

小波多尺度分析应用

侯遵泽 杨文采 著



科学出版社

小波多尺度分析应用

侯遵泽 杨文采 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书主要介绍作者在小波分析应用中的两个方面所取得的研究成果,即重力场的多尺度分析和电子证件的制作与检测。书中一方面展现了小波多尺度分析在中国大陆布格重力异常分解、密度反演中的应用以及在大别—苏鲁地区、塔里木盆地、华北地区等的应用情况和发挥的作用;另一方面介绍了小波防伪技术在证件制作与检测中的最新研究成果和实用性。

本书适合从事应用数学、计算科学、地球科学、电子与信息科学等学科专业研究的科技人员和高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

小波多尺度分析应用/侯遵泽,杨文采著. —北京:科学出版社,2012
ISBN 978-7-03-035372-6

I. ①小… II. ①侯… ②杨… III. ①小波分析-应用 IV. ①O177

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 195105 号

责任编辑:童安齐 杨 阳/责任校对:刘玉靖

责任印制:吕春珉/封面设计:耕者设计工作室

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双 青 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 10 月 第 一 版 开本: B5 (720 × 1000)

2012 年 10 月 第一次印刷 印张: 9 3/4 插页: 3

字数: 176 000

定价: 60.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换<双青>)

销售部电话 010-62134988 编辑部电话 010-62138978-8212

版权所有,侵权必究

举报电话: 010-64030229; 010-64034315; 13501151303

作者简介

侯遵泽，1956年6月生。博士，中国人民武装警察部队学院教授，硕士研究生导师。1982年本科毕业于山东大学，1992年硕士研究生毕业于北京大学，1997年博士研究生毕业于哈尔滨工业大学。1982年8月～1997年10月在地矿部地球物理勘查研究所工作，1997年11月至今在中国人民武装警察部队学院工作。自1982年以来，主持或参加并完成国家“八五”重大项目、国家科技支撑计划项目（或专题）、国家自然科学基金项目、国家“863”计划项目等国家级项目12项，省部级科研项目16项，其中1项获得国家科技进步二等奖，4项获省部级科技成果二等奖，多项研究处于国际先进、国内领先的地位。发表学术论文160余篇，其中多篇获各种奖励和被国际重要检索机构SCI、EI等收录。武警学院首批学科带头人，获得公安部优秀科技人才一等奖励津贴，享受公安部特殊津贴及国务院政府特殊津贴。



作者简介

杨文采，1942年10月生。博士，中国科学院院士。1964年毕业于北京地质学院，1981年公派赴加拿大 McGill（麦吉尔）大学进修，后考取该校博士研究生，并于1984年取得哲学博士学位。1987~1988年赴英国帝国理工学院作博士后研究，1992年任地质矿产部地球物理与地球化学勘查研究所所长，现任中国地质科学院地质研究所研究员、博士生导师，北京大学、中国地质大学兼职教授，中国科学院地球物理研究所客座研究员，全国政协委员，国家科技奖励评审委员。在地球物理学、计算科学等多个方面取得了创造性的成果，撰写专著8部，发表研究论文数百篇，被中国核心期刊 CSCD 引用600多次，被SCI、EI文献引用200多次。



序

现代科学技术的进步,使我们能够快速地了解各种信息,使生活变得丰富多彩。然而,知识界虽然告别了信息缺乏的年代,但是现在又陷入了“信息”太多太滥的怪圈。如何识别和提取更为准确和可靠的信息,仍然是知识界面临的难题之一,而先进的数学方法和计算功能永远是识别和提取准确可靠信息的科学基础。因此,发展先进的数学方法以识别隐蔽的信息十分必要。本书讨论的正是二维小波分析这一先进的数学工具,在两个完全不同的领域应用于信息识别和提取的典型。

20世纪80年代后期,小波分析理论在计算数学研讨会上成为热点,至1991年完成了从理论分析到算法实现的成长过程。1994年法国科学家来华介绍小波分析,我请我的两位数学系毕业的研究生参加了这次研讨班,并确定由其中的一位(即本书的作者侯遵泽教授),以“二维小波多尺度分析在重力场信息分析中的应用”为主题作他的博士论文。1997年初,他的小波多尺度分析的论文在《地球物理学报》上发表,很快成为该刊引用率最高的论文之一,直至今天。

