



信息技术和电气工程学科国际知名教材 **中译本** 系列

# 统计信号处理算法

Algorithms for Statistical Signal Processing

John G. Proakis 等著  
汤俊 等译



清华大学出版社

信息技术和电气工程学科国际知名教材 **中译本** 系列

# 统计信号处理算法

Algorithms for Statistical Signal Processing

John G. Proakis 等 著  
汤俊 等 译

清华大学出版社  
北京

Simplified Chinese edition copyright © 2006 by PEARSON EDUCATION ASIA LIMITED and TSINGHUA UNIVERSITY PRESS.

Original English language title from Proprietor's edition of the Work.

Original English language title: Algorithms for Statistical Signal Processing first by John G. Proakis, Copyright © 2002

EISBN: 0-13- 062219-2

All Rights Reserved.

Published by arrangement with the original publisher, Pearson Education, Inc., publishing as Prentice Hall.

This edition is authorized for sale only in the People's Republic of China (excluding the Special Administrative Region of Hong Kong and Macao).

本书中文简体翻译版由 Pearson Education 授权给清华大学出版社在中国境内(不包括中国香港、澳门特别行政区)出版发行。

北京市版权局著作权合同登记号 图字: 01-2002-5729

版权所有,翻印必究。举报电话: 010-62782989 13501256678 13801310933

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

#### 图书在版编目(CIP)数据

统计信号处理算法/(美)普罗基斯(Proakis, J. G.)等著;汤俊等译. —北京:清华大学出版社, 2006.3

(信息技术和电气工程学科国际知名教材中译本系列)

书名原文: Algorithms for Statistical Signal Processing

ISBN 7-302-12449-3

I. 统… II. ①普… ②汤… III. 统计信号—信号处理—计算方法—教材 IV. TN911.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 006257 号

出版者: 清华大学出版社 地 址: 北京清华大学学研大厦

<http://www.tup.com.cn> 邮 编: 100084

社总机: 010-62770175 客户服务: 010-62776969

责任编辑: 邹开颜 王敏稚

印刷者: 清华大学印刷厂

装订者: 三河市化甲屯小学装订二厂

发行者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 175 × 245 印张: 34.5 字数: 693 千字

版 次: 2006 年 3 月第 1 版 2006 年 3 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-12449-3/TN · 304

印 数: 1 ~ 3000

定 价: 59.00 元

## 出版说明

2000年10月,为了系统地参考和借鉴国外知名相关大学教材,推进我国大学的课程改革和我国大学教学的国际化进程,清华大学出版社策划、出版了《国际知名大学原版教材——信息技术学科与电气工程学科系列》,至今已经出版了30多种,深受高等院校信息技术与电气工程及相关学科师生和其他科技人员的欢迎和好评,在学术界和教育界产生了积极的影响。现在这个系列中的大部分教材都已经重印,并曾获得《2001年引进版优秀畅销丛书奖》。在此期间,我们曾收到来自各地高校师生的很多反映,期望我们选择这个系列中的一些较为基础性和较为前沿性的教材译成中译本出版,以便为更广大的院校师生和科技人员所选用。正是基于这种背景和考虑,清华大学出版社决定进一步推出《信息技术和电气工程学科国际知名教材中译本系列》。

这套国际知名教材中译本系列所选书目的范围,限于信息技术和电气工程学科所属各专业的技术基础课和主要专业课。教材原版本除了选自《国际知名大学原版教材——信息技术学科与电气工程学科系列》外,还将精选其他具有较大影响的国外知名的相关领域教材或教学参考书。教材内容适于作为我国普通高等院校相应课程的教材或主要教学参考书。

本国际知名教材中译本系列按分期分批的方式组织出版。为了便于使用这套国际知名教材中译本教材系列的相关师生和科技人员从学科和教学的角度,对其在体系和内容上的特点和特色有所了解,在每种中译本教材中都附有我们约请的相关领域资深教授撰写的推荐说明,其中的一些直接取自于《国际知名大学原版教材——信息技术学科与电气工程学科系列》中的影印版序。

