

多尺度动态建模 理论及其应用

文成林 著



科学出版社

www.sciencep.com

N 945 15
126
11

多尺度动态建模理论 及其应用

文成林 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是关于多尺度动态建模理论及其应用的一本专著,主要汇集了作者近年来在小波滤波、多传感器数据融合、多尺度系统理论、多尺度动态建模及目标状态估计等方面的研究成果,同时也介绍了近年来在多尺度系统理论研究领域的一些基本原理和主要方法。本书涉及的理论和方法有:多尺度系统理论与多尺度建模方法,时间序列分析的多尺度方法,小波与Kalman滤波的多尺度联合估计方法,动态过程的多尺度表示方法、建模与数据融合方法,多传感器数据融合与线性逆问题求解的多尺度方法,经验模式分解边界问题的多尺度方法,过程监测与安全检测的多尺度数据融合方法,多尺度模型预测控制方法,多速率系统的多模式设计方法等。

本书可作为信息科学专业研究生的教学参考书,同时对从事多尺度动态建模理论及其应用技术研究、开发和应用的科技人员也具有一定的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

多尺度动态建模理论及其应用/文成林著. —北京:科学出版社,2008
ISBN 978-7-03-020106-5

I. 多… II. 文… III. 动态-系统建模-研究 IV. N945.12

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第192207号

责任编辑:姚庆爽 潘继敏 / 责任校对:刘小梅

责任印制:刘士平 / 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

*

2008年1月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2008年1月第一次印刷 印张: 26 1/4

印数: 1—2 500 字数: 512 000

定价: 60.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈明辉〉)

前 言

在自然界和工程实践中,许多现象和过程都具有多尺度特征或多尺度效应,同时,人们对现象或过程的观察及测量往往也是在不同尺度/分辨率上进行的。因此,用多尺度系统理论来描述、分析这些现象或过程是十分自然的,它能够很好地表现这些现象或过程的本质特征。此外,在解决许多实际问题时,多尺度方法具有思路清晰、简洁和计算复杂度低等优点。所以,近年来它已受到许多学科领域内众多科学工作者的高度重视,并在学术界掀起了多尺度系统理论及应用研究的高潮。

多尺度系统理论迄今已得到了迅速的发展,并在线性逆问题求解、地球物理学探测、医学诊断、图像处理、目标识别、目标跟踪、系统辨识、地下水文地理学和全球海洋模型、多传感器信息融合等研究领域取得了一系列研究成果,已经成为近年来国内外研究的一个十分活跃的领域之一,每年国际上发表有关这方面的论文越来越多,所涉及的领域也越来越广泛。

作者近年来一直从事该领域的研究工作,深感有必要结合该领域的新成果、新进展和新趋势撰写一本学术著作,对各种多尺度动态建模理论与方法及其应用作系统性的介绍,并希望本书的出版能够对该领域的研究和应用起到一定的推动作用。

全书共分 13 章。第 1 章为绪论,概述了多尺度系统理论研究基本思想、多尺度系统理论研究与应用现状、多尺度建模与多尺度数据融合发展历史等。第 2 章介绍在一般理论研究与工程技术应用中所涉及的小波分析中的基本概念、基本理论与基本方法。第 3 章总结通常在理论研究与实际应用中所涉及的最优估计的基本概念、Kalman 滤波理论、常用的几种数据融合算法及一些最新研究成果。第 4 章介绍了多尺度系统理论基础性内容,主要包括多尺度表示及多尺度建模、动态系统理论及实现系统的平稳性和因果性分析等。第 5 章至第 13 章是作者近几年研究工作的总结。在第 5 章中引入和论述时间序列多尺度方差与性质,建立了一类长记忆过程参数的极大似然估计和最小二乘法估计等问题的多尺度方法。在第 6 章中,介绍了新建立的多尺度贯序式 Kalman 滤波器,并分别完成了动态系统基于单传感器与多传感器的多尺度联合估计算法。第 7 章是针对无动态模型的多源观测系统,分别基于规则树和不规则树建立了以尺度为变量的多尺度动态模型,完成针对目标状态的多尺度预测、滤波与平滑估计算法。在第 8 章中,分别完成了求解线性逆问题的多尺度降阶模型和多源观测逆问题的多尺度分布式求解算法。第 9 章是以小波的综合变换为基础,建立了一类多尺度动态模型,并分别完成了相应的多尺度递归数据融合的预测、滤波与平滑估计算法。第 10 章建立了一种小波与 Kalman 滤

