柯熙政　丁德强　著

多模式多尺度数据融合理论及其应用

科学出版社

多模式多尺度数据融合理论及其应用

柯熙政　丁德强　著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书首先针对一类不可重复测量的物理量，如时间、飞行器的位置、姿态及惯性参数等，建立多模式多尺度数据融合模型。该模型既考虑随机变量的长期特性和中期特性，也顾及随机变量的短期特性。然后，将多模式多尺度数据融合模型用于时间尺度的建立、精密定时、组合导航及飞行器姿态的测量，详细介绍相应的工程案例及实验结果。最后，从数学上证明多模式多尺度数据融合的原理，表明多模式多尺度数据融合结果优于经典的方法，可以抑制测量噪声，提高测量精度。

本书适合电子信息类专业本科生、研究生及工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

多模式多尺度数据融合理论及其应用/柯熙政，丁德强著. —北京：科学出版社, 2020.4

ISBN 978-7-03-064092-5

Ⅰ. ①多… Ⅱ. ①柯… ②丁… Ⅲ. ①导航系统-数据融合-研究 Ⅳ. ①TN966

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2020) 第 014894 号

责任编辑：宋无汗 李 萍／责任校对：邹慧卿
责任印制：张 伟／封面设计：迷底书装

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

北京中石油彩色印刷有限责任公司 印刷
科学出版社发行 各地新华书店经销
*
2020 年 4 月第 一 版 开本：720 × 1000 B5
2020 年 4 月第一次印刷 印张：15 3/4
字数：318 000

定价：108.00 元

(如有印装质量问题，我社负责调换)

前　言

物理现象大致可以分为两类：一类现象具有非线性、非平稳性，或伴有非线性、非平稳性的过程；另一类现象具有多尺度特征。人们对现象的观察、测量往往是在不同尺度上进行的，许多重要问题的本质表现为多尺度现象。物理量也可以分为可重复测量的物理量与不可重复测量的物理量，如物体的几何形状可以重复测量，而时间是不可重复测量的。本书首先针对不可重复测量的物理量，提出一种多模式多尺度数据融合的理论。然后，系统论述多模式多尺度数据融合理论，既考虑物理量的长期特性和中期特性，又顾及其短期特性，可以最大限度地抑制测量中的噪声，并说明该理论的应用。最后，从数学上证明该理论，为其推广应用奠定了基础。

本书共 6 章。第 1 章为绪论，介绍多模式多尺度数据融合理论的发展，对多模式多尺度数据融合模型进行分析和总结。第 2 章介绍小波分解原子时算法的理论与实践。建立一个均匀、稳定的时间尺度需要先进的算法和合理的加权方法，为了保持时间尺度的准确、连续，并使时间单位尽可能接近国际单位制秒，提出小波分解原子时算法并进行了实验研究。第 3 章介绍多模式多尺度组合定时的方法。时间同步设备是时间同步系统的核心设备，其特性直接决定整个时间同步网络的精度、可靠性和安全性。从安全性和可靠性考虑，时间同步设备需要具备跟踪多种时间系统并获取时间同步信号的能力。第 4 章介绍多模式多尺度组合导航方法。对北斗/GPS/罗兰 C 系统的导航原理进行介绍，推导各系统的定位原理，对比各系统的时间和坐标系统，给出组合导航系统的时间同步和坐标系统一的方案。第 5 章介绍的组合 MEMS 陀螺技术，可提高组合陀螺的测量精度。第 6 章对多模式多尺度数据融合理论进行分析与证明，奠定其数学基础。

本书是陕西省智能协同网络军民共建重点实验室、西安理工大学光电工程技术研究中心长期研究成果的总结。研究工作受到了军队预研演示验证重大课题、广东省科技部教育部“企业科技特派员行动计划”课题“多模式多尺度组合定时设备”及西安市科技局课题“多模式多尺度组合定时技术及设备”的资助。感谢李建勋博士、任亚飞博士、刘娟花博士、王宇建硕士、张伟志硕士、房宏才硕士等为课题研究所付出的青春与热情。

