

Noncoherent Detection and Equalization for MDPSK and MDAPSK Signals

Inkohärente Detektion und Entzerrung für
MDPSK- und MDAPSK-Signale

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

Doktor-Ingenieur

vorgelegt von
Robert Schober
Erlangen – 2000

Als Dissertation genehmigt von
der Technischen Fakultät der
Universität Erlangen–Nürnberg

Tag der Einreichung:	08.05.2000
Tag der Promotion:	21.07.2000
Dekan:	Prof. Dr. H. Meerkamm
Berichterstatter:	Prof. Dr. J. Huber
	Prof. Dr. R. Raheli

Berichte aus der Kommunikations- und Informationstechnik

Band 19

Robert Schober

**Noncoherent Detection and Equalization
for MDPSK and MDPSK Signals**

D 29 (Diss. Universität Erlangen-Nürnberg)

Shaker Verlag
Aachen 2000

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Schober, Robert:

Noncoherent Detection and Equalization for MDPSK and MDAPSK Signals /
Robert Schober. Aachen : Shaker, 2000

(Berichte aus der Kommunikations- und Informationstechnik ; Bd. 19)

Zugl.: Erlangen-Nürnberg, Univ., Diss., 2000

ISBN 3-8265-7861-9

Copyright Shaker Verlag 2000

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 3-8265-7861-9

ISSN 1432-489X

Shaker Verlag GmbH • P.O. BOX 1290 • D-52013 Aachen

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

Internet: www.shaker.de • eMail: info@shaker.de

Acknowledgements

First of all, I would like to thank my supervisor Prof. Johannes Huber for the continuous support of my work and for providing a stimulating environment where it was a pleasure to work in. Furthermore, I am grateful to Prof. Riccardo Raheli for his interest in my work and for serving as an external referee.

Special thanks is due to Dr.-Ing. Wolfgang Gerstacker for many fruitful discussions and the joint work which finally lead to this thesis. His proof-reading of this thesis was also excellent. Moreover, I would like to thank all present and former colleagues at the Telecommunications Institute II in Erlangen for their cooperativeness. Especially, I would like to mention Dipl.-Ing. Marco Breiling, Dipl.-Ing. Alexander Lampe, and Dipl.-Ing. Lutz Lampe for many valuable discussions on “noncoherent” topics and Susi Koschny for the immediate and efficient generation of all drawings contained in this thesis.

I am also indebted of TCMC, Philips Semiconductors, Nürnberg, for supporting this work. Here, I would like to mention Dr.-Ing. Hans Kalveram, Dipl.-Ing. Jürgen Petersen, and Dipl.-Ing. Thomas Wagner for giving me enough “freedom” to do research.

Last but not least, I would like to thank my parents for supporting my studies and my wife Elpi for her encouragement and comprehension during all this time.

Abstract

In the present work, noncoherent receivers for both frequency-nonselective and frequency-selective possibly time-variant channels are considered. M -ary differential phase-shift keying (MDPSK) and M -ary differential amplitude/phase-shift keying (MDAPSK) modulation, which both enable noncoherent demodulation, are employed.

The first part of the present work is devoted to noncoherent receivers for frequency-nonselective channels. Since the main field of application of such receivers is mobile communication, we keep receiver complexity as low as possible and focus on simple decision-feedback techniques, i.e., so-called decision-feedback differential detection (DF-DD) schemes. For derivation of these schemes three different approaches are considered. Namely, we distinguish between multiple-symbol detection (MSD) based DF-DD, linear prediction based DF-DD, and DF-DD based on nonlinear noise prediction. Which scheme is best suited for implementation strongly depends on the respective application.

MSD-based DF-DD is derived from optimum maximum-likelihood block detection and thus, it may serve as a benchmark for other DF-DD schemes. However, this scheme degrades if the actual channel statistics do not coincide with the statistics assumed for receiver optimization. This problem is circumvented by DF-DD based on linear prediction since here a simple adaptive implementation using the recursive least-squares (RLS) algorithm is possible at the expense of a higher receiver complexity. On the other hand, DF-DD based on nonlinear noise prediction offers only a performance gain compared to conventional differential detection (DD) for transmission over the additive white Gaussian noise (AWGN) channel, but, in contrast to MSD-based DF-DD optimized for AWGN, it does not degrade under fading, i.e., a simple and robust receiver results.

