

Hybrid Microwave/Free-space Optical Transmission in the Maritime Environment

Dissertation

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

vorgelegt von

Mark Gregory

Kiel 2013

Tag der Einreichung: 19.12.2013

Tag der Disputation: 02.06.2014

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Peter Adam Höher
Prof. Dr.-Ing. Robert Schober

Digital Communications

Mark Gregory

**Hybrid Microwave/Free-space Optical Transmission
in the Maritime Environment**

Shaker Verlag
Aachen 2014

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., 2014

Copyright Shaker Verlag 2014

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 978-3-8440-3100-3

ISSN 1860-7535

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

Preface

This doctoral dissertation has been executed and written while I was an external Ph.D. student in the Information and Coding Theory Group of the Faculty of Engineering at the Christian-Albrechts-University of Kiel. The main body of the research work presented here was carried out within a maritime communication terminal project.

I would like to thank Prof. Dr.-Ing. Peter Adam Hoeher for giving me the opportunity to conduct this work as an external Ph.D. student, also I am grateful for his mentorship and guidance throughout this process. I want to express my gratitude to Prof. Dr.-Ing. Robert Schober for his constructive review.

Furthermore, I would like to thank Dr.-Ing. Bernhard Wandernoth and Dr.-Ing. Edgar Fischer for their continuous support and technical discussions. In addition I would like to also thank Prof. Dr.-Ing. Sabah Badri-Hoeher and her team from the University of Applied Sciences, Kiel for facilitating hosting and maintaining the experimental test bed as well as the channel data it generated.

Moreover, I am deeply grateful for supplying me the unique channel measurement data and hardware needed for generating various channel models. My exceptional gratitude is passed to Dr. sc. Reinhard Czichy who made all this possible.

The valuable discussions with Mr. Isaac Kim from Attochron about hybrid RF/FSO systems are highly appreciated and I would like to also acknowledge Dr. Hal Yura from the Aerospace Corporation for his informative discussions about atmospheric phenomena.

I would like to thank my employer Tesat-Spacecom GmbH & Co. KG for the opportunity to work on a broad range of scientific projects and to allow me to present this work to the community at conferences. I am deeply indebted to Dr. Frank Heine, Chief Scientist at Tesat, firstly for allowing me to have a flexible work schedule and secondly for being so supportive throughout the process while I completed this Ph.D.

Finally, I thank my parents who have granted me a unique and indescribable personal support and Kathrin, for all she has done to help me during the writing of this dissertation.

Stuttgart, June 2014

Mark Gregory

Abstract

In this thesis a free-space transmission system consisting of a radio frequency (RF) and a free-space optical (FSO) link is proposed and investigated. The concept is based on an RF system operating at 38 GHz and an FSO MIMO system operating at 1550 nm. Both systems have been installed in the maritime environment in order to investigate the channel characteristics for a transmission distance of 13.9 km over water.

The huge amount of channel data, which has been recorded over several months on a 24 h base, has been evaluated and different models have been extracted that characterize the channel impacts. The complementary behaviour between the RF and FSO system to weather phenomena has been demonstrated. Furthermore, measured weather parameters are strongly correlated to the quality of the received signal. A statistical evaluation indicates that performance estimation can be established by taking into account different measurable weather quantities. According to the theoretical channel models different link budgets are presented and a good match is achieved when compared to the measured signals.

The FSO MIMO system is extensively investigated and a proposal for the maritime transmission channel is presented. Moreover, the modulation and coding schemes are discussed and finally several Monte Carlo simulations are carried out to further optimize the FSO MIMO scheme. The simulation environment is based on the measured channel models. Different detection schemes are compared and a novel method of optimizing a Log-APP detector is developed under the special assumption that receiver noise is correlated. Finally, the optimized FSO MIMO scheme is tested by using measured channel data within the simulations.

Besides a systematic investigation of the two transmission systems and the development of adequate algorithms for the extensive long-term and short-term data evaluation, a major focus of this thesis is to rate the performance of a combined hybrid RF/FSO system. Especially the various proposals for hybrid encoders are compared and rated. For the transmission system under investigation operating in the maritime environment, a proposal is given and justified by different considerations regarding availability and data throughput. Since an optimization goal of a transmission system can be very different, depending on the applications, several techniques are presented throughout this thesis that make it possible to select system parameters for given requirements.

Altogether, the proposed hybrid RF/FSO system is capable of achieving a large availability at a high data rate and it could be proved that a 4×4 FSO MIMO scheme is suitable of fully mitigating turbulence-induced scintillation in harsh maritime environments.

Kurzfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Freiraum-Übertragungssystem bestehend aus einer Richtfunkstrecke und einem optischen Link vorgeschlagen und untersucht. Das Konzept basiert auf einem Richtfunksystem bei einer Trägerfrequenz von 38 GHz und einem optischen MIMO System mit einer Wellenlänge von 1550 nm. Beide Systeme wurden im Zuge einer 13.9 km langen Versuchsstrecke über Wasser aufgebaut um die beiden Kanäle zu charakterisieren.