本国际知名教材中译本系列的读者对象为信息技术和电气工程学科所属各专业的本科生或研究生，同时兼顾其他工程学科专业的本科生或研究生。既可采用作为相应课程的教材，也可作为相应课程的教学参考书。此外，本国际知名教材中译本系列也可提供作为工作于各个技术领域的工程师和技术人员的自学读物。

感谢使用本国际知名教材中译本系列的广大师生和科技人员的支持。期望广大读者提出意见和建议。

郑大钟 教授

清华大学信息科学技术学院

# 序

数字信号处理是一发展极为迅速的科学技术领域。在 20 世纪六七十年代，它先后经历了数字滤波理论、信号的傅里叶变换、卷积和相关的快速计算的发展阶段，其后受到计算机技术、微电子技术迅猛发展的促进，使数字信号处理技术发展推向了高潮。目前数字信号处理的研究不仅限于一般理论和方法的探讨，而更多侧重于实现方面。应用领域日益扩大，新的实现方法和算法成果层出不穷。在此基础上发展起来的新一代电子系统与早期的电子系统相比较，其优化和自适应性能大大提高。

为适应数字信号处理的发展，需要有一本能较全面介绍这一领域内新技术的书籍。2002 年 Prentice Hall 出版的 *Algorithms for Statistical Signal Processing* 一书恰好能符合当前的需要。

本书主要论述统计信号处理中的算法。第 1 章为绪论，论述了线性时不变系统的特性、信号的采样、基于 DFT 的线性滤波方法和倒谱。第 2 章论述卷积和离散傅里叶变换有效算法。第 3 章论述线性预测和维纳 (Wiener) 滤波，其中包括 Levinson - Durbin 算法和 Schur 算法。第 4 章论述系统的建模与辨识，基于最小二乘法的滤波器设计，几种解最小二乘估计的方法，包括 Cholesky 分解、LDU 分解、QR 分解、Gram - Schmidt 正交化、Givens 变换、Householder 变换和奇异值分解。第 5 章论述基于最小均方算法和递归最小二乘算法的单通道自适应滤波。还对自适应滤波的应用作了介绍。第 6 章论述多通道信号的递归最小二乘快速算法，包括最小二乘估计的 QR 分解、Gram - Schmidt 正交化最小二乘估计、时间递归最小二乘估计的 Givens 算法、基于 Householder 变换的最小二乘估计、ORLS 估计算法等。第 7 章集中论述了运用信号流图以推导出基于 QR 分解的快速自适应滤波算法。第 8 章论述参数化和非参数化方法的功率谱估计，包括最小方差谱估计、特征分析、MUSIC 算法、ESPRIT 算法。第 9 章描述了在信号建模和系统辨识中的高阶统计方法。本书各章后均附有习题。

本书非常适合于已具备数字信号处理的基础知识（其中包括傅里叶变换、离散傅里叶变换、 $z$  变换、离散时间系统分析、数字滤波器

的设计和 FIR, IIR) 的读者阅读。适用于数字信号处理及相关领域的高年级本科生、研究生和科技人员。

本书是一本非常有益的、概括了当前这一领域内主要新技术的书籍, 其内容全面系统, 对数字信号处理领域的各种主要算法, 尤其是目前该领域的一些研究重点, 进行了介绍。值此在国内出版之际, 特此推荐。

下面简要介绍本书的作者:

**John G. Proakis 教授** 数字通信和数字信号处理领域中一位卓越的学者和教育家。出版了包括 *Digital Communications* 在内的 9 本广为采用的教科书。曾在 GTE 和 MIT 林肯实验室工作过。曾先后在美国麻省波士顿东北大学任副教授、教授、工程研究生院院长、工学院院长、电机和计算机系主任。现为该校荣誉教授和加州圣地亚哥加州大学客座教授, IEEE 的会士。

**Charles M. Rader 教授** 数字信号处理领域中的一位先驱者。出版 3 本数字信号处理书籍。现任 MIT 林肯实验室高级研究员。研究领域是语音压缩、卫星通信和雷达。

**凌云云 (Fuyun Ling) 博士** 1968 年毕业于清华大学, 1981 年和 1984 年先后获得美国麻省波士顿东北大学的硕士和博士学位。现任中国北京高通公司副总裁、CDMA 研发中心主任、清华大学客座教授、IEEE 会士。出版著作 2 本, 发表论文 70 多篇。研究领域为数字通信和数字信号处理的理论和应用。

