

遥感影像融合与分辨率增强技术

徐 青 张 艳 耿则勋 邢 帅 谭 兵 编著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书是在吸收国内外多源卫星遥感处理最新发展成果,并对“十五”国家 863 和总装预研项目研究成果系统总结的基础上撰写而成的。重点论述了多源卫星遥感几何处理的最新算法,包括光学、雷达成像卫星的几何模型及其参数解算方法,多源遥感影像间的高精度几何配准,多源遥感影像的数据融合以及评价标准,超分辨率图像生成的理论、算法实现、实验经过分析及其应用等。

本书适合遥感、测绘、数字信号处理、数字图像处理领域的院校、研究所以及相关机构的教师、科研人员、研究生和工程技术人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

遥感影像融合与分辨率增强技术/徐青等编著.—北京:科学出版社,2007
ISBN 978-7-03-017738-X

I. 遥… II. 徐… III. ①遥感图像-图像处理 ②遥感图像-影像分辨率-图像增强 IV. TP75

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 085476 号

责任编辑:朱海燕 韩 鹏 王日臣/责任校对:纪振红

责任印制:钱玉芬/封面设计:王 浩

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>

印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007 年 2 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2007 年 2 月第一次印刷 印张:13 1/2 插页 4

印数:1—3 500 字数:310 000

定价:45.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

前 言

自 20 世纪 50 年代末起,航天遥感技术经过 50 多年的发展和应用,已经形成了一个多层次、立体型、多角度、全方位和全天候的地球信息获取技术系统,并随之引起地球观测数据量的迅猛增长。面对数量巨大、覆盖范围广阔的遥感数据,如何处理多传感器、多时相、多分辨率的遥感数据,从中获取所需要的信息并对其进行信息增强成为目前迫切需要解决的问题,而遥感图像融合和分辨率增强技术的出现则为解决该问题提供了一条崭新的思路。

遥感图像融合和分辨率增强技术是对地观测信息获取与处理技术的高级发展,它以同一环境或对象的多源遥感影像数据为对象,按具有一定准则的数据融合引擎来组织、关联和综合数据,产生比单一信息源更精确、更完全、更可靠的估计和判决,达到获取更高质量数据信息的目的,并为最终决策应用提供依据。按照融合的目标,遥感图像融合和分辨率增强技术可分为增强图像光谱信息的数据融合和增强图像几何信息的数据融合。增强图像光谱信息的数据融合提取多种光谱通道输入图像的信息,综合成统一的具有多通道特性的图像。增强图像几何信息的数据融合就是从一系列低分辨率图像重建出更高分辨率的图像,增强图像的空间分辨率,也称为超分辨率图像重建。增强图像光谱信息的数据融合从 20 世纪 70 年代开始发展,我国的研究起步较晚,始于 80 年代,但发展极为迅速,被列为“863”计划和“九五”规划中的重点研究项目,作为计算机技术、空间技术等高新产业领域的关键技术之一。增强图像几何信息的数据融合的概念出现于 20 世纪 80 年代,在 20 世纪末,成为空间信息处理的研究热点之一,获得广泛关注。

我国对遥感图像融合和分辨率增强技术的研究起步较晚,尤其对增强图像几何信息的数据融合技术的研究还处于探索阶段,在遥感图像融合和分辨率增强技术方面还未形成系统的理论体系和处理系统。本书针对国内研究现状,结合我们承担的多项国家高技术技术信息领域的研究项目,探索了从遥感图像的几何纠正、图像配准到遥感图像的光谱信息融合、超分辨率重建等诸多方面的理论、方法和应用途径。本书的主要研究内容涉及几何处理、影像配准、增强光谱信息的数据融合和增强几何信息的超分辨率图像重建等四个方面。

1. 几何处理

研究了画幅式影像、线阵 CCD 影像以及雷达图像等多种卫星遥感影像的严格成像模型和几何纠正方法。针对线阵 CCD 影像的严格几何纠正,提出了抗差岭-压缩组合估计(RCRS)算法,较好地解决了线阵列推扫式影像外定向的难点问题——法方程病态性问题,并可以取得很高的定位精度。此外还研究了多项式、直接线性变换、有理函数模型等多种通用成像模型及近似几何纠正算法,并比较了各种通用成像模型几何校正的精度、复杂性、计算量、对已知数据的要求等性能。

