

国外电子与通信教材系列

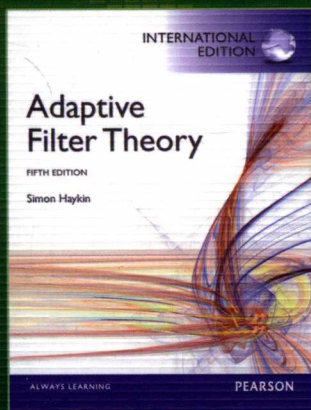
西蒙·赫金

 Pearson

自适应滤波器原理

(第五版) (英文版)

Adaptive Filter Theory, Fifth Edition



[加] Simon Haykin 著



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

国外电子与通信教材系列

自适应滤波器原理

(第五版) (英文版)

Adaptive Filter Theory
Fifth Edition

[加] Simon Haykin 著



电子工业出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京·BEIJING

内容简介

本书是自适应信号处理领域的一本经典教材。全书共17章，系统全面、深入浅出地讲述了自适应信号处理的基本理论与方法，充分反映了近年来该领域的新理论、新技术和新应用。内容包括：随机过程与模型、维纳滤波器、线性预测、最速下降法、随机梯度下降法、最小均方（LMS）算法、归一化LMS自适应算法及其推广、分块自适应滤波器、最小二乘法、递归最小二乘（RLS）算法、鲁棒性、有限字长效应、非平衡环境下的自适应、卡尔曼滤波器、平方根自适应滤波算法、阶递归自适应滤波算法、盲反卷积，以及它们在通信与信息系统中的应用。

全书取材新颖、内容丰富、概念清晰、阐述明了，适合于通信与电子信息类相关专业的高年级本科生、研究生、教师及工程技术人员阅读。

Authorized Reprint from English language edition, entitled Adaptive Filter Theory, Fifth Edition, by Simon Haykin, published by Pearson Education, Ltd., Copyright ©Pearson Education Inc. 2014.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage retrieval system, without permission from Pearson Education, Inc.

ENGLISH language edition published by PEARSON EDUCATION ASIA LTD., and PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY copyright©2017.

This edition is manufactured in the People's Republic of China, and is authorized for sale and distribution only in the mainland of China exclusively(except Taiwan, Hong Kong SAR and Macau SAR).

本书英文影印版专有出版权由 Pearson Education（培生教育出版集团）授予电子工业出版社。未经出版者预先书面许可，不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

本书在中国大陆地区出版，仅限在中国大陆发行。

本书贴有 Pearson Education（培生教育出版集团）激光防伪标签，无标签者不得销售。

版权贸易合同登记号 图字：01-2017-0856

图书在版编目(CIP)数据

自适应滤波器原理：第五版：英文/（加）西蒙·赫金（Simon Haykin）著．—北京：电子工业出版社，2017.7（国外电子与通信教材系列）

书名原文：Adaptive Filter Theory, Fifth Edition

ISBN 978-7-121-32251-8

I. ①自… II. ①西… III. ①跟踪滤波器—高等学校—教材—英文 IV. ①TN713

中国版本图书馆CIP数据核字（2017）第167689号

策划编辑：马 岚

责任编辑：冯小贝

印 刷：三河市双峰印刷装订有限公司

装 订：三河市双峰印刷装订有限公司

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编：100036

开 本：787×980 1/16 印张：56.75 字数：1653千字

版 次：2002年7月第1版（原著第4版）

2017年7月第2版（原著第5版）

印 次：2017年7月第1次印刷

定 价：149.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：（010）88254888，88258888。

质量投诉请发邮件至zltts@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式：classic-series-info@phei.com.cn。

Contents

Background and Preview 19

1. The Filtering Problem 19
2. Linear Optimum Filters 22
3. Adaptive Filters 22
4. Linear Filter Structures 24
5. Approaches to the Development of Linear Adaptive Filters 30
6. Adaptive Beamforming 31
7. Four Classes of Applications 35
8. Historical Notes 38

