

Simon Ohlendorf

Experimental Demonstration of Flexible Modulation Formats for Optical Data Center Interconnects



Lehrstuhl für Nachrichten-
und Übertragungstechnik

Experimental Demonstration of Flexible Modulation Formats for Optical Data Center Interconnects

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

Simon Ohlendorf

Kiel 2021

- | | |
|-----------------------------|----------------------------------|
| 1. Gutachter: | Prof. Dr.-Ing. Werner Rosenkranz |
| 2. Gutachter: | Prof. Dr.-Ing. Stephan Pachnicke |
| 3. Gutachter: | Prof. Dr.-Ing. Norbert Hanik |
| Tag der mündlichen Prüfung: | 22. Oktober 2021 |

Kieler Berichte zur Nachrichtentechnik

Band 22

Simon Ohlendorf

**Experimental Demonstration of Flexible Modulation
Formats for Optical Data Center Interconnects**

Shaker Verlag
Düren 2021

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Zugl.: Kiel, Univ., Diss., 2021

Copyright Shaker Verlag 2021

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8342-2

ISSN 1612-3425

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Phone: 0049/2421/99011-0 • Telefax: 0049/2421/99011-9

Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

Vorwort

In der vorliegenden Arbeit sind die Ergebnisse meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Nachrichtenübertragungstechnik der Technischen Fakultät der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel enthalten. Nach meinem Masterabschluss konnte ich in dem Forschungsprojekt SENDATE-Secure-DCI arbeiten. Die Zeit war geprägt von vielen interessanten und lehrreichen Projekttreffen, sowie der Teilnahme an zahlreichen internationalen Konferenzen. Mein Dank gilt meinem Betreuer, Herrn Prof. Dr.-Ing. Rosenkranz, dass er mir die Stelle und die damit verbundene interessante Aufgabenstellung für meine Dissertation angeboten hat und meine Arbeit mit Ratschlägen und fruchtbaren Diskussionen begleitet hat. Genauso möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Stephan Pachnicke für die Unterstützung meiner Forschungsarbeit bedanken; für die Anmerkungen bei Veröffentlichungen und die Freiheit, alle Möglichkeiten des Labors auszuschöpfen. Außerdem möchte ich beiden und Herrn Prof. Dr.-Ing. Norbert Hanik für die Zeit, die sie in die Erstellung der Gutachten investiert haben, danken. Zusätzlich gilt ihnen, sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Klinkenbusch und Herrn Prof. Dr. Adelung mein Dank für die Bildung der freundlichen und fairen Prüfungskommission.

Den KollegInnen am Lehrstuhl gilt mein besonderer Dank: Dennis, Roi, Carlos, Mihail, Shi, Adrian, Jonas, Rebekka, Tom, Sandra und Petra: Ich möchte mich bei euch für die schöne gemeinsame Zeit bedanken – für gemeinsame (Labor-) Arbeit, gemeinsame spannende Dienstreisen, Kaffepausen, eure Zeit zum Diskutieren, Pizzaessen, Grillen, Korrekturlesen(!) und vor allem die durchweg nette Atmosphäre am Lehrstuhl. Ich bin froh, in euch so viele Freunde gefunden zu haben. Bei Jochen möchte ich mich dafür bedanken, dass ich auf deine Arbeit aufbauen konnte und du mir immer ohne zu Zögern deine Hilfe angeboten hast.

Für die nie langweiligen Projekttreffen und Reisen möchte ich Annika, Carsten, Felix und Rob danken.

Für die Unterstützung während des Studiums und die Ermutigung zu dieser Arbeit: Danke Mutti & Vati!

Vielen Dank für deine Geduld, Tini – und dass ich immer auf dich zählen kann!

