

**Adaptiver Interleave-Divison Mehrfachzugriff
(IDMA) mit Anwendung in der
Mobilfunkkommunikation**

Dissertation

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

vorgelegt von

Hendrik Schöneich

Kiel 2007

Tag der Einreichung: 11. Juni 2007

Tag der Disputation: 2. November 2007

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Peter Adam Höher
Prof. Dr.-Ing. Martin Bossert
Prof. Dr.-Ing. Volker Kühn

Digital Communications

Hendrik Schöneich

**Adaptiver Interleave-Divison Mehrfachzugriff (IDMA)
mit Anwendung in der Mobilfunkkommunikation**

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.: Kiel, Univ., Diss., 2007

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 978-3-8322-6911-1

ISSN 1860-7535

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

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation und Schwerpunkte dieser Arbeit	1
1.2	Gliederung	3
1.3	Nomenklatur	4
2	Grundlagen	7
2.1	Zuverlässigkeitsmaße am Beispiel des AWGN-Kanals	7
2.2	Kanalkapazität	9
2.3	Fehlerwahrscheinlichkeit	10
2.4	Äquivalentes zeitdiskretes Kanalmodell	11
3	Mehrfachzugriffsverfahren	13
3.1	Code-Division Multiple Access (CDMA)	13
3.1.1	Direct Sequence CDMA (DS-CDMA)	14
3.1.2	Interleave-Division Multiple Access (IDMA)	15
3.2	Mehrfachzugriff und Multiplexing	17
3.3	Mapper-Bank	19
3.3.1	Binäre Modulation und Mapping	19
3.3.2	Layerspezifische Phasendrehung und Scrambling	20
3.4	Erweiterung des Kanalmodells	25
3.4.1	Modellierung der Kanalkoeffizienten	26
3.4.2	Normierung des additiven Rauschens	27

4	Empfängerstrukturen	29
4.1	Optimaler Empfänger	29
4.2	Aufwandsreduzierte sub-optimale Empfänger	31
4.2.1	Kanaldecodierung	32
4.2.2	Multi-Layer Detektion	32
4.2.2.1	Optimale Interferenzunterdrückung	34
4.2.2.2	Gauß'sche Näherung der Rest-Interferenz	36
4.2.2.3	Single Layer Detektion für gedächtnislose Kanäle	37
4.2.2.4	Single Layer Detektion für gedächtnisbehaftete Kanäle	41
4.2.3	Mehrantennensysteme	46
4.2.4	Graphenbasierte Illustration	47
4.3	Zusammenfassung	49
5	Informationstheoretische Betrachtungen	51
5.1	Kapazitätsregion	51
5.2	Gauß'scher Mehrfachzugriffskanal	54
5.3	Systemkapazität	56
5.3.1	Vergleich von TDMA, FDMA und CDMA	56
5.3.2	Vergleich von DS-OCDMA und IDMA	58
5.3.3	Grenzverteilungen der Leistung bei IDMA	61
5.3.4	Einfluss der Leistungsverteilung auf die Systemkapazität von IDMA am Beispiel zweier Nutzer	66
5.3.5	Multi-Layer-IDMA	69
5.4	Systemkapazität mit bipolarer Modulation	70
5.5	Zusammenfassung	73
6	Performanz von IDMA - Analyse und Simulation	75
6.1	Kanalcodierung und Scrambling	76
6.2	Gauß'scher Mehrfachzugriffskanal	77
6.2.1	Ein-/Ausgangsverhalten des MLD	78
6.2.1.1	Verteilung des Ersatzkanalrauschens	78
6.2.1.2	Informationstransfer des MLD	85

6.2.1.3	Verteilungsdichtefunktion der L-Werte am Ausgang des MLD	95
6.2.2	Informationstransfer des Decoders und EXIT-Chart	100
6.2.3	Evolution der L-Wert-Verteilung nach Decodierung	105
6.2.4	Maximale Systemlast	110
6.2.5	Analyse der Bitfehlerwahrscheinlichkeit	114
6.3	Optimierung der Leistungsverteilung	119
6.4	Verallgemeinerung des Kanalmodells	128
6.4.1	Komplexwertiger AWGN-Kanal	129
6.4.1.1	AWGN-Kanal mit optimierten Phasendrehungen	129
6.4.1.2	AWGN mit zufälligen Phasendrehungen	131
6.4.2	Rayleigh-Fading	133
6.4.2.1	Gedächtnislose Kanäle ($L = 0$)	133
6.4.2.2	Gedächtnisbehaftete Kanäle ($L > 0$)	135
6.5	Scrambling	141
6.6	Zusammenfassung	144
7	Adaptive Übertragung	149
7.1	Weiche Adaption	151
7.1.1	Ratenadaption	152
7.1.2	Leistungsadaption	158
7.1.3	Raten- und Leistungsadaption	159
7.2	Zusammenfassung	164
8	Kanalschätzung	165
8.1	Pilot Layer Aided Channel Estimation (PLACE)	166
8.2	Anpassung des Multi-Layer Detektors	168
8.3	Klassifizierung der Kanalschätzung	169
8.4	Pilotlayer	171
8.5	Joint Least-Squares Channel Estimation (JLSCE)	172
8.5.1	Trainingsbasierte Kanalschätzung (tb-LS)	173
8.5.2	Trainingsbasierte Kanalschätzung mit Interferenzunterdrückung (tb-LS-IC)	173

8.5.3	Semi-blinde Kanalschätzung (sb-LS)	174
8.5.4	Vergleich der mittleren quadratischen Fehler	175
8.5.5	Schätzung zeitvarianter Kanäle mittels Fensterung	179
8.6	Joint Minimum Mean Squared Error Channel Estimation (JMMSE-CE)	180
8.7	Numerische Ergebnisse	182
8.8	Zusammenfassung	187
9	Kanalcodierung	189
9.1	Faltungscodes	191
9.2	Anpassung durch irreguläre Codemischung	192
9.3	Anpassung durch Verallgemeinerung des Multi-Layer Detektors	199
9.3.1	Vorformung	199
9.3.2	Realisierungsbeispiel	200
9.4	Zusammenfassung	203
10	Zusammenfassung und Ausblick	205
10.1	Zusammenfassung	205
10.2	Ausblick	211
A	Minimum Mean Squared Error Channel Estimation (MMSE-CE)	213
A.1	Reelles MMSE-Filter	213
A.2	Komplexes MMSE-Filter	214
A.3	Korrelationsmatrizen	215
B	Phasendrehungen minimaler mittlerer Interferenzleistung	219
C	Calculus	221
C.1	Matrix-Inversionslemma	221
C.2	Verteilungsdichtefunktion der Abbildung einer bekannten Verteilungsdichtefunktion	221
C.3	Verteilungsdichtefunktion von Abbildungen multipler Zufallsvariablen	222
C.4	Summe und Differenz der Kapazitätsfunktion	222
C.5	Skalierte Kapazitätsfunktion	223
C.6	Fehlerfunktion	224

D	Statistische Verteilungen	227
D.1	Univariate Gauß-Verteilung	227
D.2	Multivariate Gauß-Verteilung	227
D.3	Sätze	228
E	Abkürzungen	231
F	Symbole	235
	Literaturverzeichnis	237