波混合多尺度预报器,引入处理经验模式分解中边界问题的多尺度方法。第 11 章建立了过程监制与安全检测的多尺度数据融合方法。第 12 章建立了模型预测控制的多尺度方法。第 13 章建立了多速率系统的多模式设计方法。

本书的许多研究内容得到了国家自然科学基金重点项目、国家自然科学基金、国家 863 计划、教育部科学技术研究项目、国家重点实验室开放基金、河南省杰出青年科学基金、河南省高校杰出科研人才创新工程项目、河南省国际合作重点项目、河南省自然科学基金、浙江省自然科学基金杰出青年创新团队项目、浙江省科学重点科研国际合作项目、浙江省教育厅科技计划重点项目等的支持,作者在此表示衷心的感谢。研究生葛泉波(第 3、11 章)、王松伟和王广江(第 5 章)、文传博(第 6 章)、史军杰(第 7 章)、周福娜(第 8 章)、曾峰(第 10 章)、黄鹤(第 12 章)、邱爱兵(第 13 章)等参加了本书的部分章节的写作、文字录入和修改工作。作者的妻子杨宏梅女士为本书的校对付出了辛勤的劳动。本书的责任编辑为本书的高质量出版也付出了辛勤的劳动,在此一并致谢。

本书作者 1996 年师从西北工业大学张洪才教授攻读博士学位,为本书的写作打下了坚实的理论基础。在此期间,作者还在潘泉教授指导下从事有关研究工作,受益匪浅。作者在清华大学控制科学与工程博士后流动站工作期间,又与周东华教授合作,使相关的研究工作得到进一步系统与完善。此书也是作者所领导的研究团队近年来集体研究成果的结晶。在本书正式出版之际,谨向他们表示衷心的感谢。

由于作者理论水平有限以及研究工作的局限性,特别是多尺度系统理论以及发展起来的多尺度动态建模理论本身正处在不断的发展之中,书中难免存在一些不足。恳请广大读者批评指正。

文成林

2007 年 5 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 多尺度系统理论研究基本思想	1
1.2 多尺度系统理论的广泛应用	3
1.2.1 海平面估计	4
1.2.2 表面重构	5
1.2.3 图像去噪	5
1.2.4 纹理分割	6
1.2.5 图像分割	7
1.2.6 多传感器融合在地下水文学中的应用	7
1.2.7 图像重构和逆问题	9
1.3 多尺度建模与多尺度数据融合	9
小结	14
参考文献	15
第 2 章 小波分析理论基础	23
2.1 快速 Fourier 变换	23
2.2 小波变换	24
2.2.1 连续小波变换	25
2.2.2 离散栅格下的小波变换	26
2.2.3 几种母小波	27
2.3 小波框架	29
2.3.1 框架	29
2.3.2 Riesz 基与正交基	30
2.3.3 小波框架	31
2.4 多尺度分析	33
2.4.1 多尺度分析的定义及基本性质	33
2.4.2 正交小波的性质	36
2.4.3 Mallat 算法	38
2.5 小波包	41
2.5.1 小波包分解的思想	41

