

全国高技术重点图书·信息获取与处理技术领域



# 小波分析与信号处理

——理论、应用及软件实现

李建平 主编

重庆出版社

51.6235

7



# 小波分析与信号处理

## ——理论、应用及软件实现

主 编 李建平  
著 者 李建平 田逢春  
曾 理 易 东  
何中市 张万萍  
赵 静 何 宇  
学术顾问 陈廷槐



重 庆 出 版 社

(川)新登字 010 号

责任编辑 王 梅  
封面设计 卢 军  
技术设计 费晓瑜

李建平 主编

小波分析与信号处理

——理论、应用及软件实现

---

重庆出版社出版、发行(重庆长江二路 205 号)

新华书店经销 陕西安康印刷厂印刷

\*

开本 787 × 1092 1/16 印张 26 插页 8 字数 585 千

1997 年 12 月第一版 1997 年 12 月第一版第一次印刷

印数: 1—2500

\*

科技新书目 447—815

ISBN7-5366-3762-4/TP·34

定价: 48.00 元

# LIST OF CONTRIBUTORS

**Li Jianping** (Chief Editor)

Ph. D

Research Centre of Wavelet Analysis, Fractal & Information Processing

Basic Department

Logistical Engineering University

Chongqing 400042, China

**Tian Fengchun**

Ph. D

Department of Radio Engineering

Chongqing University

Chongqing 400044, China

**Zeng Li**

Ph. D

Department of System Engineering & Applied Mathematics

Chongqing University

Chongqing 400044, China

**Yi Dong**

Ph. D

Department of Preventative Medicine

Third Military Medical University

Chongqing 400044, China

**He Zhongshi**

Ph. D

Department of System Engineering & Applied Mathematics

Chongqing University

Chongqing 400044, China

**Zhang Wanping**

M. S.

Department of Applied Mathematics

University of Electronic Science & Technology of China

Chengdu 610054, China

**Zhao Jing**

M. S.

Research Centre of Wavelet Analysis, Fractal & Information Processing

Basic Department

Logistical Engineering University

Chongqing 400042, China

**He Yu**

Ph. D

Department of Computer

Chongqing University

Chongqing 400044, China

# 内容提要

小波分析是目前国际上公认的最新时间—频率分析工具，由于其“自适应性”和“数学显微镜性质”而成为许多学科共同关注的焦点，是众多科技工作者爱不释手的分析工具，对于信号处理、信息处理起着至关重要的作用。

本书全面系统介绍了小波分析的基本理论和最新研究成果，重点介绍小波分析的应用成果，并通过软件实现来检验应用效果。全书分为三篇：第一篇是小波理论，包含 8 章的内容，如小波分析的发展历史及文献综述、准备知识、多分辨分析与共轭滤波器、连续小波变换、最佳小波基的构造及算法、二维母小波的构造、框架与样条小波理论、时间—频率分析；第二篇是小波应用，包含 12 章的内容，详细介绍小波分析在图像压缩、流体力学、工业 CT、故障诊断、语音分割、数学物理、地球物理勘探、医学细胞识别、线性系统、神经网络等多方面的应用；第三篇是小波软件，将第一篇和第二篇的重要算法用 C 语言实现，且全部在微机上调试通过，读者可直接应用或稍加修改即见成效。

本书的鲜明特点是强调应用，突出重点，由浅入深，编程验证。本书的读者对象主要是从事信号分析、信息获取与处理、图像处理、通讯理论、数学、物理、计算机、医学、化学、石油地质勘探、机械工程等方面的研究人员、大学教师、研究生、大学生，尤其适合专门从事处理突发性问题的工程技术人员。对于有兴趣学习新学科、高科技知识的人来说，本书也是很好的人门图书。

## 《全国高技术重点图书》 出版指导委员会

主任：朱丽兰

副主任：刘 杲

卢鸣谷

总干事：罗见龙 梁祥丰

委员：(以姓氏笔划为序)

王大中

王为珍

牛田佳

王守武

刘 仁

刘 杲

卢鸣谷

叶培大

朱丽兰

孙宝寅

师昌绪

任新民

杨牧之

杨嘉墀

陈芳允

陈能宽

罗见龙

周炳琨

欧阳莲

张兆祺

张钰珍

张效祥

赵忠贤

顾孝诚

谈德颜

龚 刚

梁祥丰

## 《全国高技术重点图书·信息获取与处理领域》 编审委员会

主任委员：陈芳允

委 员：汪成为

杨震明

袁宝宗

邓又强

# ABSTRACT

Wavelet analysis is internationally recognized up to the minute tools for analysing time-frequency. It is chiefly due to the “adaptive feature” and “mathematical microtelescope feature”, wavelet analysis is becoming a focus point of many sciences, and is fondly delighted as tools for so many scientific workers. It plays an important role in the signal & information processing.

