

Digitale Signalverarbeitung

Filterung und Spektralanalyse mit MATLAB-Übungen

Von Prof. Dr.-Ing. Karl-Dirk Kammeyer
Universität Bremen
und Prof. Dr.-Ing. Kristian Kroschel
Universität Karlsruhe

Unter Mitwirkung von Dipl.-Ing. Dieter Boss
und Dipl.-Ing. Armin Dekorsy
Universität Bremen

4., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage
Mit 269 Abbildungen



B. G. Teubner Stuttgart 1998



Inhaltsverzeichnis

Vorwort	III
I Grundlagen, Filterung und Spektralanalyse	1
1 Einleitung	3
2 Diskrete Signale und Systeme	9
2.1 Elementare diskrete Signale	10
2.2 Eigenschaften diskreter Systeme	12
2.3 Eigenschaften diskreter Signale und Systeme im Frequenzbereich	16
2.4 Das Abtasttheorem	20
2.4.1 Zusammenhang zwischen den Spektren diskreter und kontinuierlicher Zeitsignale	20
2.4.2 Alternative Formulierung des Abtasttheorems: Spektrum eines abgetasteten Signals	23
2.4.3 Deutung des Abtasttheorems anhand der Interpolationsformel für bandbegrenzte Signale	25
2.5 Komplexe diskrete Zeitsignale	27
2.5.1 Äquivalente Tiefpaß-Darstellung reeller Bandpaßsignale	27
2.5.2 Spektren komplexer Zeitsignale	31
2.5.3 Komplexe Faltung	34
2.6 Zeitdiskrete stochastische Prozesse	36
2.7 Spektraldarstellung diskreter stochastischer Prozesse	43
2.7.1 Definition der spektralen Leistungsdichte	43

2.7.2	Einfluß eines linearen Systems	45
2.8	Basisbanddarstellung stationärer Bandpaßprozesse	47
3	Die Z-Transformation	53
3.1	Definition der Z-Transformation	53
3.2	Existenz der Z-Transformierten	56
3.3	Inverse Z-Transformation	61
3.4	Eigenschaften der Z-Transformation	63
3.5	Die Systemfunktion	66
3.5.1	Herleitung der Z-Übertragungsfunktion	66
3.5.2	Amplitudengang, Phasengang und Gruppenlaufzeit diskreter Systeme	69
3.5.3	Stabilitätskriterium im z-Bereich	73
4	Rekursive Filter	77
4.1	Kanonische rekursive Filterstrukturen	78
4.2	Entwurf selektiver rekursiver Filter	82
4.2.1	Transformation kontinuierlicher in diskrete Systeme	82
4.2.2	Grundlagen zum Entwurf kontinuierlicher Systeme	88
4.2.3	Standardentwürfe im s' -Bereich	91
4.2.4	Entwurfsbeispiele für rekursive Filter	94
4.3	Spezielle Formen rekursiver Filter	98
4.3.1	Komplexwertige rekursive Filter	98
4.3.2	Allpässe	104
4.3.3	Digitale Integrierer	107
4.4	Quantisierungseinflüsse	109
4.4.1	Darstellung von Festkommazahlen	110
4.4.2	Quantisierung der Filterkoeffizienten	112
4.4.3	Stochastisches Modell des Quantisierungsrauschens	116
4.4.4	Quantisierungsrauschen in rekursiven Filtern	119
4.4.5	Spektralformung des Quantisierungsrauschens	122
4.4.6	Grenzzyklen	126
4.4.7	Skalierung	137
4.5	Entwurf digitaler Filter mit Hilfe von LC-Abzweigschaltungen	141
4.5.1	Beschreibung von LC-Abzweigschaltungen durch Vierpolelemente	142
4.5.2	Methode des invarianten Spannungsübertragungsverhältnisses	144

4.5.3	Impedanz-Transformation	149
4.5.4	Quellen und Abschlußwiderstände	151
4.5.5	Transformation des gesamten LC-Filters	152
5	Nichtrekursive Filter	157
5.1	Systeme mit endlicher Impulsantwort: FIR-Filter	158
5.2	Systeme mit linearer Phase	163
5.2.1	Komplexwertige linearphasige Systeme	163
5.2.2	Die vier Grundtypen reellwertiger linearphasiger Filter	166
5.3	Entwurf linearphasiger FIR-Filter	171
5.3.1	Grundformen idealisierter selektiver Filter	171
5.3.2	Approximation im Sinne minimalen Fehlerquadrats: Fourier-Approximation	177
5.3.3	Filterentwurf durch Fensterbewertung der idealen Impulsantwort	180
5.3.4	Tschebyscheff-Approximation im Sperrbereich: Dolph-Tschebyscheff-Entwurf	188
5.3.5	Tschebyscheff-Approximation im Durchlaß- und Sperrbereich: Remez-Entwurf	192
5.4	Entwurf spezieller nichtrekursiver Systeme	195
5.4.1	Zeitdiskrete Differenzierer	195
5.4.2	Zeitdiskrete Hilbert-Transformatoren	199
5.4.3	Interpolationsfilter	202
5.5	Komplexwertige Systeme	207
5.5.1	Komplexwertige Systeme zur Erzeugung analyti- scher Zeitsignale	207
5.5.2	Äquivalente Tiefpaßsysteme für digitale Bandpaß- filter	212
6	Die diskrete Fourier-Transformation (DFT)	217
6.1	Definition der DFT	218
6.2	Eigenschaften der DFT	222
6.3	Zusammenhänge zwischen der DFT und anderen Trans- formationen	228
6.4	Die schnelle Fourier-Transformation (FFT)	232
6.4.1	Reduktion im Zeitbereich	233
6.4.2	Reduktion im Frequenzbereich	239
6.4.3	Alternative Formen der FFT	242