Chapter 1 Stochastic Processes and Models 48

- 1.1 Partial Characterization of a Discrete-Time Stochastic Process 48
- 1.2 Mean Ergodic Theorem 50
- 1.3 Correlation Matrix 52
- 1.4 Correlation Matrix of Sine Wave Plus Noise 57
- 1.5 Stochastic Models 58
- 1.6 Wold Decomposition 64
- 1.7 Asymptotic Stationarity of an Autoregressive Process 67
- 1.8 Yule-Walker Equations 69
- 1.9 Computer Experiment: Autoregressive Process of Order Two 70
- 1.10 Selecting the Model Order 78
- 1.11 Complex Gaussian Processes 81
- 1.12 Power Spectral Density 83
- 1.13 Properties of Power Spectral Density 85
- 1.14 Transmission of a Stationary Process Through a Linear Filter 87
- 1.15 Cramér Spectral Representation for a Stationary Process 90
- 1.16 Power Spectrum Estimation 92
- 1.17 Other Statistical Characteristics of a Stochastic Process 95
- 1.18 Polyspectra 96
- 1.19 Spectral-Correlation Density 99
- 1.20 Summary and Discussion 102
- Problems 103

Chapter 2 Wiener Filters 108

- 2.1 Linear Optimum Filtering: Statement of the Problem 108
- 2.2 Principle of Orthogonality 110

- 2.3 Minimum Mean-Square Error 114
- 2.4 Wiener-Hopf Equations 116
- 2.5 Error-Performance Surface 118
- 2.6 Multiple Linear Regression Model 122
- 2.7 Example 124
- 2.8 Linearly Constrained Minimum-Variance Filter 129
- 2.9 Generalized Sidelobe Cancellers 134
- 2.10 Summary and Discussion 140
- Problems 142

Chapter 3 Linear Prediction 150

- 3.1 Forward Linear Prediction 150
- 3.2 Backward Linear Prediction 157
- 3.3 Levinson-Durbin Algorithm 162
- 3.4 Properties of Prediction-Error Filters 171
- 3.5 Schur-Cohn Test 180
- 3.6 Autoregressive Modeling of a Stationary Stochastic Process 182
- 3.7 Cholesky Factorization 185
- 3.8 Lattice Predictors 188
- 3.9 All-Pole, All-Pass Lattice Filter 193
- 3.10 Joint-Process Estimation 195
- 3.11 Predictive Modeling of Speech 199
- 3.12 Summary and Discussion 206
- Problems 207

Chapter 4 Method of Steepest Descent 217

- 4.1 Basic Idea of the Steepest-Descent Algorithm 217
- 4.2 The Steepest-Descent Algorithm Applied to the Wiener Filter 218
- 4.3 Stability of the Steepest-Descent Algorithm 222
- 4.4 Example 227
- 4.5 The Steepest-Descent Algorithm Viewed as a Deterministic Search Method 239
- 4.6 Virtue and Limitation of the Steepest-Descent Algorithm 240
- 4.7 Summary and Discussion 241
- Problems 242

Chapter 5 Method of Stochastic Gradient Descent 246

- 5.1 Principles of Stochastic Gradient Descent 246
- 5.2 Application 1: Least-Mean-Square (LMS) Algorithm 248
- 5.3 Application 2: Gradient-Adaptive Lattice Filtering Algorithm 255
- 5.4 Other Applications of Stochastic Gradient Descent 262
- 5.5 Summary and Discussion 263
- Problems 264

Chapter 6 The Least-Mean-Square (LMS) Algorithm 266

- 6.1 Signal-Flow Graph 266
- 6.2 Optimality Considerations 268
- 6.3 Applications 270
- 6.4 Statistical Learning Theory 290
- 6.5 Transient Behavior and Convergence Considerations 301
- 6.6 Efficiency 304
- 6.7 Computer Experiment on Adaptive Prediction 306
- 6.8 Computer Experiment on Adaptive Equalization 311

- 6.9 Computer Experiment on a Minimum-Variance Distortionless-Response Beamformer 320
- 6.10 Summary and Discussion 324
Problems 326

Chapter 7 Normalized Least-Mean-Square (LMS) Algorithm and Its Generalization 333

