



Christian Fuchs

Transmitter Diversity with Phase-Division in Bit-Time for Optical GEO Feeder Links



Lehrstuhl für Nachrichten-
und Übertragungstechnik

Dissertation

Transmitter Diversity with Phase-Division in Bit-Time for Optical GEO Feeder Links

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

Christian Fuchs

Kiel
2020

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

2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Stephan Pachnicke

3. Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Berthold Lankl

Datum der mündlichen Prüfung: 26.5.2021

Kieler Berichte zur Nachrichtentechnik

Band 21

Christian Fuchs

**Transmitter Diversity with Phase-Division in Bit-Time
for Optical GEO Feeder Links**

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 978-3-8440-8213-5

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

Mit der Fertigstellung der vorliegenden Dissertation geht für mich eine sehr spannende und motivierende, aber auch arbeitsintensive Zeit zu Ende. Die Dissertation entstand im Rahmen meiner forschenden Tätigkeit am Institut für Kommunikation und Navigation des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V., in enger Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Nachrichtenübertragungstechnik der Technischen Fakultät der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.

Zunächst möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Werner Rosenkranz bedanken, der mich als externen Doktoranden betreut hat und dessen stets konstruktive Rückmeldungen sehr zum erfolgreichen Abschluss dieser Arbeit beigetragen haben. Darüber hinaus bedanke ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Stephan Pachnicke für weitere Rückmeldungen zu meiner Arbeit und für die Erstellung des Zweitgutachtens, sowie bei Univ.-Prof. Dr.-Ing. Berthold Lankl für die Erstellung des Drittgutachtens.

Ein besonderer Dank gilt meinen Kollegen Dr.-Ing. Dirk Giggenbach und Dr. Ramon Mata Calvo, die stets für Diskussionen zu meiner Arbeit zur Verfügung standen und deren aufmunternde Worte mich immer wieder zum Weitermachen bewegt haben. Bedanken möchte ich mich ebenso bei Dr. Sandro Scalise, der immer für Gespräche zur Verfügung stand und mich immer wieder motiviert hat, am Ball zu bleiben. Zudem bedanke ich mich herzlich bei meinen Gruppenleiterkollegen Florian Moll, dessen konstruktive Rückmeldungen ebenfalls zu einer höheren Qualität dieser Arbeit beigetragen haben, und Christopher Schmidt. Beide haben mir insbesondere in der heißen Phase des Zusammenschreibens dieser Arbeit den Rücken freigehalten.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei allen Kolleginnen und Kollegen am Institut für Kommunikation und Navigation sowie in der Abteilung Satellitennetze. Das tolle Arbeitsklima und die kollegiale Atmosphäre haben mich in herausfordernden Phasen fortwährend getragen und bildeten die Grundlage für den erfolgreichen Abschluss nicht nur dieser Arbeit, sondern auch in den verschiedenen, von uns verantworteten, Projekten im Bereich der optischen Freiraumkommunikation.

Besonders bedanken möchte ich mich auch bei meiner Familie. Sowohl meine Eltern, Marion und Rolf, als auch meine Schwestern Yvonne und Karen, sowie meine Verwandten, haben mich jederzeit unterstützt und einen großen Rückhalt geboten.

München, August 2021
Christian Fuchs

*Weite Welt und breites Leben, Langer Jahre redlich Streben,
Stets geforscht und stets gegründet, Nie geschlossen, oft geründet,
Ältestes bewahrt mit Treue, Freundlich aufgefaßtes Neue,
Heitern Sinn und reine Zwecke: Nun! Man kommt wohl eine Strecke.*
Johann Wolfgang von Goethe

Zusammenfassung

Optische Freiraumkommunikationssysteme haben in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen. Die hohen möglichen Datenraten, und andere positive Eigenschaften, wie kompaktere Systemdesigns und eine sehr gute Leistungseffizienz, machen sie zu einer attraktiven Wahl für eine Reihe von Anwendungen. Beim Einsatz als *optischer GEO Feeder Link*, d.h. zur Datenübertragung von der Erde zu einem geostationären Satelliten, ermöglichen optische Links Datenraten von 1 Tbit/s und mehr auf einer einzelnen Übertragungsstrecke. Dies ist ein bedeutender Vorteil gegenüber Funksystemen, die aufgrund des stark limitierten elektromagnetischen Spektrums Frequenzen wiederverwenden müssen, um den gewünschten Datendurchsatz zu erreichen. Für den Einsatz als optischer GEO Feeder Link müssen jedoch einige Fragestellungen adressiert werden. Insbesondere die Kompensation von atmosphärischen Turbulenzeffekten ist eine große Herausforderung.