**Chrysostomos L. Nikias 教授** 多谱分析领域的著名学者。出版教科书 3 本, 发表论文 100 多篇, 有 8 项专利。先后任美国南加州大学 (USC) 教授、工学院副院长。现任工学院院长, IEEE 会士。研究领域为应用于数字信号处理、多媒体、雷达、声纳和生物医学信号分析中的统计信号处理。

**Marc Moonen 博士** 比利时卢文 (Leuven Katholieke) 大学电机工程系副教授。研究领域为数学的系统理论、信号处理、并行计算和数字通信。

**Ian K. Proudler 博士** 1984 年在英国剑桥大学获博士学位。1986 年起在美国 Malvern 国防研究局工作。研究领域为实时自适应滤波的结构、算法和运用有限域数学构造容错数字信号处理算法等。

陆大绘

清华大学电子工程系

# 译者的话

近 30 年来，随着集成电路技术和数字信号处理器的飞速发展和成本的不断降低，统计信号处理技术目前已经在通信、图像、语音、雷达、声纳等领域得到了广泛而深入的应用。在现代功率谱估计、自适应信号处理、自适应阵列信号处理等领域内，研究高性能的实用算法是一个重要的主题。这也是本书关注的主要问题。

本书的内容为：第 1 章中介绍了一些基本概念以及本书中使用的符号。第 2 章介绍了傅里叶变换和卷积的快速算法。在第 3 章讨论了线性预测和线性滤波器，详细介绍了线性滤波器和格型滤波器的结构，以及快速串行计算算法 Levinson - Durbin 算法和快速并行算法 Shur 算法。第 4 章介绍了最小二乘预测和解卷积滤波器的设计，并重点介绍几种解最小二乘问题的方法，包括 Choleskey 分解、LDU 分解和 QR 分解，以及 QR 分解的几种实现技术，Givens 变换、Householder 变换、SVD 分解和 GS 正交化等。第 5 章中介绍了自适应滤波器在系统辨识、自适应通道均衡、自适应噪声对消、语音编码和阵列信号处理中的应用，并重点介绍了 LMS 算法和 RLS 算法。在第 6 章中，从多通道的阵列应用问题出发，介绍了基于 GS 正交化、Givens 变换和 Householder 变换的最小二乘估计问题，引出了脉动(systolic)阵列、波前(wavefront)阵列和 CORDIC 电路等 VLSI 结构。最后为阶数递推的最小二乘问题给出了一个统一的研究框架。第 7 章则利用信号流图，讨论了基于 QRD 的快速自适应滤波器算法。在第 8 章中讨论了谱估计的技术，包括参数化方法、非参数化方法和基于特征分析的谱估计技术。最后在第 9 章中介绍了基于高阶统计量的信号分析方法。

本书的原著作者均是本领域内的杰出学者，其中有些作者对书中一些专题的发展做出过重要贡献。本书在材料的组织和内容的选取上，做到了深度和广度的有机结合。许多问题的阐述深入浅出且



易于理解。所以，我们认为这是一本很值得向有关研究人员、高年级本科生和研究生推荐的专业书籍和教学参考书，适用于通信、语音、图像、雷达等很多领域内的读者。

本书中译本由清华大学电子工程系高速信号处理与网络传输研究所汤俊副教授统稿，并负责了前言部分和第3章到第7章的翻译，第1、2、8章由许维宇、王世震、苏文俊、徐国伟和李亚萍翻译，第9章由张颢翻译。由于译者水平有限，对书中的一些技术术语难免把握不准，书中也可能会存在一些翻译不当之处，敬请读者批评指正。

译 者

2005年10月

# 前 言

在过去的 30 年里，数字信号处理(DSP)的领域得到了迅速的扩展。在 20 世纪 60 年代末期和 20 世纪 70 年代，我们见证了数字滤波器设计基本理论的发展，以及傅里叶变换、卷积和相关的高效计算算法的发展。过去的 20 年里，在数字计算机技术和集成电路制造技术的刺激下，经历了 DSP 应用的一个爆炸时期。在这期间，DSP 的基本理论已经扩展到包含参数信号建模(在功率谱估计和系统建模中得到了应用)，自适应信号处理算法，多采样率和多维信号处理，以及信号处理的高阶统计方法。