- 7.1 Normalized LMS Algorithm: The Solution to a Constrained Optimization Problem 333
- 7.2 Stability of the Normalized LMS Algorithm 337
- 7.3 Step-Size Control for Acoustic Echo Cancellation 340
- 7.4 Geometric Considerations Pertaining to the Convergence Process for Real-Valued Data 345
- 7.5 Affine Projection Adaptive Filters 348
- 7.6 Summary and Discussion 352
Problems 353

Chapter 8 Block-Adaptive Filters 357

- 8.1 Block-Adaptive Filters: Basic Ideas 358
- 8.2 Fast Block LMS Algorithm 362
- 8.3 Unconstrained Frequency-Domain Adaptive Filters 368
- 8.4 Self-Orthogonalizing Adaptive Filters 369
- 8.5 Computer Experiment on Adaptive Equalization 379
- 8.6 Subband Adaptive Filters 385
- 8.7 Summary and Discussion 393
Problems 394

Chapter 9 Method of Least-Squares 398

- 9.1 Statement of the Linear Least-Squares Estimation Problem 398
- 9.2 Data Windowing 401
- 9.3 Principle of Orthogonality Revisited 402
- 9.4 Minimum Sum of Error Squares 405
- 9.5 Normal Equations and Linear Least-Squares Filters 406
- 9.6 Time-Average Correlation Matrix Φ 409
- 9.7 Reformulation of the Normal Equations in Terms of Data Matrices 411
- 9.8 Properties of Least-Squares Estimates 415
- 9.9 Minimum-Variance Distortionless Response (MVDR) Spectrum Estimation 419
- 9.10 Regularized MVDR Beamforming 422
- 9.11 Singular-Value Decomposition 427
- 9.12 Pseudoinverse 434
- 9.13 Interpretation of Singular Values and Singular Vectors 436
- 9.14 Minimum-Norm Solution to the Linear Least-Squares Problem 437
- 9.15 Normalized LMS Algorithm Viewed as the Minimum-Norm Solution to an Underdetermined Least-Squares Estimation Problem 440
- 9.16 Summary and Discussion 442
Problems 443

Chapter 10 The Recursive Least-Squares (RLS) Algorithm 449

- 10.1 Some Preliminaries 449
- 10.2 The Matrix Inversion Lemma 453
- 10.3 The Exponentially Weighted RLS Algorithm 454
- 10.4 Selection of the Regularization Parameter 457
- 10.5 Updated Recursion for the Sum of Weighted Error Squares 459
- 10.6 Example: Single-Weight Adaptive Noise Canceller 461
- 10.7 Statistical Learning Theory 462

- 10.8 Efficiency 467
- 10.9 Computer Experiment on Adaptive Equalization 468
- 10.10 Summary and Discussion 471
Problems 472

Chapter 11 Robustness 474

- 11.1 Robustness, Adaptation, and Disturbances 474
- 11.2 Robustness: Preliminary Considerations Rooted in H^∞ Optimization 475
- 11.3 Robustness of the LMS Algorithm 478
- 11.4 Robustness of the RLS Algorithm 483
- 11.5 Comparative Evaluations of the LMS and RLS Algorithms from the Perspective of Robustness 488
- 11.6 Risk-Sensitive Optimality 488
- 11.7 Trade-Offs Between Robustness and Efficiency 490
- 11.8 Summary and Discussion 492
Problems 492

Chapter 12 Finite-Precision Effects 497

- 12.1 Quantization Errors 498
- 12.2 Least-Mean-Square (LMS) Algorithm 500
- 12.3 Recursive Least-Squares (RLS) Algorithm 509
- 12.4 Summary and Discussion 515
Problems 516