科学进步轨迹的主导方向是精细化与系统化的交织与循环。物理学把物质运动类型不断地分解与精细化,信息学也不不断地把信息分解以便于深入分析。小波分析就是一种按照信息的分辨率或尺度大小将综合信息分解开来,以便深入解剖信息内涵的一种趋于完美的数学工具。信息有可能来自单一的源,而且不含噪声;信号则经常来自多个源的叠合,并在传播过程中受到干扰。因此,把信号分解为有确定来源的信息的组合,就成为信息识别和提取中不可缺少的一个环节。本书在阐述小波分析的理论之后,介绍二维小波分析在重力场多尺度分析方面的应用,把来自不同深度的源产生的区域重力场信号分解开,成为面积性信息数据识别和提取的一个范例。

该书的第三篇介绍应用小波分析进行证件防伪及证件真伪识别。利用小波分析技术,在设计证件时可以把密码加入照片的小波系数中,在查验证件时只需要用软件去提取照片中的密码,就可以判别证件的真伪。侯遵泽教授发明的这种技术,体现了小波分析理论的精髓和应用的广泛性,为小波分析在信息管理中的应用提供了一个很好的范例。

科学的发展是社会文明的标志之一,现今,不仅小波分析方法的应用日益广泛,在小波变换基础上发展起来的曲波变换也开始进入科学研究和信息提取的领

域。花起花落花更红，书出书传书更香。我希望通过本书与广大读者的交流，使小波分析这朵鲜花开得更鲜更艳，结出更加丰硕的果实。

中国科学院院士 杨文采

2012年3月29日

前 言

疑难问题的解决，最关键的是要找到科学的方法并加以应用。数值的分解，就是一个疑难问题。本书介绍的重力异常应用和高防伪性能证件的制作，都首先需要对初始数据（或图像）进行分解。

“求和容易，分解难”，这是被公认的事实。例如，将 10 在正整数域里的分解，分成 2 个数的和，有 $10=1+9$ ， $10=2+8$ ， $10=3+7$ ， $10=4+6$ ， $10=5+5$ ；分成 3 个数的和，有 $10=1+1+8$ ， $10=1+2+7$ ， $10=1+3+6$ ， $10=1+4+5$ ， $10=2+2+6$ ， $10=2+3+5$ ， $\cdots$ ；将 10 在有理数域里分解则有无穷多个，在实数域里的分解则不可数。

然而，在加上一些条件限制后，分解的结果就会少，甚至可能有一个大概的了解或是唯一的分解结果。例如，10 的分解，分解成不小于 4 的正整数，则结果只有 2 个；如果分解成不小于 4 的正偶数，则结果只有 1 个（ $10=4+6$ ）。实际中的分解一般是有目的性的，不一定求精准，只要达到应用效果即可。

重力场的分解，一般是多意的。有效的重力异常分解，长期以来一直是世界科学中的难题。这是重力资料的应用受到限制的根本原因。过去，一些方法的分解虽然有一定道理（例如，趋势分析，就是假定一个大的趋势，将场分解成趋势场和剩余场；移动平均等方法，也是将异常分为两个部分，还有解析延拓、高次导数等方法），但这些方法均难以赋予其实际含义，一般很难得到较好的解释结果。

小波分析具有“尺度”（或频段）分解的功能，用它进行多尺度分解是有意义的。实验证明，重力场的小波多尺度分解具有地质解释意义，再结合其他方法或已知地质条件，则会得到很好的地质解释结果。

长期以来，证件防伪与假证伪造一直处于“道高一尺，魔高一丈”的状态，造假难以杜绝，究其根本原因，是防伪标识的“可见性”。运用小波多尺度分析方法结合数字水印技术进行数字图像的分解、加密，可以应用到制证防伪领域，实现制作的防伪标识不可见，从而达到高性能的防伪效果。

关于数字水印技术的介绍，目的是为了使得读者更好地理解小波分析防伪技术，也是书中电子证件不可或缺的内容。诚然，数字水印技术可以独立地应用于证件防伪，但运用小波分析方法处理图像，嵌入大容量的数字水印，既保证了防伪标识的透明性和鲁棒性，又适合了人类视觉的效果，还可极大地提高防伪功能。