In the second part of this work, noncoherent receivers for frequency-selective channels are regarded. As in the classical coherent case, we distinguish between sequence estimation, decision-feedback equalization, and linear equalization. Five noncoherent sequence estimation (NSE) schemes are presented and compared. The NSE scheme proposed by Colavolpe and Raheli (CR-NSE) turns out to provide the best performance. In particular, a modified version of the original CR-NSE scheme, which allows to generate the reference symbol necessary for branch metric calculation recursively, is well suited for implementation. The considered

noncoherent DFE (NDFE) scheme is derived directly from NSE and yields a significant performance gain (more than 4 dB) over all previously proposed NDFE schemes. The investigated noncoherent linear equalization (NLE) techniques consist of a linear filter and a decision-feedback differential detector. For filter optimization, two different criteria are employed. The first criterion leads to the minimization of the variance of intersymbol interference (ISI) in the equalizer filter output signal, whereas the second criterion leads to the minimization of the total error, which consists of ISI and noise.

For all regarded equalizers efficient noncoherent adaptive algorithms, which have a similar convergence speed as conventional coherent adaptive algorithms, are provided for channel estimation and filter adjustment.

The power efficiency of all discussed noncoherent receivers increases as the size of the observation window employed for estimation of the transmitted symbols increases. At the same time the robustness against phase variations decreases. Thus, a trade-off between power efficiency for channels with constant phase and sensitivity to phase variations exists.

Also, this work shows that properly designed noncoherent receivers can always approach the power efficiency of their coherent counterparts if the observation window is made sufficiently large. Especially for NDFE and NLE this is a new result since all previously reported schemes suffer from a large loss in performance compared to coherent equalizers.

Zusammenfassung¹

In der vorliegenden Arbeit werden inkohärente Empfänger für frequenzselektive und frequenznichtselektive Kanäle, die sowohl zeitinvariant als auch zeitvariant sein können, untersucht. Es werden M -stufige differentielle Phasenmodulation (MDPSK) und M -stufige differentielle Amplituden/Phasenmodulation (MDAPSK), die beide eine inkohärente Demodulation erlauben, verwendet.

Der erste Teil der vorliegenden Arbeit befasst sich mit inkohärenten Empfängern für frequenznichtselektive Kanäle. Da der Mobilfunk das Hauptanwendungsgebiet solcher Empfänger darstellt, wird die Empfängerkomplexität so gering wie möglich gehalten und der Schwerpunkt auf einfache Techniken mit Entscheidungsrückkopplung gelegt, d.h. auf sogenannte entscheidungsrückgekoppelte differentielle Detektionsverfahren (DF-DD). Zur Herleitung dieser Verfahren werden drei unterschiedliche Ansätze verfolgt. Unterschieden wird zwischen DF-DD basierend auf Multiple-Symbol-Detektion (MSD), DF-DD basierend auf linearer Prädiktion und DF-DD basierend auf nichtlinearer Rauschprädiktion. Welches Verfahren am besten für die Implementierung geeignet ist hängt stark von der jeweiligen Anwendung ab.

MSD-basierte DF-DD wird aus der optimalen Maximum-Likelihood-Blockschätzung abgeleitet und kann daher als Vergleichsmaßstab für andere DF-DD-Verfahren dienen. Dieser Empfängertyp degradiert jedoch, wenn die tatsächliche Kanalstatistik nicht mit der für die Empfängeroptimierung angenommenen Statistik übereinstimmt. Dieses Problem wird bei Verwendung von DF-DD basierend auf linearer Prädiktion vermieden, da hier eine adaptive Implementierung unter Verwendung des Rekursive-Least-Squares (RLS) Algorithmus möglich ist. Allerdings resultiert eine höhere Empfängerkomplexität. DF-DD basierend auf nichtlinearer Rauschprädiktion gewährleistet hingegen nur bei Übertragung über den AWGN-Kanal eine höhere Leistungsfähigkeit als konventionelle differentielle Detektion (DD). Aber im Gegensatz zu für den AWGN-Kanal optimierter MSD-basierter DF-DD degradiert dieses Verfahren nicht bei Signalschwund (Fading), d.h. dieser Empfängertyp ist einfach und robust.