2.5.2 小波包定义与性质	42
2.6 q 带正交小波	45
2.7 n 维信号的多尺度分析	47
小结	49
参考文献	49
第3章 状态估计理论基础	51
3.1 最优估计的基本概念	51
3.1.1 估计、最优估计和最优估计方法	51
3.1.2 最小方差估计	53
3.1.3 极大似然估计	56
3.1.4 极大验后估计	58
3.1.5 线性最小方差估计	60
3.1.6 最小二乘估计	64
3.2 Kalman 滤波基本理论	65
3.2.1 引言	65
3.2.2 滤波问题的提出	66
3.2.3 预备知识	70
3.2.4 离散系统 Kalman 最优预测基本方程	70
3.2.5 离散系统 Kalman 最优滤波基本方程	76
3.2.6 离散系统 Kalman 最优平滑基本方程	80
3.2.7 系统噪声或观测噪声是有色噪声的 Kalman 滤波	93
3.2.8 扩展的 Kalman 滤波方程	96
3.2.9 离散强跟踪滤波基本介绍	98
3.3 几种常用的多传感器数据融合方法	101
3.3.1 引言	101
3.3.2 同采样率同时采样的多传感器集中式融合算法	104
3.3.3 同采样率同步采的多传感器贯序式数据融合算法 (FAFSS)	106
3.3.4 同采样率同时采样的多传感器分布式融合算法	112
小结	121
参考文献	122
第4章 多尺度系统理论	124
4.1 引言	124
4.2 多尺度表示和系统	124
4.3 系统理论和实现	127
4.3.1 定义在树上的系统	127

4.3.2 实现理论	131
4.4 因果、非因果系统的平稳性和随机过程	132
4.4.1 同态树及其几何性质	132
4.4.2 移位	134
4.4.3 平稳系统的特征	136
4.4.4 平稳系统的实现	137
4.4.5 平稳随机过程	138
4.4.6 谱计算	139
小结	139
参考文献	140
第5章 时间序列分析的多尺度方法	142
5.1 时间序列分析概述	142
5.2 时间序列多尺度方差与性质	145
5.2.1 小波方差的定义和基本属性	146
5.2.2 小波方差的估计	151
5.2.3 小波方差的置信区间	152
5.2.4 小波方差的应用	157
5.3 长记忆时间序列参数的多尺度极大似然估计方法	158
5.3.1 长记忆时间序列模型	159
5.3.2 传统极大似然估计的不足	159
5.3.3 离散小波变换对长记忆过程的解相关性	160
5.3.4 多尺度极大似然估计的基本思想	161
5.3.5 利用多尺度极大似然方法估计记忆过程的参数	167
5.3.6 计算复杂度分析和仿真研究	171
5.4 最小二乘法估计的多尺度方法	173
5.4.1 线性回归模型的建立	173
5.4.2 基于多尺度最小二乘方法确定长记忆过程参数	175
5.4.3 仿真研究和计算复杂度分析	175
小结	177
参考文献	178
第6章 动态系统基于小波与 Kalman 滤波的多尺度联合估计	179
6.1 引言	179
6.2 单传感器单模型动态系统描述	181
6.2.1 单传感器单模型动态系统描述	181
6.2.2 动态系统分块形式描述	181

6.3	分块系统的多尺度描述	184
6.3.1	离散正交小波变换	184
6.3.2	分块系统的多尺度描述	186
6.4	多尺度贯序式 Kalman 滤波器	186
6.4.1	贯序式块 Kalman 滤波器	188
6.4.2	多尺度块 Kalman 滤波器	189
6.4.3	多尺度贯序式 Kalman 滤波器	190
6.4.4	MSBKF 算法推导	192
6.5	不同算法的性能比较以及 MSBKF 的证明	195
6.6	单传感器系统仿真	198
6.7	多传感器的多尺度算法	201
6.7.1	多传感器系统描述	201
6.7.2	系统分块与小波分解	202
6.7.3	同步多尺度贯序块 Kalman 滤波器	203
6.7.4	异步多尺度贯序块 Kalman 滤波器	209
6.7.5	计算机仿真	213
	小结	214
	参考文献	214
第 7 章	动态过程的多尺度表示方法、建模与数据融合	216
7.1	引言	216
7.2	多尺度随机模型	217
7.2.1	建立多尺度模型的目的和意义	217
7.2.2	多尺度模型的分类	218
7.2.3	多尺度模型的最优平滑(MKSE)估计	219
7.2.4	算法的复杂度	226
7.2.5	计算机仿真	227
7.3	基于规则树的多尺度表示方法与建模	229
7.3.1	1-D Markov 过程的几个概念	230
7.3.2	随机过程基于规则树的多尺度表示	231
7.3.3	随机过程基于规则树的多尺度模型	236
7.3.4	计算机仿真	239
7.4	基于不规则树的多尺度建模	241
7.4.1	一类不规则树的描述	242
7.4.2	基于不规则树的多尺度表示	242
7.4.3	基于不规则树的多尺度模型	250