本书是作者在多模式多尺度数据融合领域所做工作的总结，限于学识水平，书中难免存在不足之处，敬请读者批评指正。

目　　录

前言
第 1 章　绪论 ····· 1
1.1　多模式多尺度数据融合理论及应用 ····· 1
1.2　多尺度数据融合概念的演变 ····· 6
1.2.1　多尺度数据融合模型的若干应用 ····· 6
1.2.2　国内相关研究 ····· 7
1.2.3　多尺度数据融合算法 ····· 8
1.3　亟待解决的核心理论问题 ····· 8
1.4　多模式多尺度数据融合模型 ····· 9
1.4.1　多尺度数据融合定理 ····· 9
1.4.2　多尺度数据融合模型推论 ····· 11
1.5　多模式多尺度数据融合有待解决的问题 ····· 12
参考文献 ····· 13
第 2 章　小波分解原子时算法 ····· 17
2.1　时间基准及其变迁 ····· 17
2.2　时间尺度算法的意义 ····· 18
2.3　AT1(NIST) 算法 ····· 20
2.3.1　算法分析 ····· 20
2.3.2　权重计算 ····· 21
2.4　ALGOS(BIPM) 算法 ····· 21
2.4.1　TAI 的定义 ····· 22
2.4.2　时间改正项的选取 ····· 23
2.4.3　权值的选取 ····· 23
2.5　经典加权算法分析 ····· 23
2.6　原子时的小波分解算法 ····· 27
2.7　实验研究 ····· 31
参考文献 ····· 39
第 3 章　多模式多尺度组合定时 ····· 41
3.1　时间基准与时间同步 ····· 41
3.1.1　秒定义与时间基准 ····· 41

3.1.2 时间频率同步技术 ····· 42
3.1.3 多模式多尺度时间同步系统的功能 ····· 45
3.2 总体方案及硬件平台 ····· 46
3.2.1 主要技术指标 ····· 46
3.2.2 总体方案 ····· 47
3.2.3 系统内部各模块 ····· 52
3.2.4 守时授时功能的实现 ····· 55
3.2.5 小波分解原子时算法的实现 ····· 64
3.2.6 守时钟的校准 ····· 70
3.3 设备监控功能的实现 ····· 72
3.3.1 监控系统的结构设计 ····· 72
3.3.2 监控协议的设计 ····· 72
3.3.3 监控软件 ····· 77
3.3.4 测试结果 ····· 78
参考文献 ····· 80
第 4 章 多模式多尺度组合导航 ····· 82
4.1 导航系统的定位解算原理 ····· 82
4.1.1 北斗/GPS 的定位原理 ····· 82
4.1.2 罗兰 C 双曲线定位原理 ····· 84
4.1.3 组合导航的时间系统 ····· 86
4.1.4 组合导航的坐标系统 ····· 87
4.2 数据融合技术在组合导航中的应用 ····· 91
4.2.1 小波熵对噪声的识别 ····· 91
4.2.2 线性均方估计方法 ····· 99
4.2.3 基于小波熵的数据融合理论 ····· 100
4.3 状态估计方法 ····· 102
4.3.1 最小二乘法 ····· 102
4.3.2 Kalman 滤波 ····· 104
4.3.3 扩展 Kalman 滤波 ····· 107
4.4 Kalman 滤波发散的抑制 ····· 109
4.4.1 序列滤波 ····· 109
4.4.2 UD Kalman 滤波 ····· 110
4.4.3 加入渐消因子 ····· 113
4.4.4 抗差 Kalman 滤波 ····· 114
4.5 组合导航数据融合系统 ····· 117

4.5.1 北斗/GPS/罗兰 C 组合导航系统的状态估计……117
4.5.2 局部滤波器模型……120
4.6 实验研究……122
4.6.1 GPS 导航系统的 Kalman 估计实验……123
4.6.2 组合导航系统的 Kalman 滤波实验……128
4.6.3 数据融合方案的实现……132
参考文献……135
第 5 章 组合 MEMS 陀螺技术……137
5.1 研究背景及意义……137
5.1.1 MEMS 陀螺仪的发展……137
5.1.2 MEMS 陀螺仪技术……137
5.1.3 MEMS 陀螺仪数据融合……138
5.1.4 陀螺仪误差的 Allan 方差表示……139
5.2 组合陀螺……140
5.2.1 组合陀螺总体架构……140
5.2.2 器件选型及相关参数……141
5.2.3 硬件系统设计……142
5.3 软件设计……150
5.3.1 IIC 接口……150
5.3.2 SPI 接口……156
5.3.3 小波域多尺度融合算法……161
5.4 实验研究……162
5.4.1 静态实验……163
5.4.2 单轴位置速率转台实验……164
5.4.3 单轴角振动台实验……167
5.5 组合陀螺信号突变时融合方法及切换方案……169
5.5.1 信号突变检测……169
5.5.2 动态陀螺信号融合方法及切换方案融合方法……177
5.5.3 最优加权递归最小二乘融合算法……181
5.5.4 突变检测实验……187
参考文献……198
第 6 章 多模式多尺度数据融合模型的数学基础……200
6.1 数据融合的数学基础……200
6.1.1 平稳过程单尺度数据融合……200
6.1.2 平稳过程多尺度数据融合……202