在 DSP 基本理论的扩展和应用迅速发展(受成本很低的数字信号处理器的飞速发展所刺激)，对覆盖很多 DSP 专题的高级课程存在渐增的需求。本书写作的目的，是在一定程度上满足对覆盖这些前沿专题的课本的要求。

本书中大多数内容首先出现在由 Macmillan 出版公司在 1992 年出版的 *Advanced Digital Signal Processing* 中(该书 1997 年后没有再版)。这本新书和以前版本的区别在于，包含了新的一章(第 7 章)，讨论了基于 QRD 的快速自适应滤波器算法，删除了有关多采样率信号处理的一章。其余的章节则基本保持了相同的内容。

本书的重点是统计信号处理。第 2 章讨论了计算卷积和离散傅里叶变换的快速算法。第 3 章讨论了线性预测和最优维纳滤波器，包含了对 Levinson - Durbin 算法和 Schur 算法的描述。第 4 章考虑了基于最小二乘方法的滤波器设计问题，并描述了几个解最小二乘问题的方法，包括 Givens 变换、Householder 变换和奇异值分解。第 5 章讨论了基于 LMS 算法和递推最小二乘算法的单通道自适应滤波器。第 6 章描述了对多通道信号的高效递推最小二乘算法。第 7 章关注于用信号流图来推导基于 QR 分解的高效自适应滤波器算法。第 8 章研究的是功率谱估计，包括参数化和非参数化方法。第 9 章描述了在信号建模和系统辨识中的高阶统计方法。

尽管本书中的内容是由 6 个不同作者写的，但是已经尽了最大

努力在全书中保持相同的符号，相信已经成功地对前面的概述中提到的主要专题进行了相关性很强的讨论。第 1 章中给出了 DSP 基本内容的介绍，这些内容经常能在初级 DSP 课本中找到，同时也给出了在全书中使用的符号。

我们在这里讨论多个专题时，通常假设读者以前已经学过数字信号处理基本内容的课程。假定为背景知识的基本内容包括  $z$  变换、时间离散系统的特征和分析、傅里叶变换、离散傅里叶变换(DFT)、数字 FIR 和 IIR 滤波器的设计。

*John G. Proakis*

*Charles M. Rader*

*Fuyun Ling*

*Chrysostomos L. Nikias*

*Marc Moonen*

*Ian K. Proudler*

# 目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 信号的描述	1
1.1.1 确定性信号	2
1.1.2 随机信号、相关函数和功率谱	4
1.2 线性时不变系统的描述	14
1.2.1 时域描述	14
1.2.2 频域描述	17
1.2.3 因果性和稳定性	19
1.2.4 带通系统和信号	20
1.2.5 逆系统、最小相位系统和全通系统	25
1.2.6 线性系统对随机输入信号的响应	28
1.3 信号的采样	30
1.3.1 模拟信号的时域采样	31
1.3.2 离散时间信号的频谱采样	39
1.3.3 有限持续时间序列的离散傅里叶变换	40
1.3.4 DFT 和 IDFT 的矩阵变换描述	44
1.4 基于 DFT 的线性滤波方法	46
1.4.1 在线性滤波中使用 DFT	47
1.4.2 对长数据序列的滤波	50
1.5 倒谱	53
1.6 总结和参考文献	56
习题	57