本书没有过多地叙述小波分析的理论与方法，而是着重展示了其在多尺度分析中的研究与应用成果。

杨文采院士早在 1994 年就以战略家的眼光提出要在地球物理领域率先研究二维小波多尺度分析，在他的悉心指导下，我顺利完成有关该领域的博士学位论文，也为后来开展的防伪技术研究奠定了基础。此外，哈尔滨工业大学刘家琦教授在证件识别方面给予了我很多具体的帮助；刘光鼎院士、徐世浙院士一直对我的研究非常关注，给予了很多指导、鼓励和肯定；北京大学彭立中教授在小波图像处理等方面给予了帮助；中国防伪技术协会曹开星秘书长给予了多方面的鼓励和支持；中国地质科学院地质研究所程振炎研究员制作了大量图件；屈忠锋同学做了软件开发和大量实验，在此作者对他们表示由衷感谢！

感谢中国人民武装警察部队学院的各级领导、同事和战友们多年来对我工作的大力支持、关心和帮助！

最后，还要感谢我的妻子孙培香女士多年来对我事业的无私奉献和辛勤付出。

侯遵泽

2012 年春

目 录

序

前言

第一篇 小波变换与多尺度分析

第一章 小波变换	3
1.1 一维小波变换	3
1.2 二维小波变换	4
第二章 多尺度分析原理和方法	6
2.1 一维多尺度分析	6
2.2 二维多尺度分析	8
第三章 小波变换和多尺度分析算法	10
3.1 具有紧支集标准正交基的小波函数	10
3.2 二维尺度函数 Φ_N 和 Ψ_N ($N=1, 2, 3$) 的构造	14
3.3 一维 Mallat 塔式分解及重构算法	17
3.4 二维 Mallat 塔式分解及重构算法	18
3.5 离散二进小波变换与重构算法	20
3.6 快速小波变换 FWT 算法	21
3.7 小波包算法	22
主要参考文献	25

第二篇 重力场小波多尺度分解及其应用

第四章 重力异常分解概述	29
第五章 重力异常的计算与密度反演	32
5.1 重力勘探	32
5.2 地层密度分界面重力异常的计算	33
5.3 复杂地质体重力异常计算的一种模型及其快速算法	34
5.4 重力资料的处理、解释	38
第六章 一维重力异常的小波变换	40
6.1 一维重力异常多尺度分解方法	40

6.2 一维重力异常多尺度分解模拟实验	41
第七章 二维重力异常的小波变换	43
7.1 二维重力异常多尺度分解方法	43
7.2 二维重力异常模拟及实际资料处理	44
第八章 中国布格重力异常的多尺度分析	53
8.1 概述	53
8.2 中国布格重力异常的多尺度分解	54
8.3 中国大陆地壳密度不均匀的反演	58
第九章 区域重力异常多尺度分解应用举例	62
9.1 大别苏鲁重力异常多尺度分析	62
9.2 塔里木盆地重力异常多尺度密度反演	71
9.3 华北区域重力异常多尺度密度反演	74
主要参考文献	81

第三篇 小波分析防伪技术与电子证件

第十章 证件防伪概述	87
第十一章 数字水印方法	96
11.1 数字水印的基本原理和特点	96
11.2 数字水印典型算法	98
第十二章 图像的小波分析	102
12.1 Mallat 分解与重构算法	102
12.2 图像小波分解与重构算法	103
12.3 小波分析在图像数字水印中的应用	104
第十三章 彩色图像的小波域盲水印算法	108
13.1 图像的彩色空间表示及转换	108
13.2 图像置乱技术	109
13.3 人类视觉特性与水印的嵌入位置	110
13.4 算法的实现	111
第十四章 实验及其结果分析	113
14.1 水印的嵌入及检测	113
14.2 关于鲁棒性的实验	115
14.3 应用探索	119
第十五章 电子证件制作与检测	127
15.1 加密水印信号的选择	127