6.1.3　非平稳过程单尺度数据融合 ····· 206
6.1.4　非平稳过程多尺度数据融合 ····· 208
6.2　多模式多尺度数据融合中关键问题 ····· 220
6.2.1　MEMS 陀螺噪声特性与小波熵 ····· 220
6.2.2　常见的小波 ····· 222
6.2.3　小波基的选取 ····· 226
6.2.4　最佳小波基选取实验 ····· 227
6.3　最佳小波分解层数 ····· 236
6.4　数据融合加权因子的选择 ····· 238
6.5　多小波基数据融合 ····· 240
参考文献 ····· 242

第1章 绪 论

本章对多模式多尺度数据融合模型进行分析和总结，对相关领域研究进行评述，并简述该模型发展的基本情况。

1.1 多模式多尺度数据融合理论及应用

1. 数据融合

在数据融合估计的研究中，数据融合的多尺度估计理论 (multiscale estimation theory，MSET) 吸收了小波分析和 Kalman 滤波器的特点，能够对信号进行任意尺度上的重构或分解，将传统的基于模型的动态系统分析方法与基于统计特性的信号多尺度变换和分析方法融为一体，提高了融合的效率和性能。

数据融合就是指利用现代计算机高速数据处理技术，对多个传感器采集到的原始观测数据或者是经过初步处理的数据，采用一定的算法准则进行分析和处理，根据分析的结果完成需要的决策任务而进行的数据处理过程。数据融合涉及多个学科，如数字信号处理、通信、神经网络等学科，经过数据融合处理后的数据可以得到单一传感器所不能得到的信息，目的是获取更精确的状态和估计，从而可以更加准确和及时地做出态势的预估和评价。

2. 多模式多尺度估计

多尺度分析 (multiscale analysis，MSA) 是 Mallat 于 1988 年在研究图像处理问题时提出的。所谓多尺度分析，就是在观察和分析事物的时候需要在不同的尺度上进行，这样才能将事物的整体面貌和细节信息尽可能全部掌握，而不至于只观其全貌而不察其细节，或者只看到其细节而不识其整体 [1]。在大尺度上观察事物，只能看到整体面貌；在小尺度上观察事物，则只能看到细节部分，只有多尺度综合起来才能全面认识事物。

1990 年，麻省理工学院 (Massachusetts Institute of Technology，MIT) Willsky 等提出多尺度估计理论，对随机过程的多尺度建模、系统动态模型多尺度变换 (multiscale transform) 等开展了广泛的研究 [2-5]。美国莱特州立大学 Hong 等将多尺度思想应用于目标跟踪、目标状态估计、多速率交互式多模型融合等领域，但在构建动态微分方程约束的多分辨多传感器融合估计算法时，损失掉了部分信息，未能得到最优估计方案 [6]。

国内学者也在进行多尺度估计方面的研究，赵巍等 [7] 研究了用于目标识别的数据融合技术中的分层融合算法并讨论了其性质，杨志等 [8] 在用于状态估计的多传感器信息融合算法方面做了许多工作，潘泉等 [6,7] 在用于状态估计、目标跟踪的多传感器信息融合方面做了大量的工作。

3. 多尺度数据融合

多尺度分析技术得到了迅速的发展，人们已将该技术应用到地球物理、生物医学、振动工程、机械工程、故障检测、图像处理等领域。

国外对数据融合的研究已经形成较完整的体系 [9,10]，有些学者在数据融合领域也提出了新的见解和方案 [11-14]。国内对多尺度数据融合的研究是在 20 世纪 80 年代初才开始的，目前已经出现了一批带有一定综合能力的多元数据融合系统和多目标跟踪系统。文成林等 [1,15,16] 针对建立多尺度估计理论框架、多尺度模型的滤波及平滑和估计算法、多尺度随机建模及其应用进行研究。