<b>第 2 章 卷积和 DFT 算法</b> .....	62
2.1 模多项式.....	62
2.2 圆周卷积视为多项式乘积模 $u^N - 1$ .....	64
2.3 多项式的连分式.....	65
2.4 多项式情况下的中国剩余定理.....	67
2.5 短圆周卷积算法.....	68
2.6 如何计算乘法.....	75
2.7 割圆多项式.....	77
2.8 初等数论.....	78
2.8.1 最大公约数以及欧拉函数方程 .....	79
2.8.2 方程 $ax + by = 1$ .....	79
2.8.3 模算术 .....	82
2.8.4 整数模 $M$ 的中国表示法 .....	84
2.8.5 指数模 $M$ .....	86
2.9 卷积长度和维数.....	89
2.10 圆周卷积 DFT .....	93
2.11 WINOGRAD 的 DFT 算法 .....	96
2.12 DFT 的数论类推 .....	99
2.13 数论变换.....	101
2.13.1 Mersenne 数变换.....	105
2.13.2 Fermat 数变换.....	107
2.13.3 使用 NTT 进行圆周卷积的几点考虑 .....	109
2.13.4 复数运算中替代域的使用.....	109
2.14 分基 FFT .....	111
2.15 Autogen 技术 .....	116
2.16 总结.....	123
习题.....	123
<b>第 3 章 线性预测和最优线性滤波器</b> .....	126
3.1 一个平稳随机过程的更新量表示方法 .....	126
3.1.1 有理式功率谱.....	129
3.1.2 滤波器参数和自相关序列之间的关系.....	130
3.2 前向和后向线性预测 .....	131



3.2.1	前向预测	131
3.2.2	后向线性预测	135
3.2.3	格型前向和后向预测器的最优反射系数	140
3.2.4	AR 过程和线性预测的关系	140
3.3	正规方程的求解	141
3.3.1	Levinson - Durbin 算法	141
3.3.2	Schur 算法	145
3.4	线性预测误差滤波器的性质	149
3.5	AR 格型和 ARMA 格型 - 阶梯滤波器	153
3.5.1	AR 格型结构	153
3.5.2	ARMA 过程和格型 - 阶梯滤波器	155
3.6	用于滤波和预测的 Wiener 滤波器	158
3.6.1	FIR 型 Wiener 滤波器	158
3.6.2	线性均方估计的正交性原理	161
3.6.3	IIR 型 Wiener 滤波器	162
3.6.4	非因果 Wiener 滤波器	166
3.7	总结和参考文献	168
	习题	169
<b>第 4 章</b>	<b>系统建模和滤波器设计的最小二乘方法</b>	<b>177</b>
4.1	系统建模和系统辨识	178
4.1.1	基于 FIR(MA) 系统模型的系统辨识	178
4.1.2	基于全极点(AR) 系统模型的系统辨识	181
4.1.3	基于极点 - 零点(ARMA) 系统模型的系统辨识	183
4.2	预测和解卷积的最小二乘滤波器设计	189
4.2.1	最小二乘线性预测滤波器	190
4.2.2	FIR 最小二乘逆滤波器	191
4.2.3	预测性解卷积	194
4.3	最小二乘估计问题的解	197
4.3.1	定义和基本概念	197
4.3.2	最小二乘估计的矩阵形式	199
4.3.3	Cholesky 分解	203
4.3.4	LDU 分解	205

4.3.5	QR 分解 .....	207
4.3.6	Gram - Schmidt 正交化 .....	209
4.3.7	Givens 旋转 .....	212
4.3.8	Householder 反射 .....	214
4.3.9	奇异值分解 .....	218
4.4	总结和参考文献 .....	225
	习题 .....	226
<b>第 5 章</b>	<b>自适应滤波器 .....</b>	<b>231</b>
5.1	自适应滤波器的应用 .....	231
5.1.1	系统辨识或系统建模 .....	233
5.1.2	自适应通道均衡 .....	234
5.1.3	电话通道中的回波对消 .....	237
5.1.4	在宽带信号中对窄带干扰的抑制 .....	242
5.1.5	自适应谱线增强器 .....	245
5.1.6	自适应噪声对消 .....	246
5.1.7	语音信号的线性预测编码 .....	247
5.1.8	自适应阵列 .....	250
5.2	自适应直接形式 FIR 滤波器 .....	252
5.2.1	最小均方误差准则 .....	252
5.2.2	LMS 算法 .....	255
5.2.3	LMS 算法的性质 .....	258
5.2.4	直接形式 FIR 滤波器中的递推最小二乘算法 .....	264
5.2.5	直接形式 RLS 算法的性质 .....	271
5.3	自适应格型阶梯滤波器 .....	274
5.3.1	递推最小二乘格型 - 阶梯算法 .....	275
5.3.2	梯度格型 - 阶梯算法 .....	299
5.3.3	格型 - 阶梯算法的性质 .....	303
5.4	总结和参考文献 .....	307
	习题 .....	308
<b>第 6 章</b>	<b>用于阵列信号处理的递推最小二乘算法 .....</b>	<b>313</b>
6.1	用于最小二乘估计的 QR 分解 .....	313