15.2 电子证件的制作	128
15.3 电子证件的检测	129
15.4 模拟实验	129
15.5 稳健性实验	132
主要参考文献	137
后记	139

第一篇 小波变换与多尺度分析

本篇主要简述小波变换、多尺度分析的方法原理，重点介绍有关的小波变换和多尺度分析算法。

众所周知，自 1822 年 Fourier 发表他的热传导解析理论以来，Fourier 变换便成为最广泛应用的数学方法之一。然而，在应用中人们不断地发现它的不足之处。例如，它只能刻画函数的整体频谱，而不能获得信号的局部特性，即它不能用于局部分析。在很多实际问题中，我们所关心的恰恰是信号在局部空间范围中的特征。例如，地下断层会使重力异常产生阶跃，地震波的传播在遇到低速层时会产生速度和方向的变化，这些在地球物理勘查中都需做出在空间域或时间域上的局部分析。对这些问题，用 Fourier 分析方法往往不是很有效。在信号分析时，我们经常需要同时对信号在空间域和频率域上实行局部化，这也是 Fourier 变换做不到的。因此，需要寻找一种能对时、频局部化分析的新方法。

小波的原始概念最早是 J. Morlet 和 A. Grossmann 在 20 世纪 70 年代分析地球物理数据时引进的，小波变换继承了 Fourier 变换的优点，同时又弥补了其不足。小波分析被誉为“数学显微镜”，它是调和分析（包括函数空间、广义函数、Fourier 分析等）这一重要学科半个世纪以来的工作结晶，也是信号分析、图像分析、非线性科学和工程技术多年来在方法上的重大突破，是应用数学的新趋势。概括小波分析的主要功能有两点：一是其局部分析特点；二是其多尺度分析功能。若干应用中的事实表明，小波分析是解决实际问题的强有力工具。

第一章 小波变换

与其他函数变换相同,小波变换也是对一个函数 $f(x)$ 的变换,但它通过对函数 $f(x)$ 与一个所谓的小波函数作用后,具有平移、伸缩的特点。本章先通过一维小波变换的介绍,使读者了解小波变换的概念,同时,为了理解后面的应用,介绍二维小波变换。

1.1 一维小波变换

设一个函数 $\phi(x) \in L^2(R)$, 如果满足条件

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \phi(x) dx = 0$$

或

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\hat{\phi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < +\infty \quad (1-1)$$

则称 $\phi(x)$ 为小波函数。其中 $\hat{\phi}(\omega)$ 是 $\phi(x)$ 的 Fourier 变换, $L^2(R)$ 是实数域 R 上平方可积函数所构成的空间。

对于任一函数 $f(x) \in L^2(R)$, 定义其小波变换为

$$W_f(a, b) = \langle f, \phi_{a,b} \rangle = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \phi\left(\frac{x-b}{a}\right) dx \quad (1-2)$$

其中

$$\phi_{a,b}(x) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \phi\left(\frac{x-b}{a}\right) \quad (a, b \in R, a \neq 0) \quad (1-3)$$

式中: a 是伸缩系数; b 代表平移多少。

令

$$C_{\Psi} = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\hat{\phi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega$$

得相应的小波逆变换

$$f(x) = \frac{1}{C_{\Psi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} W_f(a, b) \phi_{a,b}(x) \frac{da db}{a^2} \quad (1-4)$$

取

$$a = a_0^m, \quad b = nb_0 a_0^m, \quad a_0 > 1, \quad b_0 > 1$$

则有小波变换的离散形式

$$C_f(m, n) = a_0^{-\frac{m}{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \overline{\phi(a_0^{-m}x - nb_0)} dx \quad (1-5)$$

此时,

$$\phi_{m,n}(x) = a_0^{-\frac{m}{2}} \phi(a_0^{-m}x - nb_0), \quad m, n \in Z$$

特别地, 取 $a_0=2, b_0=1$, 有

$$\phi_{m,n}(x) = 2^{-\frac{m}{2}} \phi(2^{-m}x - n) \quad (1-6)$$

$$C_f(m, n) = 2^{-\frac{m}{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \phi(2^{-m}x - n) dx \quad (1-7)$$

可以证明 $\{\phi_{m,n}\}_{m,n \in Z}$ 构成空间 $L^2(R)$ 的一组标准正交基, 即

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \phi_{m,n}(x) \overline{\phi_{j,k}(x)} dx = \delta_{mj, nk} = \begin{cases} 1, & m=j, \quad n=k \text{ 时} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

并有相应的小波逆变换

$$f(x) = \sum_{m,n \in Z} C_f(m, n) \phi_{m,n}(x) \quad (1-8)$$

可以证明, 式 (1-1) 等价于

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \phi(x) dx = 0 \quad (1-9)$$

