

Interference Cancellation for Single Carrier Transmission Systems

Interferenzunterdrückung für Einträger-Übertragungssysteme

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

DOKTOR-INGENIEUR

vorgelegt von

PATRICK-FELIX NICKEL

Erlangen – 2008

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

Tag der Einreichung: 26. Juni 2008

Tag der Promotion: 06. Oktober 2008

Dekan: Prof. Dr.-Ing. Johannes Huber

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Koch

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Joachim Hagenauer

Priv.-Doz. Dr.-Ing. Wolfgang Gerstaecker

Erlanger Berichte aus Informations- und Kommunikationstechnik

Band 20

Patrick-Felix Nickel

**Interference Cancellation for
Single Carrier Transmission Systems**

Interferenzunterdrückung für Einträger–Übertragungssysteme

D 29 (Diss. Universität Erlangen-Nürnberg)

Shaker Verlag
Aachen 2008

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Erlangen-Nürnberg, Univ., Diss., 2008

Copyright Shaker Verlag 2008

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-7824-3

ISSN 1619-8506

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Danksagung

(Acknowledgements)

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Koch, der diese Arbeit nicht nur grundsätzlich ermöglicht hat, sondern auch die Entwicklung meiner Arbeit stets konstruktiv begleitete. Mein Dank gilt der offenen und persönlichen Zusammenarbeit ebenso wie den hilfreichen Gesprächen und fruchtbaren Ideen.

Besonders danke ich Herrn Dr.-Ing. Wolfgang Gerstacker für die umfassende wissenschaftliche Betreuung und stetige Unterstützung meiner Arbeit. Sein umfangreiches Wissen, seine große Erfahrung im Bereich der Entzerrung sowie seine wissenschaftlich fundierte Vorgehensweise haben wesentlich zur Erlangung meiner Forschungsergebnisse beigetragen. Ich danke ihm für sein Engagement, die vielen wertvollen Diskussionen und die produktive Zusammenarbeit.

Ich danke Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Joachim Hagenauer für das meiner Arbeit entgegengebrachte Interesse, insbesondere für die Übernahme der Begutachtung.

Des Weiteren danke ich allen Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl für Mobilkommunikation, sowie dem gesamten Laboratorium für Nachrichtentechnik der Universität Erlangen für die stets freundliche und angenehme Arbeitsatmosphäre.

Meinen Eltern danke ich für die Ermöglichung meines Werdegangs und für ihre Unterstützung während der gesamten Zeit, meinem Bruder Dominik für den dauerhaften Ansporn und Austausch.

Ein ganz besonderer Dank gebührt meiner Freundin Mareike für ihr Verständnis, ihre Unterstützung und ihre Rücksichtnahme in den vergangenen Jahren.

Contents

1	Introduction and Outline	1
	Introduction and Abstract (German)	5
2	System Model of Single Carrier Transmission over Frequency-Selective Channels	7
2.1	Transmitter Structure	8
2.1.1	Forward Error Correction (FEC)	8
2.1.2	Modulation	13
2.2	Channel Model	15
2.2.1	Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) Channel Model	17
2.2.2	Multiple-Input Single-Output (MISO) Channel Model	19
2.2.3	Fading Intersymbol Interference (ISI) Channel	20
2.2.4	Radio Propagation	32
2.3	Receiver Structure	33
2.3.1	Receiver Input Filter and Sampling	34
2.3.2	Equalization and Decoding	37
2.3.3	Synchronization and Channel Estimation	38
2.4	GSM/ EDGE Simulation Parameters	39
2.4.1	Network Structure	39
2.4.2	Packet-Data Transmit Structure	40
2.4.3	Channel Generation	45
2.4.4	Performance Measurement	47
3	Separate Detection and Decoding	49
3.1	Maximum-Likelihood (ML) Detection	50
3.1.1	Matched Filter Bound	51
3.2	Linear Equalization	55