In this book, the basic theory and achievements of wavelet analysis up to the minute, are entirely introduced. The applied achievements of wavelet are stressed on and their effects are manifested by the software written in C Language. This book is divided into three parts. The first part is wavelet theories which contain eight chapters, such as the history of wavelet and a survey of the references, the preliminary knowledges, multiresolution analysis & quadrature filters, continuous wavelet transform & wavelet packets, the construction and algorithm of the best wavelet basis, the construction of multidimensional orthonormal wavelet basis, wavelet frames & spline wavelet theory and finally time-frequency analysis. The second part is the applications of wavelet which contain twelve chapters, such as the applications of wavelet to image compression, hydrodynamics, ICT, fault diagnosis, speech signal processing, mathematics & physics, geophysics exploration, medicine cell distinguish, linear system, neural network, and other topics. The third part is wavelet software such as the important algorithms of the first part and the second part implemented via C Language. All the C programmes are tested on personal computer, the readers can use them at once or tailor for their own applications.

The distinct characteristics of this book are the emphasis of the application of wavelet, the prominence of the main points, the description from the easy to the hard, and the implementations of the algorithms in C Language. This book is orientated to the researchers, professors, post graduate students, university students who have been engaged in signal and information processing, image processing, communication theory, mathematics & physics,



**ABSTRACT**

**computer, medicine, chemistry, petroleum geophysical exploration, machine engineering. This book is specially adpted to the engineering technicians who have been engaged in gusty problems, and is also an excellent guidebook for the readers who want to learn new science & high - technology.**

# 序 言

自从法国大科学家 Fourier 提出 Fourier 分析以来, Fourier 分析就一直是频谱分析最有效的数学工具. 小波分析是为克服 Fourier 分析不能作局部分析的缺点而提出来的, 由于其分析时间-频率局部化的卓越效果而誉满全球. 从此, 小波分析成为信号处理、信息获取与处理等许多领域首选的数学分析工具, 在国内外形成一次又一次研究高潮, 它与分形理论、神经网络联合互补对当今的自然科学产生巨大的冲击力和推动作用.

本书的作者瞄准小波分析这一国际前沿课题, 于 1993 年组织小波研讨班, 参加者主要是博士、博士生. 他们先后查阅了大量小波文献, 充分占有了第一手资料, 已经在国内外高水平的学术刊物和学术会议上发表多篇小波研究论文, 书中许多章节是他们各自博士论文的研究成果. 全书采用由博士、博士生执笔编著, 著名专家担任学术顾问负责质量把关的人员组织形式, 将全书内容分为小波理论、小波应用、小波软件三大部分, 不仅全面系统介绍了小波理论 (含一维和高维情况) 的最新成果, 而且重点突出了小波应用介绍, 使相关领域的读者能迅速进入小波应用研究前沿, 有关的小波软件也是参考价值很高的 C 语言源代码. 本书是国内第一本重点介绍小波应用成果, 同时全面介绍小波最新理论的著作. 该书适合小波分析与信号处理的初学者, 也适合理论专家和应用专家, 适合愿意学习小波课题的科技工作者.

