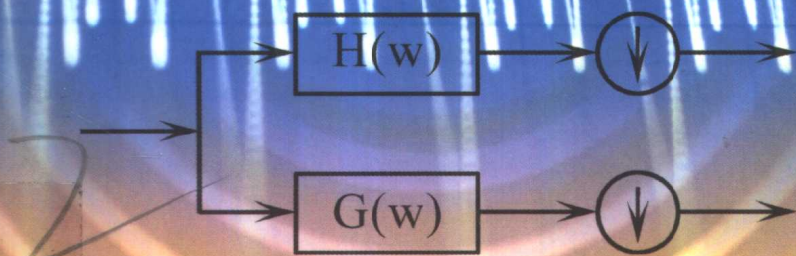


小波分析与应用实例

(第二版)

徐佩霞 孙功宪 编著



中国科学技术大学出版社

小波分析与应用实例

(第二版)

徐佩霞 孙功宪 编著

中国科学技术大学出版社

2001·合肥

内 容 简 介

本书阐述了小波变换的基本原理和基本方法,介绍了小波分析在信号处理、信号检测、语音与图像编码、多尺度边缘提取与重建等领域的应用,并给出了许多实用程序,最后对小波分析的最新发展动向做了讨论和研究。

本书介绍的理论和方法,很多内容是作者和同事们所研究的科研成果,其特点在于避免了繁琐的数学推导,面向实际应用。本书适合于信号与信息处理、通信与电子系统、电路与系统、应用数学等方面的科技工作者使用和参考,也可供相关高校作为研究生和二年级本科生的教材和教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

小波分析与应用实例 / 徐佩霞 编著. —2 版—合肥:
中国科学技术大学出版社, 2001.10

ISBN 7-312-01275-2

I. 小… II. 徐… III. 小波分析—应用 IV. O177

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 21047 号

凡购买中国科大版图书,如有白页、缺页、倒页者,由承印厂负责调换。

中国科学技术大学出版社出版发行

(安徽省合肥市金寨路 96 号,邮编: 230026)

中国科学技术大学印刷厂印刷

全国新华书店经销

开本: 850mm×1168mm 1/32 印张: 11.25 字数: 345 千字

1996 年 7 月第 1 版 2001 年 10 月第 2 版第 2 次印刷

印数: 3001—6000 册

ISBN 7-312-01275-2/O · 246 定价: 16.00 元

小波分析与应用研究是国家“八五”
自然科学基金、中国科学院、中国石油天
然气总公司、大庆油田联合资助项目

4.12.18/07

第二版前言

《小波分析与应用实例》是中国科学技术大学出版社 1996 年出版的一部论述小波理论及其应用的著作。本书在详细论述小波变换的基本原理和基本方法之后，重点介绍小波变换在语音和图像信号处理、信号检测、多尺度边缘提取等领域的应用，尤其是小波变换与小波包在语音与图像编码方面的应用，是作者近几年科研成果的反映，具有很好的应用前景。

本书的主要特点是理论联系实际，面向应用。在理论分析上力求深入浅出，注重用小波分析方法解决实际问题。我们提出的基于小波变换和变长度编码的无失真图像分层传输，及基于小波零树和集合分裂算法的比特率精确可控的图像编码方法已用于图文数据库浏览、查询和传输中，取得了良好的效果。附录中给出了多种用 C 语言编写的小波变换与小波包算法，对读者十分方便。因此自出版以来受到广大读者的欢迎和有关专家的好评。

鉴于信号处理学科的迅猛发展与小波理论的深入应用，中国科学技术大学出版社决定再版这本书。作者根据这几年的实际工作和读者们的反馈信息进行了修改，尤其是对附录提供的程序清单进行了整理和调试，使初学的读者能较快地付诸应用。

在本书的修改过程中，中国科学技术大学电子工程与信息科学系的毛捷同志做了大量的工作，本书也为他的本科生论文提供了良好的帮助。虽然我们进行了认真的修改，书中难免仍有不足之处，敬请广大读者批评指正。

作 者

2001年5月于合肥

第一版前言

小波分析(Wavelet Analysis)或多分辨率分析(Multiresolution Analysis)作为一种新兴的理论,是数学发展史上的重要成果.它无论对数学还是对工程应用都产生了深远的影响.小波分析已经和将要广泛应用于理论数学、应用数学、信号处理、语音识别与合成、自动控制、图像处理与分析、天体物理、分形等领域.从原则上讲,凡传统使用 Fourier 分析的地方,都可以用小波分析来代替.小波分析在时域和频域同时具有良好的局部化特性,而且由于对高频采取逐渐精细的时域或空域步长,从而可以聚焦到分析对象的任意细节,对传统的 Fourier 分析提出了挑战.

