

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

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>1</b>
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
<b>2</b>	<b>Grundlagen adaptiver Filter</b>	<b>37</b>
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
<b>3</b>	<b>Gradienten-Suchalgorithmen für FIR-basierte adaptive Filter</b>	<b>77</b>
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 $\mu$ . . . . .	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 $J_{\text{ex}}$ 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
<b>4</b>	<b>Least-Squares-Adaptionsalgorithmen</b>	<b>127</b>
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
<b>5</b>	<b>Adaptive Filter im Frequenzbereich</b>	<b>157</b>
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
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Vergleich der Eigenschaften der Adaptionsalgorithmen</b>	<b>183</b>
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
<b>A</b>	<b>Aufgaben und Anleitung zu den Simulationen</b>	<b>193</b>
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 $\Delta w_{dB}$ und ERLE im Kontext der Systemidentifikation . . . . .	210
A.3.2	Simulationsbeschreibung . . . . .	215
<b>B</b>	<b>Die lineare und die zyklische Faltung</b>	<b>229</b>
<b>C</b>	<b>Berechnung des Gradienten von Vektor-Matrix-Gleichungen</b>	<b>233</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>237</b>
	<b>Index</b>	<b>239</b>