Sender-Diversität basiert auf dem Einsatz von mehreren Sendern, welche identische Signale zu einem einzelnen Empfänger übertragen. Abstände von einigen zehn Zentimetern zwischen den einzelnen Sendern sind ausreichend, um decorrelierte atmosphärische Übertragungskanäle zu erreichen. Dies führt zu einer verbesserten Qualität der Empfangssignalstatistik. Typischerweise wird Sender-Diversität mit verschiedenen Wellenlängen für die einzelnen Sender implementiert, um spektrale Überlappungen der einzelnen Signale zu vermeiden. Die Verwendung derselben Wellenlänge ist wünschenswert, um ein einfacheres Systemdesign zu erreichen, führt aber aufgrund zusätzlicher Interferenzeffekte zu einer stark verschlechterten Empfangsleistungsstatistik.

Sender-Diversität mit *Phase-Division in Bit-Time*, die den Hauptbestandteil dieser Arbeit darstellt, basiert auf einer zusätzlichen, deterministischen Phasenmodulation der Sender des Diversitäts-System. Dieser Ansatz kompensiert die zusätzliche Interferenz, was zu einer besseren Empfangsleistungsstatistik führt. Somit kann das Diversitäts-System, z.B. durch Verwendung derselben Laserquelle für mehrere Sender, effizienter aufgebaut werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wird *Phase-Division in Bit-Time* vorgestellt, untersucht, simuliert und experimentell demonstriert. Basis für die Untersuchung ist ein Kanalmodell, welches von atmosphärischen Turbulenzparametern abgeleitet wird. Simulationen mit dem Zweck, *Phase-Division in Bit-Time* sowie den Einfluss von Schlüsselkomponenten zu untersuchen, werden präsentiert. Zudem wird ein Labor-Messaufbau mit einem Kanalsimulator verwendet, um die Anwendbarkeit des Verfahrens unter repräsentativen Bedingungen zu demonstrieren.

Es konnte gezeigt werden, dass das *Phase-Division in Bit-Time*-Konzept zuverlässig funktioniert. Es wurde unter den aus dem Kanalmodell abgeleiteten Turbulenzbedingungen getestet. Sowohl die Simulationen, als auch die Messergebnisse, bestätigen die erwartete Funktionalität des Verfahrens.

Abstract

Optical communication links have gained increasing attention throughout the last years. The high data rates enabled by such links, together with other positive properties such as the lower size, weight and power, make them an attractive solution for a number of application scenarios. When applied to optical GEO feeder links, i.e. for data communication links from Earth to geostationary satellites, data rates in excess of 1 Tbit/s can be reached on a single link. This is a significant advantage compared to radio frequency solutions, where spectrum limitations require the application of frequency reuse and thus multiple parallel feeder links to reach the desired throughput. However, a number of issues need to be addressed for the successful application of an optical GEO feeder link. Especially the mitigation of atmospheric turbulence, which leads to significant signal fading, is a major challenge.

Transmitter diversity is based on the application of multiple transmitters, which send equal signals to a single receiver. A spatial separation in the order of tens of centimeters between the transmitters is sufficient for achieving de-correlated atmospheric channels, which will result in improved signal statistics at the receiver. Typically, transmitter diversity systems avoid spectral overlap among the different channels by using different wavelengths for the transmitters. Using the same wavelength for multiple transmitters is desirable to reduce complexity, but the additional interference leads to strongly deteriorated received power statistics.

Transmitter diversity with Phase-Division in Bit-Time, which is the focal point of this thesis, applies an additional, pre-determined phase modulation to the transmitters in a transmitter diversity system. This approach mitigates effectively the additional interference outlined previously.

Within this thesis, Phase-Division in Bit-Time will be introduced, investigated, simulated and experimentally demonstrated. The basis for the evaluation is a channel model, which is derived from atmospheric turbulence parameters. Simulations for the purpose of validating Phase-Division in Bit-Time, and to investigate the influence of key components, are conducted. A measurement setup with a channel simulator is used to demonstrate the functionality of the scheme under representative conditions.

The Phase-Division in Bit-Time concept has been found to work properly for the atmospheric turbulence cases derived from the channel model. Results from simulations as well as from measurements confirm the intended functionality.

