

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	13
Themenaspekte	13
Digitale Kommunikationstechniken	13
Übersicht über den Lehrstoff	14
Beispiele und Übungsaufgaben	15
Kursoptionen	15
Kapitel 1 Einleitung	17
1.1 Historischer Überblick	17
1.2 Elemente eines elektrischen Kommunikationssystems	21
1.2.1 Digitale Kommunikationssysteme	23
1.2.2 Frühe Errungenschaften in der digitalen Kommunikation	27
1.3 Kommunikationskanäle und ihre Eigenschaften	29
1.4 Mathematische Modelle für Kommunikationskanäle	37
1.5 Organisation des Buches	39
1.6 Weiterführende Literatur	41
Kapitel 2 Frequenzbereichsanalyse von Signalen und Systemen	43
2.1 Die Fourier-Reihe	43
2.1.1 Fourier-Reihen reeller Signale: die trigonometrische Fourier-Reihe	48
2.2 Fourier-Transformation	50
2.2.1 Fourier-Transformation reeller, gerader und ungerader Signale	54
2.2.2 Grundlegende Eigenschaften der Fourier-Transformation	56
2.2.3 Fourier-Transformation periodischer Signale	57
2.3 Leistung und Energie	60
2.3.1 Energiesignale	61
2.3.2 Leistungssignale	61
2.4 Das Abtasten bandbegrenzter Signale	64
2.5 Bandpasssignale	69
2.6 Weiterführende Literatur	77
Aufgaben	77

Kapitel 3	Übertragung und Empfang von analogen Signalen	91
3.1	Einleitung zur Modulation	91
3.2	Amplitudenmodulation (AM)	92
3.2.1	Zweiseitenband-Amplitudenmodulation mit Unterdrückung des Trägers (ZSBM)	92
3.2.2	Konventionelle Amplitudenmodulation	99
3.2.3	Einseitenband-Amplitudenmodulation (ESBM)	103
3.2.4	Restseitenband-Amplitudenmodulation (RSBM)	107
3.2.5	Implementierung von AM-Modulatoren und AM-Demodulatoren	110
3.2.6	Signal-Multiplexing	116
3.3	Winkelmodulation	118
3.3.1	Darstellung der FM- und PM-Signale	119
3.3.2	Spektrale Eigenschaften der winkelmodulierten Signale	123
3.3.3	Implementierung der Winkelmodulatoren und Demodulatoren	130
3.4	Rundfunk und Fernsehrundfunk	137
3.4.1	AM-Rundfunk	138
3.4.2	FM-Rundfunk	139
3.4.3	Fernsehrundfunk	143
3.5	Mobile Radiosysteme	152
3.6	Weiterführende Literatur	154
	Aufgaben	154
Kapitel 4	Zufallsprozesse	169
4.1	Wahrscheinlichkeiten und Zufallsvariablen	169
4.2	Zufallsprozesse: Grundlegende Konzepte	186
4.2.1	Beschreibung von Zufallsprozessen	189
4.2.2	Statistische Mittelwerte	192
4.2.3	Stationäre Prozesse	194
4.2.4	Zufallsprozesse und lineare Systeme	203
4.3	Zufallsprozesse im Frequenzbereich	206
4.3.1	Das Leistungsspektrum stochastischer Prozesse	207
4.3.2	Die Übertragung durch LTI-Systeme	213
4.4	Gaußsche und weiße Prozesse	216
4.4.1	Gaußsche Prozesse	217
4.4.2	Weißer Prozesse	219
4.5	Bandbegrenzte Prozesse und das Abtasten	223
4.6	Bandpassprozesse	226

