

Digitale Signalverarbeitung für die faseroptische OFDM-Übertragung

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

vorgelegt dem Fachbereich 1 (Physik/Elektrotechnik)

der Universität Bremen

von

Dipl.-Ing. Henning Paul

Tag des öffentlichen Kolloquiums:	11. November 2011
Gutachter der Dissertation:	Prof. Dr.-Ing. K.-D. Kammeyer Prof. Dr.-Ing. W. Rosenkranz
Weitere Prüfer:	Prof. Dr.-Ing. R. Laur Prof. Dr.-Ing. St. Paul



Bremen, im Dezember 2011

Forschungsberichte aus dem Arbeitsbereich Nachrichtentechnik
der Universität Bremen

Band 22

Henning Paul

**Digitale Signalverarbeitung
für die faseroptische OFDM-Übertragung**

D 46 (Diss. Universität Bremen)

Shaker Verlag
Aachen 2012

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., 2011

Copyright Shaker Verlag 2012

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-0669-8

ISSN 1437-000X

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

Vorwort

Die vorliegende Arbeit ist das Resultat meiner Beschäftigung als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Arbeitsbereich Nachrichtentechnik des Instituts für Telekommunikation und Hochfrequenztechnik der Universität Bremen. Ich blicke gern auf diese Zeit zurück und bin dankbar für die Unterstützung, die ich dort erhalten habe.

Besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Karl-Dirk Kammeyer für die Ermöglichung meiner Promotion und die hervorragende Betreuung während dieser Zeit. Seine wertvollen Hinweise und Ratschläge haben mir stets weitergeholfen. Ebenfalls bedanken möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Werner Rosenkranz von der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel für seine Bereitschaft, das Zweitgutachten anzufertigen, sowie bei den Herren Prof. Dr.-Ing. Rainer Laur und Prof. Dr.-Ing. Steffen Paul dafür, dass sie für mein Promotionskolloquium als Prüfer zur Verfügung standen.

Meinen Kollegen aus dem Arbeitsbereich Nachrichtentechnik danke ich für ihre Kollegialität und den freundschaftlichen Umgang, den ich dort alltäglich erfahren durfte. Bei der Anfertigung dieser Arbeit konnte ich auf die Hilfsbereitschaft insbesondere von Dipl.-Ing. Carsten Bockelmann, Dipl.-Ing. Yidong Lang, Dipl.-Ing. Florian Lenkeit, Dipl.-Ing. Mark Petermann und Dipl.-Ing. Henning Schepker zurückgreifen, die die Durchsicht des Manuskripts auf Fehler vorgenommen haben. Carsten Bockelmann danke ich zudem für seine Ratschläge und Tipps bei der Erzeugung der Grafiken mittels des LaTeX-Pakets TikZ. Den zahlreichen Autoren der zur Manuskripterstellung eingesetzten Open Source-Software sei an dieser Stelle ebenfalls gedankt.

Den Herren Abdulamir Ali, M.Sc. und Dr.-Ing. Jochen Leibrich, sowie dem zuvor bereits genannten Herrn Prof. Dr.-Ing. Werner Rosenkranz von der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel danke ich für die gute Zusammenarbeit in dem gemeinsamen DFG-Projekt, auf dessen Grundlage diese

Dissertation entstand. Selbstverständlich sei auch der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) selbst gedankt, die die Finanzierung meiner Stelle während der Projektlaufzeit übernommen hat.

Meiner Familie danke ich für die Unterstützung, die ich in meinem Leben stets erfahren durfte. Insbesondere bin ich meinem verstorbenen Vater Hans-Erich Paul und meinem verstorbenen Großvater Horst Buda ewig dafür dankbar, schon früh meine Technikbegeisterung geweckt und kontinuierlich gefördert zu haben.

Mein herzlichster Dank gilt meiner geliebten Ehefrau Nadia, die mich in den vergangenen Jahren immer unterstützt und mich in meinen Entscheidungen bekräftigt hat. Auch danke ich ihr für die Geduld und das Verständnis, das sie mir insbesondere in der Endphase meiner Arbeit, in die auch die Geburt unserer gemeinsamen Tochter Merle Sophie gefallen ist, entgegengebracht hat.