Abstract

The focus of this work lies on the investigation of solutions for optical transport systems for data center interconnects. Besides a high data rate and the required reach, one focus of these systems is a high cost efficiency. In order to achieve this, two different system concepts will be presented in this thesis: on the one hand, single-sideband (SSB) transmission with direct detection (DD) and wavelength division multiplexing (WDM) and on the other hand the transmission with polarization multiplexing (PolMux) and coherent detection, which is well-established in optical long-haul systems.

An optimization of the trade-off between reach and capacity, which is present in all communications systems, can only be achieved to a limited extent with conventional modulation formats such as pulse amplitude modulation (PAM) or quadrature amplitude modulation (QAM) due to their limited resolution. To allow non-integer rational values of bits per symbol (BpS), different flexible modulation formats are investigated: the multicarrier technique discrete multi-tone (DMT), time-domain hybrid PAM (TDH-PAM) and multidimensional PAM (MM-PAM).

The fine-granular variation of the data rate at a constant symbol rate and also the variation of the symbol rate at a fixed data rate are investigated in several experiments. For the systems with DD and optical SSB-filtering, different algorithms for the digital signal processing (DSP) are employed. Especially the compensation of nonlinear mixing terms that are caused by DD, can significantly improve the transmission quality. The Kramers-Kronig (KK)-algorithm, which allows the reconstruction of the optical field under certain conditions, has shown to be a promising approach.

A concept for the implementation of multidimensional PAM in coherent systems with PolMux is derived and realized. In addition, an adaptive DSP-chain is designed, which allows the compensation of different disturbances. In several laboratory experiments with various symbol rates, the system concept is verified and furthermore the applicability of the chosen DSP-algorithms to the flexible modulation format is demonstrated.

Zusammenfassung

Der Fokus der vorliegenden Arbeit liegt in der Untersuchung von Lösungen für optische Übertragungssysteme für die Verbindung von Rechenzentren. Neben einer hohen Datenrate und der geforderten Reichweite liegt ein besonderer Fokus auf einer hohen Kosteneffizienz dieser Systeme. Um dies zu erreichen, sollen in dieser Arbeit zunächst zwei verschiedene Systemkonzepte vorgestellt werden: zum einen Einseitenband (ESB)-Übertragung mit Direktdetektion (DD) und Wellenlängenmultiplex (WDM) und zum anderen die in den Weitverkehrsnetzen etablierte Übertragung mit Polarisationsmultiplex (PolMux) und kohärenter Detektion.

Eine fein-granulare Optimierung des in allen nachrichtentechnischen Systemen vorhandenen Trade-Offs von Reichweite und Kapazität lässt sich mit konventionellen Modulationsformaten wie Pulsamplitudenmodulation (PAM) oder Quadraturamplitudenmodulation (QAM) nur bedingt erreichen. Um auch nichtganzzahlige rationale Werte von Bits pro Symbol (BpS) zu erlauben, werden verschiedene flexible Modulationsformate untersucht: das Mehrträgerverfahren Discrete Multi-tone (DMT), Zeitbereichshybrides PAM (TDH-PAM) und multidimensionales PAM (MM-PAM).

Die feingranulare Abstufung der Datenrate bei gleichbleibender Symbolrate und auch die Variation der Symbolrate bei konstanter Datenrate werden in mehreren Experimenten untersucht. Bei den Systemen mit Direktdetektion und optischer ESB-Filterung werden verschiedene Algorithmen für die digitale Signalverarbeitung (DSP) angewendet. Insbesondere die Kompensation von nichtlinearen Mischtermen, hervorgerufen durch die Direktdetektion, kann die Übertragungsqualität deutlich verbessern. Hierbei zeigt sich vor allem der Kramers-Kronig (KK)-Algorithmus, welcher die Rekonstruktion des optischen Feldes unter gewissen Voraussetzungen ermöglicht, als vielversprechender Ansatz.