Während der Meßkampagne wurden große Datenmengen rund um die Uhr aufgezeichnet und über mehrere Monate ausgewertet. Aus diesen Datensätzen wurden Kanalmodelle extrahiert. Das gegensätzliche Verhalten von Richtfunk und optischer Übertragung gegenüber Kanaleinflüssen konnte erfolgreich gemessen werden. Des Weiteren sind die aufgezeichneten Wettereinflüsse sehr stark mit den jeweiligen Qualitäten der Empfangssignale korreliert. Eine statistische Auswertung der Daten zeigt, dass eine Vorhersage der Qualität der Datenübertragung durch entsprechende Messungen von Wettergrößen erfolgen kann. Unter Hinzunahme von theoretischen Kanalmodellen werden verschiedene Link Budgets aufgestellt und der anschließende Vergleich zu den Messdaten zeigt eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Theorie und Praxis.

Basierend auf einer umfangreichen Untersuchung wird ein Systementwurf für das FSO MIMO Übertragungssystems vorgestellt. Ferner werden Modulations- und Codierverfahren diskutiert und schließlich erfolgt eine Optimierung des Systems mit Hilfe von Monte Carlo Simulationen. Für die Simulationen werden die aus den Messdaten generierten Kanalmodelle zugrunde gelegt. Verschiedene Empfangsmetriken werden verglichen und eine neue Metrik, basierend auf einem Log-APP Detektor, wird vorgestellt, welcher Korrelationen zwischen den verschiedenen Empfangszweigen berücksichtigt. Schließlich wird das entwickelte Empfangskonzept anhand von gemessenen Datensätzen, welche in die Simulationen eingebunden werden, getestet.

Neben der systematischen Untersuchung der beiden Übertragungssysteme und der Entwicklung von Algorithmen zur effizienten Datenauswertung liegt ein Hauptaugenmerk auf der Bewertung eines kombinierten hybriden RF/FSO Systems. Insbesondere werden hierzu verschiedene publizierte Ansätze verglichen und bewertet. Für das hier zugrunde gelegte Szenario, einer Übertragungsstrecke über Wasser, wird ein Systementwurf hergeleitet und hinsichtlich Anforderungen wie Verfügbarkeit und Datendurchsatz analysiert. Optimierungsstrategien können sich stark unterscheiden, je nach Anwendungsfall.

Aus diesem Grunde wurde in dieser Arbeit versucht, die Auswertungen in einer entsprechenden Form darzustellen, welche es erlaubt bei bekannten Anforderungen die er-

forderlichen Systemparameter zu selektieren. Insgesamt kann gezeigt werden, dass mit dem vorgeschlagenen Ansatz des hybriden RF/FSO Systems ein hoher Datendurchsatz bei hoher Verfügbarkeit erzielt werden kann. Zudem stellt sich heraus, dass ein 4×4 FSO MIMO Ansatz die Degradation des Empfangssignals durch turbulenzinduzierte Szintillationen vollständig ausgleichen kann.

Contents

1	Introduction	1
1.1	Motivation	1
1.2	Structure of thesis	3
2	Channel impacts on RF/FSO transmission	5
2.1	Atmospheric damping for FSO channel	7
2.1.1	Scattering effects	10
2.1.2	Absorption	15
2.1.3	Optical turbulence	16
2.1.4	Weather impacts on FSO transmission	22
2.2	Impacts on RF channel	27
2.2.1	RF signal fading	28
2.2.2	Weather impacts on RF transmission	31
2.3	Summary	36
3	Experimental channel measurement campaign	39
3.1	Setup measurement campaign	40
3.1.1	RF transmission system	42
3.1.2	FSO transmission system	43
3.2	Channel data description	47
3.2.1	Weather station data	47
3.2.2	Camera images	48
3.3	r_0 measurements	49
3.4	Link budget	50
3.4.1	Link budget for RF system	50
3.4.2	Link budget for FSO system	53
3.5	Channel measurement results	61
3.5.1	Long-term statistical evaluation	61
3.5.2	Correlation of significant weather events to RF and FSO data	81
3.5.3	Summary of channel models	85
3.6	Summary	86
4	Free-space optical MIMO	89
4.1	Channel capacity of MIMO systems	90
4.2	Diversity gain	94

4.2.1	Spatial diversity	95
4.2.2	Spatial multiplexing	101
4.2.3	Repetition MIMO vs. STBC	102
4.3	Receiver noise	104
4.4	Modulation schemes for FSO links	107
4.4.1	OOK modulation	108
4.4.2	Comparison between OOK and PPM modulation	110
4.5	Proposed modulation and coding scheme	111
4.5.1	Data encoding	113
4.5.2	Data detection and decoding	115
4.5.3	Numerical simulation results of proposed system	122
4.5.4	Numerical simulation results using measured channel data	130
4.6	Summary	133
5	Hybrid RF/FSO system design	135
5.1	Combined weather impacts	135
5.1.1	Fog effects on hybrid system	135
5.1.2	Rain effects on hybrid system	136
5.1.3	Conclusion to combined channel impacts	138
5.2	Hybrid encoder	138
5.2.1	Duplicated data transmission on RF and FSO link	139
5.2.2	Switching between RF/FSO transmission	139
5.2.3	Maximization of throughput, adaptive coding	141
5.2.4	Summary hybrid encoder	142
5.2.5	Do we need rate adaptivity in a hybrid RF/FSO system?	143
5.3	Summary	145
6	Summary and Outlook	147
A	List of Abbreviations and Symbols	151
	Bibliography	157
	Own Publications	167
	List of Figures	169
	List of Tables	173