本书详细论述了小波变换的基本原理和基本方法,阐述了小波分析在语音信号处理、图像信号处理、信号检测、语音与图像编码、多尺度边缘提取与重建等领域的应用,并对小波变换的快速算法和算法结构以及小波分析的最新发展动向作了讨论和研究.本书还讨论了小波包的基本原理及其应用.为了方便阅读,书后附有各种算法的 C 语言源程序清单.

本书的特点在于避免了繁琐的数学推导,面向实际应用,从工程角度来论述小波分析,这一点对工程技术人员

非常有益. 本书特别适合于信号与信息处理、通信与电子系统、语音处理与编码、图像处理与编码、电路与系统、应用数学等方面研究人员使用和参考. 值得一提的是, 本书中很多内容都是作者和同事们所研究的科研成果, 并且吸收了国内外的最新动态, 具有很强的可读性和实用性.

由于作者的水平有限, 成书时间仓促, 书中一定存在许多缺陷, 恳请相关专家和读者指正.

本书在选撰过程中, 得到了校内外的老师和项目联合资助单位的热情支持和鼓励. 特别是中国科学技术大学通信与电子系统教研室的同事们经常与作者讨论本书所涉及的学术问题, 并且为作者提供了良好的成书环境, 在此深表感谢.

作 者

1996年6月于合肥

目 次

第二版前言	(i)
第一版前言	(iii)
第一章 小波分析基础	(1)
1.1 小波分析简介	(1)
1.2 多分辨率分析	(4)
1.3 Mallat 算法	(9)
1.4 关于镜像滤波器的进一步讨论	(13)
第二章 二进小波变换	(19)
2.1 一维信号的二进小波变换	(19)
2.1.1 基本性质	(19)
2.1.2 离散二进小波变换	(22)
2.1.3 一维信号的小波函数及小波变换快速算法	(24)
2.2 图像信号的二进小波变换	(28)
2.2.1 基本性质	(28)
2.2.2 二维离散小波变换	(29)
2.2.3 二维信号的小波函数及小波变换快速算法	(32)
第三章 规范正交小波基的构造	(35)
3.1 规范正交小波基的构造	(35)
3.2 有限规范正交小波基的构造	(49)
第四章 小波变换与滤波器组	(59)
4.1 滤波器组理论	(59)

4.2	滤波器组与小波紧框架	(67)
4.3	滤波器组的计算方法	(72)
4.4	可分 Hilbert 空间的分解	(74)
第五章	自适应小波变换与最优小波	(77)
5.1	编码中的自适应小波	(77)
5.2	最佳小波的计算	(80)
5.3	编码中的最优正交小波	(84)
第六章	小波变换在信号处理与检测中的应用	(88)
6.1	小波分析用于信号滤波	(88)
6.2	小波分析用于时频受限信号检测	(89)
6.3	基于小波变换的暂态信号检测方法	(92)
6.4	基于小波变换的信号最佳接收器的设计	(95)
6.5	信号瞬时特征的小波分析方法	(100)
6.6	小波子空间列的采样定理	(104)
第七章	小波变换在语音信号处理中的应用	(110)
7.1	小波变换用于语音编码	(110)
7.2	基于小波变换和矢量量化的语音编码	(116)
7.3	基于小波变换的基音提取	(120)
7.3.1	小波变换的频域基音估计	(121)
7.3.2	小波变换的时域基音估计	(123)
7.4	基于小波变换的语音特征参数的提取	(124)
第八章	图像的小波变换处理	(126)
8.1	基于小波变换的图像编码	(126)
8.2	自适应小波变换编码	(130)
8.3	三维医学图像的小波变换编码	(133)
8.4	图像的小波变换域编码的比特分配	(135)
8.5	应用小波零树的比特率可控图像编码器	(139)
8.5.1	小波变换与小波零树	(139)
8.5.2	集合分裂算法	(140)
8.5.3	编码方法	(142)
8.5.4	比特率控制	(144)

