

# Interference Mitigation and Channel Estimation for Digital Aeronautical Communication Systems based on OFDM

## Interferenzunterdrückung und Kanalschätzung für OFDM im digitalen Flugfunk

Der Technischen Fakultät der  
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg  
zur Erlangung des Grades

DOKTOR-INGENIEUR (DR.-ING.)

vorgelegt von

MARTIN HIRSCHBECK AUS SCHWABACH

Als Dissertation genehmigt von der Technischen Fakultät  
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der mündlichen Prüfung:	05.07.2016
Vorsitzende/r des Promotionsorgans:	Prof. Dr. Peter Greil
Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. Johannes Huber Prof. Dr.-Ing. Georg Fischer

Erlanger Berichte aus Informations- und Kommunikationstechnik

Band 38

**Martin Hirschbeck**

**Interference Mitigation and Channel Estimation  
for Digital Aeronautical Communication Systems  
based on OFDM**

Interferenzunterdrückung und Kanalschätzung für OFDM  
im digitalen Flugfunk

D 29 (Diss. Universität Erlangen-Nürnberg)

Shaker Verlag  
Aachen 2017

**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.: Erlangen-Nürnberg, Univ., Diss., 2016

Copyright Shaker Verlag 2017

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 978-3-8440-4979-4

ISSN 1619-8506

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

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

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • e-mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## Danksagung (Acknowledgments)

Diese Arbeit ist im Rahmen meiner Tätigkeit am Lehrstuhl für Informationsübertragung an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg entstanden.

Zu allererst möchte ich mich bei meinem Doktorvater Prof. Johannes Huber bedanken, der mir die Möglichkeit dieser Promotion gegeben hat und mich die letzten Jahre hervorragend akademisch begleitet hat. Seine Tür stand jederzeit für wertvolle wissenschaftliche Diskussionen und das ein oder andere nette Gespräch offen.

Mein Zweitgutachter, Prof. Georg Fischer, zeigte starkes Interesse an meiner Arbeit und gab wertvolle Hinweise. Für dies und seine sofortige Bereitschaft, als Zweitgutachter meine Promotion zu unterstützen, möchte ich mich sehr herzlich bedanken.

Außerdem gilt mein Dank der Firma iAd aus Unterschlausersbach, durch dessen Kooperation mit dem Lehrstuhl ich die Möglichkeit hatte, an dem Themengebiet LDACS1 arbeiten konnte.

Darüber hinaus bin ich für das sehr angenehme Arbeitsklima mit den Kollegen am Lehrstuhl überaus dankbar. Dabei möchte ich insbesondere meinen Zimmerkollegen Jakob herausgreifen, der mir bei all den vielen kleinen und großen Problemen eine große Hilfe war.

Last but not least möchte ich mich bei meiner Frau Katharina und meinem Sohn Jonathan für deren Rücksicht und Unterstützung bedanken. Die gemeinsame Zeit mit meiner Familie hat mir sehr viel Energie gegeben, um die Promotion durchzuziehen.



# Abstract

The L-band Digital Aeronautical Communication System 1 (LDACS1) is a proposal for the upcoming data link for air traffic control. Due to the scarcity of free spectra, it is planned to operate in the frequency neighborhood of Distance Measuring Equipment (DME), whose signals have an impulsive Gaussian-shaped nature and interfere with the reception of LDACS1 signals. LDACS1 is based on orthogonal frequency-division multiplexing (OFDM). This thesis contributes solutions to two challenges of a reliable reception of LDACS1 signals: channel estimation and interference mitigation.

The first contribution is a low complexity iterative channel estimation (LCICE) technique which employs equalized data as support pilots in order to refine the pilot-aided channel estimation (PACE) in scenarios where pilot values suffer from interference. The reliabilities of the support pilots are calculated and exploited for a refined channel estimation approach.

The second and major contribution are proposals for the mitigation of the DME interference which mainly is impulsive with respect to the symbol duration of the signal but also frequency-selective with respect to the signal bandwidth:

- The first proposal is a filter bank pulse blanking (FBPB) approach with subband-selective blanking decisions. It may be extended to a subband-selective interference detection with soft blanking, which softly blanks the subband signals according to the detected and estimated subband-selective instantaneous powers of interference and signal. Furthermore efficient calculations for the signal-to-interference-and-noise ratios (SINR) at each OFDM sub-carrier are provided in this thesis in order to adapt the OFDM components such as channel estimation and demodulation to the signal processing of FBPB.
- Among FBPB, a block-based frequency-selective interference mitigation (BBFIM) is proposed. It makes use of an efficient low complexity block processing via fast Fourier transform (FFT) and an interference mitigation in frequency domain. The block length determines the time- and frequency-selectivity. The undesired spectral deformation of the interference due to block processing is avoided by using a Hann window before applying the FFT on each block.

