

George Moschytz · Markus Hofbauer

Adaptive Filter

Eine Einführung in die Theorie
mit Aufgaben
und MATLAB-Simulationen
auf CD-ROM

Mit 75 Abbildungen und einer CD-ROM



Springer

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Einleitung	1
1.1.1	Aufgaben adaptiver Filter	2
1.1.2	Inhaltsübersicht	6
1.2	Klassifizierung von typischen Anwendungen adaptiver Filter . . .	8
1.2.1	Systemidentifikation	8
1.2.2	Inverse Modellierung	9
1.2.3	Lineare Prädiktion	9
1.2.4	Elimination von Störungen	10
1.3	Beispiele adaptiver Filter	10
1.3.1	Adaptive Störgeräuschunterdrückung	10
1.3.2	Entfernung der Netzstörung bei einem klinischen Diagnostikgerät	12
1.3.3	LPC-Analyse von Sprachsignalen	14
1.3.4	Adaptive Differentielle 'Pulse-Code-Modulation' (ADPCM)	18
1.3.5	Egalisation bei drahtloser Multipfad-Übertragung	19
1.3.6	Adaptive Entzerrung bei der Datenübertragung über die Telefonleitung	21
1.3.7	Adaptive Echokompensation	25
1.3.8	Zusammenfassung der Beispiele	29
1.4	Stochastische Prozesse	30
1.4.1	Verteilungs- und Dichtefunktionen	31
1.4.2	Erwartungswert, Korrelations- und Kovarianzfunktion . . .	32
1.4.3	Stationarität und Ergodizität	33
1.4.4	Unabhängigkeit, Unkorreliertheit und Orthogonalität . . .	35
2	Grundlagen adaptiver Filter	37
2.1	Strukturen adaptiver Filter	38

2.2	Das FIR-basierte adaptive Filter	39
2.3	Lineare optimale Filterung	41
2.3.1	Fehlersignal $e[k]$ und mittlerer quadratischer Fehler (MSE)	41
2.3.2	Autokorrelationsmatrix \mathbf{R} und Kreuzkorrelationsvektor \underline{p}	43
2.3.3	Wiener-Filter: Minimierung der Fehlerfunktion $J(\underline{w})$ und optimaler Gewichtsvektor \underline{w}^o	46
2.3.4	Orthogonalitätsprinzip: Wiener-Filterung als Estimationsproblem	50
2.3.5	Weitere Eigenschaften der Fehlerfunktion $J(\underline{w})$	55
2.3.6	Eigenschaften der Eigenwerte und Eigenvektoren der Autokorrelationsmatrix \mathbf{R}	61
2.3.7	Geometrische Bedeutung der Eigenvektoren und Eigenwerte	69
2.4	Dekorrelation des Eingangssignals und Konditionierung	73
2.4.1	Konditionszahl	73
2.4.2	Diskrete Karhunen-Loève-Transformation	74
3	Gradienten-Suchalgorithmen für FIR-basierte adaptive Filter	77
3.1	Newton-, Gradienten-Verfahren und LMS-Algorithmus	79
3.1.1	Das Newton-Verfahren	79
3.1.2	Das Gradienten-Verfahren	79
3.1.3	Der LMS-Algorithmus	82
3.2	Konvergenzeigenschaften der Gradienten-Suchalgorithmen	88
3.2.1	Konvergenz des Gradienten-Verfahrens	88
3.2.2	Konvergenz des LMS-Algorithmus	92
3.2.3	Grenzen der Schrittweite μ	96
3.2.4	Die Konvergenzzeit	99
3.2.5	Die Lernkurve	103
3.2.6	Gradientenvektor, LMS-approximierter Gradientenvektor und Gradientenrauschvektor	106
3.2.7	Der Überschussfehler J_{ex} und die Fehleinstellung M beim LMS-Algorithmus	111
3.2.8	Simulation: Systemidentifikation durch den LMS-Algorithmus	118
3.3	Varianten des LMS-Algorithmus	119
3.3.1	Der normierte LMS-Algorithmus (NLMS)	119
3.3.2	Der komplexe LMS-Algorithmus	120
3.3.3	Der Newton-LMS-Algorithmus	121
3.3.4	Der P-Vektor- oder Griffiths-Algorithmus	124

3.3.5	Der Vorzeichen-LMS-Algorithmus	125
4	Least-Squares-Adaptionsalgorithmen	127
4.1	Das Least-Squares-Schätzproblem	128
4.2	Der RLS-Algorithmus	133
4.2.1	Initialisierung und Rechenaufwand des RLS-Algorithmus	140
4.3	Der RLS-Algorithmus mit Vergessensfaktor	142
4.4	Analyse des RLS-Algorithmus	146
4.5	Simulation: Systemidentifikation durch den RLS-Algorithmus	152
4.6	Der 'Fast'-RLS-Algorithmus	154
5	Adaptive Filter im Frequenzbereich	157
5.1	Der 'Frequency-Domain'-LMS-Algorithmus (FLMS)	158
5.1.1	Notation	158
5.1.2	Filterung im Frequenzbereich durch das Overlap-Save-Verfahren	160
5.1.3	Adaption des Filters im Frequenzbereich	161
5.1.4	Die Dekorrelationseigenschaft der DFT	166
5.1.5	Wahl der Parameter beim FLMS-Algorithmus, Rechenaufwand und Fehleinstellung	172
5.1.6	Simulation: Systemidentifikation durch den FLMS-Algorithmus	174
5.2	Der 'Partitioned Frequency-Domain'-LMS-Algorithmus (PFLMS)	176
6	Zusammenfassung und Vergleich der Eigenschaften der Adaptionsalgorithmen	183
6.1	Grundlagen	183
6.2	Adaptionsalgorithmen	184
6.2.1	LMS-Algorithmus	185
6.2.2	RLS-Algorithmus	187
6.2.3	FLMS- und PFLMS-Algorithmus	188
6.3	Klassifikation der Adaptionsalgorithmen	189
6.4	Simulation: Vergleich der Konvergenzeigenschaften des LMS-, RLS- und FLMS-Algorithmus	189
A	Aufgaben und Anleitung zu den Simulationen	193
A.1	Aufgaben	193
A.2	Lösungen zu den Aufgaben	200
A.3	Anleitung zu den Simulationen	210

A.3.1	Vorbereitende Überlegungen und Definitionen: MSE, J_{\min} , \underline{w}^o , System-Fehler-Mass Δw_{dB} und ERLE im Kontext der Systemidentifikation	210
A.3.2	Simulationsbeschreibung	215
B	Die lineare und die zyklische Faltung	229
C	Berechnung des Gradienten von Vektor-Matrix-Gleichungen	233
	Literaturverzeichnis	237
	Index	239