Chapter 13 Adaptation in Nonstationary Environments 518

- 13.1 Causes and Consequences of Nonstationarity 518
- 13.2 The System Identification Problem 519
- 13.3 Degree of Nonstationarity 522
- 13.4 Criteria for Tracking Assessment 523
- 13.5 Tracking Performance of the LMS Algorithm 525
- 13.6 Tracking Performance of the RLS Algorithm 528
- 13.7 Comparison of the Tracking Performance of LMS and RLS Algorithms 532
- 13.8 Tuning of Adaptation Parameters 536
- 13.9 Incremental Delta-Bar-Delta (IDBD) Algorithm 538
- 13.10 Autostep Method 544
- 13.11 Computer Experiment: Mixture of Stationary and Nonstationary Environmental Data 548
- 13.12 Summary and Discussion 552
Problems 553

Chapter 14 Kalman Filters 558

- 14.1 Recursive Minimum Mean-Square Estimation for Scalar Random Variables 559
- 14.2 Statement of the Kalman Filtering Problem 562
- 14.3 The Innovations Process 565
- 14.4 Estimation of the State Using the Innovations Process 567
- 14.5 Filtering 573
- 14.6 Initial Conditions 575
- 14.7 Summary of the Kalman Filter 576
- 14.8 Optimality Criteria for Kalman Filtering 577
- 14.9 Kalman Filter as the Unifying Basis for RLS Algorithms 579
- 14.10 Covariance Filtering Algorithm 584
- 14.11 Information Filtering Algorithm 586
- 14.12 Summary and Discussion 589
Problems 590

Chapter 15 Square-Root Adaptive Filtering Algorithms 594

- 15.1 Square-Root Kalman Filters 594
- 15.2 Building Square-Root Adaptive Filters on the Two Kalman Filter Variants 600
- 15.3 QRD-RLS Algorithm 601
- 15.4 Adaptive Beamforming 609
- 15.5 Inverse QRD-RLS Algorithm 616
- 15.6 Finite-Precision Effects 619
- 15.7 Summary and Discussion 620
 - Problems 621

Chapter 16 Order-Recursive Adaptive Filtering Algorithm 625

- 16.1 Order-Recursive Adaptive Filters Using Least-Squares Estimation:
An Overview 626
- 16.2 Adaptive Forward Linear Prediction 627
- 16.3 Adaptive Backward Linear Prediction 630
- 16.4 Conversion Factor 633
- 16.5 Least-Squares Lattice (LSL) Predictor 636
- 16.6 Angle-Normalized Estimation Errors 646
- 16.7 First-Order State-Space Models for Lattice Filtering 650
- 16.8 QR-Decomposition-Based Least-Squares Lattice (QRD-LSL) Filters 655
- 16.9 Fundamental Properties of the QRD-LSL Filter 662
- 16.10 Computer Experiment on Adaptive Equalization 667
- 16.11 Recursive (LSL) Filters Using A Posteriori Estimation Errors 672
- 16.12 Recursive LSL Filters Using A Priori Estimation Errors with Error Feedback 675
- 16.13 Relation Between Recursive LSL and RLS Algorithms 680
- 16.14 Finite-Precision Effects 683
- 16.15 Summary and Discussion 685
 - Problems 687

Chapter 17 Blind Deconvolution 694

- 17.1 Overview of Blind Deconvolution 694
- 17.2 Channel Identifiability Using Cyclostationary Statistics 699
- 17.3 Subspace Decomposition for Fractionally Spaced Blind Identification 700
- 17.4 Bussgang Algorithm for Blind Equalization 714
- 17.5 Extension of the Bussgang Algorithm to Complex Baseband Channels 731
- 17.6 Special Cases of the Bussgang Algorithm 732
- 17.7 Fractionally Spaced Bussgang Equalizers 736
- 17.8 Estimation of Unknown Probability Distribution Function of Signal Source 741
- 17.9 Summary and Discussion 745
 - Problems 746

Epilogue 750

- 1. Robustness, Efficiency, and Complexity 750
- 2. Kernel-Based Nonlinear Adaptive Filtering 753

Appendix A Theory of Complex Variables 770

- A.1 Cauchy–Riemann Equations 770
- A.2 Cauchy’s Integral Formula 772
- A.3 Laurent’s Series 774
- A.4 Singularities and Residues 776
- A.5 Cauchy’s Residue Theorem 777
- A.6 Principle of the Argument 778
- A.7 Inversion Integral for the z -Transform 781
- A.8 Parseval’s Theorem 783