7.4.4 计算机仿真	253
小结	254
参考文献	255
第8章 线性逆问题求解的多传感器多尺度数据融合方法	257
8.1 引言	257
8.1.1 逆问题背景及其分类	257
8.1.2 完全重构逆问题	259
8.1.3 求解逆问题的常见方法	259
8.1.4 多源观测逆问题的多尺度求解现状	261
8.2 基础知识	263
8.2.1 逆问题观测模型	263
8.2.2 信号的多尺度分解	264
8.2.3 多传感器观测系统的多尺度变换	264
8.2.4 逆问题的统计求解基础	266
8.2.5 多尺度先验模型	267
8.2.6 多尺度最大后验随机逆算法	269
8.2.7 相对误差协方差矩阵	270
8.3 求解线性逆问题的多尺度降阶模型	270
8.3.1 求解线性逆问题的多尺度降阶模型	271
8.3.2 算法所需的计算量分析	272
8.3.3 仿真实验	273
8.4 多源观测逆问题的多尺度分布式求解算法	276
8.4.1 目标信号 x 和观测数据 z_i 的多尺度变换	276
8.4.2 目标信号的小波系数和最粗尺度系数基于各传感器的局部估计	277
8.4.3 目标信号的小波系数和最粗尺度系数的局部估计值的分层融合	277
8.4.4 目标信号基于全局信息的融合估计	279
8.4.5 融合效果分析	279
8.4.6 算法所需的计算量分析	280
8.4.7 仿真实验	281
小结	288
参考文献	289
第9章 多尺度随机建模与多尺度数据融合估计	291
9.1 引言	291
9.2 动态系统的多尺度随机建模	292
9.3 多尺度观测系统描述	297

9.4	多尺度递归数据平滑融合估计算法	298
9.5	多尺度随机模型数据综合算法的实现	300
9.5.1	状态向量 $x(i)$ 预测估计与滤波估计	302
9.5.2	状态向量 $x(i)$ 的平滑估计	304
9.6	基于有限长度数据的多尺度建模与多尺度数据融合估计	305
9.7	例子与计算机仿真	306
	小结	307
	参考文献	308
第 10 章	一类时间序列多尺度预报新方法	310
10.1	引言	310
10.2	多尺度预报算法	311
10.2.1	一种扩展小波与 Kalman 滤波混合估计与预报算法(EWKHEFA)	311
10.2.2	多尺度预报算法仿真实验	315
10.3	EMD 边界问题的多尺度方法	316
10.3.1	EMD 方法及其分析	316
10.3.2	EMD 方法边界问题的多尺度方法仿真实验分析	320
	小结	320
	参考文献	321
第 11 章	过程监制与安全检测的多尺度数据融合方法	323
11.1	统计过程监控简介	323
11.2	主元分析	326
11.2.1	主元分析描述	326
11.2.2	主元变量的选取	329
11.2.3	基于 PCA 的过程监控	330
11.3	过程监控的多尺度数据融合方法	331
11.3.1	问题分析	331
11.3.2	基于状态估计的过程监控	332
11.3.3	基于数据融合理论的过程监控	335
11.3.4	过程监控的多尺度数据融合方法	340
	小结	342
	参考文献	342
第 12 章	多尺度模型预测控制	345
12.1	预测控制简介	345
12.2	模型预测控制的基本原理(MPC)	348
12.3	多尺度模型预测控制(MSMP)	350