中国科学院院士

1997 年 7 月 12 日

林百于

# 前言

世界从本质上说是非线性的,线性是非线性的特殊情况,非线性才是世界的本质.以非线性为特征的非线性科学是一门跨学科的综合基础性科学,旨在揭示非线性系统的共同性质、基本特征和运动规律.当前研究非线性科学的主要工具有分形理论、人工神经网络、Fourier 分析、小波分析等.法国著名数学家 Fourier 于 1822 年提出的 Fourier 分析理论结合 1965 年美国 Bell 实验室的 Cooley、Tukey 两位工程师提出的快速 Fourier 变换即 FFT,使得 Fourier 分析成为理论分析和数值计算最完美的工具.最初,人们认为 Fourier 分析是处理线性问题极为有效的工具.80 年代以后,人们开始用 Fourier 分析直接处理非线性问题,并且发展很快,取得了丰富的成果,这就是所谓的非线性 Fourier 分析——即处理非线性问题的 Fourier 分析. Fourier 分析的致命缺点是不能作局部分析,为克服 Fourier 的不足,由科学家、工程师和数学家们共同提出了小波分析,这正是反映了大科学时代学科之间相互渗透、相互综合的大趋势.小波分析的最大特点有两个:一是“自适应性”,它能根据被分析的对象自动调整有关参数;二是“数学显微镜性质”,它能依据观察的对象自动“调焦”,以取得人们满意的最佳效果.小波分析最早应用在地震数据压缩,以后在图像处理、故障诊断等方面取得了传统方法根本无法达到的效果.现在小波分析已渗透到自然科学、应用科学、社会科学等许多方面,连金融、证券、股票等都有小波的应用研究.由此,小波分析成为国际研究热点.无论是 Fourier 分析,还是小波分析均是以线性变换为基础的,如果按照前面非线性 Fourier 分析的定义,则非线性小波分析是处理非线性问题的小波分析,如 Navier - Stokes 方程的求解等,但我们认为非线性小波分析应以非线性变换为基础,这就提出了非线性小波变换,它与经典的小波变换完全不一样,这种非线性小波变换处理非线性问题更加有效.

1993 年,我国著名计算机专家、重庆大学计算机研究所所长、博士生导师陈廷槐教授在美国访问讲学期间已收集到小波方面的许多重要文献资料,参观了美国 National Instrument Corporation 公司的实验室,观看了将小波用于诊断动脉硬化症等方面小波实验的计算机演示.同年组建了由重庆大学、后勤工程学院、第三军医大学等学校的博士、博士生组成的小波分析与信号处理研讨班.研讨班通过中文科技数据库、美国工程索引(EI)、国际联机等手段查阅了小

波文献 600 余篇、小波著作 10 余部,对许多理论问题和应用问题进行了深入的研究和探讨,我们发现目前尚无全面深入介绍小波应用的著作,而许多人对如何应用小波理论、如何编程、如何解决自己的问题最感兴趣,因此撰写一本面向应用、兼顾理论的小波著作无疑具有重要意义.由李建平发起组织并编写写作大纲和具体要求的《小波分析与信号处理——理论、应用及软件实现》著作也由此诞生了.全书以小波分析国际应用研究为线索,以研讨班成员的特长为基础,由小波理论、小波应用、小波软件三篇构成,许多章节是研讨班成员博士论文的研究成果.实用性和可操作性是本书最大的特点,重要算法用 C 语言源代码给出,读者可直接应用或稍加修改即见成效.全书由陈廷槐教授担任学术顾问,负责质量把关,李建平担任主编,负责组织协调,具体分工如下:李建平撰写第 1、7、14、15、17、18、19、20 章,田逢春撰写第 8、9 章,曾理撰写第 6、11、12 章,易东撰写第 4、16 章,何中市撰写第 2、5 章,张万萍撰写第 10 章,赵静撰写第 13 章,何宇撰写第 3 章.全书由李建平审阅修改后定稿.

本书的写作得到中国工程院院士、国家教委光电技术及系统开放实验室主任黄尚廉教授和中国计算机学会理事、四川省学科评议组成员、重庆市科技顾问团顾问、重庆大学计算机研究所副所长、博士生导师程代杰教授的推荐和指导;得到我国著名科学家、中国科学院院士林为干教授的帮助和具体指导,林院士在百忙中为本书作序并提出宝贵意见,作者谨向他们表示衷心感谢.作者还要感谢重庆大学计算机系徐问之教授的一贯指导和帮助,徐教授自始至终关心本书的写作;感谢重庆大学系统工程及应用数学系杨万年教授、段虞荣教授、张世清博士的支持和关心,感谢段虞荣教授及其研究生郑继明提供的第 15 章参考资料,尤其要感谢张世清博士提供了部分重要参考文献.在本书形成的最后阶段,适逢中国科学院数学研究所陈翰麟教授来重庆大学讲学,与陈教授的讨论使本书增色不少,我们对陈教授的指导表示感谢.电子科技大学李正良教授、钟守铭副教授对本书的出版给予很大的支持,我们向他们表示感谢.同时,我们还要感谢后勤工程学院领导及教务部、科研处的鼎力支持.还要感谢后勤工程学院基础部及教研室的领导和同志们的支持和帮助;感谢被引用文献的作者以及提出过宝贵建议的各位同行与专家.作者认为,本书是国内外小波分析与信号处理领域科技工作者共同劳动成果的体现,是集体智慧的结晶.

