Entwurf von Hardware-Implementierungen nachrichtentechnischer Algorithmen in Mehrantennen-OFDM-Systemen

Vom Fachbereich für Physik und Elektrotechnik
der Universität Bremen

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Frank Ludwig

wohnhaft in Oldenburg

Referent	Prof. Dr.-Ing. Steffen Paul
Koreferent	Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Kühn
Eingereicht am:	06.04.2017
Tag des Promotionskolloquiums:	13.06.2017

Forschungsberichte aus dem
Institut für theoretische Elektrotechnik und Mikroelektronik
Arbeitsbereich Kommunikationselektronik
Universität Bremen
Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. Steffen Paul

Band 6

Frank Ludwig

Entwurf von Hardware-Implementierungen nachrichtentechnischer Algorithmen in Mehrantennen-OFDM-Systemen

D 46 (Diss. Universität Bremen)

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.: Bremen, Univ., Diss., 2017

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 978-3-8440-5568-9
ISSN 2195-2809

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

Kurzfassung

In unserer Gesellschaft ist die drahtlose Übertragung von digitalen Daten in den letzten Jahren zur Selbstverständlichkeit geworden. Die wachsende Anzahl der Geräte, die vernetzt sind und die stark gestiegene Menge an Daten die kommuniziert wird, erfordern immer höhere Datenraten. Deswegen wird die Resource Raum durch Mehrantennensysteme immer stärker ausgenutzt und durch OFDM-Systeme die vorhandene Bandbreite sehr effizient genutzt. Die interdiziplinäre Forschung auf dem Gebiet der Mikroelektronik sowie der Nachrichtentechnik ist dabei der Gegenstand dieser Arbeit. Es wird die sendeseitige Vorverarbeitung untersucht, um effizientere Systeme zu erhalten. Es werden Algorithmen sowie mögliche Hardwareumsetzungen auf deren Effizienz untersucht und deren Hardwareimplementierungen gezeigt. Zudem wird ein Hardwaredemonstrator entwickelt, mit dem die Echtzeitübertragung eines Zwei-Wege Relaying Systems betrachtet wird. Durch das vorgeschlagene System kann die Kommunikation in stark durch Interferenz beschränkten Netzwerken deutlich verbessert werden.

Abstract

Wireless communication is a very important technology in many people's lives. Therefore, in industry wireless communication becomes a major technology to cope with the challenges of the future. The rising quantity of networking devices and the increasing amount of communicated data require much higher data rates. For that reason, the spatial resource is exploited by multi-antenna systems. Furthermore, OFDM systems utilize the available bandwidth very efficiently. The subject of this work is the interdisciplinary research in the field of microelectronics and communication engineering. In order to obtain efficient systems, the pre-equalization on the transmitter site is explored. Algorithms and hardware implementations are shown and analyzed concerning their efficiency. Furthermore, a hardware demonstrator is developed for real-time communication in a two-way relaying system. With this system communication in interference-limited networks will be highly improved.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Arbeitsbereich Kommunikationselektronik am Institut für Theoretische Elektrotechnik und Mikroelektronik (ITEM) der Universität Bremen. Gefördert wurde diese durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), bei der ich mich an dieser Stelle bedanken möchte.
Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Steffen Paul nicht nur für die Ermöglichung meiner Promotion und die vorbildliche Betreuung, sondern auch dafür, dass er mich für das Thema begeistern konnte. Für die Übernahme des Zweitgutachtens danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Kühn. Für ihr Mitwirken im Prüfungsausschuss danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Alberto García-Ortiz und Herrn Prof. Dr.-Ing. Armin Dekorsy.
Des Weiteren bedanke ich mich bei allen Kollegen am ITEM für die angenehme Zeit und der guten Zusammenarbeit. Besonders hervorheben möchte ich dabei Herrn Till Wiegand für die Einarbeitungszeit und Herrn Jochen Rust für die gute Zusammenarbeit bei Veröffentlichungen. Danken möchte ich auch den Technikern Herrn Michael Peeper, Herrn Peter Lutzen und Herrn Lars Kleditsch, die für die gute Infrastruktur gesorgt haben, sowie Frau Valerie Gerdes für Ihre große Hilfsbereitschaft bei allen organisatorischen Fragen und für das Korrekturlesen von Veröffentlichungen. Besonderer Dank gilt auch den Herrn Mark Petermann, Herrn Markus Stefer, Herrn Dirk Wübben und Herrn Meng Wu für die ausgezeichnete Zusammenarbeit im Zuge der Projektbearbeitung. Zudem möchte ich mich bei allen Studenten bedanken, die mich mit Ihren Arbeiten unterstützt haben, besonders bei Herrn Axel Budweg, Herrn Di Zhang und Herrn Theodor Hillebrand.
Bei Herrn Christof Osewold und Herrn Steffen Janßen möchte ich mich für die Begleitung, aber auch für die wissenschaftliche Diskussionen beim Pendeln bedanken. Ohne Euch hätte ich das Zugfahren über diese lange Zeit wohl nicht durchgehalten. Ein weiterer Dank gilt meinem ehemaligem Studienkollegen Herrn André Wilkening, dass er während der WiMi-Zeit als Freund in den Kaffeepausen da war.
Nicht zuletzt bedanke ich mich auch bei meinen Freunden und meiner Familie. Ein ganz besonderer Dank gilt meinen Kindern Greta und Henri sowie meiner lieben Janna für ihr Verständnis und ihrer Aufmunterung.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 1
1.1 Eigener Beitrag 2
1.2 Gliederung der Arbeit 3