12.3.1	离散小波变换	350
12.3.2	线性系统的多尺度描述	353
12.3.3	多尺度模型预测控制	358
12.4	仿真研究	369
	小结	370
	参考文献	371
第 13 章	多速率系统的多模式设计方法	372
13.1	背景简介	372
13.1.1	多速率系统简介	372
13.1.2	多速率控制	372
13.1.3	多速率信号处理	376
13.1.4	多速率与多尺度的关系	379
13.2	采样系统描述	380
13.2.1	数据采样系统	380
13.2.2	离散提升	381
13.2.3	连续提升	385
13.3	多速率数据采样系统的多模式设计	392
13.3.1	系统描述	393
13.3.2	准备知识	395
13.3.3	多速率提升与多尺度控制	396
	小结	402
	参考文献	403

第 1 章 绪 论

在自然界和工程实践中,许多现象和过程都具有多尺度特征或多尺度效应,同时,人们对现象或过程的观察/测量往往也是在不同尺度/分辨率上进行的,因此,用多尺度系统理论来描述、分析这些现象或过程是十分自然的,它能够很好地表现这些现象或过程的本质特征。此外,在解决许多实际问题时,多尺度方法具有思路清晰、简洁和计算复杂度低等优点。所以,近年来它已受到许多学科领域内众多科学工作者的高度重视,并在学术界掀起了多尺度系统理论及应用研究的高潮^[1,2]。

多尺度系统理论是在信号的多尺度表示理论基础上建立起来的,而多尺度/多分辨率现象在控制系统和信号处理等很多领域中广泛存在^[1,2]。在信号的多尺度表示和现象的多尺度建模等方面,以 MIT 的 A. S. Willsky 教授为首的研究小组做了一系列创造性工作^[1],由于其方法对信号的时间和尺度分解呈现出一种自然方式,而一些应用实例也表明,基于这种表示可以建立起有效的、最优的信息处理算法。

1.1 多尺度系统理论研究基本思想

作为统计分析现象和数据的概念和方法,多尺度一直受到了各门学科的广泛关注^[1,2],而这正是由于多尺度具有非凡的活跃能力以及丰富的表现形式。本节将致力于介绍具有广泛理论意义和应用价值的多尺度建模与多尺度数据融合这一重要分支的发展过程及研究现状,将为理解对过程或现象进行多尺度分析和处理提供一个非常有用的平台。在分析和处理不同尺度上的现象或过程时,不仅需要建立像使用小波变换来产生信号在不同尺度上的分解一样的多尺度算法,而且还需要建立起以尺度为变量的多尺度动态模型。这就像在时间序列或随机场中建模所采用的方法一样,主要的工作是构造统计模型,并要求模型框架需满足能够适用于广泛的自然现象、具有获取这些现象和构造强有力算法的功能、为精确分析何时采用这些模型以及执行算法提供统计工具等基本条件。

通常情况下,建立过程或现象多尺度建模框架是以如下四个方面作为出发点^[1,2]:

第一,所研究的现象或过程具有多尺度特性或多尺度效应。如地理方面的大气和海洋现象等许多物理现象都具有空间或时空的多尺度特征^[3~9],许多自然现象也具有多尺度特征^[10~17],还有自相似或分形过程^[18]和分形布朗运动^[19~21]等数学

模型也具有类似特性。

第二,无论现象或过程是否具有多尺度特性,通常来说,观测信号可能是在不同尺度上得到的。如在地理系统中,复杂的数据同化问题需要对来自不同类型的数据进行融合,这些数据不仅表示不同的观测现象,并且还表征在不同尺度上探测到的不同地质特性。而在对卫星的观测当中^[7,22-23],来自海平面船载测量数据或来自海洋 X 射线断层探测器的观测数据等也都看作是来自于不同尺度^[24,25]。同样诸如遥感、合成孔径雷达融合 SAR 图像、地球物理学逆问题、生物医学诊断中电子放射断层技术(PET)、磁共振成像图像(MRI)等观测数据都视为来自于不同的尺度^[26]。

第三,无论现象或过程是否具有多尺度特性,观测信号是否在不同尺度上得到,不同使用者的观测目标是在不同的尺度上的。例如,在大规模的地球测绘中,不同的研究者须考虑不同尺度上不同范围的研究对象性能,如一位研究者所重点研究的变量可能对于另外一位研究者而言就是噪声;还有数据同化的目标可能设置在不同尺度上,从而就可以通过测绘油库来评估石油的出产率和总产量;另外,在军事应用中,不同的使用者需要测绘不同的环境和位置图等。