6.4.4	Inverse FFT	244
6.5	Anwendung der FFT zur digitalen Filterung: Schnelle Faltung	246
6.5.1	Overlap-add-Verfahren	246
6.5.2	Overlap-save-Verfahren	253
7	Spektralanalyse determinierter Signale	257
7.1	Diskrete Fourier-Transformation reeller Folgen	258
7.1.1	Simultane Transformation zweier Folgen	259
7.1.2	Transformation einer Folge der Länge $2N$ durch eine N -Punkte-FFT	260
7.2	Spektraltransformation reeller Bandpaßsignale	263
7.2.1	Abtasttheorem für Bandpaßsignale	263
7.2.2	Spektraltransformation der komplexen Einhüllenden	269
7.3	Spektralanalyse periodischer Signale	272
7.3.1	Abtastung eines zeitkontinuierlichen periodischen Signals	272
7.3.2	Diskrete Fourier-Transformation einer komplexen Exponentialfolge	273
7.3.3	Der Leck-Effekt	276
7.4	Anwendung von Fensterfunktionen im Zeitbereich	279
7.4.1	Allgemeine Interpretation des Leck-Effektes	279
7.4.2	Hann-Fenster als Beispiel für die prinzipielle Wirkungsweise einer Fensterung im Zeitbereich	280
7.4.3	Weitere gebräuchliche Fensterfunktionen	284
7.4.4	Gleichmäßige Approximation im Sperrbereich: Dolph-Tschebyscheff-Fenster	286
7.4.5	Übersicht über die verschiedenen Fensterfunktionen	288
8	Traditionelle Spektralschätzung	293
8.1	Schätzung von Autokorrelationsfolgen	295
8.2	Berechnung von Autokorrelationsfolgen mit FFT	302
8.3	Das Periodogramm	311
8.3.1	Zusammenhang zwischen Periodogramm und AKF-Schätzung	312
8.3.2	Erwartungstreue des Periodogramms	314
8.3.3	Varianz des Periodogramms	317
8.4	Konsistente Spektralschätzung	321

8.4.1	Mittelung von Periodogrammen (Bartlett-Methode)	321
8.4.2	Fensterung der Datensegmente (Welch-Methode)	323
8.4.3	Korrelogramm-Verfahren (Blackman-Tukey-Schätzung)	326
8.5	Vergleich Periodogramm-Korrelogramm	331
9	Parametrische Spektralschätzung	339
9.1	ARMA-Modelle zur Beschreibung von Rauschprozessen	341
9.2	Markoff-Prozeß als autoregressives Modell erster Ordnung	346
9.3	Die Yule-Walker Gleichung	349
9.4	Lineare Prädiktion	352
9.4.1	Ableitung der Wiener-Hopf Gleichung für ein nichtrekursives Prädiktionsfilter	352
9.4.2	Das Orthogonalitätsprinzip	356
9.4.3	Zusammenhang zwischen linearer Prädiktion und autoregressiver Modellierung	358
9.5	Die Levinson-Durbin Rekursion	360
9.5.1	Ableitung der PARCOR-Koeffizienten	360
9.5.2	Rekursive Berechnung der Prädiktionsfehlerleistung	363
9.5.3	Rekursionsformel zur Berechnung der Prädiktor- koeffizienten (Levinson-Durbin Rekursion)	365
9.6	Die Lattice-Struktur	368
9.6.1	Ableitung des Analysefilters in Lattice-Form	368
9.6.2	Rekursive Synthesefilter in Lattice-Struktur	372
9.6.3	Minimalphasigkeit des Analysefilters – Stabilität des Synthesefilters	374
9.6.4	Orthogonalität des Rückwärts-Prädiktorfehlers	378
9.6.5	Übersicht über die verschiedenen Beschreibungs- formen für autoregressive Prozesse	382
9.7	Lösung der Yule-Walker Gleichung	384
9.7.1	Yule-Walker- oder Autokorrelationsansatz	385
9.7.2	Kovarianzmethode	388
9.7.3	Burg-Algorithmus	389
9.8	Beispiele zur parametrischen Spektralschätzung	394
9.8.1	Erprobung anhand synthetischer Testsignale	394
9.8.2	Anwendungen zur Sprachcodierung	397

II	Matlab-Übungen von D. Boss und A. Dekorsy	405
1.	Einleitung	407
2.	Aufgaben	409
2.1	Diskrete Signale und Systeme (Kap. 2)	409
2.2	Rekursive Filter (Kap. 4)	422
2.3	Nichtrekursive Filter (Kap. 5)	427
2.4	Die diskrete Fourier-Transformation (Kap. 6)	431
2.5	Spektralanalyse determinierter Signale (Kap. 7)	433
2.6	Traditionelle Spektralschätzung (Kap. 8)	436
2.7	Parametrische Spektralschätzung (Kap. 9)	438
3.	Lösungen	441
3.1	Diskrete Signale und Systeme (Kap. 2)	441
3.2	Rekursive Filter (Kap. 4)	459
3.3	Nichtrekursive Filter (Kap. 5)	463
3.4	Die diskrete Fourier-Transformation (Kap. 6)	471
3.5	Spektralanalyse determinierter Signale (Kap. 7)	474
3.6	Traditionelle Spektralschätzung (Kap. 8)	485
3.7	Parametrische Spektralschätzung (Kap. 9)	491
4.	m-Files	497
	Literaturverzeichnis	529
	Sachverzeichnis	536