

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Zum Anliegen dieses Buches	1
1.2	Hinweise zur Notation	3
2	Codierung und Modulation	5
2.1	Digitale Nachrichtenquelle	6
2.2	Modulation	8
2.2.1	Modulation mit zeitbegrenzten Signalelementen	12
2.2.2	Digitale Pulsamplitudenmodulation	13
2.3	Codierung	16
2.3.1	Code und Codierung	17
2.3.2	Formen der Redundanzeinbringung	18
2.3.3	Zuordnung	19
2.4	Übertragung	20
2.4.1	Senderausgangsstufe	20
2.4.2	Dämpfung und Verzerrung	23
2.4.3	Störung	23
2.4.4	Zeitkontinuierliches Kanalmodell	23
2.4.5	Empfängereingangsstufe	24
2.5	Demodulation	26
2.5.1	Demodulation mit harter Entscheidung, Detektion	26
2.5.2	Demodulation mit weicher Entscheidung	27
2.5.3	Synchronisation	27
2.5.4	Äquivalente Codierung	28
2.5.4.1	Signalverzerrungen	28
2.5.4.2	Farbiges Rauschen	30
2.5.5	Zeitdiskretes Kanalmodell	32
2.5.5.1	Zeitdiskreter Kanal ohne Gedächtnis	33
2.5.5.2	Digitales Kanalmodell	33
2.6	Decodierung	34
2.6.1	Codesymbolsequenzschätzung	35
2.6.2	Enddecodierung	35
2.7	Zuverlässigkeit eines digitalen Übertragungssystems	36
2.8	Maximum-Likelihood-Sequenz-Schätzung	37
2.8.1	Maximum-a-posteriori- und Maximum-Likelihood-Sequenz-Schätzung	37

2.8.2	Darstellung von Signalen in Signalräumen	38
2.8.3	Optimale Demodulation beim AWGN-Kanal	40
2.8.3.1	Metriken bezüglich der Signalelemente	43
2.8.3.2	Demodulation durch Korrelation	45
2.8.3.3	Entscheidungsgebiete	46
2.8.4	Unionsschranke für die Fehlerwahrscheinlichkeit beim AWGN-Kanal	47
2.8.5	MLSE bei Demodulation mit harter Entscheidung	51
2.8.6	MLSE bei zeitvarianten Kanälen	54
2.9	Informationstheoretische Aspekte der redundanten Kanalcodierung	54
2.9.1	Fehlerexponent	55
2.9.2	Cut-Off-Rate	57
2.9.3	Kanalkapazität	58
2.9.4	Austausch von Leistungs- und Bandbreiteneffizienz	60
3	Trelliscodierung	65
3.1	Gedächtnisstrukturen von Trelliscodern	66
3.2	Trelliscodierung als Markovprozeß	69
3.3	Trellisdiagramm	74
3.3.1	Fehlerereignisse und Distanz	75
3.3.2	Distanzprofil und Symbolfehlerwahrscheinlichkeit	77
3.3.2.1	Produkttrellisdiagramm	77
3.3.2.2	Distanzmatrix und erzeugende Funktion	79
3.3.2.3	Beispiel	83
3.3.3	Bestimmung der minimalen Distanz	84
3.3.3.1	Grenzwert der erzeugenden Funktion	84
3.3.3.2	Test kurzer Fehlerereignisse	84
3.3.3.3	Sequentieller Algorithmus	85
3.4	Mittleres Leistungsspektrum trelliscodierter Signale	87
3.4.1	Trelliscodierung mit gleitendem Fenster	94
3.4.2	Trelliscoder mit wachsendem Fenster	94
3.4.3	Beispiel	96
3.4.4	Periodische Markovketten	98
4	Trellisdecodierung	99
4.1	Kanalmodell für die Decodierung	99
4.2	Sequenz- und Einzelsymbolschätzung	100
4.3	Sequenzschätzverfahren	102
4.3.1	Viterbi-Algorithmus	102
4.3.2	Sequenzschätzung mit Zustandsreduktion	106
4.3.2.1	Trellisdiagramm mit Butterfly-Struktur	106
4.3.2.2	Zustandsreduktion erster Ordnung	107
4.3.2.3	Zustandsreduktion höherer Ordnungen	109
4.3.2.4	Distanzverlust bei RSSE	109
4.3.2.5	Sequenzschätzung mit Entscheidungsrückkopplung	110