20 世纪 70 年代初，美国国防部组织人员尝试对多个声呐信号进行了融合处理 [17]，期望实现在战时可以对敌方水下目标进行声呐自动探测。1979 年，Daliy 把雷达采集到的图像数据和美国宇航局的陆地卫星多光谱扫描仪 (multi spectral scanner，MSS) 传感器数据进行复合，复合后的图像用来进行地质研究，该过程就是较为简单的数据融合 [18]。20 世纪 80 年代后，有很多学者进入图像数据融合领域。这一时期使用的方法主要包括色彩空间变换、求平均或者加权平均、主成分分析及高通滤波等。这些都属于早期的融合方法，其共同的特点是不进行分解变换，整个融合过程始终在同一层上。1991 年，在海湾战争的推动下，美军开始大力推行多传感器的数据融合技术，以期获得在军事应用中更为精确的定点打击能力。相关学术专著的出版，推动了多传感器数据融合的发展 [19,20]。

自然界中的信号绝大多数是随机信号，而在随机信号处理方法的研究上，经历了从最初的最大似然估计法，到 1960 年由 Kalman 提出实用递推估计算法 —— Kalman 滤波算法 [21]，这些方法都为后期的基础理论研究奠定了理论基础。

数据融合处理中面对的大多是非平稳信号，针对这类信号，人们希望处理后在滤除噪声的前提下，尽可能地保持信号的突变部分。Mallat 将多分辨思想、滤波器组合设计和完全重构条件紧密结合在一起，同时把图像处理方面已经发展较为成熟的多尺度分析理论同小波理论联系到一起，定义了小波变换 (wavelet transform，WT)，并提出了 Mallat 算法，也就是快速小波变换算法 [4]。

进入 21 世纪后，数据融合技术逐渐开始广泛应用于民用领域的各个行业。2004 年，Gonzalo 等 [22] 基于小波多分辨率融合方法，提出了普遍适用的图像融合处理方法，可以处理具有相同或者不同分辨率级别的图像，如电荷耦合器件 (charge-coupled device，CCD) 图像、红外图像等。

2007 年，Amolins 等 [23] 针对传统的图像融合方法会导致图像颜色失真的问题，给出了基于小波变换的图像融合方案，通过对比传统的图像融合方法，说明了小波融合方法效果要优于传统的融合方案。尤其在最小化颜色失真方面，小波融合方法表现要明显小于传统方法。

2014 年，Bashari 等 [24] 采用 Kalman 融合算法预测西班牙电力市场的电价走势，首先选取自适应神经模糊推理系统、人工神经网络和自回归移动平均等流行的时间序列模型对电力市场的电价数据进行预处理，然后将上述模型的输出结果通过 Kalman 融合算法进行融合。该方法同时利用了上述经典的预测模型的优势，通过数据融合又进一步弥补了各个模型的不足，进一步提高了预测的精准度。

2015 年，Niaki 等 [25] 将基于小波包分解的数据融合方法用于机床刀具的状态监测，实现了基于小波包分解的数据融合算法在机械制造自动控制中的应用，实践表明通过融合算法估计的误差最大不超过 13%。

20 世纪 90 年代初，我国一批高校和科研单位开始广泛从事数据融合方面的研究，也出版了一些理论专著 [26,27]。

2003 年，Klein [28] 用数学方法证明了多个传感器融合之后的效果总是要优于单个传感器的测量值，且当去掉多个传感器中的任何一个或者几个后，融合效果比使用全部传感器的融合结果相对较差，最后用仿真结果证明了该结果的正确性。2004 年，吕锋等 [29] 针对不同尺度上各个独立的多传感器单模型动态系统，利用小波变换对最细尺度的状态方程进行分解，建立以尺度为变量的动态多尺度随机模型，然后利用该模型对各个尺度上的局部信息进行统一和整合，在最细尺度上获得目标的最优估计。2006 年，彭冬亮等 [30] 针对多源信息融合的研究成果和现状做了回顾和展望，并指出了该技术后期可能的发展方向。2008 年，文成林等 [31] 首先以小波包变换为基础，利用多尺度小波分解得到各个尺度上的每个图像像素的概率模型，然后利用最小二乘法对多尺度概率模型中的参数进行估计，最后采用贝叶斯算法对某一个像素点处的像素值进行融合估计，通过小波包逆变换得到目标的最优估计值。仿真结果表明该方法与传统图像处理方法比较，可以得到更完整的图像信息。