2. 影像配准

多源遥感图像之间的配准是图像融合的基础,其精度直接影响到后续融合处理的质

量。本书提出了基于多种数字影像匹配方法与小面元微分纠正相结合的多源遥感影像高精度配准算法,可确保可见光范围内不同类型、不同分辨率的遥感图像之间的相对配准精度达到子像素级。

3. 增强光谱信息的数据融合

增强光谱信息的遥感图像融合一直是对地观测数据处理技术中的一个重要研究方向。本书关于增强光谱信息的遥感图像融合方面研究内容包括如下四方面:

(1) 对多源遥感影像数据融合的基本理论、特点、层次结构、主要方法、应用、历史现状及存在问题进行了全面详细的总结,形成了该技术的基本知识和理论体系。

(2) 对像素层多源遥感影像融合的原理、数据源、技术流程、主要算法进行了详细的分析与总结,对目前常用的三类融合算法的计算效率、算法复杂度、适用范围、融合图像质量等进行了分析比较。

(3) 以突出遥感图像中的线状目标为目的,结合小波变换的多分辨分析在边缘检测中优势,提出了基于多尺度边缘增强的影像融合算法。实验证明,融合影像在较好地提高空间分辨率和保持光谱特性的同时,对图像中主要地物目标的边缘进行了增强。

(4) 复数小波变换是对实数小波变换的一个推广,其具有近似的平移不变性以及更好的方向选择性。本书对复数小波变换在遥感影像融合中的应用进行了研究,设计了基于复数小波变换的融合算法。实验结果表明,基于复数小波变换的图像融合总体效果优于实数小波变换的融合效果。

4. 增强几何信息的超分辨率图像重建

对影像超分辨率重建的理论和技術方法进行了比较系统的探讨和研究,在影像超分辨率重建的前期数据处理、影像超分辨率重建算法及重建结果影像的后处理及影像超分辨率重建技术的应用等方面,进行了深入的研究并取得了一系列有意义的研究成果,主要包括:

(1) 在运动参数估计方面,基于影像形变的连续性特征和数字摄影测量中的特征点高精度提取与匹配技术,提出了一种精度高、可靠性强的自适应运动参数估计方法,并设计了相应的算法及数据结构,试验证明该算法比较适合于遥感影像等具有局部变形特征的影像配准,其配准精度可达到子像素精度,为基于遥感影像的超分辨率重建奠定了基础。

(2) 对频率域解混叠方法的理论和算法流程进行了分析与说明,并针对各种试验数据进行频率域超分辨率重建试验,证明了频率域解混叠方法的理论正确性、实践可行性及应用局限性。

(3) 在小波多分辨率分析与正交小波变换理论的基础上,将基于小波的影像超分辨率插值重建算法扩展到更一般的运动估计模型,以适用于多种情况下的小波超分辨率重建,并将该算法首次成功应用于遥感影像超分辨率重建中。

(4) 提出了一种能充分利用 Delaunay 三角网性质且局部可更新的循环插值重建算法——MDTHR 算法,该方法具有计算简单,适合影像数据更新的优点。

(5) 对 MAP 和 POCS 这两种空间域方法进行研究,总结了其基本思想与一般算法流程,并针对各种试验数据进行了空间域超分辨率重建试验,在遥感影像超分辨率重建中取得显著的重建效果,在应用上具有创新性。

(6) 对基于交错采样型遥感影像的超分辨率重建技术进行了研究,分析了交错采样型 CCD 传感器的成像原理、成像模型及其重建方法;对 SPOT-5 超模式影像数据处理的关键技术与流程进行了研究,并解决了大尺寸遥感影像的超分辨率重建问题。

其中光谱信息融合的研究成果已得到工程实践的检验,并应用到实际生产中,超分辨率重建全面地研究了频率域、空间域图像超分辨率重建等丰富内容,具有显著的特点和重要的参考价值,研究成果正推广到工程检验中。