第四,无论现象或过程是否具有多尺度特性,观测信号是否在不同尺度或分辨率上得到,利用多尺度算法往往能获得更多信息,从而降低问题的不确定性及复杂性。在解决许多实际问题时,多尺度方法具有思路清晰、简洁及计算复杂度低等优点。如在求解偏微分方程中涉及离散化问题时,利用多尺度方法能够极大地减小计算量^[2]。

建立多尺度模型的关键特性是在模型中引入尺度变量,就像在时间序列中的时间变量。在这方面主要是针对对象是定义在图 1.1.1 所示的多尺度树上的随机过程,研究如何建立起相应的统计模型。

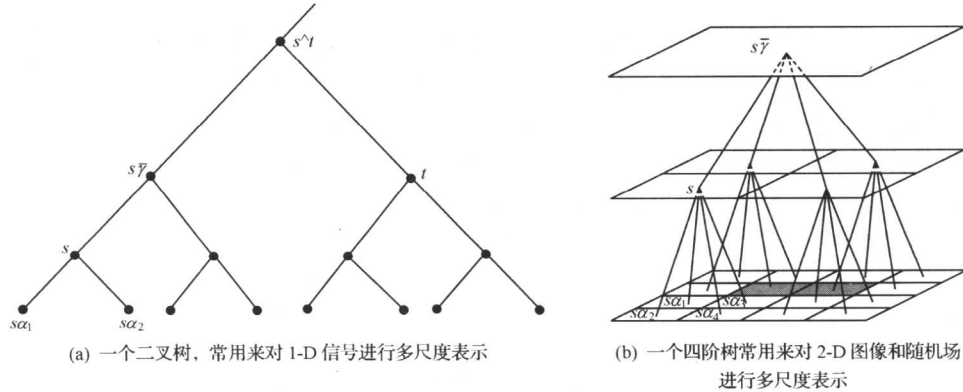


图 1.1.1 多尺度树的例子

在图 1.1.1(a)中,二阶树是用于 1-D 信号或过程(1-D 信号是指具有单个独立自变量的函数)的多尺度表示中的一种模型结构,树上的每一层就对应于一个确定的尺度。类似地,如图 1.1.1(b)所示的是四阶树,它主要是用于 2-D 信号、现象或图像的多尺度表示。这两种树结构在理论和应用中都已得到广泛的实用,然而研究和应用时并非一定要求在规则的树结构上,如从一个节点向下传递的节点个数既不同于 2 也不是 4,而有可能是 3 或其他数目,也可能不具有某种确定的规律性,即向下传递的数目在从节点到节点或从尺度到尺度的过程中可能都在改变。

在所描述的多尺度模型中,每一个节点 s 都对应于一个随机变量或向量。简单地说,每一个变量表示的就是对应此节点上的过程或现象的相关信息。然而,这些变量确切是什么?又是如何与信号、图像、现象或感兴趣的数据进行关联的?这都将随着实际应用的不同而不同。如在一些情况下,仅仅需要考虑最细尺度上的基本物理变量、观测信号、估计或需要推导的变量。在这些情况下,粗尺度上的变量就是细尺度上的变量分解到该粗尺度上的那一部分,如利用小波分解或拉普拉斯金字塔对目标信号或过程进行的分解过程^[14,27]。在其他应用中,若可以直接测量粗尺度上的变量,则可以对来自不同尺度上的观测进行多尺度信息/数据融合处理。更一般地讲,不管粗尺度上的变量是否可以直接被测量到,也不论是否可以写出细尺度上变量的确切函数,在多尺度表示中所包含的信息都可用于如下情况,即揭示研究现象的统计结构和所估计变量的全局特性。例如,在统计实现理论和动态系统状态概念中^[28,29],这些变量扮演着获得信号本质特性的角色。另外,所描述的算法也与隐马尔可夫模型有着紧密的联系^[30~33],如用在语音分析、图像分割和高层视觉中的问题里的隐状态可能表示所要估计的高层标码等^[34~36]。