Im zweiten Teil dieser Arbeit werden inkohärente Empfänger für frequenzselektive Kanäle betrachtet. Wie im klassischen kohärenten Fall wird zwischen Sequenzschätzung, entschei-

¹The translation of the Abstract, the Table of Contents, and the Introduction into German language is a mandatory requirement for doctoral theses at the Faculty of Engineering of the University Erlangen-Nürnberg.

dungsrückgekoppelter Entzerrung und linearer Entzerrung unterschieden. Es werden fünf inkohärente Sequenzschätzverfahren (NSE) vorgestellt und verglichen. Es zeigt sich, dass NSE nach Colavolpe und Raheli (CR-NSE) die größte Leistungsfähigkeit besitzt. Insbesondere eine modifizierte Version des originalen CR-NSE-Verfahrens, das die rekursive Erzeugung des für die Zweigmetrikberechnung notwendigen Referenzsymbols erlaubt, ist sehr gut für die Implementierung geeignet. Das betrachtete inkohärente entscheidungsrückgekoppelte Entzerrungsverfahren (NDFE) leitet sich direkt aus NSE ab und erzielt einen deutlichen Gewinn (mehr als 4 dB) in der Leistungseffizienz gegenüber bisher vorgeschlagenen NDFE-Verfahren. Die untersuchten linearen Entzerrverfahren (NLE) verwenden ein lineares Filter und einen entscheidungsrückgekoppelten differentiellen Detektor. Für die Optimierung des Filters werden zwei unterschiedliche Kriterien verwendet. Das erste Kriterium führt zur Minimierung der Varianz der Intersymbolinterferenzen (ISI) im Entzerrfilterausgangssignal, wohingegen das zweite Kriterium auf die Minimierung des aus ISI und Rauschen bestehenden Gesamtfehlers abzielt.

Für alle betrachteten Entzerrer werden für die Kanalschätzung und Filtereinstellung effiziente inkohärente adaptive Algorithmen, die eine ähnliche Konvergenzgeschwindigkeit wie konventionelle kohärente adaptive Algorithmen haben, bereitgestellt.

Die Leistungseffizienz aller diskutierter inkohärenter Empfänger nimmt mit der Größe des für die Schätzung eines gesendeten Symbols verwendeten Beobachtungsfensters zu. Gleichzeitig nimmt die Robustheit gegenüber Phasenvariationen ab. Somit gibt es einen Austausch zwischen der Leistungseffizienz für Kanäle mit konstanter Phase und der Empfindlichkeit gegenüber Phasenvariationen.

Diese Arbeit zeigt zudem, dass gut entworfene inkohärente Empfänger immer die Leistungseffizienz der entsprechenden kohärenten Empfänger erreichen können, solange das Beobachtungsfenster groß genug ist. Insbesondere für NDFE und NLE ist dieses Resultat neu, da alle vorher publizierten Verfahren im Vergleich zu kohärenten Entzerrern einen großen Verlust in der Leistungseffizienz verursachen.

Contents

1	Introduction	1
2	Basic Concepts	9
2.1	Continuous-Time Transmission Model	9
2.2	Modulation and Differential Encoding	11
2.2.1	MDPSK Modulation	12
2.2.2	MDAPSK Modulation	13
2.3	Discrete-Time Channel Model	14
2.3.1	Frequency-Nonselective Channel	16
2.3.2	Frequency-Selective Channel	19
2.3.2.1	Time-Variant Channel	19
2.3.2.2	Time-Invariant Channel	20
2.4	Conventional Receivers for MDPSK and MDAPSK	21
2.4.1	Coherent Receivers	21
2.4.2	Noncoherent Receivers	23
2.4.2.1	Conventional Differential Detection for MDPSK	24
2.4.2.2	Conventional Differential Detection for MDAPSK	24
I	Noncoherent Receivers for Frequency-Nonselective Channels	27
3	Overview (Part I)	29
4	Multiple-Symbol Detection (MSD)	33
4.1	Derivation of the MSD Metric	33