2004 年，Jiang 等 [32] 立足于显微镜图像的深度图像融合原理，通过和不同的空间融合方法进行对比，提出一种基于小波变换的多聚焦图像融合算法，该算法可以看成是对现有算法的改进。通过实验分析了该算法的性能，总结出了其特点和适用范围。

2004 年，Xu 等 [33] 提出一种用于多传感器系统的小波数据融合算法，该算法采用最小均方误差来获得被测量信息的最佳估计，最终得到的最优估计值的方差值不仅小于每个传感器的观测值，而且小于所有传感器测量值的算术平均。该算法属于自适应算法范畴，适用于包括非时变和时变过程在内的静态和动态系统。

2007 年，杨志等 [34] 根据人类视觉系统特征和边缘信息目标识别原理，对图像进行视觉域融合处理，最终结果可以达到自适应抑制噪声的目的，有效增强视觉图像的特征信息。

2007 年，邓自立 [35] 对滤波理论做了较为详细的介绍，重点分析了自校正理论及其应用、Kalman 滤波与现代时间序列分析方法等。

2010 年，Fan 等 [36] 报道了一种基于小波变换和边缘保持的图像融合处理算法，该算法根据小波系数的自身特性处理低频和高频系数，通过逆小波变换获得最终融合图像。通过多焦点图像实验可以证明，该算法不仅考虑到了小波变换的完整特性，还兼顾了人类视觉系统的特点，同时提高了计算效率。

2015 年，Song 等 [37] 报道了一种新的特征融合策略，主要用于处理重叠尖峰的分类问题。该方法以小波变换为基础，保留了小波变换的投影思想，提取小波系数特征和峰值特征，针对不同特征构建包含数据集的邻域信息图。该方法的关键是导出一个融合图以反映不同特征的相对重要性，一般可以通过加权方法来实现。对比单一的特征分类方法，该方法的准确率提高了 9%。

2016 年，Wang[38] 以小波变换为基础，通过对时间序列进行建模，利用多尺度小波融合算法进行时间序列信号分析，从仿真分析的角度阐述了算法的优点和有效性。

柯熙政等 [39,40] 自 1990 年开始从事小波多尺度分解和融合方面的理论和工程应用方面的研究，其思想简单来说就是首先利用小波变换对多传感器的原始采样值进行小波分解，然后用小波变换系数进行加权平均，平均综合后得到一个整个测量过程的新的小波变换系数，在上述步骤的基础上进行逆小波变换，最后得到的实际上是一个估计值，但是这个估计值比原始的测量数据更加准确。1997 年，柯熙政用小波多尺度分析的方法结合分形理论对原子钟噪声进行了分析，给出了不同尺度上的原子钟噪声的变换特征。1998 年，柯熙政等 [41] 以小波变换为基础，设计了一种新的时频域滤波器用以分析原子钟的噪声特性，这种滤波器有两个明显的优势：第一，在时频域上该滤波器可以按照不同的噪声特性进行滤波；第二，相比传统滤波器，该滤波器保证了在信号域上的相互正交和滤波结果唯一。同年，柯熙政等建立了分域递推模型。该模型主要思想就是结合多尺度分析方法，对信号首先进行多尺度频率正交分解，然后对分解后的信号在不同的尺度上进行小波变换系数建模，最后验证了这种方法的预测精度要优于传统方法，同时比较简单可行。2000 年，李孝辉等 [42] 提出以小波分解的方法建立小波分解原子时，将原子钟信号在小波域按照频率进行多尺度分解，在不同频率范围内加权，通过对实验数据的验证，证明了小波分解原子时算法可以提取各个原子钟的优良特性，对原子钟的突然变化给出及时反映，在不同频率范围内取得最优权值，提高了综合时间的稳定度。2006 年，任亚飞等 [43] 在前期研究的基础上提出了一种基于小波熵的数据融合