Appendix B Wirtinger Calculus for Computing Complex Gradients 785

- B.1 Wirtinger Calculus: Scalar Gradients 785
- B.2 Generalized Wirtinger Calculus: Gradient Vectors 788
- B.3 Another Approach to Compute Gradient Vectors 790
- B.4 Expressions for the Partial Derivatives $\partial f/\partial z$ and $\partial f/\partial z^*$ 791

Appendix C Method of Lagrange Multipliers 792

- C.1 Optimization Involving a Single Equality Constraint 792
- C.2 Optimization Involving Multiple Equality Constraints 793
- C.3 Optimum Beamformer 794

Appendix D Estimation Theory 795

- D.1 Likelihood Function 795
- D.2 Cramér–Rao Inequality 796
- D.3 Properties of Maximum-Likelihood Estimators 797
- D.4 Conditional Mean Estimator 798

Appendix E Eigenanalysis 800

- E.1 The Eigenvalue Problem 800
- E.2 Properties of Eigenvalues and Eigenvectors 802
- E.3 Low-Rank Modeling 816
- E.4 Eigenfilters 820
- E.5 Eigenvalue Computations 822

Appendix F Langevin Equation of Nonequilibrium Thermodynamics 825

- F.1 Brownian Motion 825
- F.2 Langevin Equation 825

Appendix G Rotations and Reflections 827

- G.1 Plane Rotations 827
- G.2 Two-Sided Jacobi Algorithm 829
- G.3 Cyclic Jacobi Algorithm 835
- G.4 Householder Transformation 838
- G.5 The QR Algorithm 841

Appendix H Complex Wishart Distribution 848

- H.1 Definition 848
- H.2 The Chi-Square Distribution as a Special Case 849
- H.3 Properties of the Complex Wishart Distribution 850
- H.4 Expectation of the Inverse Correlation Matrix $\Phi^{-1}(n)$ 851

Glossary 852

- Text Conventions 852
- Abbreviations 855
- Principal Symbols 858

Bibliography 864

Suggested Reading 879

Index 897

国外电子与通信教材系列

自适应滤波器原理

(第五版) (英文版)

Adaptive Filter Theory
Fifth Edition

[加] Simon Haykin 著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内容简介

本书是自适应信号处理领域的一本经典教材。全书共17章,系统全面、深入浅出地讲述了自适应信号处理的基本理论与方法,充分反映了近年来该领域的新理论、新技术和新应用。内容包括:随机过程与模型、维纳滤波器、线性预测、最速下降法、随机梯度下降法、最小均方(LMS)算法、归一化LMS自适应算法及其推广、分块自适应滤波器、最小二乘法、递归最小二乘(RLS)算法、鲁棒性、有限字长效应、非平衡环境下的自适应、卡尔曼滤波器、平方根自适应滤波算法、阶递归自适应滤波算法、盲反卷积,以及它们在通信与信息系统中的应用。

全书取材新颖、内容丰富、概念清晰、阐述明了,适合于通信与电子信息类相关专业的高年级本科生、研究生、教师及工程技术人员阅读。

Authorized Reprint from English language edition, entitled Adaptive Filter Theory, Fifth Edition, by Simon Haykin, published by Pearson Education, Ltd., Copyright ©Pearson Education Inc. 2014.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage retrieval system, without permission from Pearson Education, Inc.

ENGLISH language edition published by PEARSON EDUCATION ASIA LTD., and PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY copyright©2017.

This edition is manufactured in the People's Republic of China, and is authorized for sale and distribution only in the mainland of China exclusively(except Taiwan, Hong Kong SAR and Macau SAR).