4.2	MSD for MDPSK Signals	36
4.2.1	AWGN Channel ($f_D = 0$)	38
4.2.2	Rayleigh Fading Channel	39
4.2.3	Ricean Fading Channel with $N = 2$	40
4.2.4	Final Remarks	40
4.3	MSD for MDAPSK Signals	41
4.3.1	Phase-Noncoherent Metric	41
4.3.2	Phase- and Amplitude-Noncoherent Metric	43
5	Decision-Feedback Differential Detection (DF-DD) Based on MSD	45
5.1	MSD-Based DF-DD for MDPSK	46
5.1.1	DF-DD Decision Rule	46
5.1.1.1	General Ricean Fading	46
5.1.1.2	AWGN Channel ($f_D = 0$)	46
5.1.1.3	Rayleigh Fading Channel	48
5.1.1.4	Ricean Fading Channel with $N = 2$ ($f_D = 0$)	48
5.1.1.5	Slow Ricean Fading Channel ($f_D = 0$, $B_h = 0$)	49
5.1.1.6	Approximations for General Ricean Fading	50
5.1.2	BER Analysis for QDPSK and Genie-Aided DF-DD	50
5.1.2.1	AWGN Channel ($f_D = 0$, $\Delta f = 0$)	52
5.1.2.2	Rayleigh Fading Channel ($\Delta f = 0$)	53
5.1.2.3	Numerical Results	53
5.1.3	Simulation Results	56
5.2	MSD-Based DF-DD for MDAPSK	58
5.2.1	Phase-Noncoherent DF-DD	58
5.2.1.1	Nonrecursive DF-DD	58
5.2.1.2	Recursive DF-DD	60
5.2.1.3	Optimum Ring Ratio for 16DAPSK	60
5.2.2	Phase- and Amplitude-Noncoherent DF-DD	61
5.2.2.1	Nonrecursive DF-DD	62

5.2.2.2	Recursive DF-DD	64
5.2.2.3	Optimum Ring Ratio for 16DAPSK	65
5.2.3	Simulation Results and Comparison with a Previously Proposed DF-DD Scheme	65
5.3	Chapter Summary and Final Remarks	70
6	DF-DD Based on Linear Prediction	71
6.1	General Concept	72
6.2	Receiver Optimization	73
6.2.1	Decision Rule for MDPSK	73
6.2.2	Decision Rule for MDAPSK	75
6.3	Comparison with MSD-Based DF-DD for MDPSK	78
6.4	BER Analysis for Genie-Aided DF-DD	81
6.4.1	BER for QDPSK	81
6.4.1.1	Influence of Frequency Offset Δf on BER	81
6.4.1.2	Alternative Expression for BER for Rayleigh Fading	82
6.4.1.3	Limiting Performance for $N \rightarrow \infty$	83
6.4.1.4	Numerical Results	87
6.4.2	BER for 16DAPSK	88
6.4.2.1	Influence of Frequency Offset Δf on BER	89
6.4.2.2	Optimum Thresholds for Amplitude Decision	90
6.4.2.3	Optimum Ring Ratio	91
6.4.2.4	Numerical Results	92
6.5	Adaptation of the Predictor Coefficients	93
6.5.1	RLS Algorithm	93
6.5.2	Convergence Behaviour	95
6.5.3	Influence of Forgetting Factor w	97
6.6	Simulation Results	98
6.6.1	QDPSK Transmission	98
6.6.2	16DAPSK Transmission	103
6.7	Chapter Summary and Final Remarks	105

7 DF-DD for MDPSK Based on Nonlinear Noise Prediction	107
7.1 General Concept	107
7.2 Receiver Structure	108
7.3 Statistical Properties of the Effective Noise $z[\cdot]$	109
7.4 Receiver with Nonlinear FIR NPEF	110
7.4.1 Derivation of the Optimum FIR Filter	110
7.4.2 ACF and PACF of $e[\cdot]$	113
7.4.3 DDFSE and DFE	114
7.5 Receiver with Nonlinear IIR NPEF	118
7.5.1 Derivation of the Optimum IIR Filter	118
7.5.2 ACF and PACF of $e[\cdot]$	119
7.5.3 DDFSE and DFE	121
7.6 Receiver Performance under Frequency–Nonselective Fading	123
7.7 Simulation Results	124
7.8 Chapter Summary and Final Remarks	130
8 Conclusions (Part I)	131
 II Noncoherent Receivers for Frequency–Selective Channels	 133
9 Overview (Part II)	135
10 Noncoherent Sequence Estimation (NSE)	137
10.1 Algorithms for Noncoherent Sequence Estimation	138
10.1.1 NSE after Differential Demodulation	138
10.1.2 Optimum Noncoherent Sequence Estimation	140
10.1.3 NSE Using Multiple–Symbol Observations	142
10.1.4 NSE Using Maximally Overlapped Observations	145
10.1.4.1 Nonrecursive Amplitude and Phase Reference Symbol	145
10.1.4.2 Recursive Amplitude and Phase Reference Symbol	147
10.1.5 NSE Proposed by Colavolpe and Raheli	148

