2.1.2 Wireless Channel Components	9
2.2 Channel Modeling Techniques	11
2.3 Stochastic Channel Modeling	12
2.3.1 Wide Sense Stationarity (WSS)	14
2.3.2 Uncorrelated Scattering (US)	14
2.3.3 WSSUS Model	15
2.3.4 Doppler Probability Density Functions	15
2.3.5 Theory of Non-Stationary Channels	21
2.3.6 Stochastic Simulation Model	23
2.4 Geometric Channel Modeling	26
2.5 Geometric-Stochastic Channel Modeling	26
2.6 Vehicular Channel Models	27
2.7 Aeronautical Channel Models	29
3 Measurement Campaigns	33
3.1 Channel Sounder	33
3.1.1 Parameter Selection and Devices	33

3.1.2	Synchronization	35
3.2	V2V Campaign	36
3.2.1	Measurement Parameters	36
3.2.2	TX and RX Vehicle	37
3.2.3	Route	39
3.2.4	Antennas	40
3.3	A2A Campaign	40
3.3.1	Measurement Parameters	41
3.3.2	TX and RX Aircraft	42
3.3.3	Routes	45
3.3.4	Antennas	46
3.3.5	Physiological Training	47
4	Vehicle-to-Vehicle Channel	49
4.1	Components of the Channel	49
4.1.1	Direct Component	49
4.1.2	Specular Reflection Components	50
4.1.3	Scattered Components	50
4.2	2D Model	52
4.2.1	Geometric Part	52
4.2.2	Stochastic Part	56
4.3	Theoretical Results	60
4.4	Validation	66
4.5	Ellipsoidal Coordinates	75
4.5.1	Coordinate Transformation	76
4.5.2	Delay and Doppler in the PSCS	77
4.5.3	Characteristic Function	79
4.5.4	Theoretical Results	80
4.6	Algebraic Geometry	84
5	Air-to-Air Channel	87
5.1	Components of the Channel	87
5.1.1	Direct Component	87
5.1.2	Specular Reflection Components	88
5.1.3	Scattered Components	88
5.2	From a 2D to a 3D Model	88
5.2.1	Geometric Part	89
5.2.2	Stochastic Part	92

5.3	Theoretical Results	94
5.4	Validation	100
6	Summary and Outlook	107
A	WSSUS Correlation Functions	111
B	Doppler Frequency	113
B.1	Expressed in Cartesian Coordinates $\mathbf{x}$	113
B.2	Expressed in Ellipse Parameter ϕ	114
B.3	Expressed in Algebraic Parameter s	115
B.4	Indefinite Integral in Algebraic Parameter s	116
C	Doppler Frequency Derivative	117
D	Jakes Proof	119
E	Simulation Parameters	121
	Acronyms and Symbols	123
	References	131

Introduction

In the 1860s, Scottish physicist James Clerk Maxwell predicted the existence of electromagnetic waves. Maxwell's equations were the beginning of the wireless communications age. However, it took more than twenty years to experimentally prove that the predictions of the electromagnetic theory were right. Heinrich Hertz, a German physicist, succeeded in 1886 to transfer electromagnetic waves from a transmitter (TX) to a receiver (RX) and thus confirmed Maxwell's theory. Guglielmo Marconi then extended the work of Hertz to achieve long-distance communications. Marconi started at a young age sending wireless messages across his father's garden. After immigrating to England, Marconi continued to increase the distance of the wireless telegraphy. The biggest success was the first transatlantic wireless transmission. He built a transmitter station in Poldhu, Cornwall, UK, and a receiver station on what is today known as Signal Hill in St. John's, Newfoundland, Canada. He reportedly received the first message, the Morse code letter S, on 12th December 1901, which started the inexorable usage of wireless communications systems.

One of the early application fields of wireless communications was the transmission of messages between oceangoing vessels, especially in case of emergency. Since the wired telegraphy already connected Europe and America since 1858, transmissions to and from ships seemed to be a very useful application of the new wireless technology. Interestingly, wireless technology has been used from the beginning for the purpose of mobile-to-mobile (M2M) communications, as transmitter and receiver are mobile and not connected via cable. One of the most famous examples of early M2M communications is the use of the new technology during the sinking of the Titanic. In this example, M2M communications was used to notify the HMS Carpathia about the accident allowing the HMS Carpathia to change course saving many passengers from the freezing cold water. Thus, the usefulness of M2M communications became clear.