由于作者水平有限,加之时间仓猝,书中定有不少错误和不妥之处,敬请广大读者批评指正.

本书得到重庆市中青年科技专家基金资助.

李建平于解放军后勤工程学院

1997 年 8 月 28 日

# 目 录

## 第一篇 小波理论

<b>第 1 章 小波分析的发展历史及文献综述</b> .....	(3)
1.1 人类对信息的认识、利用和发展.....	(3)
1.2 Fourier 分析概述.....	(4)
1.3 小波分析的发展历史.....	(5)
1.4 小波分析文献综述.....	(7)
1.5 分形理论、神经网络与小波分析.....	(12)
1.6 非线性 Fourier 分析与非线性小波分析.....	(14)
1.7 小波分析理论的主要成果.....	(15)
1.8 结论.....	(15)
<b>第 2 章 准备知识</b> .....	(22)
2.1 基本分析.....	(22)
2.2 函数空间.....	(27)
2.3 Fourier 级数.....	(29)
2.4 连续 Fourier 变换.....	(30)
2.5 离散 Fourier 变换.....	(31)
2.6 卷积.....	(35)
2.7 逼近.....	(36)
2.8 编程技术.....	(39)
<b>第 3 章 多分辨分析与共轭滤波器</b> .....	(46)
3.1 多分辨分析.....	(46)

3.2	滤波器定义及性质 .....	(52)
3.3	相位响应 .....	(59)
3.4	频率响应 .....	(67)
<b>第4章</b>	<b>连续小波变换 .....</b>	<b>(77)</b>
4.1	概述 .....	(77)
4.2	二维连续小波变换的引入 .....	(77)
4.3	二维连续小波变换的定义 .....	(78)
4.4	小波变换的一些基本性质 .....	(80)
4.5	小波基函数的选择 .....	(81)
<b>第5章</b>	<b>最佳小波基的算法 .....</b>	<b>(89)</b>
5.1	定义 .....	(90)
5.2	最佳基的搜索 .....	(94)
<b>第6章</b>	<b>二维母小波的构造 .....</b>	<b>(96)</b>
6.1	多维母小波函数与多维小波变换 .....	(96)
6.2	二维母小波函数的投影 .....	(97)
6.3	由一维母小波函数反投影构造二维母小波函数 .....	(99)
6.4	算法的数值实现 .....	(101)
<b>第7章</b>	<b>框架与样条小波理论 .....</b>	<b>(104)</b>
7.1	框架 .....	(104)
7.2	样条小波理论 .....	(110)
<b>第8章</b>	<b>时间-频率分析 .....</b>	<b>(125)</b>
8.1	时-频局部化及其度量 .....	(125)
8.2	相平面 .....	(129)
8.3	基与相平面 .....	(131)
8.4	信号的时-频分析 .....	(134)
8.5	编程实现 .....	(137)

## 第二篇 小波应用

<b>第9章</b>	<b>小波分析在图像数据压缩中的应用 .....</b>	<b>(141)</b>
9.1	概述 .....	(141)
9.2	小波变换的能量集中特性与数据压缩 .....	(142)