Contents

1	Introduction	1
1.1	Overview	1
1.2	Topic of this Thesis	2
1.3	Structure of this Thesis	2
2	Fundamentals of Free-Space Optical Communications	3
2.1	Historical Background	3
2.2	Advantages & Challenges	5
2.3	Application Scenarios of FSO Links	6
2.3.1	Overview	6
2.3.2	Aircraft-to-Ground and Aircraft-to-Aircraft	7
2.3.3	HAPS-to-HAPS and HAPS-to-Ground	7
2.3.4	Inter-Satellite-Links	7
2.3.5	Satellite-Downlinks to Earth	8
2.3.6	Optical GEO Feeder Links	9
2.4	Free-Space Optical Communication Systems	10
2.4.1	Overview	10
2.4.2	Optical System	10
2.4.3	Pointing, Acquisition and Tracking	12
2.4.4	Optical Modulation Formats	12
2.4.5	Wavelength Selection	14
2.4.6	Communication System Design	14
2.4.7	Transmitter Design	14
2.4.8	Receiver Design	15
2.4.9	Forward Error Correction	16
2.4.10	Typical Data Rates for FSO Systems	16
2.4.11	Transmit Pulse Shaping	17
2.4.11.1	Overview	17
2.4.11.2	Rectangular Shape	17
2.4.11.3	Cosine Roll-Off	18
2.5	Receiver Modeling	20
2.5.1	Overview	20
2.5.2	PIN-Receiver	21
2.5.3	APD-Receiver	21
2.5.4	Receiver with Optical Pre-Amplifier	22
2.5.5	Sensitivity Comparison	23
2.5.5.1	Bit Error Probability vs. Bit Error Rate	24

2.5.6	Receiver Model in this Thesis	25
2.5.6.1	Frequency Response	25
2.5.6.2	Influence of Shot-Noise	26
2.5.6.3	Summary	26
2.6	Wavelength Division Multiplexing	27
2.7	Optical Filtering	27
2.8	Optical Ground Station Networks	29
2.9	GEO Feeder Link Scenario	31
2.10	Baseline System Design	31
3	Transmission Channel	33
3.1	Introduction	33
3.2	Channel Modeling	33
3.3	Gaussian Beam Propagation	34
3.3.1	Overview	34
3.3.2	Complex Field Amplitude	34
3.3.3	Calculation of Received Irradiance	36
3.3.4	Antenna Gain	37
3.3.5	Definition of Beam Divergence	39
3.3.6	Free-Space Transmission	40
3.3.7	Plane and Spherical Waves	40
3.4	Atmospheric Transmission	41
3.5	Atmospheric Turbulence	43
3.5.1	Overview	43
3.5.2	Kolmogorov Energy Cascade	44
3.5.3	Refractive Index of Air	45
3.5.4	Mathematical Description of Refractive Index Fluctuations	46
3.5.5	Spectral Modeling	47
3.5.6	Refractive-Index Structure Parameter	48
3.6	Atmospheric Turbulence Profiles	49
3.6.1	Overview	49
3.6.2	Hufnagel-Valley Turbulence Profile	49
3.6.3	Bufton Wind Profile	50
3.6.4	Parameter Selection	51
3.6.5	Turbulence- and Wind-Profiles for Different Elevation Angles	51
3.7	Calculation of Atmospheric Turbulence Parameters	53
3.7.1	Atmospheric Parameter Functions	53
3.7.2	Rytov Variance and Scintillation Index	54
3.7.3	Spatial Coherence Radius	55
3.7.4	Fried Parameter	57
3.7.5	Beam Wander	57
3.7.6	Point-Ahead and Isoplanatic Angles	59
3.7.7	Turbulence Reference Cases	61
3.8	Atmosphere-Induced Irradiance Fluctuations	62
3.8.1	PDF of Received Irradiance	62
3.8.2	PDF of Received Irradiance with Tracking Errors	63

