

Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
Lehrstuhl für Nachrichten- und Übertragungstechnik

Dissertation

Investigation of Coherent Optical OFDM Systems and Algorithms for Long-haul Transmission

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

der Technischen Fakultät

der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

Susmita Adhikari

Kiel, May 2015

1. Gutachter

Prof. Dr.-Ing. Werner Rosenkranz

2. Gutachter

Dr.-Ing. H. (Hugo) de Waardt

Datum der mündlichen Prüfung

30. Oktober 2015

Kieler Berichte zur Nachrichtentechnik

Band 15

Susmita Adhikari

**Investigation of Coherent Optical OFDM Systems
and Algorithms for Long-haul Transmission**

Shaker Verlag
Aachen 2016

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 2016

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 978-3-8440-4401-0

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

In loving memory of my father who believed in me
more than I believed in myself.

Abstract

The steady growth in data traffic demand in optical fiber networks has propelled researches in various fields from optical and electrical components to modulation formats and digital signal processing. The motivation is always to find the right combination of these technologies to make an optical transmission system more robust and future proof. Orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) is an advanced modulation format which was first proposed for fiber optic communication in 1996. Since then OFDM has been investigated for a wide spectrum of applications from access to metro and long-haul fiber communication. For all the cases, the tolerance of OFDM systems towards transmission impairments both linear and nonlinear and the remedy to these impairments together with other OFDM related issues are of major concern. Phase noise and sampling frequency offset (SFO) are considered a challenge for OFDM transmission systems. In this thesis, together with the introduction to these topics, several mitigation algorithms are investigated. The common phase error estimation and RF-pilot based phase noise compensation are studied in detail to understand their performance for multiple cases such as different FFT size and QAM constellations. A different pilot bands based structure is also introduced for the compensation of SFO. In addition to these techniques, alternatives such as self-coherent optical (SCO) OFDM and injection-locked laser based (ILL) OFDM, are also scrutinized. In SCO-OFDM the pilot or the optical carrier is extracted in the optical domain using two consecutive Fabry Perot filters and used as a local oscillator. Subsequently, no phase noise compensation is required in the DSP. The use of an ILL to retrieve the frequency and phase information from the extracted pilot without the use of an amplifier is also studied and compared. OFDM has been very well known to have a high peak-to-average- power ratio compared to its other advanced modulation format siblings. High PAPR stimulates higher fiber nonlinearity penalty, thus limiting the maximum transmission reach. In this thesis, both PAPR reduction and nonlinear mitigation techniques are investigated for legacy systems and green field deployments. The use of RF-pilot based phase noise compensation is analyzed for the compensation of self-phase modulation (SPM) and cross-phase modulation (XPM). It is seen that this method efficiently compensates for XPM though is less effective for SPM compensation. Backpropagation is a good technique for SPM compensation. In this thesis, these two individual methods are compared to a joint compensation utilizing both RF-pilot approach and backpropagation. Additionally, discrete Fourier transform spread (DFTS-) OFDM and spectral shaping of DFT-precoded OFDM are explored as possible ways to reduce PAPR and to improve the nonlinear tolerance of the OFDM system.

Zusammenfassung

Die ständige Zunahme des Datenverkehrs hat die Forschung in der optischen Nachrichtentechnik im Bereich optische Bauteile, Modulation-Formate und digitalen Signal Verarbeitung (DSP) angetrieben. Die Motivation dahinter ist es, die richtige Kombination dieser Technologien zu finden um robuste Übertragungssysteme zu erstellen. ‚Orthogonal frequency division multiplexing‘ (OFDM) ist ein Modulationsformat, das erst 1996 für die optische Nachrichtentechnik vorgeschlagen wurde. Seitdem wird OFDM für die Anwendung in Metro, Access und Long-haul optischer Netzwerke erforscht. Für alle Fälle ist die Kompensation der linearen und nicht-linearen Effekte ein wichtiger Punkt. Das Phasenrauschen und der Abtastratenversatz (auf Englisch: SFO) werden als eine Herausforderung betrachtet. In dieser Dissertation, zusammen mit der Einführung der Themen, werden verschiedene Kompensationsalgorithmen erforscht.