方案，该方案首先将信号在频率上进行多尺度分解，然后利用小波熵判别法来进行后期的噪声消除和数据融合，最后以北斗和罗兰 C 这两个子系统的实测数据为基础，证明了这种基于小波熵的融合方法的优越性。2009 年，柯熙政等 [44] 将多尺度融合算法应用于多个微机电系统 (micro electronic mechanical system，MEMS) 陀螺仪的数据处理中，首先对每个陀螺仪原始采集数据 Kalman 滤波；接着利用小波变换对滤波后的多路信号进行处理，在不同的分辨率 (尺度) 上进行小波多尺度融合处理，得到多个 MEMS 陀螺所组成的组合系统在不同尺度上的小波变换系数；最后，通过小波逆变换得到多个 MEMS 陀螺仪融合处理后的估计值。2015 年，文献 [45] 基于小波分析的基础理论，从数学原理上证明了小波分解融合算法的有效性，从而在理论上肯定了该方法不是一种偶然现象，为该算法的推广奠定了数学基础。

2001 年，王毅等 [46] 针对多分辨率图像融合算法分解与重构过程的特点，将该算法移植到 TMS320C6201 数字信号处理器 (digital signal processing，DSP) 中，采用图像融合算法中常用的灰度调制法、对比度调制法和拉普拉斯金字塔算法进行测试。结果表明，对于灰度调制法、对比度调制法可以实现全实时融合处理，而对于分解层数为 3 层的拉普拉斯金字塔算法，每帧数据的处理时间接近 70ms，实现了准实时融合处理。

2002 年，严居斌等 [47] 选取 TMS320C3X 系列的 DSP 芯片为核心处理器，充分利用 DSP 的汇编指令进行编程，提高了算法在芯片中的运行效率，通过 DSP 仿真器对系统进行了仿真验证，结果表明系统可以满足一般实时性场合。

2006 年，卢蓉等 [48] 为了验证多分辨率像素级图像融合算法的实时处理性能，选取计算量相对较少且只涉及乘法运算和加法运算的拉普拉斯金字塔融合算法作为研究对象，以 TMS320C64X 型的 DSP 为硬件平台进行算法实现。结果表明，在 DSP 平台上的融合算法可以得到较好的融合结果，同时满足像素级多分辨率图像处理系统的实时性要求。

2007 年，王勇等 [49] 采用 TMS320F2812 为核心处理芯片，设计了基于 DSP 实时操作系统的 MEMS 陀螺信号实时采集和处理系统，实现了数据采集、提升小波信号降噪和补偿算法实时处理与传输等多项功能。实验验证该系统的处理时延约为 7.6ms，可以满足对实时性要求不是特别高的处理任务。

2013 年，张春林等 [50] 基于现场可编程门阵列 (field programmable gate array，FPGA) 设计了一种图像融合处理系统，实现了图像信息的 A/D (analog/digital，模拟/数字) 采集及数据的存储和输出等功能，具备一定的实用价值。

2015 年，王培利等 [51] 将双路图像融合实时处理系统用于多成像的研究。该系统利用 3 片 DSP 芯片，其中 2 片用作预处理，1 片用作算法实时处理。通过对两路图像融合处理测试，表明该系统能够满足实时处理要求。

2016年，王嘉成等[52]设计了一款用于目标跟踪的多传感器图像融合处理系统，可以实现高分辨率多源传感器数据采集和目标跟踪等功能。该系统以FPGA+DSP为核心，针对两种工作于不同波段的红外相机和两种可见光相机，实现了图像的实时融合处理计算。

1.2　多尺度数据融合概念的演变

1.2.1　多尺度数据融合模型的若干应用

对可重复测量的物理量，能通过多次重复测量逼近该物理量的真值，但实际中存在的另一类物理量，如时间测量、飞行器位置、姿态的测量等，则不能重复测量。本书在总结前人工作经验的基础上，探讨一种多尺度数据融合模型，将多个传感器的测量数据用小波变换展开，在多个尺度对不同传感器进行数据融合，能解决不可重复测量物理量的真值估计问题。

1. 小波变换在时间测量中的应用

时间测量在导航定位、大地测绘等领域有着广泛的应用，是导航定位、大地测绘的基础。自原子时出现以来，人们发展了多种用于原子时计算的方法，在工程实践中发挥了重要的作用。在小波分析理论的基础上，柯熙政等把小波变换引入原子时计算领域，文献[53]~[56]对小波分解原子时计算理论和方法进行了有益的探讨，并把这种方法应用于实际工程中，同时对该方法得到的时间尺度的频率稳定度进行了分析。

