

Nadja Lohse

Charakterisierung und stochastische Modellierung
des Raum-Zeit-Mobilfunkkanals

Beiträge aus der Informationstechnik

Nadja Lohse

**Charakterisierung und
stochastische Modellierung
des Raum-Zeit-Mobilfunkkanals**

 VOGT

Dresden 2008

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

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

Zugl.: Dresden, Techn. Univ., Diss., 2007

Die vorliegende Arbeit stimmt mit dem Original der Dissertation „Charakterisierung und stochastische Modellierung des Raum-Zeit Mobilfunkkanals“ von Nadja Lohse überein.

Besuchen Sie uns im Internet:
www.vogtverlag.de

© Jörg Vogt Verlag 2008
Alle Rechte vorbehalten. All rights reserved.

Gesetzt vom Autor
Printed in Germany

ISBN 978-3-938860-15-1

Jörg Vogt Verlag
Voglerstr. 20 · 01277 Dresden
Telefon: +49-(0)351-31403921
Telefax: +49-(0)351-31403918
Email: info@vogtverlag.de

Für Paula

Technische Universität Dresden

**Charakterisierung und
stochastische Modellierung
des Raum-Zeit-Mobilfunkkanals**

Nadja Lohse

der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität Dresden

zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktoringenieurs

(Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. habil. Albrecht Reibiger

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Gerhard Fettweis

Prof. i. R. Dr. tech. Ernst Bonek

Prof. Dr.-Ing. Christian Schäffer

Tag der Einreichung: 06.11.2006

Tag der Verteidigung: 20.04.2007

Kurzfassung

Der Mobilfunkkanal wird von immer mehr Nutzern mit umfangreichen Diensten wie Video und TV belegt. Diese Kommunikationsdienste benötigen eine immense Kapazität an derzeit hauptsächlich genutzten Informationsträgern Zeit und Frequenz. Dieser erhöhte Bedarf wird durch den Einsatz adaptiver Antennen abgefangen. Dies wird möglich, da adaptive Antennen zusätzliche Informationsträger nutzen, den Raum und die Raumfrequenz. Um den Gewinn der Antennen und der damit verbundenen raumvarianten Signalverarbeitung zu ermitteln, werden raumvariante Kanalmodelle wichtig. Deren Basis wiederum ist die theoretische Charakterisierung des raumvarianten Mobilfunkkanals. Beide, die Charakterisierung und die Modellierung des Raum-Zeit-Mobilfunkkanals, sind Hauptbestandteile der Dissertation.

Die vorgestellte Charakterisierung des Raum-Zeit-Mobilfunkkanals ist von grundlegender Natur. Sie stellt eine räumliche Erweiterung der generellen Charakterisierung nach Bello dar, welche auf den zeitvarianten Mobilfunkkanal begrenzt war, und berücksichtigt alle physikalisch möglichen Kanalressourcen (abgeleitet aus den Maxwell'schen Gleichungen). Zur Charakterisierung gehört die so genannte absolute Kanalbeschreibung, der auch die bekannte MIMO-Kanalbeschreibung zuzuordnen ist. Diese Zuordnung wird durch eine mathematische Herleitung in der Arbeit belegt. Neben dieser bekannten wird eine neue, relative Beschreibung des raumvarianten Mobilfunkkanals eingeführt. Relative und absolute Raum-Zeit-Kanalbeschreibung sind bei der Bildung von Raum-Zeit-Abtastmodellen gleichberechtigt.

Die aufgestellten Raum-Zeit-Abtastmodelle sind Kanalmodelle unter Berücksichtigung der physikalischen Mindestanforderung des Abtasttheorems. Wesentlicher Bestandteil der Raum-Zeit-Abtastmodelle sind die Gewinnfunktionen. Die Vielzahl an real möglichen Gewinnfunktionen impliziert deren stochastische Beschreibung mit Hilfe von stochastischen Kanalprozessen. Basierend auf zwei Arten von Kanalressourcen werden zwei Arten von stochastischen Kanalprozessen eingeführt: Aus weitestgehender stochastischer Stationarität leitet sich der Gaußprozess ab. Unter der Annahme unkorrelierter Streuer wird ein Streuerprozess definiert. Zur Anwendung der Raum-Zeit-Abtastmodelle werden stochastische Modellparameter evaluiert.