本书包括七章内容:

第一章对遥感卫星发展的历程和现状进行了详细介绍,并概略介绍了遥感影像的几何处理方法和遥感数据融合的内容、意义。

第二章有代表性地介绍画幅式遥感影像、线阵 CCD 遥感影像和雷达影像的严密成像模型和严格几何纠正方法,以及多项式、直接线性变换、有理函数等通用成像模型和近似几何纠正方法。

第三章介绍图像在进行光谱信息增强的数据融合之前,所必需的图像高精度配准处理,提出基于小面元的图像高精度配准算法。

第四章研究增强图像光谱信息的数据融合技术,具体包括图像数据融合技术概述、增强图像光谱信息的数据融合技术概述、基于多尺度边缘增强的图像融合算法、复数小波变换在图像融合中的应用。

第五章对增强图像几何信息的数据融合技术——超分辨率图像重建技术进行综合介绍,并介绍图像超分辨率重建前所需的预处理工作,包括建立几何形变模型、不良帧剔除、多帧图像运动参数估计。

第六章研究频率域超分辨率重建算法。

第七章研究空间域超分辨率重建算法和图像复原、去噪算法。

本书是作者近几年在遥感图像融合和分辨率增强研究领域的学术和科研工作的总结,其中包含了作者近年来的重要研究成果。由于作者技术和学术水平有限,书中缺陷和不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

作 者

2005 年 12 月于郑州

目 录

前言

第一章 概述	1
1.1 航天遥感的发展历程	1
1.2 遥感影像的几何处理.....	10
1.3 卫星遥感影像的融合处理.....	11
1.3.1 遥感影像融合处理的意义.....	11
1.3.2 增强光谱信息的图像融合技术	13
1.3.3 增强几何信息的图像融合技术	14
第二章 卫星遥感影像几何处理	19
2.1 画幅式影像的几何处理.....	19
2.1.1 画幅式影像严格成像模型.....	19
2.1.2 画幅式影像严格几何纠正.....	20
2.2 线阵 CCD 影像的几何处理	22
2.2.1 线阵 CCD 影像严格成像模型	22
2.2.2 线阵 CCD 影像严格几何纠正	26
2.3 合成孔径雷达影像的几何处理.....	33
2.3.1 SAR 影像成像模型	34
2.3.2 SAR 影像几何精纠正	36
2.4 通用成像模型.....	38
2.4.1 直接线性变换成像模型与纠正	38
2.4.2 多项式成像模型与纠正	40
2.4.3 有理函数成像模型与纠正.....	41
第三章 多源遥感影像高精度配准	47
3.1 影像配准综述.....	47
3.1.1 影像配准的概念	47
3.1.2 影像配准的方法	47
3.1.3 配准方法的评价	49
3.2 基于小面元的影像高精度配准算法.....	49
3.2.1 基本思想.....	49
3.2.2 特征点提取	51
3.2.3 影像自动匹配	54
3.2.4 小三角形面元的微分纠正.....	60
3.2.5 小面元纠正的精度分析	61
3.2.6 大区域遥感影像的高精度配准	66

第四章 增强图像光谱信息的数据融合	68
4.1 图像数据融合概述	68
4.1.1 结构模型	68
4.1.2 发展现状和应用情况	72
4.1.3 面临的主要问题	73
4.2 增强图像光谱信息的数据融合技术概述	74
4.2.1 代数运算融合方法	75
4.2.2 基于空间变换的融合方法	76
4.2.3 基于金字塔式分解和重建的融合方法	81
4.2.4 融合算法的试验分析	84
4.3 基于多尺度边缘增强的图像融合算法	85
4.3.1 概述	85
4.3.2 基于小波变换的图像边缘检测	86
4.3.3 基于多尺度边缘增强的融合算法	89
4.3.4 试验结果与分析	89
4.4 复数小波变换在图像融合中的应用研究	92
4.4.1 复数小波原理	93
4.4.2 基于复数小波变换的图像融合算法	99
4.4.3 试验结果与分析	101
第五章 超分辨率图像重建原理	103
5.1 基本概念	103
5.1.1 图像尺寸、分辨率与超分辨率	103
5.1.2 研究背景及意义	107
5.1.3 发展历程和研究现状	108
5.2 超分辨率图像重建的数据预处理	112
5.2.1 几何形变模型	112
5.2.2 不良帧剔除	113
5.2.3 多帧图像运动参数估计	115
5.3 超分辨率图像重建有待进一步研究的问题	128
第六章 频率域超分辨率图像重建方法	129
6.1 频率域超分辨率图像重建的理论基础	129
6.2 频率域解混叠方法	131
6.2.1 基本思想	131
6.2.2 算法概述	132
6.3 实验结果	134
第七章 空间域超分辨率图像重建方法	141
7.1 引言	141
7.2 基于小波的超分辨率图像重建	142
7.2.1 正交小波变换与多分辨率分析	143

