

**Modeling and Simulation of Limiting
Impairments on Next Generation's Transparent
Optical WDM Transmission Systems with
Advanced Modulation Formats**

Dissertation

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

Jochen Leibrich

Kiel
2006

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Werner Rosenkranz

2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Norbert Hanik

3. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Herbert Haunstein

Datum der mündlichen Prüfung: 19. Januar 2007

Kieler Berichte zur Nachrichtentechnik

Band 8

Jochen Leibrich

**Modeling and Simulation of Limiting Impairments
on Next Generation's Transparent Optical WDM
Transmission Systems with
Advanced Modulation Formats**

Shaker Verlag
Aachen 2007

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., 2007

Copyright Shaker Verlag 2007

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 978-3-8322-6001-9

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 ist das Ergebnis meiner Forschungstätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter bzw. Gastwissenschaftler am Lehrstuhl für Nachrichten- und Übertragungstechnik der Technischen Fakultät der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.

Ich bedanke mich sehr herzlich bei Prof. Dr.-Ing. Werner Rosenkranz für die Möglichkeit, mit dieser Aufgabenstellung meine Freude an wissenschaftlicher Forschung mit der Tätigkeit eines Ingenieurs verbinden zu können. Weiterhin waren seine beständige Unterstützung und Loyalität essentiell für die Fertigstellung dieser Arbeit. Prof. Dr.-Ing. Norbert Hanik und Prof. Dr.-Ing. Herbert Haunstein gilt mein Dank für die investierte Zeit im Rahmen der Korreferate.

Allen ehemaligen und aktuellen Kollegen am Lehrstuhl für Nachrichten- und Übertragungstechnik sowie allen Studenten, von denen ich durch Betreuung ihrer Arbeit lernen konnte, bin ich gleichermaßen dankbar für die tolle Zusammenarbeit. Dennoch möchte ich das langjährige Büroteam mit meinen Freunden Christoph Wree und Marc Bohn hervorheben. Petra Weidgen erhält ein großes Dankeschön für die sprachliche Korrektur des Manuskripts.

Stellvertretend für meine schulische Ausbildung ist mir an dieser Stelle wichtig, meinem langjährigen Mathematiklehrer Horst Müller zu danken. Die algebraischen Grundlagen, die ich bei ihm gelernt habe, waren für diese Arbeit unverzichtbar. Ebenso wichtig war die Begeisterung für signal- und systemtheoretische Problemstellungen, die während meines Studiums an der TU Darmstadt von Prof. Dr.-Ing. Eberhard Häsler geweckt wurde.

Mein persönlicher Dank gilt meinen Eltern Dagmar und Dieter Leibrich für ihre großartige Hilfe bei der Bewältigung vieler Hürden auf dem Weg zur Fertigstellung. Schließlich danke ich meiner Freundin Mireille für ihre Ausdauer, mehr als ein halbes Jahrzehnt unsere Entfernungszziehung aufrechtzuerhalten, und für ihre Geduld gerade in den letzten Wochen vor der Disputation.

Kiel, Januar 2007

Jochen Leibrich

Abstract

Next generation's fiber optic transmission systems show significant differences towards those systems currently existing, mainly in terms of higher optical transparent length. This trend, which is driven by economical reasons, pushes next generation's systems closer towards physical limits.

Consequently, fundamental knowledge of limiting impairments from the point of view of systems theory is essential. This is the main approach of this thesis:

Based on broad investigation into possible limiting impairments, taking into account system parameters of practical relevance two main impairments are identified. These are cross-phase modulation and ASE-noise. They are investigated in detail using analytical as well as simulative approaches. Thereby, the main focus is set on mitigating the impact of the impairments by implementation of advanced modulation formats.

The thesis is completed by a discussion of important techniques required for numerical simulation of optical transmission systems as well as a description of the simulation environment MOVE-IT, which was developed in the framework of this thesis.

Zusammenfassung

Faseroptische Übertragungssysteme zukünftiger Generationen unterscheiden sich von den gegenwärtigen Systemen durch eine erheblich vergrößerte optisch transparente Länge. Dieser vor allem durch Kostenaspekte motivierte Trend führt dazu, dass diese Systeme sehr viel näher an physikalischen Grenzen arbeiten müssen.

Um optische Übertragungssysteme in der Nähe physikalischer Grenzen betreiben zu können, ist eine gute Kenntnis der systemtheoretischen Eigenschaften störender Einflussgrößen erforderlich. Hier liegt der Ansatz der vorliegenden Arbeit:

Ausgehend von einer breit angelegten Untersuchung möglicher Störeinflüsse werden, unter Berücksichtigung gängiger Systemparameter zukünftiger Systeme, zwei Effekte als Hauptstörgrößen identifiziert. Diese sind Kreuzphasenmodulation und ASE-Rauschen, die nachfolgend detailliert untersucht werden.