6.2	Gram - Schmidt 正交化用于最小二乘估计 .....	317
6.2.1	利用 MGS 算法的最小二乘估计 .....	317
6.2.2	MGS 算法中量的物理意义 .....	319
6.2.3	修正 Gram - Schmidt 算法的时间递推形式 .....	320
6.2.4	RMGS 算法的变型算法 .....	327
6.2.5	用 VLSI 阵列来实现 RMGS 算法及和最小二乘 格型算法的关系 .....	331
6.3	用于时间递推最小二乘估计的 Givens 算法 .....	336
6.3.1	时间递推 Givens 算法 .....	336
6.3.2	无需平方根的 Givens 算法 .....	339
6.3.3	Givens 变换的 CORDIC 方法 .....	343
6.4	基于 Householder 变换的递推最小二乘估计 .....	357
6.4.1	采用 Householder 变换的块时间递推最小二乘估计 .....	357
6.5	阶数递推最小二乘估计算法 .....	362
6.5.1	ORLS 估计的基本联系 .....	363
6.5.2	ORLS 估计算法的正则结构 .....	369
6.5.3	ORLS 算法的基本处理单元的变型 .....	375
6.5.4	ORLS 算法的系统研究和推导 .....	379
6.6	总结和参考文献 .....	381
	习题 .....	382
<b>第 7 章</b>	<b>基于 QRD 的快速自适应滤波器算法 .....</b>	<b>385</b>
7.1	背景知识 .....	386
7.1.1	信号流图 .....	386
7.1.2	复习基于 QRD 的 RLS .....	387
7.1.3	剩余提取 .....	390
7.2	QRD 格型 .....	391
7.3	多通道格型 .....	399
7.4	快速 QR 算法 .....	406
7.5	多通道快速 QR 算法 .....	412
7.6	总结和参考文献 .....	422
	习题 .....	424



<b>第 8 章 功率谱估计</b> .....	427
8.1 有限时间观测信号的谱估计 .....	427
8.1.1 能量谱密度的计算.....	428
8.1.2 随机信号自相关函数和功率谱的估计:周期图法 .....	432
8.1.3 在功率谱估计中 DFT 的使用 .....	437
8.2 功率谱估计的非参数化方法 .....	439
8.2.1 Bartlett 方法:平均周期图 .....	440
8.2.2 Welch 方法:修正的平均周期图 .....	441
8.2.3 Blackman 和 Tukey:平滑周期图 .....	443
8.2.4 非参数化功率谱估计的性能特征.....	446
8.2.5 非周期图功率谱估计的计算量.....	449
8.3 功率谱估计的参数化方法 .....	451
8.3.1 模型参数和自相关之间的关系.....	453
8.3.2 确定 AR 模型参数的 Yule - Walker 方法 .....	455
8.3.3 确定 AR 模型参数的 Burg 方法 .....	455
8.3.4 确定 AR 模型参数的无约束最小二乘方法 .....	458
8.3.5 确定 AR 模型参数的连续估计方法 .....	460
8.3.6 AR 模型阶数的选择 .....	461
8.3.7 功率谱估计的 MA 模型.....	462
8.3.8 功率谱估计的 ARMA 模型 .....	463
8.3.9 实验结果.....	466
8.4 最小方差谱估计 .....	474
8.5 谱估计的特征分析算法 .....	475
8.5.1 Pisarenko 谐波分解方法 .....	477
8.5.2 正弦信号在白噪声中的自相关矩阵的特征分解.....	479
8.5.3 MUSIC 算法 .....	481
8.5.4 ESPRIT 算法 .....	482
8.5.5 阶数选择的准则.....	485
8.5.6 实验结果.....	486
8.6 总结和参考文献 .....	488
习题.....	489
<b>第 9 章 信号的高阶谱分析</b> .....	497
9.1 高阶谱在信号处理中的应用 .....	497