10.1.5.1	Nonrecursive Phase Reference Symbol	148
10.1.5.2	Recursive Phase Reference Symbol	149
10.1.6	Comparison of the Considered NSE Schemes	149
10.2	Algorithms for Noncoherent Channel Estimation	152
10.2.1	Receiver Structure	153
10.2.2	Noncoherent LMS Algorithm	154
10.2.2.1	Derivation of the NLMS Algorithm	154
10.2.2.2	Absolute Minimum of $J_{\text{NLMS}}(\hat{\mathbf{h}}[k])$	156
10.2.2.3	Performance for $N_{\text{NAA}} \rightarrow \infty$	157
10.2.2.4	Influence of Phase Shift and Frequency Offset	157
10.2.3	Noncoherent RLS Algorithm	158
10.2.4	Convergence of NLMS and NRLS Algorithm	160
10.2.5	Simulation Results	161
10.3	Chapter Summary and Final Remarks	166
11	Noncoherent Decision-Feedback Equalization (NDFE)	167
11.1	Preliminaries	167
11.2	NDFE Receiver Structure and Filter Adjustment	168
11.2.1	Receiver Structure	168
11.2.2	Filter Adjustment	171
11.3	Limiting Performance for $N \rightarrow \infty$	174
11.3.1	Steady-State Solution for the FF and FB Filters	174
11.3.2	NDFE Decision Rule for $N \rightarrow \infty$	176
11.4	Suboptimum NDFE	176
11.5	Special Case: Noncoherent Linear Equalization	177
11.6	Filter Adaptation	179
11.6.1	NLMS Algorithm	179
11.6.2	NRLS Algorithm	180
11.6.3	Convergence of the Noncoherent Adaptive Algorithms	183
11.7	Simulation Results	184
11.8	Chapter Summary and Final Remarks	188

12 Noncoherent Linear Equalization (NLE)	189
12.1 Receiver Structure	189
12.1.1 Linear Equalizer Filter	189
12.1.2 DF-DD for MDPSK	190
12.1.3 DF-DD for MDAPSK	191
12.2 Noncoherent Minimum ISI Equalization (NMIE)	193
12.2.1 NMIE with Fixed Equalizer Coefficients	193
12.2.1.1 Noncoherent Cost Function	193
12.2.1.2 Stationary Points of the Cost Function	196
12.2.1.3 Infinite-Length Equalizer	197
12.2.1.4 Performance for $N \rightarrow \infty$	198
12.2.2 Adaptive Algorithms for Adjustment of the Equalizer Coefficients	199
12.2.2.1 NLMS Algorithm	199
12.2.2.2 NRLS Algorithm	200
12.2.2.3 Stationary Points of the Adaptive Algorithms	201
12.2.2.4 Stability Analysis of the NLMS Algorithm	203
12.2.2.5 Speed of Convergence of the Noncoherent Adaptive Algorithms	205
12.2.3 Simulation Results	208
12.3 Noncoherent MMSE Equalization for MDPSK	212
12.3.1 NLME for Fixed Equalizer Coefficients	212
12.3.2 Adaptive Algorithms for Equalizer Adjustment	212
12.3.2.1 NLMS Algorithm	213
12.3.2.2 NRLS Algorithm	213
12.3.2.3 Speed of Convergence of the Adaptive Algorithms	214
12.3.3 Performance for $N \rightarrow \infty$ and $\alpha \rightarrow 1$	215
12.3.3.1 Steady-State Solution of the Adaptive Algorithms	216
12.3.3.2 Optimum Solution	217
12.3.3.3 Minimum Error Variance and SNR	217
12.3.4 Simulation Results and Comparison with NMIE	218