8.6 基于小波变换的运动估计与运动补偿	(145)
第九章 小波包的基本原理及其应用	(150)
9.1 小波包的基本原理	(150)
9.2 信息代价函数与最佳子集的选取	(153)
9.3 小波包与非标准矩阵相乘算法	(156)
9.4 小波包在图像编码中的应用	(161)
9.5 小波包与公开密钥语音加密	(164)
第十章 离散小波变换的快速算法与算法结构	(166)
10.1 离散小波变换算法结构	(166)
10.2 基于 FFT 的 DWT 算法	(169)
10.3 基于 Running FIR 的 DWT 方法	(172)
10.4 小波变换快速算法的进一步研究	(174)
10.5 小波变换的边界延拓方法	(179)
第十一章 小波变换与多尺度边缘提取	(182)
11.1 多尺度边缘提取	(182)
11.2 一维信号从多尺度边缘重建	(185)
11.2.1 一维重建算法	(185)
11.2.2 投影算子 P_r 的实现	(187)
11.3 图像信号从多尺度边缘的重建	(189)
11.3.1 二维重建算法	(189)
11.3.2 二维信号 P_r 的实现	(191)
11.4 多尺度边缘提取与重建实验结果分析及其 对图像编码的意义	(192)
11.5 第二代小波变换图像编码	(194)
第十二章 二维不可分离小波变换简介	(198)
12.1 多维分析/综合系统模型	(198)
12.2 分析与综合系统的多相表示	(202)
12.3 二维不可分离小波变换	(204)
12.4 二维二带完全重构滤波器	(207)
12.5 从一维滤波器到多维滤波器的变换	(209)
12.6 从滤波器组建立小波基	(212)

12.7 二维不可分离小波变换应用展望	(214)
附录	(216)
附录 A 一维小波正变换源程序清单	(217)
附录 B 一维小波反变换源程序清单	(227)
附录 C 一维小波包分解源程序清单	(236)
附录 D 一维小波包重建源程序清单	(248)
附录 E 二维正交小波正变换源程序清单	(257)
附录 F 二维正交小波反变换源程序清单	(270)
附录 G 二维小波包分解源程序清单	(284)
附录 H 二维小波包重建源程序清单	(311)
附录 I 小波滤波器系数文件生成源程序清单	(332)
附录 J 小波分析中常用的数学符号	(335)
参考文献	(336)

第一章 小波分析基础

本章是小波分析 (Wavelet Analysis) 的理论基础, 也是学习以后章节的基础. 首先从连续小波变换谈起, 讨论了多分辨率分析 (Multiresolution Analysis) 和 Mallat 金字塔算法, 并且给出了规范正交小波基和镜像滤波器的一系列描述. 本章最后还对小波的时频局部化分析做了讨论.

1.1 小波分析简介

近年来, 由函数 h 经伸缩和平移得到的一族函数

$$h_{ab}(x) = |a|^{-\frac{1}{2}} h\left(\frac{x-b}{a}\right) \quad a, b \in \mathbb{R}, a \neq 0 \quad (1.1)$$

被广泛应用于数学理论和其它领域, 此函数被称之为小波函数族. 式中, a 为伸缩因子, b 为平移因子.

这种伸缩和平移的思想源远流长, 它已经在信号处理、信号检测、多尺度边缘提取等领域得到应用. 根据应用领域的不同可以选择不同的参数 a 和参数 b . 如果让(1.1)式中的 a 和 b 在 $\mathbb{R}^* \times \mathbb{R}$ 上连续变化, 则任意函数 $f \in L^2(\mathbb{R})$ 可以表示为:

$$Uf(a, b) = \langle h_{ab}, f \rangle = |a|^{-\frac{1}{2}} \int \overline{h\left(\frac{x-b}{a}\right)} f(x) dx \quad (1.2)$$

如果 h 满足约束条件 (也称为容许条件)

$$\int \frac{|\hat{h}(\omega)|^2}{\omega} d\omega < \infty \quad (1.3)$$

式中, $\wedge$ 表示 Fourier 变换:

$$\hat{h}(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int e^{-j\omega x} h(x) dx$$

那么由(1.2)式定义的 U 是 $L^2(R)$ 到 $L^2(R^* \times R; a^{-2} da db)$ 的映射. U 称为连续小波变换. 满足(1.3)式的 h 称为允许小波.

