Digitale Signalverarbeitung in kohärenten optischen Kommunikationssystemen mit mehrstufigen Modulationsformaten

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktorin der Ingenieurwissenschaften
(Dr.-Ing.)
der Technischen Fakultät
der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

vorgelegt von

Christina Hebebrand

Kiel 2012

1. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Werner Rosenkranz
2. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Berthold Lankl

Datum der mündlichen Prüfung: 01.06.2012

Dissertation eingereicht am: 27.02.2012

Kieler Berichte zur Nachrichtentechnik

Band 11

Christina Hebebrand

**Digitale Signalverarbeitung in kohärenten
optischen Kommunikationssystemen mit
mehrstufigen Modulationsformaten**

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.: Kiel, Univ., Diss., 2012

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 978-3-8440-1177-7

ISSN 1612-3425

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 während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Nachrichten- und Übertragungstechnik der Fakultät an der Christian-Abrechts-Universität zu Kiel entstanden.

Meinem besonderen Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing Rosenkranz für die Überlassung der interessanten Aufgabenstellung sowie für seine stete Diskussionsbereitschaft und sein Engagement bei der Betreuung. Ebenfalls danken möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Lankl für die Übernahme des Zweitgutachtens.

Meinen Kollegen und Kolleginnen während meiner Zeit am Lehrstuhl danke ich für die gute und produktive Zusammenarbeit, für die fruchtbaren Diskussionen und das angenehme Arbeitsklima. Mein besonderer Dank gilt dabei Jochen Leibrich, Stefan Schöllman, Annika Dochhan, Murat Serbay, Petra Usinger, Sandra Robien und Abdularmir Ali.

Ebenso danke ich meinen Freunden und meiner Familie für die Unterstützung während der Erstellung dieser Arbeit.

Zusammenfassung

Durch den rasant steigenden Bedarf an Übertragungskapazität, vor allem durch die wachsende Bedeutung des Internets, wird intensiv über eine Erhöhung der Kanaldatenrate in optischen Übertragungssystemen nachgedacht. In Zukunft soll die Kanaldatenrate der Ethernetkanäle von derzeit 10 Gbit/s auf 100 Gbit/s und mehr erhöht werden. Die Erhöhung der Kanaldatenrate hat zur Folge, dass bei der Übertragung limitierende lineare und nichtlineare Effekte berücksichtigt werden müssen.

Durch den Einfluss der limitierenden Effekte bei höheren Datenraten, ist es notwendig geworden, bandbreiteneffizientere Methoden bei der Übertragung über die optische Glasfaser einzusetzen. Ein Ansatz zur Reduzierung der Signalbandbreite ist der Einsatz von mehrstufigen Modulationsformaten, wodurch der Einfluss bestimmter Effekte verringert werden kann. Eine weitere Möglichkeit, eine zuverlässige und robuste Übertragung zu realisieren, ist die Verwendung eines kohärenten Empfängers. Mit Hilfe eines solchen Empfängers in Kombination mit digitaler Signalverarbeitung ist es möglich, die Signalverzerrungen des optischen Kanals im Elektrischen zu entzerren. Die Kombination aus mehrstufigen Modulationsformaten mit kohärentem Empfang hat den Vorteil, dass der Empfängeraufbau für alle Modulationsformate der Gleiche ist. Für die Demodulation der mehrstufigen Modulationsformate muss nur die digitale Signalverarbeitung an das jeweilige Format angepasst werden. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit kohärenter Empfang in Kombination mit mehrstufigen Modulationsformaten betrachtet. Das Hauptaugenmerk liegt auf der Untersuchung und Optimierung wesentlicher Komponenten der digitalen Signalverarbeitung des kohärenten Empfängers.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Limitierende Effekte eines optischen Übertragungssystems	3
2.1	Effekte auf der Glasfaser	3
2.1.1	Dämpfung	4
2.1.2	Chromatische Dispersion (CD)	5
2.1.3	Polarisationsmodendispersion (PMD)	5
2.1.3.1	PMD erster Ordnung	6
2.1.3.2	PMD höherer Ordnung	8
2.1.4	Selbstphasenmodulation (SPM)	9
2.2	Optischer Verstärker	10
2.2.1	Optisches Signal-zu-Rausch Verhältnis (OSNR)	11
2.3	Laserphasenrauschen	12
2.4	Nichtlineares Phasenrauschen	14
3	Das Übertragungssystem	17
3.1	Senderaufbau für mehrstufige Modulationsformate	17
3.2	Empfänger	19
3.2.1	Optische Empfängerkomponenten	20
3.2.1.1	Mach-Zehnder-Delay-Line-Interferometer (DLI)	20
3.2.1.2	90° Hybrid	22
3.2.2	Direkter Empfang	24

3.2.3	Direkter Empfang mit Multi-Symbol Phasenbestimmung (MSPE)	26
3.2.4	Kohärenter Empfang	33
3.2.4.1	Homodyner kohärenter Empfang	35
3.2.4.2	Heterodyner kohärenter Empfang	35
3.2.4.3	Intradynen kohärenter Empfang	37
3.2.4.4	Grundlagen des Phasenregelkreises (PLL)	38
3.2.5	Entscheidung, Dekodierung und Mapping	45
4	Trägerrückgewinnung	47
4.1	Viterbi- und Viterbi Trägerphasenschätzung	48
4.1.1	Einfluss des Tiefpassfilters	49
4.1.2	Unwrapping	55
4.2	Frequenzschätzung	56
5	Entzerrung	63
5.1	Inverses System (IS)	65
5.2	Entzerrung mit Hilfe des minimalen mittleren quadratischen Fehlers (MMSE)	68
5.2.1	MMSE mit Trainingssequenz	68
5.2.2	Constant Modulus Algorithmus (CMA)	70
5.3	Dispersionstoleranz von RZ-QPSK, RZ-8PSK und Star-RZ-QAM mit Entzerrung mittels IS und MMSE	72
5.3.1	Untersuchungen mit gleichem Bandbreitenbedarf	72
5.3.2	Untersuchungen bei gleicher Datenrate	75
6	Taktrückgewinnung	79
6.1	Abtastratenkonvertierung	80
6.2	Phasenregelkreis mit Gardner-Phasendetektor	83
6.2.1	Einfluss von PMD erster Ordnung	86
6.2.1.1	DGD-tolerante Phasendetektoren	87
6.2.2	Einfluss von chromatischer Dispersion	94

6.2.3	Adaptive Regelung der Kreisverstärkung	95
6.2.4	Kompensation der Verzögerung zwischen Inphasen- und Quadraturkomponente	98
6.3	Taktrückgewinnung „Digitales Filter und Quadrierer“	101
6.3.1	Einfluss des Trägerfrequenzoffsets, Laserphasenrauschen und ASE Rauschen	103
6.3.2	PMD erster Ordnung	104
6.3.3	PMD höherer Ordnung	107
6.3.4	Einfluss von chromatischer Dispersion	109
7	Zusammenfassung	113
A	Dispersionstoleranz von RZ-QPSK, RZ-8PSK und Star-RZ-QAM mit Entzerrung bei gleichem Bandbreitenbedarf	115
B	Verschiebung der S-Kurven innerhalb eines DGD-toleranten Pha- sendetektors	119
C	Einfluss von PMD erster Ordnung auf die Taktrückgewinnung „Digitales Filter und Quadrierer“ der „Struktur 4“	123
	Abkürzungsverzeichnis	127
	Formelverzeichnis	131
	Literaturverzeichnis	134