Bestehende raumvariante Kanalbeschreibungen wie die MIMO-Kanalbeschreibung reichen heute aus, die Informationsträger der aktuellen Signalverarbeitung mit adaptiven Antennen aufzulösen. Die Auflösung derzeit noch nicht berücksichtigter und in der Arbeit vorgestellter Informationsträger könnte die Signalverarbeitung und die Ausnutzung des Raum-Zeit-Mobilfunkkanals in Zukunft noch intelligenter machen.

Abstract

There are more and more users of mobile phones, and fewer and fewer of them are without video and TV features. These broadband communication services require immense capacity of current radio channel resources as well as time and frequency. In future this increasing demand of channel capacity could be secured with the application of smart antennas. Smart antennas make use of additional resources of the radio channel, the space and the spatial frequency. In order to evaluate the benefit of such antennas (which certainly includes the benefit of spatial signal processing) spatial channel models became necessary. An essential aspect of spatial channel modelling is the theoretical characterisation of the spatial channel. Both characterisation and modelling of space-time mobile radio channel are the main topics of this dissertation.

The presented characterisation of space-time-channel is of a general nature. It is a spatial expansion of the general characterisation by Bello which was limited to the time-variant radio channel. Channel description is divided into so-called absolute one and relative one. The existing MIMO channel description is a special case of absolute channel description. The mathematical proof will be presented to the reader. The relative channel description according to Bello allowed the simple generation of time-variant sampling models (the most important representative of these sampling models is the tapped delay line model). This advantage of the relative view is not mirrored in the spatial domain. That is why the absolute and relative channel descriptions have been dealt with equally to generate space-time sampling models.

The dissertation specifies two parts of stochastic processes, the Gaussian process and the scatterer process, which make the modelling of the multifaceted part of the sampling models, the gain function, possible. For the application of the resulting stochastic sampling models you only need a set of channel parameters.

Existing channel models are based on the practical association that the spatial information has to be known at the antenna elements only. Today this is sufficient because adaptive antennas know the spatial channel at these points only. In order to be receptive to the entire potential of channel resources, the knowledge of the presented general characterisation and modelling of mobile radio channel could be helpful.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Vodafone Stiftungslehrstuhl für Mobile Nachrichtensysteme der Technischen Universität Dresden. Ich vollendete die Dissertation als Angestellte bei der Firma Ortner cleanroom logistic systems GmbH.

Mein besonderer Dank gilt Professor Gerhard Fettweis. Er ermöglichte mir eine freie und weltoffene wissenschaftliche Tätigkeit am Lehrstuhl und schaffte nicht zuletzt durch seine geistvolle und motivierende Art und Weise die Grundlage für meine Dissertation. Ich bedanke mich bei ihm für die lange wissenschaftliche Begleitung und die Übernahme des Hauptreferats. Für die Unterstützung bei meiner Forschungstätigkeit bedanke mich bei allen beteiligten Lehrstuhlkollegen. Namentlich gilt mein Dank Dr. Volker Aue und Dr. Marcus Bronzel für die wegweisenden Gespräche. Des Weiteren bedanke ich mich bei Dr. Jens Jelitto, Clemens Michalke und Johannes Hübner für die gemeinsamen Untersuchungen, dessen Ergebnisse dieser Arbeit beistanden.

Während meiner Lehrstuhlzeit war ich bei den beiden europäischen Forschungsprojekten COST259 und COST273 eingebunden. In der Arbeitsgruppe zur Kanalmodellierung, der ich zugehörte, habe ich viele Experten auf meinem Fachgebiet kennen gelernt. Vor allem bei Dr. Ralf Kattenbach bedanke ich mich für die kreativen und produktiven Gespräche. Ihm verdanke ich auch eine gemeinsame Weiterentwicklung meiner neuen Ideen. Dr. Ralf Kattenbach war damit für mich und die Arbeit von unschätzbarem Wert. Ich danke ebenfalls Professor Reiner Thomä und Professor Ernst Bonek und ihren Lehrstuhlmitarbeitern für den fachlichen Austausch. Professor Ernst Bonek gebührt ein ganz besonderer Dank für die Übernahme des Koreferats und den damit verbundenen hochgeschätzten fachlichen Rat.