2 Mehrantennen- und OFDM Funkübertragungssysteme 5
2.1 Mehrantennensysteme 5
2.2 Lineare digitale Modulation 6
2.3 Orthogonal Frequency-Division Multiplexing 7

3 Räumliche Vorentzerrung für verteilte Empfänger 9
3.1 Lineare Vorentzerrung 10
3.1.1 Matched Filter 11
3.1.2 Zero-Forcing Filter 11
3.1.3 Wiener Filter/ MMSE Filter 11
3.2 Nichtlineare Vorentzerrung 12
3.2.1 Dirty Paper Codierung 12
3.2.2 Tomlinson-Harashima Vorcodierung 14
3.3 Vergleich der Vorentzerrungsverfahren 16
3.3.1 Vergleich der Leistungsfähigkeit der Vorentzerrungsverfahren 16
3.3.2 Bewertung der Vorentzerrungsverfahren hinsichtlich der Hardwareimplementierung 18
3.4 QR-Zerlegung für THP 21
3.4.1 Givens-Rotation 21
3.5 THP Implementierung mittels CORDIC 25
3.5.1 Givens-Rotation mit CORDIC-Algorithmus 25
3.5.2 Implementierung der QRD mit CORDIC 27
3.6 THP Implementierung mit stückweiser linearen Funktionsapproximation . 31
3.6.1 Logarithmisches Zahlensystem 32
3.6.2 Direkte Approximation 37
3.6.3 Syntheseergebnisse der SLFA 39
3.7 Approximation der QR-Zerlegung durch Interpolation über die Unterträger 40

4 Kalibrierung der Kanalmatrix bei fehlerhafter Kanalreziprozität . . 43
4.1 Sendeseitige Kanalkenntnis zur Vorentzerrung 43
4.2 Fehlerhafte Kanalreziprozität 44
4.3 Relative Kalibrierung im Frequenzbereich 46
4.4 Hardwareimplementierung der TLS-Kalibrierung 49
4.4.1 Syntheseergebnisse der Kalibrierung 50
4.4.2 Performance der Kalibrierung 52

5 Echtzeitübertragung eines Two-Way Relaying Systems 55
5.1 Physical Layer Network Coding 55
5.1.1 Detektions- und Dekodierverfahren 57
5.2 Systembeschreibung des Demonstrators 60
5.2.1 Radio Frame Struktur 60
5.2.2 OFDM Parameter 65
5.2.3 Empfangsstruktur 66
5.2.4 Hardware des Demonstrators 68
5.3 Messergebnisse der Echtzeitübertragung 70

6 Zusammenfassung 79

7 Anhang 83
7.1 Reellwertzerlegung 83
7.2 VHDL Implementierung Runden 84

Literaturverzeichnis 85