由原子钟保持的时间尺度就是原子时，每一台原子钟都可以保持一个时间尺度。但每一个物理装置都有出现故障的可能，为了保持时间尺度的准确、连续并且使时间单位尽可能接近国际单位制秒，这就需要由参加守时的各个原子钟的时间计算出标准时间，即小波分解原子时算法[57-59]。

2. 导航定位中的多尺度数据融合模型

柯熙政等进行了多模式多尺度数据融合的实验研究，在北纬为23.××°、东经为113.××°处放置了罗兰C接收机和北斗三星的接收机，分别对两个接收机做长时间的定位测量，选取了其中一段时间内的1763个定位点进行分析，对定位点的经纬度相继应用熵值判别和线性均方估计的方法进行数据融合。先对数据进行预处理，再利用每个实测数据的离散熵信息量来判断该数据是否含有粗大误差。该方法可同时完成对病态子系统的监控，并剔除掉病态系统的野值，保证组合导航系统的正常工作。实验结果表明：北斗三星的定位误差在纬度和经度上分别是100m和10m，罗兰C的定位误差在纬度和经度上分别是100m和12m，而组合定位误差

在纬度和经度上分别是 50m 和 5m。这和实际情况相符。北斗的三颗同步静止卫星在赤道上的几何分布呈现东西走向，纬度和经度方向上的定位精度有很大的差别。罗兰 C 接收机的定位与它选择台链的主副台地理位置有关。该实验考虑接收机所在的地方，基于接收信号的强弱并避免包周差的影响，选择的 6780 台链引起在纬度和经度上的定位精度差异是合理的。因此，组合后的定位精度仍然存在纬度和经度方向上的差异，误差明显降低了，总体提高了定位的精度，组合系统的定位精度优于任意子系统 [60,61]。

3. 微机械陀螺中的多模式多尺度模型

为了提高陀螺仪的在线测量精度，文献 [61] 对不同精度的两组陀螺仪数据进行融合，每组各取三个精度接近的陀螺仪用于实验研究，其参数见表 1.1 和表 1.2。

1) 低精度陀螺仪实验结果

从表 1.1 可以看出，低精度的陀螺仪数据经过多尺度数据融合处理后，其零偏稳定性在 Kalman 滤波的基础上可提高一个数量级左右。

表 1.1 低精度陀螺仪零偏稳定性的变化

零偏稳定性	陀螺仪 1	陀螺仪 2	陀螺仪 3
原始输出	0.30635	0.36217	0.46003
Kalman 滤波后	0.065862	0.07713	0.10121
数据融合后		0.0065245	

2) 高精度陀螺仪实验结果

从表 1.2 可以看出，经数据融合处理后，高精度陀螺仪的零偏稳定性可提高一个数量级左右。

表 1.2 高精度陀螺仪零偏稳定性的变化

零偏稳定性	陀螺仪 1	陀螺仪 2	陀螺仪 3
原始输出	0.059587	0.067933	0.094825
Kalman 滤波后	0.052016	0.050581	0.072264
数据融合后		0.003817	

1.2.2 国内相关研究

有关多尺度多传感器数据融合方法的研究，许多文献都有相关的报道。文献 [25] 不仅介绍了常用的利用小波变换对多传感器测量数据进行融合方法的步骤及结果等，还介绍了与文献 [62] 类似的方法。文献 [63]、[64] 给出将 Kalman 滤波和小波变换相结合的适合于动态数据的一种多尺度多传感器数据融合方法。此

外，文献 [65]~[70] 提到了一种采用多个输出数据速率不同的传感器数据融合的方法，使不同输出数据率的传感器具有相同的数据输出率。文献 [71] 提出了一种图像多尺度融合的方法，文献 [72] 讨论了不同数据融合结果的方差变化，文献 [73] 把小波包变换引入数据融合。

1.2.3　多尺度数据融合算法

多尺度多传感器数据融合方案的基本步骤 [73] 如下：首先，选择合适的小波基函数对每一个传感器的观测数据分别进行小波分解，得到各个传感器在不同尺度上小波系数和最粗尺度上的尺度系数；然后，采用相同或不同的融合规则对得到的这些系数进行融合处理；最后，对融合处理后的小波系数进行小波逆变换，在最小尺度上得到的重构数据即为融合后的结果。