12.4 NLME for MDPSK Signals	222
12.4.1 Equalizer Adaptation	222
12.4.2 Simulation Results	223
12.5 Chapter Summary and Final Remarks	223
13 Conclusions (Part II)	225
Appendix	227
A BER Analysis for Genie-Aided DF-DD	227
A.1 $\pi/4$ -QDPSK Modulation	227
A.2 16DPSK Modulation	229
A.2.1 Phase Decision	229
A.2.2 Amplitude Decision	231
B Proofs	235
B.1 Eq. (6.33)	235
B.2 Eq. (6.45)	235
B.3 Eq. (6.49)	236
B.4 Eq. (7.34)	238
B.5 Eq. (11.50)	239
C Calculation of the Optimum FIR and IIR Noise Prediction-Error Filter Coefficients	241
C.1 Optimum FIR Filter Coefficients	241
C.2 Alternative Derivation of the Optimum IIR Filter Coefficients	243
D Stationary Points of the NMIE Cost Function	245
Glossary	247
Bibliography	255

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen	9
2.1	Zeitkontinuierliches Übertragungsmodell	9
2.2	Modulation und differentielle Vorcodierung	11
2.2	MDPSK-Modulation	12
2.2	MDAPSK-Modulation	13
2.3	Zeitdiskretes Kanalmodell	14
2.3.1	Frequenznichtselektiver Kanal	16
2.3.2	Frequenzselektiver Kanal	19
2.3.2.1	Zeitvarianter Kanal	19
2.3.2.2	Zeitinvarianter Kanal	20
2.4	Konventionelle Empfänger für MDPSK und MDAPSK	21
2.4.1	Kohärente Empfänger	21
2.4.2	Inkohärente Empfänger	23
2.4.2.1	Konventionelle differentielle Detektion für MDPSK	24
2.4.2.2	Konventionelle differentielle Detektion für MDAPSK	24
I	Inkohärente Empfänger für frequenznichtselektive Kanäle	29
3	Überblick (Teil I)	29
4	Multiple-Symbol-Detektion (MSD)	33
4.1	Ableitung der MSD-Metrik	33
4.2	MSD für MDPSK-Signale	36
4.2.1	AWGN-Kanal ($f_D = 0$)	38
4.2.2	Rayleigh-Fading-Kanal	39
4.2.3	Rice-Fading-Kanal mit $N = 2$	40
4.2.4	Abschließende Bemerkungen	40

4.3	MSD für MDAPSK-Signale	41
4.3.1	Phaseninkohärente Metrik	41
4.3.2	Phasen- und amplitudeninkohärente Metrik	43
5	Entscheidungsrückgekoppelte Detektion (DF-DD) basierend auf MSD	45
5.1	Entscheidungsrückgekoppelte Detektion basierend auf MSD für MDPSK	46
5.1.1	DF-DD Entscheidungsregel	46
5.1.1.1	Allgemeines Rice-Fading	46
5.1.1.2	AWGN-Kanal ($f_D = 0$)	46
5.1.1.3	Rayleigh-Fading-Kanal	48
5.1.1.4	Rice-Fading-Kanal mit $N = 2$	48
5.1.1.5	Langsamer Rice-Fading-Kanal ($f_D = 0$, $B_h = 0$)	49
5.1.1.6	Näherungen für allgemeines Rice-Fading	50
5.1.2	BER-Analyse für QDPSK und geniusunterstützte DF-DD	50
5.1.2.1	AWGN-Kanal	52
5.1.2.2	Rayleigh-Fading-Kanal	53
5.1.2.3	Numerische Ergebnisse	53
5.1.3	Simulationsergebnisse	56
5.2	Entscheidungsrückgekoppelte Detektion basierend auf MSD für MDAPSK	58
5.2.1	Phaseninkohärente DF-DD	58
5.2.1.1	Nichtrekursive DF-DD	58
5.2.1.2	Rekursive DF-DD	60
5.2.1.3	Optimales Ringverhältnis für 16DAPSK	60
5.2.2	Phasen- und amplitudeninkohärente DF-DD	61
5.2.2.1	Nichtrekursive DF-DD	62
5.2.2.2	Rekursive DF-DD	64
5.2.2.3	Optimales Ringverhältnis für 16DAPSK	65
5.2.3	Simulationsergebnisse und Vergleich mit bekannten DF-DD-Verfahren	65
5.3	Kapitelzusammenfassung und abschließende Bemerkungen	70

