

Inhaltsverzeichnis

I	Grundlagen	1
1	Einführung	3
1.1	Zum Inhalt dieses Buches	3
1.2	Warum statistische Signalmodelle?	4
1.3	Kurzer historischer Überblick	4
1.4	Modellbildung	6
1.5	Vorkenntnisse	9
1.6	Formelzeichen	10
2	Wahrscheinlichkeit – Zufallsvariablen	13
2.1	Wahrscheinlichkeit	13
2.1.1	Wahrscheinlichkeitsraum	13
2.1.1.1	Ergebnismenge	13
2.1.1.2	Ereignisfeld	14
2.1.1.3	Definition der Wahrscheinlichkeit	16
2.2	Zufallsvariablen	19
2.2.1	Definition	19
2.2.2	Wahrscheinlichkeitsverteilung und Wahrscheinlichkeitsdichte	21
2.2.3	Gemeinsame Wahrscheinlichkeitsverteilung und gemeinsame Wahrscheinlichkeitsdichte	25
2.2.4	Erwartungswert	33
2.2.5	Momente, Korrelation	36
2.2.6	Erzeugende Funktionen	43
2.2.6.1	Momenterzeugende Funktion	43
2.2.6.2	Charakteristische Funktion	44
2.2.6.3	Kumulantenerzeugende Funktion	47
2.2.7	Schätzwert für eine Zufallsvariable	49
3	Zufallsprozesse	52
3.1	Definition und Beispiele	52
3.2	Wahrscheinlichkeitsverteilung und Wahrscheinlichkeitsdichte	56
3.3	Schar- und Zeitmittelwerte	58
3.4	Stationarität	65
3.5	Ergodizität	69
3.6	Korrelation	73

3.6.1	Komplexe Zufallsprozesse	74
3.6.2	Eigenschaften der Autokorrelationsfunktion	74
3.6.3	Eigenschaften der Kreuzkorrelationsfunktion	79
3.6.4	Messung von Korrelationsfunktionen	79
3.6.5	Anwendungen	82
3.7	Spektrale Leistungsdichte	85
3.7.1	Stationäre Zufallsprozesse	86
3.7.2	Instationäre Zufallsprozesse	92
3.8	Spezielle Zufallsprozesse	94
3.8.1	Gaußprozeß	95
3.8.1.1	Gaußdichte	95
3.8.1.2	Zufallsprozeß	100
3.8.2	Poissonprozeß	101
3.8.3	Erlangprozeß	108
3.8.4	Markovketten	110
3.8.5	ARMA-Prozesse	118
3.8.6	Bandbegrenzte Zufallsprozesse	122
4	Transformation von Zufallsprozessen durch Systeme	127
4.1	Begriff des Systems	127
4.2	Einige Begriffe aus der Systemtheorie	128
4.3	Zeitinvariante gedächtnisfreie Systeme	132
4.3.1	Transformation der Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktion	132
4.3.2	Transformation der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion	135
4.3.3	Transformation der Momente	140
4.4	Zeitinvariante lineare dynamische Systeme	141
4.4.1	Transformation des linearen Mittelwertes	142
4.4.2	Transformation der Autokorrelationsfunktion	144
4.4.3	Transformation des Leistungsdichtespektrums	149
4.4.4	Anwendungsbeispiele	153
4.4.4.1	Systemidentifikation	154
4.4.4.2	Formfilter	156
4.5	Äquivalente Verstärkung	166
4.6	Momente höherer Ordnung	171
4.6.1	Korrelationsfunktionen und Leistungsdichtespektren höherer Ordnung	174
4.6.2	Kumulantfunktionen und Kumulantspektren	177
4.6.3	Identifizierung linearer Systeme mit Hilfe von Spektren höherer Ordnung	180