4.7	Weiterführende Literatur	233
	Aufgaben	233
Kapitel 5	Einfluss des Rauschens auf analoge Kommunikationssysteme	249
5.1	Einfluss des Rauschens auf lineare Modulationssysteme	249
5.1.1	Einfluss des Rauschens auf Basisbandsysteme	250
5.1.2	Einfluss des Rauschens auf die ZSBM	250
5.1.3	Einfluss des Rauschens auf die ESBM	252
5.1.4	Einfluss des Rauschens auf die konventionelle AM	253
5.2	Schätzung der Trägerphase mittels einer phasengekoppelten Regelschleife (PLL)	257
5.2.1	Die phasengekoppelte Regelschleife (PLL)	258
5.2.2	Einfluss des additiven Rauschens auf die Phasenschätzung	261
5.3	Einfluss des Rauschens auf die Winkelmodulation	267
5.3.1	Einfluss des Schwellenwerts in den Winkelmodulationen	276
5.3.2	Pre-emphasis- und De-emphasis-Filter	280
5.4	Vergleich der analogen Modulationssysteme	284
5.5	Die Auswirkung der Übertragungsverluste	285
5.5.1	Charakterisierung der thermischen Rauschquellen	286
5.5.2	Die effektive Rauschtemperatur und die Rauschzahl	287
5.5.3	Die Übertragungsverluste	290
5.5.4	Zwischenverstärker für die Signalübertragung	292
5.6	Weiterführende Literatur	295
	Aufgaben	295
Kapitel 6	Informationsquellen und Quellencodierung	301
6.1	Modellierung von Informationsquellen	302
6.1.1	Messen der Information	303
6.1.2	Verbund- und bedingte Entropien	306
6.2	Das Quellencodierungstheorem	308
6.3	Quellencodierungsalgorithmen	311
6.3.1	Der Huffman-Quellencodierungsalgorithmus	311
6.3.2	Der Lempel-Ziv-Quellencodierungsalgorithmus	317
6.4	Die Theorie der Ratenverzerrung	319
6.4.1	Die gegenseitige (Trans-)Information	319
6.4.2	Die differentielle Entropie	320
6.4.3	Die Ratenverzerrungsfunktion	322
6.5	Die Quantisierung	328

6.5.1	Die skalare Quantisierung	329
6.5.2	Die Vektorquantisierung	337
6.6	Die Signalformcodierung	341
6.6.1	Die Puls-Code-Modulation (PCM)	341
6.6.2	Die differentielle Puls-Code-Modulation (DPCM)	347
6.6.3	Die Deltamodulation (ΔM)	349
6.7	Analyse-Synthese-Techniken	352
6.8	Die digitale Audioübertragung und Audioaufnahme	356
6.8.1	Digitales Audio in Telefonübertragungssystemen	357
6.8.2	Die digitale Audioaufnahme	359
6.9	Der JPEG-Bildcodierungsstandard	364
6.10	Weiterführende Literatur	367
	Aufgaben	368

Kapitel 7 Digitale Übertragung über den additiven, weißen gaußschen Rauschkanal **381**

7.1	Geometrische Darstellung der Signale	381
7.2	Die Pulsamplitudenmodulation	386
7.3	Zweidimensionale Signale	391
7.3.1	Basisbandsignale	392
7.3.2	Zweidimensionale Bandpasssignale — die Trägerphasenmodulation	395
7.3.3	Zweidimensionale Bandpasssignale — die Quadratur-Amplitudenmodulation	398
7.4	Mehrdimensionale Signale	400
7.4.1	Orthogonale Signale	401
7.4.2	Biorthogonale Signale	406
7.4.3	Simplexsignale	407
7.4.4	Binärcodierte Signale	409
7.5	Der optimale Empfänger für digitalmodulierte Signale mit additivem weißen gaußschen Rauschen	411
7.5.1	Der Korrelationstypen-Demodulator	412
7.5.2	Der angepasste Filtertypen-Demodulator	417
7.5.3	Der optimale Detektor	423
7.5.4	Demodulation und Detektion von trägeramplitudenmodulierten Signalen	429
7.5.5	Demodulation und Detektion von trägerphasenmodulierten Signalen	432
7.5.6	Demodulation und Detektion von quadraturamplitudenmodulierten Signalen	438
7.5.7	Demodulation und Detektion von frequenzmodulierten Signalen	441