9.3	小波变换前后图像的灰度直方图变化与数据压缩	(144)
9.4	图像质量评价标准	(149)
9.5	小波变换实现图像数据压缩编码的一般步骤	(149)
9.6	时-频局部化与分块量化	(151)
9.7	零树法	(154)
9.8	小波变换用于图像数据压缩时需要考虑的几个问题	(161)
<b>第 10 章</b>	<b>小波分析在流体力学中的应用</b>	<b>(167)</b>
10.1	小波分析在平面叶栅优化设计中的应用	(167)
10.2	小波分析在双重孔隙储集层系统的数学模型求解中的应用	(173)
10.3	小波分析在双重孔隙储集层系统参数辨识中的应用	(183)
<b>第 11 章</b>	<b>小波分析在 ICT 中的应用</b>	<b>(188)</b>
11.1	CT 的原理与扇束卷积反投影	(188)
11.2	小波分析与边缘探测	(189)
11.3	从投影数据探测断面内边缘	(190)
11.4	实验结果	(191)
<b>第 12 章</b>	<b>小波分析在故障诊断中的应用</b>	<b>(193)</b>
12.1	小波变换与信号的奇异性	(193)
12.2	小波多尺度降噪算法	(196)
12.3	仿真实验	(198)
<b>第 13 章</b>	<b>小波分析在语音信号处理中的应用</b>	<b>(200)</b>
13.1	语音信号的特点	(201)
13.2	局部余弦变换与语音清、浊音分割及共振峰识别	(202)
13.3	基于小波变换的语音清、浊音分割及基音周期检测	(209)
13.4	基于小波变换的语音数据压缩	(215)
<b>第 14 章</b>	<b>小波分析在数学、物理及工程中的应用</b>	<b>(219)</b>
14.1	小波分析在数学中的应用	(219)
14.2	小波分析在物理学中的应用	(226)
14.3	小波分析在工程中的应用	(226)
<b>第 15 章</b>	<b>小波分析在地球物理勘探中的应用</b>	<b>(229)</b>
15.1	概述	(229)

15.2	分形与分维 .....	(230)
15.3	小波分析与分形理论算法及应用实例 .....	(230)
<b>第 16 章</b>	<b>小波分析在医学细胞识别中的应用 .....</b>	<b>(239)</b>
16.1	概述 .....	(239)
16.2	胞核边缘提取 .....	(239)
16.3	实验结果 .....	(241)
16.4	讨论 .....	(241)
<b>第 17 章</b>	<b>小波分析在线性系统中的应用 .....</b>	<b>(243)</b>
17.1	Haar 系统的算法 .....	(245)
17.2	具有消失矩和相伴求积的小波 .....	(247)
17.3	积分算子与精度估计 .....	(250)
17.4	算法描述 .....	(257)
17.5	数值结果 .....	(257)
<b>第 18 章</b>	<b>小波分析在神经网络中的应用 .....</b>	<b>(259)</b>
18.1	神经网络概述 .....	(259)
18.2	自适应小波神经网络 .....	(260)
18.3	基于小波变换的前传神经网络的分析与设计 .....	(261)
<b>第 19 章</b>	<b>多种小波基应用性能分析 .....</b>	<b>(282)</b>
19.1	小波基应满足的条件 .....	(282)
19.2	一维小波函数汇总分析 .....	(283)
19.3	高维小波基 .....	(298)
<b>第 20 章</b>	<b>小波分析的一些有前景的应用领域 .....</b>	<b>(301)</b>
20.1	小波分析的真正高潮还没有到来 .....	(301)
20.2	小波分析的现有应用领域分析 .....	(302)
20.3	小波分析应用存在的问题 .....	(303)
20.4	小波分析一些有前景的应用领域 .....	(303)

### 第三篇 小波软件



# CONTENTS

## PART ONE The Theory of Wavelet Analysis

<b>1 The History of Wavelet Analysis &amp; References Summarization About Wavelet</b> .....	(3)
1.1 Cognition, exploitation & development of human being about information .....	(3)
1.2 Summarization of Fourier analysis .....	(4)
1.3 History of wavelet analysis .....	(5)
1.4 References summarization about wavelet analysis .....	(7)
1.5 Fractal theory, neural network & wavelet analysis .....	(12)
1.6 Nonlinear Fourier analysis & nonlinear wavelet analysis .....	(14)
1.7 Main results of wavelet analysis .....	(15)
1.8 Conclusion .....	(15)
<b>2 Preliminaries</b> .....	(22)
2.1 Basic analysis .....	(22)
2.2 Function spaces .....	(27)
2.3 Fourier series .....	(29)
2.4 Continuous Fourier transform .....	(30)
2.5 Discrete Fourier transform .....	(31)
2.6 Convolution .....	(35)
2.7 Approximation .....	(36)
2.8 Programming technique .....	(39)