本书英文影印版专有出版权由 Pearson Education (培生教育出版集团)授予电子工业出版社。未经出版者预先书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

本书在中国大陆地区出版,仅限在中国大陆发行。

本书贴有 Pearson Education (培生教育出版集团)激光防伪标签,无标签者不得销售。

版权贸易合同登记号 图字:01-2017-0856

图书在版编目(CIP)数据

自适应滤波器原理:第五版:英文/(加)西蒙·赫金(Simon Haykin)著.一北京:电子工业出版社,2017.7(国外电子与通信教材系列)

书名原文:Adaptive Filter Theory, Fifth Edition

ISBN 978-7-121-32251-8

I. ①自… II. ①西… III. ①跟踪滤波器—高等学校—教材—英文 IV. ①TN713

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第167689号

策划编辑:马 岚

责任编辑:冯小贝

印 刷:三河市双峰印刷装订有限公司

装 订:三河市双峰印刷装订有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编:100036

开 本:787×980 1/16 印张:56.75 字数:1653千字

版 次:2002年7月第1版(原著第4版)

2017年7月第2版(原著第5版)

印 次:2017年7月第1次印刷

定 价:149.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888,88258888。

质量投诉请发邮件至zlts@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式:classic-series-info@phei.com.cn。

导 读

自适应信号处理是信号与信息处理学科一个重要的学科分支，并成功地应用于通信、控制、雷达、声呐、地震和生物医学工程等领域。由国际著名学者西蒙·赫金(Simon Haykin)教授编著并为我国广大读者所熟悉的《自适应滤波器原理》一书，全面、系统地介绍了这方面的基本理论和应用技术，充分反映了该领域的最新成果，是自适应信号处理领域一部与时俱进的佳作。

该书自第一版1986年问世以来，三十年间，已出五版。从第一版仅仅涉及常规自适应滤波，到第二版引入盲自适应方法，再到第三版引入人工神经网络方法，直到第四版的局部修改和第五版的进一步修订，始终贯穿着一条基本脉络：体系愈加合理，日臻完善；内容紧跟时代，不断更新。正因为这样，该书备受读者欢迎，影响与日俱增，赢得很高的声誉。相信该书第五版及其中译本的出版，必将对我国高校相关课程体系和内容改革起到一定的借鉴作用。

该书第五版除保持原书构思新颖、取材得当、概念清楚、论述严谨等特色外，内容有所取舍。例如：

- 增加了第5章“随机梯度下降法”和第11章“鲁棒性”；
- 在新版第6章的LMS算法和第10章的RLS算法中引入“统计效率”的概念，并用统计学习理论重新论述和分析了这两类算法的收敛性问题；
- 将原版第14章更名为“非平稳环境下的自适应”，并增加了相关内容，以作为新版的第13章；
- 删除了旧版本中与本书主题或实际应用关系不大的自适应IIR滤波器（原第11章）和反向传播学习（原第17章）两章内容，并把有关学习的概念放到新版第13章做适当介绍；
- 在“后记”中删除了与本书主题关系不大的“递归神经网络”和“非线性动力学”等内容，并引入反映该领域新进展的基于核（函数）的非线性自适应滤波等内容。

尽管有上述修改，但其涉及的主要内容和该书的适用范围没有大的变化。根据译者使用该书所积累的经验，再结合第五版翻译过程的体会，我们认为，新版本至少有以下几个特点：

- 进一步完善了体系结构，强化了数学基础。
- 更加注重新颖性、系统性与实用性的紧密结合。
- 更加突出通信信号处理应用。

中译版译者

前 言

新旧版本比较

本书新版本（第五版）对旧版本（第四版）进行了大量的修订。主要修改如下^①：

1. 引入了全新的第5章关于随机梯度下降法的内容。
2. 根据朗之万（Langevin）函数及相应的布朗运动，修改了第6章（旧版本第5章）中最小均方（LMS）的统计学习理论。
3. 引入了全新的第11章关于鲁棒性的内容。
4. 在第13章后半部引入非平稳环境下自适应的新内容，并将其应用于增量Delta-Bar-Delta（IDBD）算法和自动步长方法。
5. 在附录B和附录F中分别引入关于微积分及朗之万函数的新内容。
6. 更新了参考文献，增列了“建议阅读文献”。
7. 删除了旧版本中“自适应IIR滤波器”和关于复数神经网络的“反向传播学习”两章。