7.6	Die Fehlerwahrscheinlichkeit bei der Detektion von Signalen mit additivem weißem gaußschen Rauschen	448
7.6.1	Die Fehlerwahrscheinlichkeit bei der binären Modulation	448
7.6.2	Die Fehlerwahrscheinlichkeit bei der M -ären PAM	451
7.6.3	Die Fehlerwahrscheinlichkeit bei der phasenkohärenten PSK-Modulation	456
7.6.4	Die Fehlerwahrscheinlichkeit bei der DPSK	460
7.6.5	Die Fehlerwahrscheinlichkeit bei der QAM	461
7.6.6	Fehlerwahrscheinlichkeit der M -ären orthogonalen Signale	467
7.6.7	Die Fehlerwahrscheinlichkeit der M -ären biorthogonalen Signale	471
7.6.8	Die Fehlerwahrscheinlichkeit der M -ären Simplexsignale	472
7.6.9	Die Fehlerwahrscheinlichkeit bei der nichtkohärenten FSK-Detektion	473
7.6.10	Vergleich der Modulationsverfahren	476
7.7	Performance-Analyse für Drahtleitungs- und Funkkommunikationskanäle	480
7.7.1	Die Regeneratoren	481
7.7.2	Link-Budget-Analyse für Funkkanäle	482
7.8	Die Symbolsynchronisierung	486
7.8.1	Frühwert-Spätwert-Gatter-Synchronisierer	487
7.8.2	Die Methode des minimalen mittleren Quadratfehlers	490
7.8.3	Methoden der Höchstwahrscheinlichkeit	491
7.8.4	Methoden der spektralen Linie	493
7.8.5	Symbolsynchronisation der trägermodulierten Signale	496
7.9	Weiterführende Literatur	497
	Aufgaben	497
Kapitel 8	Digitale Übertragung über bandbegrenzte AWGN-Kanäle	519
8.1	Digitale Übertragung über bandbegrenzte Kanäle	519
8.1.1	Digitale PAM-Übertragung über bandbegrenzte Basisbandkanäle	523
8.1.2	Digitale Übertragung über bandbegrenzte Bandpasskanäle	525
8.2	Das Leistungsspektrum der digital modulierten Signale	527
8.2.1	Das Leistungsspektrum eines Basisbandsignals	528

8.2.2	Das Leistungsspektrum eines trägermodulierten Signals	533
8.3	Signalentwurf für bandbegrenzte Kanäle	534
8.3.1	Entwurf von bandbegrenzten Signalen für Null-ISI – das Nyquist-Kriterium	537
8.3.2	Entwurf von bandbegrenzten Signalen mit kontrollierter ISI – Teilantwortsignale	542
8.4	Fehlerwahrscheinlichkeit bei der Detektion der digitalen PAM	545
8.4.1	Die Fehlerwahrscheinlichkeit bei der Detektion der digitalen PAM mit Null-ISI	545
8.4.2	Symbol-für-Symbol-Detektion von Daten mit kontrollierter ISI	546
8.4.3	Die Fehlerwahrscheinlichkeit bei der Detektion von Teilantwortsignalen	550
8.5	Digitalmodulierte Signale mit Gedächtnis	553
8.5.1	Modulationscodes und Modulationssignale mit Gedächtnis	554
8.5.2	Der Höchstwahrscheinlichkeits-Sequenzdetektor	569
8.5.3	Die Höchstwahrscheinlichkeits-Sequenzdetektion der Teilantwortsignale	574
8.5.4	Das Leistungsspektrum der digitalen Signale mit Gedächtnis	579
8.6	Systementwurf mit Kanalverzerrung	583
8.6.1	Entwurf von Sende- und Empfangsfiltern für einen Kanal mit bekannten Eigenschaften	585
8.6.2	Kanalentzerrung	588
8.7	Die Mehrträgermodulation und die OFDM	606
8.7.1	Implementierung eines OFDM-Systems mittels des FFT-Algorithmus	608
8.8	Weiterführende Literatur	611
	Aufgaben	612