3.2.1	Linear ZF Equalization	55
3.2.2	Linear MMSE Equalization	56
3.3	Trellis-Based Detection	58
3.3.1	Maximum-Likelihood Sequence Estimation (MLSE)	58
3.3.2	Decision-Feedback Equalization (DFE)	62
3.3.3	Delayed Decision-Feedback Sequence Estimation (DDFSE)	64
3.3.4	Reduced-State Sequence Estimation (RSSE)	64
3.3.5	T-Algorithm	67
3.3.6	Error Probability	67
3.4	Sequential Detection	68
3.4.1	Fano Algorithm	70
3.4.2	Stack Algorithm	72
3.4.3	M-Algorithm	72
3.4.4	Generalized Viterbi Algorithm	74
3.4.5	Cutoff Rate	74
3.5	Soft-Output Equalization	75
3.6	Prefiltering	78
3.6.1	Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) Channel	79
3.6.2	Multiple-Input Single-Output (MISO) Channel	79
3.7	Channel Estimation	86
3.7.1	Joint Channel Estimation and Detection	87
3.7.2	Training Sequence based Channel Estimation	89
3.8	Application Case: MIMO Transmission for GSM/ EDGE	94
3.8.1	Equalization	94
3.8.2	Matched Filter Bound including Channel Estimation	96
3.8.3	Simulation Results	99
3.9	Summary	101
4	Iterative Detection and Decoding	105
4.1	Soft-Input Soft-Output Symbol Estimation	107
4.1.1	BCJR Algorithm	108
4.1.2	Soft-Input Soft-Output Decoding of Convolutional Codes	112
4.1.3	Soft-Input Soft-Output Equalization	117
4.1.4	Reduced-Complexity Soft-Input Soft-Output Equalization	121
4.1.5	Iterative Soft-Output Detection with Soft ISI Cancellation	122

4.2	Turbo Equalization	124
4.2.1	Interleaving	126
4.2.2	Precoding	127
4.2.3	Extrinsic Information Transfer (EXIT) Charts	128
4.2.4	Simulation Results for Single User Receiver	133
4.3	Summary	139
5	Interference Cancellation	141
5.1	Linear Interference Suppression	144
5.2	Multiple Antenna Interference Cancellation applying Joint Detection of Desired User and Interferer	148
5.2.1	Threshold Computation for the T-Algorithm	148
5.2.2	Simulation Results	151
5.3	Single Antenna Interference Cancellation (SAIC) applying Joint Detection of Desired User and Interferer	156
5.3.1	Reduced-State Detection for SAIC	156
5.3.2	Improved Reduced-State Detection by Application of Generalized (List) Viterbi Algorithm	161
5.4	Iterative SAIC (Turbo Equalization)	166
5.4.1	Transmission Schemes and Receiver Structure	167
5.4.2	Extrinsic Information Transfer (EXIT) Charts for Multiuser Equalizers	173
5.4.3	Channel Estimation	179
5.4.4	Improved Iterative SAIC	181
5.4.5	Iterative Soft-Output Detection with Soft ISI Cancellation	185
5.5	Summary	186
6	Information Theoretical Considerations	189
6.1	Information Rate Computation	189
6.1.1	System Model	190
6.1.2	Receiver Types	190
6.1.3	Capacity Evaluation	191
6.2	Receiver Models and Receive Scenarios	193
6.3	Computation Methods	195
6.3.1	Channel Modification	195
6.3.2	State Reduction with Selective Survivor Tracking	196
6.3.3	Receive Signal pdf Calculation	196

6.4	Outage Capacity	196
6.5	Simulation Results	197
6.6	Network Capacity Improvements by SAIC	201
6.7	Summary	206
7	Conclusions	207
A	Notation and Abbreviations	209
B	FIR MMSE–DFE Prefilter	219
	Bibliography	225

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Übersicht	1
	Einleitung und Zusammenfassung (Deutsch)	5
2	Systemmodell der Einträgerübertragung über frequenzselektive Kanäle	7
2.1	Senderaufbau	8
2.1.1	Vorwärtsfehlerkorrektur	8
2.1.2	Modulation	13
2.2	Kanalmodell	15
2.2.1	Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) Kanalmodell	17
2.2.2	Multiple-Input Single-Output (MISO) Kanalmodell	19
2.2.3	Frequenzselektiver Schwundkanal	20
2.2.4	Funkausbreitung	32
2.3	Empfängerstruktur	33
2.3.1	Empfängereingangsfiler und Abtastung	34
2.3.2	Entzerrung und Decodierung	37
2.3.3	Synchronisation und Kanalschätzung	38
2.4	GSM/ EDGE Simulationsparameter	39
2.4.1	Netzstruktur	39
2.4.2	Paketdaten Sendestruktur	40
2.4.3	Kanalgenerierung	45
2.4.4	Bestimmung der Leistungsfähigkeit	47
3	Separate Detektion und Decodierung	49
3.1	Maximum-Likelihood (ML) Detektion	50
3.1.1	Matched Filter Fehlerschranke	51
3.2	Lineare Entzerrung	55