6	DF–DD basierend auf linearer Prädiktion	71
6.1	Allgemeines Konzept	72
6.2	Empfängeroptimierung	73
6.2.1	Entscheidungsregel für MDPSK	73
6.2.2	Entscheidungsregel für MDAPSK	75
6.3	Vergleich mit MSD–basierter DF–DD für MDPSK	78
6.4	BER–Analyse für geniusunterstützte DF–DD	81
6.4.1	BER für QDPSK	81
6.4.1.1	Einfluss des Frequenzoffsets Δf auf BER	81
6.4.1.2	Alternativer Ausdruck für BER bei Rayleigh–Fading	82
6.4.1.3	Leistungsfähigkeit im Grenzfall $N \rightarrow \infty$	83
6.4.1.4	Numerische Ergebnisse	87
6.4.2	BER für 16DAPSK	88
6.4.2.1	Einfluss des Frequenzoffsets Δf auf BER	89
6.4.2.2	Optimale Schwelle für Amplitudenentscheidung	90
6.4.2.3	Optimales Amplitudenringverhältnis	91
6.4.2.4	Numerische Ergebnisse	92
6.5	Adaption der Prädiktorkoeffizienten	93
6.5.1	RLS–Algorithmus	93
6.5.2	Konvergenzverhalten	95
6.5.3	Einfluss des Vergessensfaktors w	97
6.6	Simulationsergebnisse	98
6.6.1	QDPSK–Übertragung	98
6.6.2	16DAPSK–Übertragung	103
6.7	Kapitelzusammenfassung und abschließende Bemerkungen	105
7	DF–DD für MDPSK basierend auf nichtlinearer Rauschprädiktion	107
7.1	Allgemeines Konzept	107
7.2	Empfängerstruktur	108
7.3	Statistische Eigenschaften des effektiven Rauschens $z[\cdot]$	109

7.4	Empfänger mit FIR-Rauschprädiktionsfehlerfilter	110
7.4.1	Herleitung des optimalen FIR-Filters	110
7.4.2	ACF und PACF von $e[\cdot]$	113
7.4.3	DDFSE und DFE	114
7.5	Empfänger mit IIR Rauschprädiktionsfehlerfilter	118
7.5.1	Herleitung des optimalen IIR-Filters	118
7.5.2	ACF und PACF von $e[\cdot]$	119
7.5.3	DDFSE und DFE	121
7.6	Empfängerleistungsfähigkeit für frequenznichtselektives Fading	123
7.7	Simulationsergebnisse	124
7.8	Kapitelzusammenfassung und abschließende Bemerkungen	130
8	Schlussfolgerungen (Teil I)	131
II	Inkohärente Empfänger für frequenzselektive Kanäle	135
9	Überblick (Teil II)	135
10	Inkohärente Sequenzschätzung (NSE)	137
10.1	Algorithmen zur inkohärenten Sequenzschätzung	138
10.1.1	NSE nach differentieller Demodulation	138
10.1.2	Optimale inkohärente Sequenzschätzung	140
10.1.3	NSE mit Beobachtung mehrerer Symbole	142
10.1.4	NSE mit maximal überlappenden Beobachtungen	145
10.1.4.1	Nichtrekursives Amplituden- und Phasenreferenzsymbol	145
10.1.4.2	Rekursives Amplituden- und Phasenreferenzsymbol	147
10.1.5	NSE nach Colavolpe und Raheli	148
10.1.5.1	Nichtrekursives Phasenreferenzsymbol	148
10.1.5.2	Rekursives Phasenreferenzsymbol	149
10.1.6	Vergleich der betrachteten NSE-Verfahren	149
10.2	Algorithmen zur inkohärenten Kanalschätzung	152