本书新版要点

自适应滤波器是统计信号处理中的一个重要组成部分。它可对未知统计环境或非平稳环境下的各种信号处理问题，提供一种十分吸引人的解决方案，并且其性能通常远优于用常规方法设计的固定滤波器。此外，自适应滤波器还能够提供非自适应方法所不能提供的信号处理能力。因此，自适应滤波器已经成功应用于诸如通信、控制、雷达、声呐、地震和生物医学工程等许多领域。

^① 除这里所罗列的修改外，还包括散布在其他章节的许多修改。例如，第6章增加了关于LMS算法的最优性考虑和统计效率的新内容，第10章引入了关于RLS算法统计效率的新内容，第14章新增了关于信息滤波算法的独特性和Fisher信息等内容。——译者注

本书写作目的

本书写作的主要目的是研究各种线性自适应滤波器的数学原理。所谓自适应性是根据输入数据调整滤波器中的自由参数（系数）来实现的，从而使得自适应滤波器实际上是非线性的。我们说自适应滤波器是“线性”的，指的是如下含义：

无论何时滤波器的输入-输出映射都服从叠加原理，无论何时，在任意特定时刻，滤波器的参数都是固定的。

线性自适应滤波问题不存在唯一的解。但存在由各种递归算法所表示的“一套工具”，每一工具给出它所拥有的期望特性。本书就提供了这样一套工具。

在背景方面，本书假设读者已学过概率论、数字信号处理等大学本科的导论性课程及通信和控制系统等先修课程。

本书组成结构

本书绪论部分从一般性地讨论自适应滤波器的运算及其不同形式开始，并以其发展历史的注释作为结束。其目的是想通过该课题的丰富历史，向那些对该领域感兴趣并有志潜心钻研的读者追溯这些研究动机的由来。

本书主体内容共17章，具体安排如下。

- 1) 随机过程与模型，这方面内容在第1章中介绍，着重讲解平稳随机过程的部分特征（如二阶统计描述）。它是本书其余部分内容的主要基础。
- 2) 维纳滤波器理论及其在线性预测中的应用（第2章和第3章），维纳滤波器在第2章中介绍，它定义了平稳环境下的最佳线性滤波器，而且提供了线性自适应滤波器的一个基本框架。第3章讲述了线性预测理论，着重讲述了前向预测和后向预测及其变种，并以线性预测在语音编码中的应用作为该章的结束。
- 3) 梯度下降法，在第4章和第5章中讲述。第4章介绍了一种固定型的古老最优化技术（即所谓最速下降法）的基础；该方法提供了维纳滤波器波的一种迭代演变框架。作为直接对比，第5章介绍了随机梯度下降法的基本原理；该方法非常适合处理非平稳环境，而且通过最小均方（LMS, Least-Mean-Square）和梯度自适应格型（GAL, Gradient Adaptive Lattice）算法阐明了其适用性。
- 4) LMS算法族，涵盖了第6章、第7章、第8章三章，具体如下：