Bremen, im Dezember 2011

Henning Paul

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Systemtheoretische Modellierung	5
2.1	Digitalteil des Senders	6
2.2	Analogteil des Senders	6
2.3	Der optische Kanal	10
2.4	Analogteil des Empfängers	13
2.4.1	Direkte Detektion	13
2.4.2	Optisch kohärente Detektion	15
2.5	Digitalteil des Empfängers	17
2.6	Zusammenfassung	18
3	Die OFDM-Übertragungstechnik	19
3.1	Der Mehrträgeransatz	20
3.1.1	Orthogonale Symbolformung	21
3.1.2	Auswirkungen eines Kanalgedächtnisses	24
3.1.3	OFDM-Kanalentzerrung	27
3.2	Blockschaltbilder von OFDM-Modulator und -Demodulator . .	28
3.3	Zusammenfassung	30
4	Systemtheoretische Aspekte optischer Übertragungssysteme	31
4.1	Kanaleigenschaften	31
4.1.1	Eigenschaften des äquivalenten Kanals	32
4.1.2	Kanalgedächtnis	34
4.2	Definition des optischen Signal-zu-Rauschverhältnisses (OSNR)	37
4.3	Dimensionierung eines optischen OFDM-Systems	42

4.4	Nichtlineare Eigenschaften der Sender- und Empfängerkomponenten	44
4.4.1	Anforderungen an das Zeitsignal	44
4.4.2	Arbeitspunktoptimierung	46
4.4.3	Auswirkungen von additivem Kanalrauschen auf das Empfangssignal	52
4.4.4	Signal-zu-Interferenz&Rausch-Verhältnis in Abhängigkeit vom Arbeitspunkt	54
4.4.5	Simulationsergebnisse	56
4.4.6	Träger-zu-Seitenband-Verhältnis	60
4.4.7	Fazit	61
4.5	Interferenzvermeidung	62
4.5.1	Spektrale Eigenschaften des Interferenzterms	62
4.5.2	Simulationsergebnisse	66
4.6	Zusammenfassung	69
5	Lineare und nichtlineare Kompensationsverfahren	71
5.1	Nichtlineare (Vor-)Entzerrung	71
5.1.1	Vorentzerrung der MZM-Kennlinie	72
5.1.2	Entzerrung der Detektorkennlinie	75
5.1.3	Clipping-Effekte	79
5.1.4	Simulationsergebnisse	80
5.2	Kanalvorentzerrung	85
5.2.1	Simulationsergebnisse	94
5.2.2	FIR-Approximation des Vorentzerrers	96
5.3	Zusammenfassung	97
6	Kanalschätzung	99
6.1	Grundprinzip der Schätzung	99
6.2	Rauschreduktion	101
6.2.1	Simulationsergebnisse	105
6.3	Zusammenfassung	108
7	Adaptive Übertragungsverfahren	111
7.1	Krongold-Algorithmus	112
7.1.1	Frequenzselektivität des äquivalenten Basisbandkanals	113
7.1.2	Allokationsbeispiele	115
7.1.3	Simulationsergebnisse	117

7.1.4	Loading in Verbindung mit nichtlinearer (Vor-)Entzerrung	122
7.2	Maßnahmen zur Verringerung von Einhüllendenschwankungen .	126
7.2.1	ASUS-Verfahren zur Spitzenwertreduktion	126
7.2.2	Simulationsergebnisse	128
7.3	Zusammenfassung	130
8	Einträger-Frequenzbereichsentzerrer	131
8.1	Funktionsweise	131
8.1.1	Nichtlineare Effekte	133
8.1.2	Einschränkungen der Einträger-Frequenzbereichsentzerrung	134
8.2	Systemmodell	134
8.2.1	Einfluss des Sendefilters	135
8.2.2	Kanalschätzung	139
8.2.3	Fazit	140
8.3	Frequenzbereichsentzerrung bei komplexwertiger Modulation .	140
8.3.1	Optisch kohärente Systeme	140
8.3.2	Modulation mit Zwischenfrequenz für direkt detektierende Systeme	142
8.4	Zusammenfassung	150
9	Zusammenfassung	153
A	Leistungsäquivalenzen	157
B	Momente nichtlinear transformierter Gaußverteilungen	159
B.1	Momente einer Cosinus-transformierten Gaußverteilung	159
B.2	Momente einer Cosinus-Quadrat-transformierten Gaußverteilung	160
B.3	Momente einer geclippten Gaußverteilung	160
B.4	Momente einer geclippten, Cosinus-transformierten Gaußverteilung	163
B.5	Momente einer geclippten, Cosinus-Quadrat-transformierten Gaußverteilung	163
B.5.1	Bussgang-Gain	164
B.5.2	Momente erster und zweiter Ordnung	166
C	LDS der Interferenz	169

Verzeichnis der Formelzeichen und Abkürzungen	173
Mathematische Konventionen	173
Symbolverzeichnis	177
Abkürzungsverzeichnis	179
Index	188