Für die Durchsicht meiner Arbeit bedanke ich mich bei Professor Albrecht Reibiger, welcher hauptsächlich das Kapitel zwei mit seinen wertvollen und hilfreichen Kommentaren und Anregungen versah. Auch bei Professor Christian Schäffer bedanke ich mich an dieser Stelle für die kurzfristige Übernahme des guten Koreferats.

Ich bedanke mich sehr bei Heinz Martin Esser, dem Geschäftsführer der Ortner c.l.s. GmbH, der das Absolvieren der Dissertation neben meiner Anstellung bei ihm schätzte und stets unterstützte und mir so auch den nötigen Freiraum im letzten Jahr ermöglichte.

Meinen Eltern und meiner Schwester Katja mit ihrer Familie danke ich für die liebe Begleitung über die gesamte Zeit. Ingo, dem Mann an meiner Seite gilt ein herzlicher Dank für seine liebevolle Unterstützung in den letzten Jahren. Meiner Tochter Paula möchte ich auf das Innigste für alles danken, ihr widme ich diese Arbeit.

Inhaltsverzeichnis

Listen häufig verwendeter Symbole, Abkürzungen	VII
Kapitel 1 Einleitung	1
1.1 Geschichtlicher Hintergrund	1
1.2 Notwendigkeit einer raumvarianten Kanalbeschreibung	1
1.3 Abgrenzung zu existierenden Kanalbeschreibungen	2
1.4 Das stochastische Abtastmodell als Kanalmodell	3
1.5 Abgrenzung zu existierenden Kanalmodellen	3
1.6 Aufbau der vorliegenden Arbeit	4
Kapitel 2 Analogie in Raum und Zeit	5
2.1 Elektromagnetische Wellenausbreitung im Mobilfunkkanal	6
2.1.1 Maxwellsche Gleichungen und elektromagnetische Welle	6
2.1.2 Raum-Zeit-Analogie bei Parametern der elektromagnetischen Welle	8
2.1.3 Raum-Zeit-Analogie in der Wellenausbreitung	8
2.2 Der Mobilfunkkanal als System	10
2.2.1 Die Linearitätsannahme	10
2.2.2 Systemklasse MIMO	11
2.3 Exkurs: Systemmodell Lorenz-Transformation	11
2.3.1 Raumzeit und Raumzeitfrequenz	11
2.3.2 Die Lorentz-Transformation	12

Kapitel 3	Deterministische Raum-Zeit-Kanalbeschreibung	15
3.1	Begriffsbestimmungen	16
3.1.1	Eingang und Ausgang des Kanals	16
3.1.2	Absolute und relative Kanalkoordinaten	16
3.1.3	Kernfunktionen und Systemfunktionen	16
3.1.4	Zeitvarianz, Raumvarianz des Kanals und Kanalbereiche	16
3.2	Absolute Kanalbeschreibung mit Kernfunktionen	17
3.2.1	Der lineare zeitvariante, rauminvariante Mobilfunkkanal	17
3.2.2	Der lineare raumvariante, zeitinvariante Mobilfunkkanal	18
3.2.3	Der lineare raum- und zeitvariante Mobilfunkkanal	20
3.2.4	Der lineare, raumzeitvariante Mobilfunkkanal	22
3.3	Relative Kanalbeschreibung mit Systemfunktionen	23
3.3.1	Die relative Sichtweise	23
3.3.2	Differenzkoordinaten im Zeitbereich	23
3.3.3	Die lineare zeitvariante, rauminvariante Kanalbeschreibung nach Bello	24
3.3.4	Differenzkoordinaten im Raumbereich	26
3.3.5	Der lineare raumvariante, zeitinvariante Mobilfunkkanal	27
3.3.6	Der lineare raum- und zeitvariante Mobilfunkkanal	28
3.3.7	Die Anwendung von relativen Differenz-Vierervektoren	29
Kapitel 4	Raum-Zeit-Abtastmodelle	31
4.1	Die Anwendung des Abtasttheorems auf die Kanalfunktionen	32
4.1.1	Zusammenhang von Begrenzung und Abtastung	32
4.1.2	Begrenzung und Abtastung der Systemfunktionen	32
4.1.3	Begrenzung und Abtastung der Kernfunktionen	34
4.2	Beispielhafte Abtastmodelle	36