II Anwendungen**187**

5	Optimale Systeme	189
5.1	Klassifizierung von Schätzwerten	189
5.2	Optimierungskriterien	190
6	Linearer Prädiktor	199
6.1	Problemstellung und Voraussetzungen	199
6.2	Normal-Gleichung	200
6.3	Prädiktionsfehler	205
6.4	Rekursive Berechnung der Prädiktorkoeffizienten (Durbin-Algorithmus)	208
6.5	Prädiktion um M Schritte	216
6.6	Rekursion des Prädiktionsfehlers	218
7	Signalangepaßtes Filter	221
7.1	Einführung	221
7.2	Problemstellung	222
7.2.1	Maximierung eines Quotienten	223
7.2.2	Minimierung eines mittleren quadratischen Fehlers	235
7.3	Zeitdiskretes Filter	236
7.4	Eigenschaften des Ausgangssignals eines signalangepaßten Filters . .	239
7.5	Fehlerwahrscheinlichkeit bei binärer Entscheidung	245
7.6	Impulse verschiedener Form	250
8	Optimalfilter nach Wiener und Kolmogoroff	254
8.1	Problemstellung	254
8.2	Integralgleichung nach Wiener-Hopf	255
8.3	Nichtkausales Filter	259
8.3.1	Optimaler Frequenzgang	259
8.3.2	Minimaler mittlerer quadratischer Fehler	265
8.4	Kausales Filter	268
8.4.1	Optimaler Frequenzgang	268
8.4.2	Minimaler mittlerer quadratischer Fehler	281
8.5	Optimalfilter für pulsamplitudenmodulierte Signale	285
8.6	Zeitdiskretes Filter	298
9	Kalman-Filter	304
9.1	Zustandsvariablen	304
9.2	Rekursive Schätzung – ein Beispiel	316

X	Inhaltsverzeichnis	
9.3	Der Filteralgorithmus	319
9.4	Verallgemeinerung der Voraussetzungen	332
9.4.1	System- und Meßrauschen mit von Null verschiedenem Mittelwert	332
9.4.2	Korreliertes System- und Meßrauschen	333
9.4.3	Farbiges Systemrauschen	335
10	Adaptive Filter	337
10.1	Anwendungsbereiche adaptiver Filter	337
10.2	Allgemeine Voraussetzungen	342
10.3	Verfahren der kleinsten Quadrate	344
10.4	Verfahren mit mittlerem quadratischem Fehler	349
10.5	Analyse des LMS-Algorithmus	355
10.5.1	Mittelwerte der Filterkoeffizienten	355
10.5.2	Konvergenz des Verfahrens	355
10.5.3	Geometrische Betrachtung	363
10.5.4	Einfluß einer Störung	366
10.6	Ein allgemeiner Ansatz	368
10.7	Adaption rekursiver Filter	370
10.7.1	Minimaler mittlerer quadratischer Gleichungsfehler	376
10.7.2	Stabilität	383
10.7.3	Der HARF-Algorithmus	386
11	Schätzung von Signalparametern	390
11.1	Schätzung zufälliger Parameter	391
11.1.1	Fehlerfunktion	391
11.1.2	Schätzwert nach Bayes	393
11.1.2.1	Quadratische Fehlerfunktion	395
11.1.2.2	Betrag als Fehlerfunktion	396
11.1.2.3	Einheitliche Fehlerbewertung	397
11.1.3	Invarianz von Schätzwerten	402
11.1.3.1	1. Fall	402
11.1.3.2	2. Fall	405
11.1.4	Eine untere Grenze für die Varianz des Schätzfehlers	412
11.2	Schätzung determinierter Parameter	415
11.2.1	Maximum-Likelihood-Schätzwert	415
11.2.2	Cramér-Rao-Schranke	416
12	Entscheidungsverfahren	426
12.1	Binäre Entscheidung	426

Inhaltsverzeichnis	XI
12.1.1 Bayessche Entscheidung	427
12.1.1.1 Minimierung der Fehlerwahrscheinlichkeit	437
12.1.2 Minimax-Test	441
12.1.3 Neyman-Pearson-Test	447
12.1.4 Empfänger-Charakteristik	451
12.2 Mehrwertige Entscheidungen	463
12.3 Entscheidung mit Zurückweisung	472
12.4 Sequenzentscheidung (Viterbi-Algorithmus)	474
Literaturverzeichnis	483
Namen- und Sachverzeichnis	491