Die Schätzung des ‚common phase error‘ und die Unterdrückung des Phasenrauschens werden im Detail für verschiedene Link-Bedingungen erforscht. In dieser Arbeit wird eine weitere Kompensationsmethode für SFO beschrieben, wobei mehrere Pilotöne angewendet werden. Darüber hinaus werden zusätzlich zu diesen Methoden weitere Alternativen wie selbst kohärente optische (SCO-) OFDM und injektion-locked laser (ILL-) OFDM ebenfalls überprüft. Bei SCO-OFDM wird der Pilotton oder der optische Träger im optischen Bereich mit Hilfe von zwei kaskadierten Fabry Perot -Filter extrahiert und als ein lokaler Oszillator verwendet. Anschließend wird keine Phasenrauschenkompensation in dem DSP angewendet. Die Verwendung eines ILL, um die Frequenz und Phaseninformationen aus dem Pilotton ohne die Verwendung eines Verstärkers ist auch hier erforscht und verglichen.

OFDM ist bekannt dafür, dass es im Vergleich zu anderen Modulationsformaten einen hohen ‚peak-to-average-power ratio‘ hat. Ein hohes PAPR verursacht eine Verschlechterung der Übertragungsperformance und auf diese Weise wird die maximale Übertragsreichweite eingeschränkt. In dieser Dissertation werden sowohl PAPR Reduktion als auch nicht-lineare Kompensationstechniken für Legacy- und neue Systeme untersucht. Die Verwendung von RF basierter Phasenrauschenkompensation wird zur Kompensation der self-phase modulation (SPM) und cross-phase modulation (XPM) analysiert. Es wurde betrachtet, dass dieses Verfahren effizienter für die Kompensation der XPM ist als die Kompensation der SPM sind. Backpropagation ist eine gute Technik für die Unterdrückung der SPM. In dieser Dissertation werden diese zwei Methoden kombiniert und ihre Performance miteinander verglichen. Außerdem werden die discrete Fourier transform spread (DFTS-) OFDM und DFT-precoded OFDM spectral shaping für die Reduktion des PAPR und die Steigerung der Toleranz gegen nicht-lineare Effekte erforscht.