Für die multidimensionale Modulation wird ein möglicher Ansatz zur Implementierung in kohärenten Systemen mit PolMux gezeigt. Zudem wird eine DSP-Kette entworfen, welche eine adaptive Kompensation verschiedener Störungen ermöglicht. In mehreren Laborexperimenten mit verschiedenen Symbolraten wird das Systemkonzept verifiziert und zudem die Anwendbarkeit der gewählten DSP-Algorithmen auf das flexible Modulationsformat nachgewiesen.

Contents

1	Introduction	1
1.1	Structure	2
2	Flexible Modulation Techniques	5
2.1	Error Rates for Conventional Modulation Formats	7
2.2	Techniques with Flexible Coding	15
2.2.1	Rate-Adaptive FEC	16
2.2.2	Coded Modulation	19
2.2.3	Constellation Shaping	20
2.3	Discrete Multi-tone	23
2.3.1	Principle of OFDM	24
2.3.2	Flexible Data Rates in DMT with Bit- and Powerloading	28
2.4	Time-Domain Hybrid Modulation	32
2.5	Multidimensional Modulation	37
2.5.1	Bit Mappings using Pseudo-Gray Coding	40
2.5.2	Implementation in Coherent Systems	45
3	Optical Data Center Interconnects	49
3.1	Transmitter Side	52
3.1.1	Electrical and RF-Components	53
3.1.2	E/O Conversion	53
3.2	Transmission Channel	57
3.2.1	Amplification – Optical Noise	57
3.2.2	Optical Filters	60
3.2.3	Fiber	63
3.3	Receiver Side	68
3.3.1	Direct Detection	68
3.3.2	Coherent Detection	74
4	Digital Signal Processing for Systems with Direct Detection	77
4.1	DSP for DMT	78
4.1.1	Transmitter Side	78
4.1.2	Receiver Side	80

Contents

4.2	DSP for Single-Carrier Systems with Direct Detection	81
4.2.1	Transmitter Side	81
4.2.2	Receiver Side	82
4.3	Kramers-Kronig Algorithm	88
4.3.1	Reconstruction of the Signal Phase	89
4.3.2	Requirements and Remarks on the KK Algorithm	90
4.3.3	Modified Kramers-Kronig Algorithm	98
5	DSP for Systems with Coherent Detection	103
5.1	Transmitter Side	105
5.2	Receiver Side	106
5.2.1	Correction of IQ-Distortions of the Receiver	106
5.2.2	Blind Compensation of Chromatic Dispersion	107
5.2.3	Frame Synchronization	109
5.2.4	De-rotation of the State of Polarization	111
5.2.5	Compensation of Carrier Frequency Offset	112
5.2.6	2x2 MIMO Equalization	113
5.2.7	Phase Noise Compensation	114
5.2.8	4x4 MIMO Equalization	116
6	Experimental Results	121
6.1	Flexible Data Rates in Systems with Direct Detection	121
6.1.1	Measurements with DMT	122
6.1.2	Single Channel Measurements with Single-Carrier Formats . . .	124
6.1.3	DWDM Experiments with Kramers-Kronig DSP	131
6.2	Bandwidth-Variable Transmission with Direct Detection	135
6.2.1	Bandwidth-Variable Transmission with Adaptive Sampling Rate at the Receiver	138
6.3	Experiments with Coherent Detection	140
6.3.1	Coherent MM-PAM with 42 GBd Symbol Rate	142
6.3.2	Coherent MM-PAM with 56 GBd and 60 GBd Symbol Rate . .	145
7	Conclusions and Outlook	151
A	Implementation SNR	155

B	Multidimensional PAM	157
B.1	Comparison of Decoding Techniques for Multidimensional PAM	157
B.2	Mappings for 1.5 Bits per Symbol	158
C	Comparison of SSB PAM and Nyquist Subcarrier Modulation	161
	List of Abbreviations	165
	List of Symbols	171
	Bibliography	177
	Veröffentlichungen des Autors	198
	Liste der Veröffentlichungen der Lehrstuhl-Reihe	201