10.2.1	Empfängerstruktur	153
10.2.2	Inkohärenter LMS-Algorithmus	154
10.2.2.1	Herleitung des NLMS-Algorithmus	154
10.2.2.2	Absolutes Minimum von $J_{\text{NLMS}}(\hat{\mathbf{h}}[k])$	156
10.2.2.3	Leistungsfähigkeit für $N_{\text{NAA}} \rightarrow \infty$	157
10.2.2.4	Einfluss von Phasendrehung und Frequenzoffset	157
10.2.3	Inkohärenter RLS-Algorithmus	158
10.2.4	Konvergenz des NLMS- und NRLS-Algorithmus	160
10.2.5	Simulationsergebnisse	161
10.3	Kapitelzusammenfassung und abschließende Bemerkungen	166
11	Inkohärente entscheidungsrückgekoppelte Entzerrung (NDFE)	167
11.1	Vorbemerkungen	167
11.2	Empfängerstruktur und Filtereinstellung für NDFE	168
11.2.1	Empfängerstruktur	168
11.2.2	Filtereinstellung	171
11.3	Leistungsfähigkeit im Grenzfall $N \rightarrow \infty$	174
11.3.1	Lösung für FF- und FB-Filter im stationären Zustand	174
11.3.2	NDFE-Entscheidungsregel für $N \rightarrow \infty$	176
11.4	Suboptimale NDFE	176
11.5	Spezialfall: Inkohärente lineare Entzerrung	177
11.6	Filteradaption	179
11.6.1	NLMS-Algorithmus	179
11.6.2	NRLS-Algorithmus	180
11.6.3	Konvergenz der inkohärenten adaptiven Algorithmen	183
11.7	Simulationsergebnisse	184
11.8	Kapitelzusammenfassung und abschließende Bemerkungen	188
12	Inkohärente lineare Entzerrung (NLE)	189
12.1	Empfängerstruktur	189

12.1.1	Lineares Entzerrerfilter	189
12.1.2	DF-DD für MDPSK	190
12.1.3	DF-DD für MDAPSK	191
12.2	Inkohärente Minimum-ISI-Entzerrung (NMIE)	193
12.2.1	NMIE mit festen Entzerrerkoeffizienten	193
12.2.1.1	Inkohärente Kostenfunktion	193
12.2.1.2	Stationäre Punkte der Kostenfunktion	196
12.2.1.3	Entzerrer unendlicher Länge	197
12.2.1.4	Leistungsfähigkeit für $N \rightarrow \infty$	198
12.2.2	Adaptive Algorithmen zur Einstellung der Entzerrerkoeffizienten	199
12.2.2.1	NLMS-Algorithmus	199
12.2.2.2	NRLS-Algorithmus	200
12.2.2.3	Stationäre Punkte der adaptiven Algorithmen	201
12.2.2.4	Stabilitätsanalyse des NLMS-Algorithmus	203
12.2.2.5	Konvergenzgeschwindigkeit der inkohärenten adaptiven Algorithmen	205
12.2.3	Simulationsergebnisse	208
12.3	Inkohärente MMSE-Entzerrung für MDPSK	212
12.3.1	NLME für feste Entzerrerkoeffizienten	212
12.3.2	Adaptive Algorithmen zur Entzerrereinstellung	212
12.3.2.1	NLMS-Algorithmus	213
12.3.2.2	NRLS-Algorithmus	213
12.3.2.3	Konvergenzgeschwindigkeit der adaptiven Algorithmen	214
12.3.3	Leistungsfähigkeit für $N \rightarrow \infty$ und $\alpha \rightarrow 1$	215
12.3.3.1	Stationäre Lösung der adaptiven Algorithmen	216
12.3.3.2	Optimale Lösung	217
12.3.3.3	Minimale Fehlervarianz und SNR	217
12.3.4	Simulationsergebnisse und Vergleich mit NMIE	218
12.4	NLME für MDAPSK-Signale	222
12.4.1	Entzerreradaptation	222
12.4.2	Simulationsergebnisse	223
12.5	Kapitelzusammenfassung und abschließende Bemerkungen	223

13 Schlußfolgerungen (Teil II)	225
Anhang	227
A BER-Analyse für geniusunterstützte DF-DD	227
A.1 $\pi/4$ -QDPSK-Modulation	227
A.2 16DAPSK-Modulation	229
A.2.1 Phasenentscheidung	229
A.2.2 Amplitudenentscheidung	231
B Beweise	235
B.1 Gl. (6.33)	235
B.2 Gl. (6.45)	235
B.3 Gl. (6.49)	236
B.4 Gl. (7.34)	238
B.5 Gl. (11.50)	239
C Berechnung der optimalen FIR- und IIR-Rauschprädiktionsfehlerfilterkoeffizienten	241
C.1 Optimale FIR-Filterkoeffizienten	241
C.2 Alternative Herleitung der optimalen IIR-Filterkoeffizienten	243
D Stationäre Punkte der NMIE-Kostenfunktion	245
Glossar	247
Literaturverzeichnis	255