Inhaltsverzeichnis	III	
4.2.1	Vorgehensweise	36
4.2.2	Modell mit zeitvarianter Übertragungsfunktion und verzögerungsbegrenztem Kanal	36
4.2.3	Modell mit raumvarianter Übertragungsfunktion und distanzbegrenztem Kanal	38
4.2.4	Modell mit Raum-Zeit-Übertragungsfunktion Annahme: verzögerungs- und distanzbegrenzter Kanal	39
4.2.5	Modell mit Raum-Zeit-Impulsantwort. Annahme: Raum-Zeit Frequenzbandbegrenzter Kanal	40
4.3	Weitere Sammlung zu Abtastmodellen	42
4.3.1	Bestandteile der Abtastmodelle	42
4.3.2	Aufstellung weiterer Abtastmodelle	44
4.3.3	Bedeutung der Abtastmodelle	45
Kapitel 5	Stochastische Raum-Zeit-Kanalbeschreibung	47
5.1	Stochastischer Kanalprozess	48
5.1.1	Zwei stochastischen Eigenschaften	48
5.1.2	Gaußprozess	49
5.1.3	Streuerprozess	51
5.2	Stochastische Stationarität, unkorrelierte Streuer, Ergodizität	51
5.2.1	WSSUS-Annahme	51
5.2.2	Definition unter WSS-Annahme	51
5.2.3	Definition unter US-Annahme	52
5.2.4	Definition unter Ergodizitäts-Annahme	53
5.3	Korrelationsfunktion und Leistungsdichtespektrum	54
5.3.1	Vereinte Definition in Raum und Zeit	54
5.3.2	Ihre Parameter Kohärenz und Spektrale Aufweitung (spread)	56
5.3.3	Auswirkungen von Kohärenz und Spektrale Aufweitung auf Übertragungsqualität	57

Kapitel 6	Realisierung der Gewinnfunktion über stochastischen Kanalprozess	61
6.1	Der stochastische Prozess im Abtastmodell	62
6.1.1	Einsatz von Gauß- und Streuerprozess	62
6.1.2	Zwei beispielhafte stochastische Raum-Zeit-Abtastmodelle	62
6.2	Methoden zur Modellierung von Streuerprozess und Gaußprozess	64
6.2.1	Modellierung des Streuerprozesses mit Wahrscheinlichkeitsdichte	64
6.2.2	Modellierung des Gaußprozesses mit Korrelationsfilter	64
6.3	Implementierung eines Raum-Zeit-Korrelationsfilters	66
6.3.1	Anwendung der Karhunen-Lóeve-Transformation	66
6.3.2	Implementierung mit COSSAP	67
6.3.3	Modellverifizierung	68
6.3.4	Generierte Raum-Zeit-Gewinnfunktionen	69
6.4	Analyse einer Verbundwahrscheinlichkeitsdichte	71
6.4.1	Analyse Azimut-Verzögerungs-Verbundwahrscheinlichkeitsdichte	71
6.4.2	Auswahl der Streuerverteilungsdichte	74
6.4.3	Darstellung mit MATLAB	74
Kapitel 7	Statistik zu wesentlichen Kanalparametern	77
7.1	Kanaltopographien nach COST 259	78
7.2	Messkampagnen und Simulationstool	80
7.2.1	Einleitung	80
7.2.2	Messtool RUSK ATM Channel Sounder	80
7.2.3	Simulationstool Radiowave Propagation Simulator (RPS)	81

Inhaltsverzeichnis	v
7.2.4 Vergleich einer simulierten und gemessenen Impulsantwort	82
7.3 Statistiken und Analyse zu ausgewählten Kanalparametern	84
7.3.1 Ausgewählte Kanalparameter	84
7.3.2 Statistik zu Anzahl von dominanten Mehrwegen	84
7.3.3 Statistik zur Verteilung der Einfallswinkel an der Mobilstation	86
7.3.4 Analyse der räumlichen Korrelation und Kohärenzweite	88
7.3.5 Bekannte Korrelationsfunktionen und Leistungsdichtespektren	90
Kapitel 8 Zusammenfassung	93
Anhang A Kernmatrix K_1 und Kanalmatrix H	97
Anhang B Abtasttheorem für Kanalfunktionen	103
Anhang C Karhunen-Lóeve-Transformation	107
Literaturverzeichnis	109