4.3.2.6	Wahl der Hyperzustände	112
4.3.2.7	Leistungseffizienz bei RSSE	116
4.3.2.8	Zustandsreduktion bei der Pfadaufspaltung	118
4.3.3	Sequentielle Decodierung	122
4.3.4	Selektionsalgorithmus	124
4.4	Verfahren zur Einzelsymbolschätzung	126
4.4.1	Fortlaufende Einzelsymbolschätzung	127
4.4.2	Einzelsymbolschätzung bei terminiertem Trellisdiagramm	129
4.4.3	Fortlaufende Einzelsymbolschätzung durch empfangsseitige Blockbildung	133
4.5	Zuverlässigkeitsschätzung beim Viterbi-Algorithmus	134
4.5.1	Zuverlässigkeitsschätzung für Binärsymbole	135
4.5.2	Zuverlässigkeit von Zeichen	137
4.5.3	Anmerkungen zur Realisierung	138
5	Trelliscodierte digitale Übertragungsverfahren	141
5.1	Lineare Impulsinterferenzen	141
5.1.1	Interpretation linearer Impulsinterferenzen als Trelliscodierung	143
5.1.1.1	Zeitliche Segmentierung	143
5.1.1.2	Whitened-Matched-Filter	145
5.1.1.3	Spektrale Faktorisierung	154
5.1.2	Distanzeigenschaften	155
5.1.2.1	Minimale Euklidische Distanz	155
5.1.2.2	Distanzprofil	160
5.1.3	Zustandsreduktion	163
5.1.3.1	Detektion mit Entscheidungsrückkopplung und Tomlinson-Harashima-Vorcodierung	164
5.1.3.2	Sequenzschätzung mit Entscheidungsrückkopplung	168
5.1.4	Impulsinterferenzfreie Entzerrung	170
5.1.4.1	Optimales Nyquist-Filter	170
5.1.4.2	Störungsprädiktion	172
5.2	Continuous-Phase-Modulation	176
5.2.1	Das CPM-Signal	176
5.2.2	Interpretation als trelliscodiertes Signal	179
5.2.2.1	Periodische Trelliscodierung	181
5.2.2.2	Zeitinvariante Trelliscodierung	182
5.2.3	Effizienz von CPM-Verfahren	184
5.2.3.1	Leistungseffizienz	184
5.2.3.2	Bandbreiteneffizienz	188
5.2.3.3	Komplexität	190
5.2.4	Aufwandsreduzierte CPM-Empfänger	192
5.2.4.1	Sequenzschätzung mit reduzierter Zustandszahl	193
5.2.4.2	Empfänger mit spektraler Abtastung	193
5.2.4.3	Empfängersynchronisation	198

5.2.5	Codierung für CPM	200
5.2.5.1	CPM mit wechselndem Modulationsindex	200
5.2.5.2	Faltungscodierung für CPM	200
5.2.5.3	Blockcodierung für CPM	201
5.3	Faltungscodierung	204
5.3.1	Einführung in die algebraische Struktur finiter Körper	204
5.3.1.1	Gruppe	205
5.3.1.2	Körper	206
5.3.1.3	Vektorräume, lineare Abbildungen	208
5.3.1.4	Polynomring, Quotientenkörper	209
5.3.2	Lineare dispersive Systeme	210
5.3.2.1	Einfache Scrambler	212
5.3.2.2	Mehrfache Scrambler	213
5.3.3	Faltungscodierung	215
5.3.3.1	Äquivalente Coder	216
5.3.3.2	Systematische Faltungscoder	221
5.3.3.3	Prüfmatrix und dualer Code	221
5.3.4	Distanzeigenschaften von Faltungscodes	222
5.3.5	Gelochte Faltungscodes	226
5.3.5.1	Decodierung gelochter Faltungscodes	227
5.3.5.2	Äquivalenter Code und Distanzeigenschaften	228
5.3.5.3	Ratenkompatibel gelochte Faltungscodes	229
5.4	Trelliscodierte Pulsamplitudenmodulation	231
5.4.1	Digitale Pulsamplitudenmodulation	232
5.4.2	Informationstheoretische Motivation	234
5.4.3	Trelliscodierte PAM mit einfacher Zuordnung	237
5.4.3.1	Codierung für biorthogonale Signalkonstellationen	237
5.4.3.2	Zuordnung durch Partitionierung der Signalmenge	238
5.4.3.3	Codeoptimierung	242
5.4.3.4	Decodierung	245
5.4.3.5	Berechnung der Distanzprofile	247
5.4.4	Trelliscodierung mit mehrfacher Zuordnung	250
5.4.4.1	Lattice-Codes	251
5.4.4.2	Partitionierung des Gitters \mathbf{Z}^4	252
5.4.4.3	Mehrstufigencodierung	253
5.4.4.4	Decodierung	256
5.4.5	Rotationsinvariante Verfahren	259
5.4.6	Zeitvariante Modulation bei PSK	260
6	Vergleich trelliscodierter Übertragungsverfahren	261
6.1	Vergleich von CPM und PAM	261
6.2	Vergleich von CPM und trelliscodierter PAM	264
6.3	Vergleich trelliscodierter QAM-Verfahren	267
6.4	Vergleich anhand der cut-off-Rate	270

Anhang	275
Erzeugende Funktionen der Distanzprofile von Faltungscodes	
A.1 Codes der Rate $R_c = 1/2$	275
A.2 Codes der Rate $R_c = 1/3$	278
A.3 Codes der Rate $R_c = 2/3$ (Gelochte Codes)	280
A.4 Codes der Rate $R_c = 3/4$ (Gelochte Codes)	282
Literaturverzeichnis	285
Sachverzeichnis	303