

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b>	<b>III</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Hintergrund und Zielsetzung . . . . .	1
1.2 Gliederung der Arbeit . . . . .	3
1.3 Notation . . . . .	4
<b>2 Grundlagen</b>	<b>7</b>
2.1 Zeitdiskretes Basisbandmodell für frequenzselektive MIMO- Systeme . . . . .	7
2.2 Sender . . . . .	11
2.2.1 Codierung . . . . .	11
2.2.2 Modulation . . . . .	13
2.2.3 Pilotdaten . . . . .	14
2.2.4 Kenngrößen und statistische Eigenschaften des Sen- designals . . . . .	15
2.3 Kanal . . . . .	16
2.3.1 Stochastische Modellierung des Kanals . . . . .	16
2.3.2 Kanalkapazität . . . . .	20
2.4 Empfänger . . . . .	22
2.4.1 MAP-Kriterium unter Berücksichtigung nicht-idealer Kanalkennntnis . . . . .	22
2.4.2 MAP-Kriterium bei gaußverteilterm Kanal . . . . .	24
2.4.3 Diskussion . . . . .	26
2.5 Zusammenfassung . . . . .	27
<b>3 Pilotdatengestützte Kanalschätzung</b>	<b>29</b>
3.1 Definitionen . . . . .	29
3.2 Deterministische Ansätze: Maximum-Likelihood-Schätzer . . . . .	30

3.3	Bayessche Ansätze für unkorrelierte Block-Rayleigh-Kanäle: Maximum-a-posteriori-Schätzer . . . . .	32
3.4	Bayessche Ansätze für räumlich korrelierte Block-Rayleigh- Kanäle . . . . .	33
3.4.1	MAP-Lösung . . . . .	34
3.4.2	Modifizierte MAP-Lösung . . . . .	36
3.4.3	Nicht-regularisierter Fixpunkt-Algorithmus . . . . .	37
3.4.4	Linear regularisierter Fixpunkt-Algorithmus . . . . .	40
3.4.5	Durch Projektion regularisierter Fixpunkt-Algorithmus . . . . .	41
3.4.6	Linear und durch Projektion regularisierter Fixpunkt- Algorithmus . . . . .	45
3.5	Mehrkanalige Pilotdatensequenzen zur Schätzung frequenz- selektiver MIMO-Kanäle . . . . .	48
3.5.1	Pilotdaten im Zeitmultiplex . . . . .	49
3.5.2	Zadoff-Chu-Sequenzen . . . . .	49
3.5.3	$M$ -Folgen . . . . .	50
3.6	Zusammenfassung . . . . .	51
<b>4</b>	<b>Semiblinde Kanalschätzung</b>	<b>53</b>
4.1	CRLB für semiblinde Kanalschätzung . . . . .	53
4.1.1	Definitionen . . . . .	54
4.1.2	Bestimmung der Fisher-Informationsmatrix und asymptotische Näherungen . . . . .	55
4.1.3	Eingrenzung der SNR-Bereiche für die asymptoti- schen Näherungen . . . . .	56
4.1.4	Beispiel . . . . .	57
4.2	Semiblinde Kanalschätzung auf Basis von Statistik zweiter Ordnung . . . . .	58
4.2.1	Maximum-Likelihood-Ansatz . . . . .	59
4.2.2	Maximum-a-posteriori-Ansatz . . . . .	62
4.2.3	Numerische Ergebnisse . . . . .	63
4.3	Feedback-Methoden . . . . .	64
4.3.1	Semiblinde Kanalschätzung mit Hard Decision Feed- back . . . . .	66
4.3.2	Semiblinde Kanalschätzung mit Soft Decision Feedback . . . . .	67
4.3.3	Feedback-Methoden bei codierter Übertragung . . . . .	73
4.3.4	Numerische Ergebnisse . . . . .	78
4.4	Trellis-basierte Verfahren . . . . .	82
4.4.1	Numerische Ergebnisse . . . . .	85
4.5	Zusammenfassung . . . . .	86