Both proposals outperform the state of the art, whereby FBPB offers a tremendous robustness against impulsive interference. They may be adapted to any interference situation and may be applied together with any modulation scheme including single-carrier modulation at receiver-side without changing the standard.



# Kurzfassung

Der Vorschlag „L-Band Digital Aeronautical Communication System 1“ (LDACS1) gilt als aussichtsreicher Kandidat bei der Standardisierung eines zukünftigen digitalen Funksystems in der Flugsicherung. Aufgrund der Knappheit von Funkfrequenzen ist ein Betrieb in Frequenznähe vom Abstandsmesssystem DME (Distance Measuring Equipment) geplant, dessen impulsartige, Gauß-förmige Signale den Empfang von LDACS1-Signalen empfindlich stören. LDACS1 basiert auf *orthogonal frequency-division multiplexing* (OFDM). In der vorliegenden Arbeit werden Lösungen für einen zuverlässigen Empfang von LDACS1-Signalen vorgestellt.

Der erste Beitrag dieser Arbeit ist ein iteratives Kanalschätzverfahren (*low complexity iterative channel estimation* (LCICE)), welches entzerzte und detektierte Daten als Hilfspilotsignale für eine verbesserte, pilot-gestützte Kanalschätzung verwendet. Dies ist vor allem dann vorteilhaft, wenn Pilotsymbole durch DME-Interferenz gestört sind. In jeder Iteration wird dabei die Zuverlässigkeit der Hilfspilotsignale berechnet und im Anschluss für eine verbesserte Kanalschätzung verwendet.

Der zweite und hauptsächliche Beitrag dieser Arbeit sind Vorschläge zur Interferenzunterdrückung der DME-Interferenz, wobei ausgenutzt wird, dass DME-Signale sowohl als impulsartig im Vergleich zur Dauer eines OFDM-Symbols als auch als frequenzselektiv gegenüber der Signalbandbreite behandelt werden können:

- Der erste Vorschlag ist ein Verfahren *filter bank pulse blanking* (FBPB) mit einem subband-selektiven Ausblenden (Blanking) impulsartig gestörter Signalabschnitte. FBPB kann mit einer subband-selektiven Detektion von Interferenz-Momentanleistungen und einem sog. *soft Blanking* erweitert werden. Blanking führt jedoch zu Signalveränderungen, welche die OFDM-Komponenten Kanalschätzung und Demodulation erheblich beeinträchtigen. In dieser Arbeit werden effiziente Methoden zur Berechnung für das *signal-to-interference-and-noise ratio* (SINR) für jeden OFDM-Subträger vorgelegt, welches dazu benutzt wird, den Empfänger an die Signalveränderungen durch Blanking anzupassen.
- Neben FBPB wird ein Verfahren *block-based frequency-selective interference mitigation* (BBFIM) vorgestellt. Es verwendet eine effiziente Blockverarbeitung mit Hilfe einer *fast Fourier transform* (FFT) und unterdrückt die Interferenz im Frequenzbereich. Ein optimaler Austausch zwischen Zeit- und Frequenzselektivität wird hierbei durch eine geeignete Blocklänge erreicht. Eine unerwünschte spektrale Ver-

breiterung der Interferenz auf Grund der Blockverarbeitung wird durch eine Hann-Fensterung von sich zeitlich überlappenden Blöcken vor der FFT vermieden.

Beide Vorschläge übertreffen den Stand der Technik hinsichtlich Störunterdrückung deutlich, wobei FBPB die größte Robustheit gegenüber starken und häufigen Störimpulsen aufweist, sich BBFIM jedoch durch geringere Komplexität auszeichnet. FBPB und BBFIM können in angepasster Form auf alle Interferenzsituationen und zusammen mit jedem Modulationsverfahren, inklusive Einträgermodulation, auf Empfangsseite angewandt werden, ohne dabei einen Übertragungsstandard abändern zu müssen.

---

# Contents

<b>Abstract</b>	<b>i</b>
<b>Kurzfassung (in German)</b>	<b>iii</b>
<b>1 Introduction and Outline</b>	<b>1</b>
<b>2 Transmitter of L-Band Digital Aeronautical Communication System 1</b>	<b>5</b>
2.1 Channel Coding and Modulation Schemes . . . . .	6
2.2 OFDM-Frame Structure . . . . .	10
2.3 OFDM-Symbol in Time Domain . . . . .	13
<b>3 Aeronautical Channel Model</b>	<b>17</b>
3.1 Mobile Radio Channel . . . . .	18
3.2 Linear Time-Variant System . . . . .	20
3.3 Discrete-Time Tapped-Delay-Line Model . . . . .	24
3.4 Aeronautical Channel Scenarios . . . . .	28
3.4.1 AWGN . . . . .	29
3.4.2 En-Route . . . . .	30
3.4.3 Take-off/landing . . . . .	32
3.4.4 Runway . . . . .	34
3.4.5 Taxiway . . . . .	35
3.5 Autocorrelation Functions of Channel Simulation . . . . .	36
3.6 Inter-Symbol and Inter-Carrier Interferences Caused by Channel . . . . .	39
3.7 Link Budget . . . . .	42
<b>4 L-Band Interference</b>	<b>47</b>