Kapitel 9 Die Kanalkapazität und die Kanalcodierung **627**

9.1	Modellierung der Kommunikationskanäle	627
9.2	Die Kanalkapazität	630
9.2.1	Die gaußsche Kanalkapazität	635
9.3	Grenzen der Kommunikation	637
9.3.1	Die PCM-Übertragung analoger Quellen	642
9.4	Die Codierung für zuverlässige Kommunikation	643
9.4.1	Eine enge Grenze für die Fehlerwahrscheinlichkeit orthogonaler Signale	644

9.4.2	Ziele der Kanalcodierung	647
9.5	Lineare Blockcodes	654
9.5.1	Decodierung und Effizienz der linearen Blockcodes	659
9.5.2	Burstfehlerkorrigierende Codes	668
9.6	Zyklische Codes	670
9.6.1	Die Struktur der zyklischen Codes	670
9.7	Faltungscodes	679
9.7.1	Grundlegende Eigenschaften der Faltungscodes	680
9.7.2	Optimale Decodierung der Faltungscodes – der Viterbi-Algorithmus	686
9.7.3	Andere Decodierungsalgorithmen für Faltungscodes	691
9.7.4	Grenzen der Fehlerwahrscheinlichkeit bei Faltungscodes	692
9.8	Komplexe Codes aus Kombinationen von einfachen Codes	696
9.8.1	Produktcodes	697
9.8.2	Verkettete Codes	697
9.8.3	Turbocodes	698
9.8.4	Der BCJR-Algorithmus	700
9.8.5	Effizienz der Turbocodes	702
9.9	Die Codierung der bandbreiteneingeschränkten Kanäle	705
9.9.1	Kombinierte Codierung und Modulation	705
9.9.2	Die gittercodierte Modulation	707
9.10	Praktische Anwendungen der Codierung	714
9.10.1	Codierung in der Nachrichtenübertragung zu Weltraumsonden (deep-space communications)	714
9.10.2	Codierung für Telefonleitungsmodems	716
9.10.3	Codierung für Compact Discs	717
9.11	Weiterführende Literatur	720
	Aufgaben	720
Kapitel 10	Drahtlose Kommunikation	733
10.1	Digitale Übertragung über Fading-Mehrwegkanäle	733
10.1.1	Kanalmodelle für zeitveränderliche Mehrwegkanäle	736
10.1.2	Signalentwurf für Fading-Mehrwegkanäle	744
10.1.3	Effizienz der binären Modulation in nichtfrequenzselektiven Rayleigh-Fading-Kanälen	747
10.1.4	Effizienzsteigerung durch Signaldiversität	750
10.1.5	Modulation und Demodulation bei frequenzselektiven Kanälen – der RAKE- Demodulator	755

10.1.6	Vielfachantennensysteme und Raum-Zeit-Codes	758
10.2	Kontinuierliche Trägerphasenmodulation	763
10.2.1	Phasenkontinuierliche FSK (CPFSK)	764
10.2.2	Phasenkontinuierliche Modulation (CPM)	773
10.2.3	Spektrale Eigenschaften der CPFSK- und CPM-Signale	776
10.2.4	Demodulation und Detektion von CPM-Signalen	781
10.2.5	Effizienz von CPM in AWGN- und Rayleigh-Fading-Kanälen	787
10.3	Spektrumgespreizte Kommunikationssysteme	790
10.3.1	Modell eines spektrumgespreizten digitalen Kommunikationssystems	791
10.3.2	Spektrumgespreizte Direktsequenzsysteme	793
10.3.3	Einige Anwendungen der spektrumgespreizten DS-Signale	804
10.3.4	Die Auswirkung von Pulsinterferenzen und Fading	809
10.3.5	Die Erzeugung von PN-Sequenzen	811
10.3.6	Frequenzspringendes Spreizungsspektrum	815
10.3.7	Synchronisation von spektrumgespreizten Systemen	822
10.4	Digitale Mobilkommunikationssysteme	830
10.4.1	Das GSM-System	830
10.4.2	Das auf IS-95 basierende CDMA-System	834
10.5	Weiterführende Literatur	839
	Aufgaben	841
Anhang A	Die Fehlerwahrscheinlichkeit beim Mehrfachkanalempfang von binären Signalen	849
	Literaturverzeichnis	853
	Register	865