(1.3)式事实上表示, h 有足够的衰减速度, 并且均值为 0. 这也是在实际工作中所希望的结果.

$$\int h(x) dx = 0 \quad (1.4)$$

典型情况是 h 有些振荡, 例如

$$h(x) = \frac{2}{\sqrt{3}} \pi^{-\frac{1}{4}} (1-x^2) e^{-\frac{x^2}{2}} \quad (1.5)$$

在其它一些应用场合, 可以限制(1.1)式中参数 a, b 在离散值上变化. 固定伸缩步长 $a_0 > 1$, 移位步长 $b_0 \neq 0$. 则有

$$h_{mn}(x) = a_0^{-\frac{m}{2}} h(a_0^{-m} x - nb_0) \quad (1.6)$$

即

$$a = a_0^m, \quad b = nb_0 a_0^m$$

我们可以看到, 对应于大的正值 m , h_{m0} 的波形是展开的, 同时有大的平移因子 $b_0 a_0^m$ 与之对应. 对于大的负值 m , 情况正好相反, h_{m0} 的波形是集成的, 小的平移因子 $b_0 a_0^m$ 就足以覆盖.

离散小波变换 T 是和离散小波联系在一起的, 它把函数 f 映射到 Z^2 中的数列.

$$\begin{aligned} (Tf)_{mn} &= \langle h_{mn}, f \rangle \\ &= a_0^{-\frac{m}{2}} \int \overline{h(a_0^{-m} x - nb_0)} f(x) dx \end{aligned} \quad (1.7)$$

如果 h 为允许小波, 并且有足够的衰减, 则变换 T 把 $L^2(R)$ 映射到 $l^2(Z^2)$. 通常, T 不存在逆, 如果存在, 即对某些 $A > 0, B < \infty$, 有

$$A \|f\|^2 \leq \sum_{m,n \in Z} |\langle h_{mn}, f \rangle|^2 \leq B \|f\|^2, f \in L^2(R)$$

则函数族 $\{h_{mn}; m, n \in Z\}$ 称为一个框架. 这时可以建立从小波系数 $\langle h_{mn}, f \rangle$ 重建 f 的数字方法. 特别地

$$f = \frac{2}{A+B} \sum_{mn} h_{mn} \langle h_{mn}, f \rangle + R \quad (1.8)$$

这里

$$\|R\| \leq O\left(\frac{B}{A} - 1\right) \|f\|$$

如果 $\frac{B}{A}$ 接近于 1, 则误差项 R 可以被忽略. 实际上, 使用(1.5)

式定义的小波, 采用 $a_0 = 2^{\frac{1}{4}}, b_0 = 5$, 可以有 $\frac{B}{A} - 1 \leq 10^{-5}$, 重建公式

(1.8)给出了很好的结果, 甚至对于大的 $a_0 = 2$, 对应的 $\frac{B}{A} - 1 \approx 0.08$,

用它对语音进行分解和重建时, 仍有很好的清晰度和可懂度^[1].

在有些场合下, 小波函数族 h_{mn} 是相关的, 而不是相互独立的, 因而离散小波变换域只是 $L^2(Z^2)$ 的子空间. 框架相关性越强, 子空间就越小, 这在某些场合是有用的(如去除加性噪声). 如果 a_0, b_0 分别接近于 1 和 0, 则框架相关性很强, 接近于连续小波, 它可以用于边缘检测等领域. 在另外一些场合, 则走向另一个极端, 要求去除框架的相关性. 人们选取 h 和 a_0, b_0 , (a_0 典型值为 2), 使 h_{mn} 构成规范正交基. $L^2(R)$ 内最简单的规范正交基就是著名的 Harr 基, 即

$$h(x) = \begin{cases} 1, & 0 \leq x < \frac{1}{2} \\ -1, & \frac{1}{2} \leq x < 1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1.9)$$

并且当取 $a_0 = 2, b_0 = 1$ 时

$$h_{mn}(x) = 2^{-\frac{m}{2}} h(2^{-m}x - n), \quad m, n \in \mathbb{Z} \quad (1.10)$$

构成 $L^2(\mathbb{R})$ 规范正交基. 对 $1 < p < \infty$, 它同样构成 $L^p(\mathbb{R})$ 规范正交基.