3.2.1	Lineare ZF Entzerrung	55
3.2.2	Lineare MMSE Entzerrung	56
3.3	Trellisbasierte Detektion	58
3.3.1	Maximum–Likelihood Sequenzschätzung (MLSE)	58
3.3.2	Decision–Feedback Equalization (DFE)	62
3.3.3	Delayed Decision–Feedback Sequence Estimation (DDFSE)	64
3.3.4	Reduced–State Sequence Estimation (RSSE)	64
3.3.5	T–Algorithmus	67
3.3.6	Fehlerwahrscheinlichkeit	67
3.4	Sequentielle Detektion	68
3.4.1	Fano Algorithmus	70
3.4.2	Stack Algorithmus	72
3.4.3	M–Algorithmus	72
3.4.4	Generalized Viterbi Algorithm	74
3.4.5	Cutoff Rate	74
3.5	Soft–Output Entzerrung	75
3.6	Vorfilterung	78
3.6.1	Multiple–Input Multiple–Output (MIMO) Kanal	79
3.6.2	Multiple–Input Single–Output (MISO) Kanal	79
3.7	Kanalschätzung	86
3.7.1	Gemeinsame Kanalschätzung und Detektion	87
3.7.2	Trainingssequenzbasierte Kanalschätzung	89
3.8	Anwendungsfall: MIMO Übertragung bei GSM/ EDGE	94
3.8.1	Entzerrung	94
3.8.2	Matched Filter Fehlerschranke inklusive Kanalschätzung	96
3.8.3	Simulationsergebnisse	99
3.9	Zusammenfassung	101
4	Iterative Detektion und Decodierung	105
4.1	Soft–Input Soft–Output Symbolschätzung	107
4.1.1	BCJR Algorithmus	108
4.1.2	Soft–Input Soft–Output Decodierung von Faltungscodes	112
4.1.3	Soft–Input Soft–Output Entzerrung	117
4.1.4	Komplexitätsreduzierte Soft–Input Soft–Output Entzerrung	121
4.1.5	Iterative Soft–Output Detektion mit Soft ISI Unterdrückung	122

4.2	Turbo Entzerrung	124
4.2.1	Interleaving	126
4.2.2	Vorcodierung	127
4.2.3	Extrinsic Information Transfer (EXIT) Charts	128
4.2.4	Simulationsergebnisse für Einnutzerempfänger	133
4.3	Zusammenfassung	139
5	Interferenzunterdrückung	141
5.1	Lineare Interferenzunterdrückung	144
5.2	Multiple Antenna Interference Cancellation durch gemeinsame Detektion von Nutzer und Störer	148
5.2.1	Schwellwertberechnung für den T-Algorithmus	148
5.2.2	Simulationsergebnisse	151
5.3	Single Antenna Interference Cancellation (SAIC) durch gemeinsame Detektion von Nutzer und Störer	156
5.3.1	Zustandsreduzierte Detektion für SAIC	156
5.3.2	Verbesserte zustandsreduzierte Detektion durch Einsatz des Generalized (List) Viterbi Algorithmus'	161
5.4	Iterative SAIC (Turbo Entzerrung)	166
5.4.1	Übertragungsschemata and Empfängeraufbau	167
5.4.2	Extrinsic Information Transfer (EXIT) Charts für Mehrnutzerentzerrer	173
5.4.3	Kanalschätzung	179
5.4.4	Verbesserte iterative SAIC	181
5.4.5	Iterative Soft-Output Detektion mit Soft ISI Unterdrückung	185
5.5	Zusammenfassung	186
6	Informationstheoretische Betrachtungen	189
6.1	Informationsratenberechnung	189
6.1.1	Systemmodell	190
6.1.2	Empfängertypen	190
6.1.3	Kapazitätsberechnung	191
6.2	Empfängermodelle und Empfangsszenarien	193
6.3	Berechnungsmethoden	195
6.3.1	Kanalmodifikation	195
6.3.2	Zustandsreduktion mit selektiver Pfadverfolgung	196
6.3.3	Berechnung der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion des Empfangssignals	196

6.4	Ausfallkapazität	196
6.5	Simulationsergebnisse	197
6.6	Netzkapazitätsverbesserungen durch SAIC	201
6.7	Zusammenfassung	206
7	Zusammenfassung	207
A	Notation und Abkürzungen	209
B	FIR MMSE–DFE Vorwärtsfilter	219
	Literaturverzeichnis	225