

Experimental Investigations of Digital Signal Processing in Optical Access Networks

Dissertation

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

Johannes von Hoyningen-Huene

Kiel 2015

1. Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Werner Rosenkranz

2. Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Christian G. Schäffer

Tag der mündlichen Prüfung:

25. September 2015

Kieler Berichte zur Nachrichtentechnik

Band 14

Johannes von Hoyningen-Huene

**Experimental Investigations of Digital Signal
Processing in Optical Access Networks**

Shaker Verlag
Aachen 2015

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., 2015

Copyright Shaker Verlag 2015

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 978-3-8440-4015-9

ISSN 1612-3425

Shaker Verlag GmbH • P.O. BOX 101818 • D-52018 Aachen

Phone: 0049/2407/9596-0 • Telefax: 0049/2407/9596-9

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

Vorwort

Diese Arbeit stellt die Zusammenfassung meiner Forschungstätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Nachrichten- und Übertragungstechnik der Technischen Fakultät der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel dar.

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr.-Ing. Werner Rosenkranz für die Betreuung dieser Arbeit, seine Unterstützung und sein Vertrauen sowie für die Möglichkeit als Ingenieur forschen zu können. Ich danke Herrn Prof. Dr.-Ing. Christian Schäffer für die Übernahme des Zweitgutachtens und die investierte Zeit in diesem Zusammenhang, sowie Frau Prof. Dr. Martina Gerken und Herrn Prof. Dr. Kohlstedt für die Bildung einer sehr freundlichen und fairen Prüfungskommission.

Ein großer Dank gilt weiterhin meinen Kollegen am Lehrstuhl für Nachrichten- und Übertragungstechnik. Insbesondere meinem langjährigen Bürokollegen Christian Ruprecht bin ich dankbar. Viele Erkenntnisse sind durch Diskussionen am Whiteboard in unserem Büro entstanden und haben zu gemeinsamen Forschungsergebnissen geführt. Wir waren ein sehr gutes Team.

Des Weiteren bedanke ich mich bei meinem guten Freund seit frühen Kindheitstagen und geschätzten Kollegen Dennis Clausen für alle fachlichen Gespräche und natürlich für seine Freundschaft. Meinem Kollegen und Betreuer meiner Diplomarbeit Jochen Leibrich verdanke ich sehr viel signaltechnisches Wissen und wissenschaftliche Arbeitsmethoden. Dank gilt auch meinen weiteren Kollegen Roi Rath, Semjon Schäfer, Annika Dochhan, Abdulmir Ali und Christina Hebebrand. Für alle technische und organisatorische Unterstützung gilt mein großer Dank Sandra Robin und Petra Usinger.

Der Großteil meiner Forschungstätigkeit am Lehrstuhl fand im Rahmen des Projektes ADVAntagePON statt. Bei Dr. Michael Eiselt und Dr. Helmut Grieser möchte ich mich hierbei für die stets konstruktive Zusammenarbeit bedanken.

Zuletzt möchte ich mich bei meiner Familie für all ihre Unterstützung während meines Studiums und der Promotion bedanken. Schließlich danke ich meiner Frau Wiebke für ihr kritisches Korrekturlesen, für ihre Geduld und Liebe.

Abstract

The demand for data transmission capacity is steadily increasing over the last years and all elements of the communication network are affected by this development. In addition to the long-haul and metro networks, also the access networks are being realized with optical transmission technologies. In access, the cost-efficiency is the dominating criterion. In current access networks, this is considered by using very simple optical components and without the use of advanced digital signal processing (DSP).

To further increase the data rate and the reach of these optical access networks different forms of digital signal processing could be applied in future. Two potential DSP methods for optical access networks are investigated in this work.

In the first part, transmitter-side and receiver-side signal processing in transmission systems with cost-efficient optical components are investigated. In transmission experiments, the predistortion of the laser at the transmitter and the post-compensation of the received signal at the receiver are evaluated and compared.

In the second part of this work, the concept of orthogonal frequency division multiple access (OFDMA) is discussed as potential multiple access scheme for optical access networks. This is an alternative to time division multiple access and provides great flexibility of sharing the channel capacity in frequency and in time domain among multiple subscribers. The properties and challenges of OFDMA in optical access networks are investigated experimentally in downstream direction (from the central office to the subscribers) and in upstream direction (from the subscribers to the central office).

Zusammenfassung

Durch den steigenden Bedarf an Übertragungskapazität werden alle Bereiche des modernen Kommunikationsnetzes beeinflusst. Neben dem Weitverkehrsnetzen und den Metronetzen werden auch die Zugangsnetze vermehrt mit optischer Übertragungstechnik realisiert. Im Zugangsbereich ist die Kosteneffizienz ein wichtiger Faktor. In aktuellen Netzen zeigt sich dies durch den Einsatz von einfachen optischen Komponenten und den weitgehenden Verzicht auf digitale Signalverarbeitung.

Zur weiteren Steigerung der Datenrate und der Reichweite dieser optischen Zugangsnetze, bieten sich in Zukunft allerdings diverse Formen der digitalen Signalverarbeitung an. Die Untersuchung von möglichen Verfahren zur digitalen Signalverarbeitung im Zugangsbereich gliedert sich in dieser Arbeit in zwei Hauptteile.

Im ersten Teil wird der Einsatz von senderseitiger bzw. empfängerseitiger Signalverarbeitung in optischen Übertragungssystemen mit kostengünstigen optischen Komponenten untersucht. Hierbei wird experimentell untersucht, wie sich durch Vorverzerrung des Laserstrom am Sender bzw. Entzerrung des empfangenen Signals die Datenrate und Reichweite steigern lässt.