这说明, 小波函数 $\phi(x)$ 具有振荡性。从式 (1-3) 可以看出, $\phi_{a,b}(x)$ 的振荡性随 $\frac{1}{|a|}$ 的增大而增大, 因此, a 是频率参数; b 是空间参数; 从式 (1-5) 可以看出, 小波变换对不同的频率成分 (相应于 a_0^{-m}), 在空间域上的取样步长 (即 $b_0 a_0^m$) 是有调节作用的, 高频者 (对应于小的 m 值) 取样步长小, 低频者 (对应于大的 m 值) 取样步长大, 这说明小波变换在空间域和时间域同时具有良好的局部化性质; 此外, 小波变换对于平移和伸缩是共变的, 即对于固定的小波函数 $\phi(x)$, 若 $W_f(a, b)$ 是 $f(x)$ 的小波变换, 则 $W_f(a, b-b_0)$ 就是 $f(x-b_0)$ 的小波变换, $W_f\left(\frac{a}{\lambda}, \frac{b}{\lambda}\right)$ 就是 $\frac{1}{\sqrt{\lambda}} f\left(\frac{x}{\lambda}\right)$ 的小波变换 (这里 $\lambda > 0$), 这说明小波变换可以通过伸缩、平移而具备“变焦距”的特性。

1.2 二维小波变换

设 $\Psi(x, y) \in L^2(R^2)$, R^2 为二维实数域, 对于任意的 $(\omega_x, \omega_y) \in R^2$, $\Psi(x, y)$ 的 Fourier 变换 $\hat{\Psi}(\omega_x, \omega_y)$ 满足

$$C_\Psi = \int_0^{+\infty} \frac{|\hat{\Psi}(s\omega_x, s\omega_y)|^2}{s} ds < +\infty, s > 0 \quad (1-10)$$

则任一函数 $f(x, y) \in L^2(R^2)$ 的小波变换定义为

$$\begin{aligned} W_f(s, u, v) &= \langle f, \Psi_{s,u,v} \rangle \\ &= s \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) \overline{\Psi(s(x-u), s(y-v))} dx dy \end{aligned} \quad (1-11)$$

其中

$$\Psi_{s,u,v}(x, y) = s\Psi(s(x-u), s(y-v)) \quad (1-12)$$

与一维情形相似, 小波函数 $\Psi(x, y)$ 满足

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \Psi(x, y) dx dy = 0 \quad (1-13)$$

相应小波重构为

$$f(x, y) = \frac{1}{C_\Psi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_0^{+\infty} W_f(s, u, v) \Psi_{s,u,v}(x-u, y-v) s ds du dv \quad (1-14)$$

可以定义 N 个小波函数: $\Psi^i(x, y)$, $1 \leq i \leq N$, 其 Fourier 变换 $\hat{\Psi}^i(\omega_x, \omega_y)$ 满足

$$\sum_{i=1}^N |\hat{\Psi}^i(\omega_x, \omega_y)|^2 = |\hat{\Psi}(\omega_x, \omega_y)|^2 \quad (1-15)$$

对应于每一个 i , 有其小波变换

$$W_f^i(s, u, v) = s \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) \Psi^i(s(x-u), s(y-v)) dx dy \quad (1-16)$$

相应地, 其小波重构为

$$f(x, y) = \frac{1}{C_\Psi} \sum_{i=1}^N \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_0^{+\infty} W_f^i(s, u, v) \Psi_{s,u,v}^i(x-u, y-v) s ds du dv \quad (1-17)$$

其中

$$\Psi_{s,u,v}^i(x, y) = s\Psi^i(s(x-u), s(y-v)) \quad (1-18)$$

特别地, 取 $i=1, 2, 3$, $s=2^{-j}$, 有函数族

$$\left\{ \begin{aligned} &2^{-j}\Psi_{2^j}^1(x-2^{-j}n, y-2^{-j}m) \\ &2^{-j}\Psi_{2^j}^2(x-2^{-j}n, y-2^{-j}m) \\ &2^{-j}\Psi_{2^j}^3(x-2^{-j}n, y-2^{-j}m) \end{aligned} \right\}_{(m,n,j) \in \mathbb{Z}^3} \quad (1-19)$$

构成空间 $L^2(\mathbb{R}^2)$ 的一个标准正交小波基。