S.Mallat 和 Y.Meyer 发现这些小波函数都可以用多分辨率分析统一起来. 对函数 $f \in L^2(\mathbb{R}^d)$, 可以用一系列函数的极限来表示, $f = \lim_{m \rightarrow -\infty} P_m f$, $P_m f$ 代表了尺度 2^m 上的平滑版本. 固定 m , 则 $\langle h_{mn}, f \rangle$ 对应于两个平滑版本的差别. Mallat 算法在语音与图像的分解与重建中起到了重要作用, 就像 FFT 在经典 Fourier 分析中一样举足轻重.

1.2 多分辨率分析

多分辨率分析是在 $L^2(\mathbb{R})$ 函数空间内, 将函数 f 描述为一列近似函数的极限. 每一个近似都是函数 f 的平滑版本, 而且具有越来越精细的近似函数. 这些近似都是在不同尺度上得到的, 多分辨率分析由此得名.

严格地说, 多分辨率分析的思想是:

① $L^2(\mathbb{R})$ 内一系列嵌套子空间 V_m , $m \in \mathbb{Z}$,

$$\cdots V_2 \subset V_1 \subset V_0 \subset V_{-1} \subset V_{-2} \cdots \quad (1.11)$$

这一系列嵌套子空间具有:

逼近性:

$$\bigcap_{m \in \mathbb{Z}} V_m = \{0\}, \quad \overline{\bigcup_{m \in \mathbb{Z}} V_m} = L^2(\mathbb{R}) \quad (1.12)$$

伸缩性:

$$f \in V_m \Leftrightarrow f(2 \cdot) \in V_{m-1} \quad (1.13)$$

因此, V_m 依次是上一级子空间 V_{m-1} 的近似子空间.

② 存在函数 $\varphi \in V_0$, 对所有的 $m \in \mathbb{Z}$, φ_{mn} 构成 V_m 的无条件基. 即

$$V_m = \overline{\text{span}\{\varphi_{mn}, n \in \mathbb{Z}\}} \quad (1.14a)$$

③ 存在 $0 < A \leq B < \infty$, 对所有的 $c(n)_{n \in \mathbb{Z}} \in l^2(\mathbb{Z})$, 有

$$A \sum_n |c_n|^2 \leq \left| \sum_n c_n \varphi_n \right|^2 \leq B \sum_n |c_n|^2 \quad (1.14b)$$

这里

$$\varphi_{mn}(x) = 2^{-\frac{m}{2}} \varphi(2^{-m}x - n)$$

令 P 表示向 V_m 上的投影, 从(1.11)式和(1.12)式可以看出, 对任意的 $f \in L^2(\mathbb{R})$, $\lim_{m \rightarrow -\infty} P_m f = f$. 由(1.13)式保证了 V_m 对应不同尺度. $f \in V_m \Rightarrow f(\bullet - 2^m n) \in V_m, m \in \mathbb{Z}$, 则是(1.14)式必然结果.

为了讨论多分辨率分析, 这里从一个简单的例子开始.

例 1.1 一个典型的例子是:

$V_m = \{f \in L^2(\mathbb{R}); f \text{ 在 } [2^m n, 2^m(n+1)] \text{ 上为常数}, n \in \mathbb{Z}\}$

显然满足(1.11)~(1.13)式. 定义投影算子 P 为:

$$P_m f|_{[2^m n, 2^m(n+1))} = 2^{-m} \int_{2^m n}^{2^m(n+1)} f(x) dx$$

随着 m 增加, $P_m f$ 是 f 越来越精确的近似.

可以选择

$$\varphi(x) = \begin{cases} 1, & 0 \leq x < 1 \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$$

有

$$\varphi \in V_0, V_m = \overline{\text{span}\{\varphi_{mn}\}}$$

由(1.13)式知, (1.14)式可以用更弱条件 $V_0 = \overline{\text{span}\{\varphi_{0n}\}}$ 代替. 不失一般性, φ_{0n} 是规范正交的 (对任意 m , φ_{mn} 也是). 如果不是规范正交的, 可以令

$$\tilde{\varphi}(\omega) = c \hat{\varphi}(\omega) \left(\sum_{k \in \mathbb{Z}} |\tilde{\varphi}(\omega + 2k\pi)|^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.15)$$

有 $\overline{\text{span}\{\varphi_{0n}\}} = \overline{\text{span}\{\tilde{\varphi}_{0n}\}}$. 并且 $\tilde{\varphi}_{0n}$ 为规范正交的.

定义