Im zweiten Teil wurde das Konzept von orthogonalem Frequenzbereichsmultiplex als Mehrfachzugriffsverfahren (OFDMA) in optischen Zugangsnetzen untersucht. Diese Alternative zum Zeitbereichsmultiplex hat besonders Vorteile durch die flexible Aufteilung der Kanalkapazität in Frequenz und Zeit. Die Eigenschaften und Anforderungen von OFDMA im Zugangsbereich werden experimentell sowohl in Abwärtsrichtung, also von der Vermittlungsstelle zum Teilnehmer, als auch in Aufwärtsrichtung, von den Teilnehmern zur Vermittlungsstelle, untersucht.

Contents

1	Introduction	1
2	Optical Components in Access Networks	3
2.1	Optical Modulation	4
2.1.1	Semiconductor Laser	5
2.1.2	Directly Modulated Laser (DML)	7
2.1.3	External Modulation	8
2.2	Optical Transmission Channel	10
2.2.1	Optical Single-Mode Fiber (SMF)	10
2.2.2	Optical Amplifiers	14
2.3	Optical Demodulation	16
2.3.1	Direct Detection (DD)	16
2.3.2	Coherent Detection	17
3	Passive Optical Networks: Signal Processing and Transmission Schemes	21
3.1	Optical Access Networks: Past and Presence	23
3.2	Future Optical Access Networks	24
3.2.1	Multiple Access Schemes	24
3.2.2	Optical Components	28
3.2.3	Digital Signal Processing	28
4	Pre-Compensation of DML-DD-Impairments at Transmitter	31
4.1	Predistortion with Filter	32
4.2	Predistortion with Look-Up-Table (LUT)	34
4.3	Optimization of LUT-Coefficients	36
4.3.1	Estimation of the Signal Quality	37
4.3.2	Gradient Method	38

4.3.3	Exhaustive Search	38
4.3.4	Other Optimization Concepts	39
4.4	Experimental Evaluation of Predistortion	39
4.4.1	Experimental Setup	40
4.4.2	Results of 10 Gb/s OOK Transmission	41
4.4.3	Results of 5 GBaud 4-ASK Transmission	44
4.5	Summary	45
5	Equalization of DML-DD-Impairments at Receiver	47
5.1	Comments on the Experimental Setup	49
5.2	Feed-Forward Equalizer (FFE)	50
5.2.1	Concepts	51
5.2.2	Estimation of Coefficients with Training Sequence	56
5.2.3	Experimental Results with FFE	59
5.3	Decision Feedback Equalizer (DFE)	65
5.3.1	Estimation of Coefficients with Training Sequence	67
5.3.2	Adaptation of Coefficients	69
5.3.3	Experimental Results with FFE-DFE	71
5.4	Nonlinear Volterra Equalization (NLVE)	76
5.4.1	Estimation and Adaptation of Coefficients	77
5.4.2	Experimental Results with NLVE	78
5.5	Maximum-Likelihood Sequence Estimation (MLSE)	82
5.5.1	Concept of Viterbi Algorithm	85
5.5.2	Estimation of MLSE-Coefficients	92
5.5.3	Experimental Results with MLSE	93
5.6	Combination of FFE, DFE and MLSE	96
5.6.1	Estimation of Coefficients	97
5.6.2	Experimental Results	98
5.7	Comparison of Equalizers Concepts and Summary	99
6	Orthogonal Frequency Division Multiplexing for PON	101
6.1	General Concept of OFDM	102
6.1.1	Orthogonality at the Transmitter	103
6.1.2	Orthogonality at the Receiver	105

6.2	Implementation of Digital OFDM Systems	106
6.2.1	Zero-Padding of IFFT Input Vector	109
6.2.2	Cyclic Prefix	111
6.2.3	Generation of Real-Valued OFDM Signals	112
6.2.4	PAPR of OFDM Signals	119
6.3	Further Elements of the OFDM DSP	121
6.3.1	OFDM Frame Structure	122
6.3.2	Higher-Order Modulation Formats	123
6.3.3	Synchronization	126
6.3.4	Linear Channel Equalization	129
6.3.5	Phase Noise Compensation	133
6.4	Optical OFDM Transmission Systems	137
6.4.1	Direct Detection	138
6.4.2	Coherent Detection	139
6.5	Aspects of OFDMA	140
6.5.1	Downstream	141
6.5.2	Upstream	141
6.6	Optical OFDMA Downstream Experiments	143
6.6.1	Experimental Setup	143
6.6.2	Partial Signal Reception with Reduced Rate DSP	146
6.7	Optical OFDMA Upstream Experiments	147
6.7.1	Experimental Setup	148
6.7.2	OFDMA DSP Structures	149
6.7.3	Crosstalk between the Upstream Signals	152
6.7.4	Phase Noise Compensation	153
6.7.5	Influence of Stimulated Brillouin Scattering	155
6.7.6	Remarks on OFDMA Upstream Experiment	156
6.8	Summary	157
7	Conclusion and Outlook	159
A	Ideal Timing Synchronization and Clock Offset Correction	161
B	MMSE-Approach for Non-Integer Fractionally-Spaced Equalizer	165
B.1	FFE	165

B.2	FFE-DFE	167
C	Deterministic Phase Shift with Partial OFDMA Demodulation	169
C.1	Effect on Synchronization	170
C.2	Effect on Symbol Decision	170
D	Lists	171
D.1	Symbols	171
D.2	Abbreviations	177
	Bibliography	181
	List of LNT Publications	195