4.1	Distance Measuring Equipment . . . . .	47
4.1.1	System Description . . . . .	47
4.1.2	Simulation Model . . . . .	49
4.1.3	Overview of Interference on LDACS1 . . . . .	51
4.1.4	Close-meshed Deployment of DME Ground Stations . . . . .	53
4.1.5	Forward Link Scenarios . . . . .	54
4.1.6	Reverse Link Scenarios . . . . .	56
4.1.7	Simplified Scenario . . . . .	57
4.2	Military Radio Systems in the L-Band: JTIDS/MIDS . . . . .	57
4.3	Further L-Band Systems . . . . .	58
4.4	Inter-Cell Interference . . . . .	59
<b>5</b>	<b>Receiver Models</b>	<b>61</b>
5.1	OFDM Receiver . . . . .	61
5.2	System Model for the Analysis of Channel Estimation . . . . .	68
5.3	System Model for the Analysis of Interference Mitigation . . . . .	68
<b>6</b>	<b>Channel Estimation</b>	<b>71</b>
6.1	Pilot-Aided Channel Estimation (PACE) . . . . .	71
6.1.1	Sampling Theorem for the Channel Transfer Function . . . . .	72
6.1.2	MMSE Filter . . . . .	73
6.1.3	Cascaded 1D Interpolation . . . . .	76
6.2	Low Complexity Iterative Channel Estimation (LCICE) . . . . .	77
6.3	Performance Analysis . . . . .	81
6.3.1	Simulation Setup . . . . .	81
6.3.2	Simulation Results . . . . .	82
6.4	Complexity Analysis . . . . .	88
<b>7</b>	<b>Mitigation of Impulsive Interference</b>	<b>91</b>
7.1	State of the Art in Interference Mitigation . . . . .	92
7.1.1	Simple Pulse Blanking (SPB) . . . . .	92
7.1.2	Combination Pulse Blanking (CPB) . . . . .	93
7.2	Filter Bank Pulse Blanking (FBPB) . . . . .	94

---

7.2.1	Concept	95
7.2.2	Choice of Subband Filters	97
7.2.3	Subband-Selective DME Detection	98
7.2.4	MMSE-based Soft-Blanking	103
7.2.5	Performance Analysis	105
7.3	Adaptation of OFDM for FBPB	108
7.3.1	Calculation of SINR Values	108
7.3.2	Blanking Equalization (BE)	119
7.3.3	Adaptation of Channel Estimation	119
7.3.4	Adaptation of Demodulation	119
7.3.5	Iterative ICI Cancellation	120
7.3.6	Performance Analysis	120
7.4	Block-Based Frequency-Selective Interference Mitigation (BBFIM)	121
7.4.1	Concept	123
7.4.2	Subband-Selective DME Detection	126
7.4.3	MMSE-based Soft Mitigation	128
7.4.4	Performance Analysis	128
7.5	Performance Comparison with State of the Art	132
7.6	Performance with Aeronautical Channels	133
7.7	Analysis of Computational Complexity	135
7.8	Summary	137
<b>8</b>	<b>Summary and Conclusions</b>	<b>139</b>
<b>A</b>	<b>Transformation into Equivalent Complex Baseband (ECB)</b>	<b>141</b>
<b>B</b>	<b>Modeling Doppler Frequencies</b>	<b>145</b>
<b>C</b>	<b>Parameters of Channel Scenarios</b>	<b>153</b>
C.1	En-Route	154
C.2	Take-off/Landing	155
C.3	Runway	156
C.4	Taxiway	157

---

<b>D</b>	<b>Calculation of Inter-Symbol Interference</b>	<b>159</b>
<b>E</b>	<b>LLR Calculations / Demodulation</b>	<b>163</b>
<b>F</b>	<b>Notation</b>	<b>167</b>
F.1	Abbreviations . . . . .	167
F.2	Operators and Functions . . . . .	170
F.3	Sets . . . . .	172
F.4	Mathematical Symbols from the Latin Alphabet . . . . .	172
F.5	Mathematical Symbols from the Greek Alphabet . . . . .	183
F.6	Units . . . . .	186
	<b>Bibliography</b>	<b>189</b>