3.8.3	Estimation of Bit Error Probability	66
3.8.4	Power Spectral Density	68
3.9	Atmosphere-Induced Phase-Piston Fluctuations	70
3.9.1	Introduction	70
3.9.2	Variance	70
3.9.3	Power Spectral Density	71
3.10	Satellite Measurements	73
3.10.1	Introduction	73
3.10.2	Key Parameters of Space and Ground Segment	74
3.10.3	Measurement Results	75
3.11	Reference Scenario Definition	78
3.11.1	Overview	78
3.11.2	Reference Case Selection	78
3.12	Summary	80
4	Transmitter Diversity with Phase-Division in Bit-Time	81
4.1	Introduction	81
4.2	Modeling of Transmitter Diversity	83
4.3	Typical Implementation of Transmitter Diversity	84
4.4	Benefits of Transmitter Diversity	85
4.4.1	Overview	85
4.4.2	Simulation of Received Power Statistics	86
4.4.3	Probability Density Functions of Received Power	88
4.4.4	Mean Bit Error Probability	89
4.4.5	Summary and Resulting Gain with Tx-Diversity	91
4.5	Influence of Phase-Piston Fluctuations	92
4.5.1	Overview	92
4.5.2	Simulation Results	93
4.5.3	Influence of Phase-Piston Variance	93
4.6	Phase-Division in Bit-Time	95
4.6.1	Overview	95
4.6.2	Introduction to Alamouti Coding	95
4.6.3	Application of Alamouti Scheme in IM/DD-Systems	96
4.6.4	Phase-Div Concept	97
4.6.5	Practical Implementation of Phase-Div	99
4.6.6	Application of Phase-Div in Communication System	101
4.6.7	Simulation of Amplitude Distortions	104
4.6.8	Estimation of Bit Error Probability	104
4.6.9	Phase-Div Modulation Signal Shape	105
4.6.10	Phase-Div with more than Two Transmitters	108
4.7	Link Budget Calculation	110
4.8	Summary	112
5	System Simulation	113
5.1	Introduction	113
5.2	Simulation Parameters	115

5.3	Investigation of System Parameters with One Transmitter	116
5.3.1	Overview	116
5.3.2	Idealized Simulation	116
5.3.3	Transmit Pulse Shape	117
5.3.4	Bandwidth of Photo Diode in Receiver	118
5.3.5	Optical Filter	119
5.3.6	Evaluation of Fading Channels	121
5.4	Evaluation of Transmitter Diversity	122
5.4.1	Overview	122
5.4.2	Basic Transmitter Diversity with Different Wavelengths	123
5.4.3	Equal Wavelength without Phase-Div	124
5.5	Evaluation of Phase-Division in Bit-Time	125
5.5.1	Overview	125
5.5.2	Eye Diagrams	125
5.5.3	Equal Wavelength with Phase-Div	126
5.5.4	Phase-Div Modulation Signal Shape and Transmit Pulse Shape	127
5.5.4.1	Overview	127
5.5.4.2	Rectangular Transmit Pulse	127
5.5.4.3	Sinusoidal Transmit Pulse	128
5.5.5	Influence of WDM Filtering	129
5.5.5.1	Overview	129
5.5.5.2	Rectangular Transmit Pulse	130
5.5.5.3	Sinusoidal Transmit Pulse	132
5.6	Spectral assessment of Phase-Division in Bit-Time	134
5.6.1	Overview	134
5.6.2	Single Transmitter	135
5.6.3	Two Transmitters	136
5.7	Summary	138
6	Measurements	141
6.1	Introduction	141
6.2	Characterization of Measurement Setup	146
6.2.1	Visualization of Phase-Div Modulation	146
6.2.2	Erbium-Doped Fiber Amplifier	147
6.3	Evaluation Based on Power Measurements	149
6.3.1	Overview	149
6.3.2	Best-Case Turbulence	149
6.3.2.1	Individual Channel Results	149
6.3.2.2	Transmitter Diversity Results	151
6.3.3	Worst-Case Turbulence	152
6.3.3.1	Individual Channel Results	152
6.3.3.2	Transmitter Diversity Results	153
6.3.4	Summary of Power Measurement Results	154
6.4	Bit Error Rate Performance	155
6.4.1	Overview	155
6.4.2	Signal Processing for BER Estimation	156

6.4.3	Eye Diagrams	157
6.4.4	Best-Case Turbulence Results	158
6.4.5	Worst-Case Turbulence Results	160
6.5	Summary and Discussion	162
7	Conclusions	163
7.1	Summary	163
7.2	Specific Contributions of this Thesis	164
7.3	Future Work	165
A	Illustration of the Phase-Division in Bit-Time Scheme	167
A.1	Introduction	167
A.2	Single Transmitter without Transmitter Diversity	168
A.3	Transmitter Diversity without Phase-Division	169
A.4	Transmitter Diversity with Phase-Division	171
B	Simulation Parameters	173
C	Reference Signal Generation for Channel Simulator	175
C.1	Introduction	175
C.2	Amplitude Fluctuations	175
C.2.1	Overview	175
C.2.2	Best-Case	176
C.2.3	Worst-Case	177
C.3	Phase-Piston Fluctuations	179
C.3.1	Overview	179
C.3.2	Best-Case	179
C.3.3	Worst-Case	180
D	Directories	183
D.1	Physical Constants	183
D.2	Mathematical Symbols	183
D.3	Abbreviations	187
D.4	Picture Credits	188
	Bibliography	189
	Liste der Veröffentlichungen der Lehrstuhl-Reihe	197