1.3　亟待解决的核心理论问题

多模式多尺度数据融合方法已经在若干工程中获得了应用，但仍有一些核心的理论问题有待解决，如系统解释多尺度数据融合的数学原理及分析小波基、函数的正交性、多小波基变换、小波分解层数、小波变换的端部效应等因素对多尺度数据融合结果的影响。

1. 小波基函数的正交性

不同小波基对信号的描述不同，因此只能根据具体要求选择合适的小波基，而小波基函数的选取直接影响数据的融合质量。文献 [74] 中指出小波基具有 5 个重要的指标: 正交性、紧支性、消失矩、正则性、对称性，在实际应用中可依据这些指标并采用实验来确定最佳小波基。例如，在 MEMS 陀螺仪数据融合中要想取得相对最优的数据融合结果，可选择支撑长度和消失矩较大、对称性较好的小波基 [75]。

根据文献 [76] 的介绍，小波包适用于细小边缘或纹理较多的图像，多小波对信号滤波时可避免将一些信号特征模糊化。该文献中还指出若能按信号特征自适应选择小波基，即通过从给定的小波基中选择最优的使之最有效地表示信号的小波基，则对信号描述的效果将会得到较大改善。小波基函数的选择对数据融合的结果也有影响。

2. 小波分解层数和加权值

一般根据主观经验事先选择一个固定的分解层数，但这样确定的分解层数难以使算法在不同情形下都获得最优的降噪效果 [77]。因此，自适应选择分解层数的方法值得重视。

含噪信号经过小波变换以后，有用信号和噪声在各层小波空间里分别具有不同的特性: 信号的主要特征由分布在较大尺度上的少数幅值较大的系数来表征，而噪声则表现在各层小波空间里，对应着个数较多、幅值较小的小波系数。也就是说，白噪声经过正交小波变换后仍然是白噪声；有用信号经过小波变换后的小波系数将表现出与白噪声不同的特性，即主要由少数大尺度小波空间上数值较大的小波系数来表征 [78,79]。因此，可以依据各层小波空间系数是否具有白噪声特性来确定合理的分解层次。大量的实验表明，当小波高频系数表现出非白噪声特性时，对应的分解层数即为要选择的分解层数。

在多模式多尺度数据融合中，各层的数据采用分层加权平均，可采用小波方差 [80] 或小波熵 [43,61,79] 进行加权。由于小波的多分辨率特性，这样加权既考虑各个传感器的长期稳定性、中期稳定性，也顾及各个传感器的短期稳定性。在某一个尺度范围，比较稳定的传感器占的权值大，作用显著，权值小的传感器作用小。如何自动地匹配不同的传感器是一个必须面对的问题。

1.4 多模式多尺度数据融合模型

多模式多尺度数据融合模型的基本出发点，就是在多模式多尺度进行数据融合后的测量结果优于单一在时域对测量数据进行融合的结果。

1.4.1 多尺度数据融合定理

对多尺度数据融合的数学原理进行深入分析和推导，首先由小波变换中的一些性质得出关于小波分解系数之间的相关性的定理及推论。然后，通过小波变换后相邻项之间的相关性做定性和定量分析，得到几个定理并给出结论: 经小波变换后，同一尺度上的平滑信号之间、细节信号之间互不相关，自相关性均减半，平滑信号与细节信号之间互不相关。最后，基于实际中总能得到不同尺度上的多传感器数据，这类数据可以视为被测量信息及干扰信息迭代的结果，并基于传感器系统的相关假设和定义，给出了多尺度数据融合定理的推导过程及证明 [81]。下面介绍其中一些较为重要的推导及结论。

首先，推导并给出时域加权融合的最小均方误差为

$$\sigma_{\min}^2 = 1 \Big/ \sum_{i=1}^{m} \frac{1}{\sigma_i^2} \tag{1.1}$$

此时所对应的加权因子为

$$W_i^* = 1 \Big/ \left(\sigma_i^2 \sum_{i=1}^{m} \frac{1}{\sigma_i^2} \right), i = 1, 2, \cdots, m \tag{1.2}$$