Zum Einsatz kommen sowohl systemtheoretische als auch simulative Untersuchungsmethoden, wobei das Hauptaugenmerk auf die Verringerung des Einflusses der beiden Störgrößen durch alternative Modulationsformate gerichtet ist.

Ergänzt wird die Arbeit durch eine Diskussion zentraler Techniken zur Simulation optischer Übertragungssysteme sowie eine Beschreibung der während dieser Arbeit entwickelten Simulationsumgebung MOVE-IT.

Contents

1	Introduction	1
1.1	Background	1
1.2	Motivation and Focus of this Thesis	2
1.3	Overview	3
2	Transmission Impairments in WDM Systems	5
2.1	Introduction into Optical Transmission Systems	5
2.1.1	Overview	5
2.1.2	System Modeling	7
2.2	Classification of Transmission Impairments	10
2.3	Linear Effects	10
2.3.1	Loss	11
2.3.2	Group Velocity Dispersion	12
2.3.3	Polarization Mode Dispersion	16
2.3.4	Linear Crosstalk	17
2.4	Nonlinear Effects	18
2.4.1	Kerr Effect	19
2.4.2	Stimulated Raman Scattering	27
2.5	Noise	31
2.6	Summary and Motivation	32

CONTENTS

3 Optical Transmission Systems and their Limitations	33
3.1 Overview	33
3.2 Transmitter/Receiver Concepts	33
3.2.1 Basics for Optical Modulation	34
3.2.2 Amplitude-Shift Keying Modulation	35
3.2.3 Phase-Shift Keying Modulation	37
3.3 Link Setup	41
3.3.1 The Optical Link as a Cascade of Fiber Spans	41
3.3.2 Classification of Fiber Types	42
3.4 System Optimization	42
3.4.1 Dispersion Management	43
3.4.2 Power Management	44
3.5 Limitations for System Performance	45
3.5.1 Survey	45
3.5.2 Identification of Dominating Nonlinear Impairments	46
3.6 Summary	50
4 Cross-Phase Modulation	51
4.1 Overview	51
4.2 Basics	52
4.3 PM-Model	53
4.3.1 Derivation	53
4.3.2 Properties, Applications, and Range of Validity	54
4.4 Simplified PM/IM Conversion Model	58
4.4.1 Derivation	58
4.4.2 Properties, Applications, and Range of Validity	60
4.5 Advanced PM/IM Conversion Model	62
4.5.1 Derivation	62
4.5.2 Properties, Applications, and Range of Validity	65
4.6 Full PM/IM Conversion Model	74

4.6.1	Derivation	74
4.6.2	Properties, Applications, and Perspective	78
4.7	Summary	84
5	Noise	85
5.1	Overview	85
5.2	ASE-Noise	86
5.2.1	Setup of Optically Preamplified Receivers	86
5.2.2	Noise Figure of Erbium-Doped Optical Amplifiers	86
5.2.3	ASE-Noise in the Electrical Domain	89
5.2.4	Analytical Estimation of the BER	101
5.2.5	Receiver Sensitivity of ASK-Transmission	105
5.2.6	Receiver Sensitivity of DPSK-Transmission	112
5.3	Shot Noise and Thermal Noise	119
5.3.1	Shot Noise	119
5.3.2	Thermal Noise	121
5.4	Summary	122
6	Simulation Techniques	123
6.1	Background and Overview	123
6.2	Implementation of Linear Systems	123
6.2.1	Linear versus Cyclic Convolution	124
6.2.2	Cyclic Convolution	125
6.2.3	Linear Convolution	126
6.2.4	Modeling Dispersive Fiber as a Digital Filter	131
6.3	The Split-Step Method	137
6.3.1	Basic Idea	137
6.3.2	Convergence Properties of the SSM: Basics	139
6.3.3	Simulating WDM Systems	141

CONTENTS

6.4	Monte Carlo Simulations	148
6.4.1	Overview	148
6.4.2	PDF of Monte Carlo Estimator	148
6.4.3	Approximation of Estimator Accuracy	150
6.5	Simulation Tool MOVE-IT	152
6.5.1	Overview	152
6.5.2	Graphical User Interface	153
6.5.3	Optimized MC-Simulation	155
7	Conclusion	157
7.1	Specific Contributions of this Thesis	157
7.2	Further Development of Main Ideas	158
A	Comparison of TFA and SCA	161
A.1	Linear Fiber	161
A.2	Nonlinear Fiber	165
B	Small-Signal Analysis for Dispersive Fiber	169
B.1	First-Order Analysis	169
B.2	Second-Order Analysis	171
B.3	Normalization Aspects Due to Fiber Loss	173
C	The Full XPM Model: Computation	175
D	IIR-Approach for Dispersive Fiber	179
D.1	First Approach	180
D.2	Second Approach	181

CONTENTS

E Lists	183
E.1 Physical Constants	183
E.2 Symbols	183
E.3 Abbreviations	192
Bibliography	195
List of LNT publications	207