<b>5</b>	<b>Blinde Kanalschätzung</b>	<b>89</b>
5.1	Blinde Kanalschätzung auf Basis von Second-Order-Statistics	90
5.1.1	Blind Channel Subspace Estimation . . . . .	90
5.2	Blinde Kanalschätzung auf Basis von Higher-Order-Statistics	95
5.2.1	Vorbetrachtungen . . . . .	96
5.2.2	JADE-Algorithmus . . . . .	100
5.2.3	Numerische Ergebnisse . . . . .	103
5.2.4	Statistische Unabhängigkeit und Codierung . . . . .	103
5.3	Code-basierte blinde Kanalschätzung . . . . .	105
5.3.1	Asymmetrische LDPC-Codes . . . . .	106
5.3.2	Code-basierte blinde Kanalschätzung . . . . .	109
5.3.3	Graphen-basierte Inkohärente LDPC-Decodierung . . . . .	112
5.3.4	Numerische Ergebnisse . . . . .	122
5.4	Zusammenfassung . . . . .	125
<b>6</b>	<b>Gesamtkonzeptionen</b>	<b>127</b>
6.1	Uncodierte Übertragung . . . . .	127
6.1.1	Semiblinder Empfänger . . . . .	127
6.1.2	Blinder Empfänger . . . . .	128
6.1.3	Numerische Ergebnisse . . . . .	130
6.2	Codierte Übertragung . . . . .	131
6.2.1	Semiblinder Empfänger . . . . .	131
6.2.2	Blinder Empfänger . . . . .	132
6.2.3	Numerische Ergebnisse . . . . .	133
6.3	Übertragung über Mehrantennensystem im ISM-Band . . . . .	134
6.3.1	Mehrantennen System zur Übertragung im ISM-Band (MASI) . . . . .	134
6.3.2	Semiblinder Empfänger . . . . .	135
6.3.3	Blinder Empfänger . . . . .	135
6.3.4	Numerische Ergebnisse . . . . .	135
6.4	Zusammenfassung . . . . .	138
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>141</b>
<b>A</b>	<b>Allgemeine Definitionen und Grundlagen</b>	<b>145</b>
A.1	Differentiation . . . . .	145
A.1.1	Wirtinger Kalkül . . . . .	145
A.1.2	Ableitung nach Vektoren . . . . .	145
A.1.3	Ableitung nach Matrizen . . . . .	146
A.1.4	Beispiele . . . . .	146
A.2	Matrix- und Vektor-Normen . . . . .	146
A.2.1	L2-Norm . . . . .	146

A.2.2	Frobenius-Norm . . . . .	147
A.3	Operatoren . . . . .	147
A.3.1	Spur . . . . .	147
A.3.2	Vektor-Operator . . . . .	147
A.3.3	Kronecker-Produkt . . . . .	147
A.3.4	Landau-Symbol . . . . .	148
A.4	Algebraische Funktionen . . . . .	149
A.4.1	Sprungfunktion . . . . .	149
A.4.2	Dirac-Delta-Funktion . . . . .	149
A.5	Sätze der linearen Algebra . . . . .	150
A.5.1	Matrix-Inversionslemma . . . . .	150
A.5.2	Matrix-Identitäten . . . . .	150
A.5.3	Quadratische Ergänzung . . . . .	150
<b>B</b>	<b>Grundlagen der Wahrscheinlichkeitstheorie</b>	<b>151</b>
B.1	Definitionen . . . . .	151
B.1.1	Wahrscheinlichkeit und Verteilungsdichtefunktion . . . . .	151
B.1.2	Verbund-Wahrscheinlichkeit und Verbund-VDF . . . . .	152
B.1.3	Bedingte Wahrscheinlichkeit und bedingte VDF . . . . .	152
B.1.4	Kettenregel . . . . .	152
B.1.5	Statistische Unabhängigkeit . . . . .	153
B.1.6	Bayes-Regel . . . . .	153
B.2	Spezielle Verteilungsdichtefunktionen . . . . .	153
B.2.1	Gleichverteilung . . . . .	153
B.2.2	Komplexe Normalverteilung . . . . .	154
B.2.3	Rayleigh-Verteilung . . . . .	155
B.2.4	Zentrale Chi-Quadrat-Verteilung . . . . .	155
B.3	Momente und Kumulanten . . . . .	155
B.3.1	Charakteristische Funktion . . . . .	155
B.3.2	Zweite Charakteristische Funktion . . . . .	155
B.3.3	Momente . . . . .	156
B.3.4	Kumulanten . . . . .	157
B.3.5	Eigenschaften von Momenten und Kumulanten . . . . .	158
B.3.6	Unabhängigkeit $N$ -ter Ordnung . . . . .	159
<b>C</b>	<b>LDPC-Codes</b>	<b>161</b>
C.1	Einführung . . . . .	161
C.2	Definitionen . . . . .	161
C.3	Grafische Repräsentation . . . . .	163
C.4	Decodierung mittels Sum-Product-Algorithmus . . . . .	164
C.5	Beispiele . . . . .	169

---

C.6	Entwurf von Parity-Check-Matrizen . . . . .	171
C.7	Numerische Ergebnisse . . . . .	174
<b>D</b>	<b>Herleitungen</b>	<b>177</b>
D.1	Kapitel 2 . . . . .	177
D.1.1	Herleitung von Gleichung (2.4.3) . . . . .	177
D.1.2	Herleitung von Gleichung (2.4.5) . . . . .	178
D.2	Kapitel 3 . . . . .	180
D.2.1	Cramer-Rao-Lower-Bound für skalare und vektorielle Schätzprobleme . . . . .	180
D.2.2	Fehleranalyse Fixpunkt . . . . .	183
D.3	Kapitel 4 . . . . .	184
D.3.1	Asymptotische Näherung der FIM bei hohem SNR . . . . .	184
D.3.2	Asymptotische Näherung der FIM bei niedrigem SNR . . . . .	185
D.3.3	Herleitung von Gleichung (4.3.4) . . . . .	186
D.4	Kapitel 5 . . . . .	187
D.4.1	Herleitung von Gleichung (5.3.8) . . . . .	187
<b>E</b>	<b>Verzeichnisse</b>	<b>191</b>
E.1	Symbolverzeichnis . . . . .	191
E.2	Abkürzungsverzeichnis . . . . .	193
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>197</b>
	<b>Stichwortverzeichnis</b>	<b>204</b>