定义在树上的每一个节点上的变量都必须满足树上的 Markov 性,多尺度模型与很多模型及算法之间有着密切的联系,如 Markov 过程、Markov 随机场(MRF)、Bayes 网络、置信网及图形模型等^[33~37]。

1.2 多尺度系统理论的广泛应用

目前,多尺度建模与信息的多尺度处理方法已广泛应用到诸多领域中,如图像去噪^[42,43]、图像去模糊^[44]、边缘检测^[45]、视频流估计^[46,47]、边界重构^[48]、纹理分割^[49]、图像分割^[34,50]等低层计算机视觉或图像处理问题,高层识别和视觉问题^[35,51],有限光子制图^[43,52,53],交通网建模^[54],海洋学、大气学、地球物理遥感、数据同化和数据融合等^[4,23,55,56],语音学^[3,25,57],水文地理应用中的多传感器融合^[9,58],过程控制^[59,60],合成孔径雷达图像分析与融合^[26,61,62],地理信息系统^[63,64],医学图像分析^[65],视觉神经反应模型^[66],数学物理学等^[67,68],这些广阔的应用领域充分说明了多尺度建模理论与多尺度处理方法的灵活性、广泛性及有效性。

1.2.1 海平面估计

第一个应用实例是利用来自一个或多个卫星测量数据绘制海平面变化图^[4,23],图 1.2.1 显示了由 TOPEX/POSEIDON 卫星提供的太平洋的某一海域的测量数据图^[4]。数据同化是其中要面临解决的一个重要问题:一是在制图中进行纬度转换时,要对网格上的 $10^5 \sim 10^7$ 个点处的目标状态变量进行估计,因此就存在计算量大的问题;二是如图 1.2.1 所示的采样模式不规则性问题;三是海平面变化和测量值的精度的非平稳性问题,例如,Gulf 流或 Kuroshio 流在太平洋上与在其他海域就有很大的不同;四是被估计的海平面的变化量与地平面有关,由于地平面随地点的变化而不同(地平面不固定,而且在特殊地貌存在显著误差,如在夏威夷岛、延伸到海面的小岛以及海沟),就需要对原始卫星数据进行调整。因为空间变换的不确定,调整后的结果存在误差;五是不仅要估计海平面变化,还要计算这些估计值的统计量(如误差协方差),再将这些统计量和具有其他信息的估计值综合起来,以识别统计显著偏差;六是海平面高度变化很大,实际上,海平面变化的典型波数谱模型存在不规则碎片型的 $1/f^\gamma$ 谱。

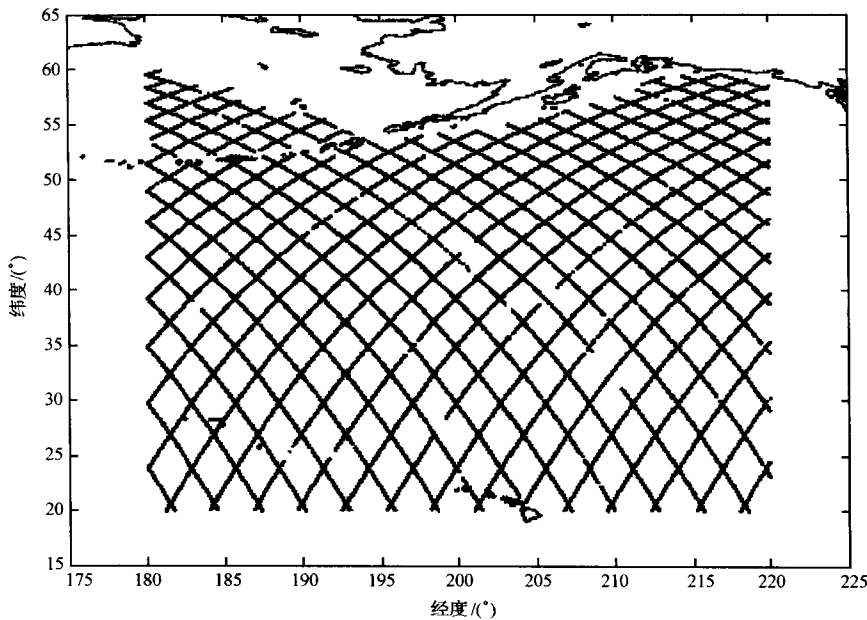


图 1.2.1 TOPEX/POSEIDON 跟踪北太平洋的一组测量结果^[4]