Table of Contents

Abstract i

Zusammenfassung ii

Table of Contents iii

1. Introduction 1

 1.1 Motivation and Focus of the Thesis 2

 1.2 Outline of the Thesis 3

2. Fiber Optic Transmission Channel 5

 2.1 Linear Impairments 7

 2.1.1 Fiber Loss 7

 2.1.2 Fiber Dispersion 9

 2.1.3 Polarization Mode Dispersion 12

 2.2 Nonlinear Impairments 14

 2.2.1 Kerr Effect 15

 2.2.1.1 Self-Phase Modulation 16

 2.2.1.2 Cross-Phase Modulation 17

 2.2.1.3 Four-Wave Mixing 19

 2.2.2 Stimulated Inelastic Scattering 20

 2.2.2.1 Stimulated Raman Scattering 20

 2.2.2.2 Stimulated Brillouin Scattering 21

3. Orthogonal Frequency Division Multiplexing 23

 3.1 OFDM Flashback 24

 3.2 OFDM System Description 24

 3.3 OFDM Signal Processing 31

 3.3.1 Synchronization 31

3.3.2	Channel Estimation and Equalization.....	33
3.4	OFDM Advantages and Challenges.....	35
3.4.1	Peak-to-Average Power Ratio (PAPR).....	36
3.5	MIMO processing for Polarization Division Multiplexed Receiver.....	38
4.	Fiber Optic Transmission Systems	43
4.1	Optical Modulation.....	44
4.2	Coherent Detection.....	47
4.3	System Impairments.....	50
4.3.1	Sampling Frequency Offset (SFO).....	51
4.3.2	Frequency Offset (FO).....	54
4.3.3	Phase Noise (PN).....	55
5.	Signal Processing for Coherent Optical OFDM	59
5.1	Phase Noise Compensation.....	59
5.1.1	Common Phase Error (CPE) Based Phase Noise Compensation	60
5.1.2	RF-pilot (RFP) Based Phase Noise Compensation	63
5.1.2.1	Implementation of the RFP-based Compensation.....	64
5.1.2.2	Optimization of Carrier-to-Signal Power Ratio (CSR)	66
5.1.2.3	Optimization of the Filter Bandwidth	67
5.1.3	Simulation Results.....	68
5.1.3.1	Tolerance to Laser Linewidth	70
5.1.3.2	Implication of Changing the FFT Size.....	72
5.1.3.3	Implication of Changing the Modulation Order.....	74
5.2	Enhanced RFP-based SFO Compensation	74
5.2.1	Sampling Frequency Offset Estimation.....	76
5.2.2	Implementation of Enhanced RFP-based Sampling Frequency Offset Compensation ..	78
5.2.3	Simulation Results.....	81
5.2.3.1	SFO Tolerance Comparison with 4 QAM and 8 QAM.....	82
5.2.3.2	Phase Noise Tolerance with SFO Compensation.....	83

5.2.3.3	Probability Density Function of Estimated SFO Values.....	84
6.	Alternatives to Coherent OFDM.....	85
6.1	Self-Coherent OFDM.....	86
6.1.1	Implementation of Self-Coherent Detection.....	87
6.1.2	Experimental Setup for PPF Based SCO-OFDM System	88
6.1.2.1	Frequency Alignment.....	90
6.1.2.2	Pilot to Signal Extinction	91
6.1.2.3	Phase Mismatch	91
6.1.2.4	Polarization Sensitivity	92
6.1.3	Experimental Results.....	92
6.1.3.1	Back-to-Back Performance	93
6.1.3.2	Transmission Performance.....	95
6.1.4	Concept for Polarization Diverse SCO-OFDM.....	96
6.2	ILL Based Self-Coherent OFDM.....	97
6.2.1	Concept of Injection Locking	98
6.2.2	Experimental Setup for ILL-OFDM System	99
6.2.3	Experimental Results.....	100
6.2.3.1	Back-to-Back Performance.....	100
6.2.3.2	Filter Optimization.....	103
6.2.3.3	Laser Linewidth Tolerance	104
6.2.3.4	Transmission Performance.....	106
7.	Nonlinearity Mitigation.....	109
7.1	XPM Influence from Neighboring OFDM Channels on DPSK.....	110
7.1.1	Simulation Results: Dependence of XPM Penalty on Neighboring OFDM Signal Bandwidth	113
7.1.2	Simulation Results: Reduction of XPM Penalty with Delta Powers	115
7.2	Experimental Analysis: Dependence of Nonlinear Tolerance on FFT Size.....	117
7.3	Mitigation Technique: RFP Together with Backpropagation	120

Table of Contents

7.3.1	Simulation Analysis for Nonlinear Tolerance	121
7.3.1.1	Optimization for RFP parameters	122
7.3.1.2	Performance Comparison.....	124
7.3.2	Experimental Analysis for Nonlinear Tolerance	125
7.4	Mitigation Technique: Spectrally Shaped DFTS-OFDM	128
7.4.1	DFT Spread OFDM	129
7.4.2	Spectrally-Shaped OFDM	130
7.4.3	Simulation Setup.....	131
7.4.4	Simulation Results.....	133
7.4.4.1	Performance for Varying Launch Power	133
7.4.4.2	Optimization of Number of Bands	134
7.4.4.3	Optimization of Excess Bandwidth Parameter.....	136
7.4.4.4	Performance Comparison for Different Fibers.....	137
7.4.4.5	Complexity Analysis.....	138
8.	Conclusions	141
	Outlook.....	144
	List of Abbreviations	147
	Appendix	151
A.1	Optical Signal-to-Noise Ratio	151
A.2	Bit Error Rate	153
A.3	SNR per Bit.....	154
	Bibliography.....	155
	Curriculum Vitae	166
	List of Publications.....	167