- 第6章讨论了LMS算法的各种不同应用，详尽阐述了小步长统计理论。这一新的理论来源于非平衡热力学的朗之万方程，这为LMS算法的瞬态过程提供了一个比较准确的评估。计算机仿真证明了该理论的有效性。
 - 第7章和第8章扩展了传统的LMS算法族。这一点是通过详细论述归一化LMS算法、仿射投影自适应滤波算法、频域和子带自适应LMS滤波算法来实现的。仿射投影算法可看做介于LMS算法与递归最小二乘（RLS）算法的中间算法。频域和子带自适应LMS滤波算法将在后面讨论。
- 5) 最小二乘法 and RLS算法，分别在第9章和第10章介绍。第9章论述了最小二乘法，它可看做源于随机过程的维纳滤波器的确定性副本。在最小二乘法中，输入数据是以块（block-by-block）为基础进行处理的。过去因其数值计算复杂性而被忽视的分块方法正日益引起人们的关注，这得益于数字计算机技术的不断进步。第10章在最小二乘法的基础上设计了RLS算法，并详尽阐述了其瞬态过程的统计理论。
- 6) 鲁棒性、有限字长效应和非平稳环境下的自适应问题，分别在第11章、第12章和第13章中介绍。具体如下：
- 第11章介绍了 H^∞ 理论，它为鲁棒性提供数学基础。在这一理论下，只要所选的步长参数很小，LMS算法在 H^∞ 的意义下就是鲁棒的；但在面对内在或外在干扰的非平稳环境时，RLS算法的鲁棒性不如LMS算法。本章也讨论了确定性鲁棒性与统计有效性（效率）之间的折中问题。
 - 第5~10章的线性自适应滤波算法理论以无限精度（字长）运算为基础。然而，当用数字形式实现任何自适应滤波算法时，将产生由有限精度运算所引起的有限字长效应。第12章讨论了LMS和RLS算法数字实现时的有限字长效应。
 - 第13章扩展了LMS和RLS算法理论。这是通过评价和比较运行于非稳定环境（设其为马尔可夫模型）下LMS和RLS算法的性能来实现的。这一章的第二部分主要研究两个新算法：其一为增量Delta-Bar-Delta（IDBD）算法，它由传统LMS算法的步长参数的向量化实现；其二为自动步长法，它以IDBD算法为基础，通过实验构成一个自适应步骤，以避免手动调整步长参数。
- 7) 卡尔曼滤波理论及相关的自适应滤波算法，这些内容在第14章、第15章、第16章中介绍，具体如下：
- 第14章介绍了RLS算法。实际上，RLS算法是著名的卡尔曼滤波的一个特例。突出状态的概念是卡尔曼滤波的一个重要特点。因此，很好地理解卡尔曼滤波理论（也包括将平稳环境下的维纳滤波器作为其特例）是十分重要的。此外，应注意，协方差滤波和信息滤波算法是卡尔曼滤波器的变种。

- 第15章在协方差滤波和信息滤波的基础上导出了它们各自的平方根形式。具体而言，就是引入前阵列和后阵列的思想，从而促使一类使用吉文斯(Givens)旋转脉冲阵列的新的自适应滤波算法的产生。
- 第16章介绍了另一类新的阶递归最小二乘格型(LSL)滤波算法，该算法也建立在协方差型和信息算法型卡尔曼滤波器的基础上。为了实现这类算法，需要利用一种数值鲁棒的所谓QR分解方法。阶递归LSL算法的另一个有吸引力的特点是其计算复杂度遵循线性规律。但是，这些算法的所有优点都是以数学和编码上的高度复杂性为代价的。

8) 无监督(自组织)自适应，即盲反卷积，在本书的最后一章即第17章介绍。这里所谓的“盲”表示在完成自适应滤波的过程中不需要期望响应的协助。这个艰巨任务是采用基于如下概念的模式完成的：

- 子空间分解，在本章第一部分介绍，提供了一个灵巧的数学上解决盲均衡问题的方法。为了解决这个问题，我们使用通信系统中固有的循环平稳性来寻找信道输入的二阶统计量，以使用无监督方式均衡信道。
- 高阶统计量，在本章第二部分介绍，它可以是显式的或者隐式的。这部分内容致力于导出一类盲均衡算法，统称为Bussgang类盲均衡算法。本章第二部分还包含一类以源于最大熵法的信息论方法为基础的新的盲均衡算法。

本书还包含一个后记，它分为两个部分：

- 后记第一部分回顾前面章节中介绍的内容，最后总结了鲁棒性、有效性(效率)和复杂性，并且说明了LMS和RLS算法在这三个根本性的重要工程问题上所起的作用。
- 后记第二部分包括以核函数(它起着计算单元隐层的作用)为基础的一类新的非线性自适应滤波算法。这些核函数来源于再生核希尔伯特空间(RKHS)，而且这里给出的内容源自机器学习文献中已被很好研究的那些资料。特别是，后记将注意力聚焦于LMS滤波，包括传统LMS算法在其中所起的关键性作用；而且简要讨论了自适应滤波中这个相对较新的方法的属性和限制。

本书还包含如下内容的附录：

- 复变函数
- 沃廷格(Wirtinger)微分
- 拉格朗日(Lagrange)乘法
- 估计理论