通常,在估计海平面以及计算其协方差和估计值时都常面临许多难题,这是由于现象本身具有非平稳性,从而造成数据性质不断变化、测量值的采样模式不规则等现象,因此使用如快速 Fourier 变换(FFT)等常用方法往往难以达到预期的目

的。但若能有效合理利用海平面变化所呈现的不规则碎片型等特点,并借助适当的多尺度模型就可以得到非常有效的结果。

1.2.2 表面重构

在计算机视觉领域中,被广泛研究的问题之一,就是如何利用规则或不规则的表面高度或法线采样值来重构目标的表面,而变分则是其中的一个常用方法。特别地,若用 I 表示一个二维平面,且有 $z(r), r=(r_1, r_2) \in I$, 并用

$$\nabla z(r) = (p(r), q(r)) = \left(\frac{\partial z(r)}{\partial r_1}, \frac{\partial z(r)}{\partial r_2} \right) \quad (1.2.1)$$

表示表面的梯度;类似地,用 $y(r)$ 表示表面的测量值, $g(r) = (u(r), v(r))$ 表示梯度的测量值,假设测量值有噪声,且可能是在不规则地区得到,通过最小化函数^[1]

$$\begin{aligned} & \int_I \alpha_1(r) [y(r) - z(r)]^2 dr + \int_I \alpha_2(r) \|g(r) - \nabla z(r)\|^2 dr \\ & + \int_I \alpha_3(r) \|\nabla z(r)\|^2 dr + \int_I \alpha_4(r) \{ \|\nabla p(r)\|^2 + \|\nabla q(r)\|^2 \} dr \end{aligned} \quad (1.2.2)$$

就可得到表面 $z(r)$ 的估计值及梯度 $p(r)$ 和 $q(r)$ 的估计值。式(1.2.2)中前两项中的非负系数 $\alpha_1(r)$ 和 $\alpha_2(r)$ 控制着重构接近测量值的程度,而后两项则是对重构表面的平滑约束。实际上,由第一项表示给出的非零梯度被称为薄膜罚函数,而由最后一项表示弯曲表面的梯度则称为薄平面罚函数,我们可以通过调整 $\alpha_3(r)$ 和 $\alpha_4(r)$ 来实现调整这些惩罚项的强弱。

注意到,表面的梯度 $p(r), q(r)$ 必须满足可积性,由式(1.2.1)可得

$$\frac{\partial p(r)}{\partial r_2} = \frac{\partial q(r)}{\partial r_1} \quad (1.2.3)$$

最小化带有约束(1.2.3)的式(1.2.2),或者变形之后再求其最小值。

如文献[32]、[46]、[48]所述,这样的最优化问题也可以转化为求带有先验不规则碎片型约束的估计问题。在求解过程中,解偏微分方程比较容易,计算误差的统计量较难,若利用相应的多尺度模型,常会使问题得到大大的简化。

1.2.3 图像去噪

在图像去噪的研究和应用中,过去常使用的维纳滤波或高斯 MRF 等线性模型,它们都是利用图像的一二阶统计量来最小化均方差,因而在对具有边缘或高频区域特征的图像进行恢复时就会有很大的局限性。特别地,一般采用的线性方法所具有的低通特性使得算法在去噪时往往会损害图像本身的某些重要特征。如图 1.2.2(b)是一个带有许多边缘和高频区域的含噪的场景。图 1.2.2(c)和图 1.2.2(d)是执行线性维纳滤波后的结果,从图上可以看出去噪效果并不理想。