7.2.2	非均匀采样数据插值	144
7.2.3	小波超分辨率图像重建	146
7.3	基于 Delauny 三角网的超分辨率图像重建	150
7.3.1	Delauny 三角网的基础理论	151
7.3.2	基于 Delauny 三角网的一般超分辨率插值重构算法	153
7.3.3	基于 Delauny 三角网的改进动态超分辨率插值算法	155
7.4	插值重建图像的复原处理	159
7.4.1	插值重建图像的盲解卷积	159
7.4.2	R-L 算法简介	160
7.4.3	基于 R-L 算法的迭代盲解卷积技术	164
7.5	基于 MAP 的超分辨率图像重建	169
7.5.1	单帧 MAP 超分辨率算法原理	170
7.5.2	多帧 MAP 超分辨率算法	171
7.6	基于凸集投影(POCS)的超分辨率图像重建	175
7.6.1	凸集投影的理论和方法	176
7.6.2	凸集投影方法的具体实施	177
7.7	交错采样 CCD 影像的重建及质量评价	180
7.7.1	交错采样 CCD 传感器成像原理与模型	181
7.7.2	重建影像质量评价	186
	后记	196
	参考文献	198

第一章 概 述

1.1 航天遥感的发展历程

自 20 世纪 50 年代末起,航天遥感技术经历了近半个世纪的发展和应 用,已成为人类观测地球、探索空间、了解宇宙的火眼金睛。凭借它人类才能够拨开云雾见山峦,以前所未有的深度和广度认识、描述、观测和建设人类居住的地球;凭借它,人类才真正实现了了解宇宙、放眼苍穹的梦想。在近半个世纪的发展中,航天遥感经历了萌芽、最初应用、广泛应用、高分辨率和超光谱共四个发展阶段,在空间探测、资源调查、环境监测、通信导航、气象预报、测绘侦察等领域得到了广泛的应用。

20 世纪 60 年代初至 70 年代初是遥感卫星发展的萌芽阶段,遥感卫星主要应用于军事侦察方面,以典型的摄影测量相机作为传感器,采用胶片方式记录探测信息,并通过太空回收仓传输探测信息的记录体——胶片罐。具有代表性的有美国探索者计划中的 Corona 遥感卫星(KH-1、KH-2、KH-3、KH-4、KH-4A、KH-4B)、Argon 遥感卫星(KH-5)和 Lanyard 遥感卫星(KH-6)。KH-(KeyHole)代表计划中的侦察卫星,KH-后的数字代表卫星上搭载的相机系统类型。早期设计的相机系统 KH-1、KH-2、KH-3、KH-5 和 KH-6 仅包括一个全景相机或一个画幅式相机,后期设计的相机系统(KH-4、KH-4A 和 KH-4B)包括两台全景相机,一台前视,一台后视,前视和后视相机的主光轴之间的夹角为 30° 。KH-6 相机可沿飞行方向前倾或后摆,实现对同一地区的立体观测。全部记录胶片均为黑白相片,仅采用了少量红外和彩色胶片进行过试验。相机和影像的主要参数见表 1-1,从表中可以看出,最佳的影像空间分辨率是 1.83m(KH-6),最差的影像空间分辨率是 140.20m(KH-5),相对于测绘制图的需求还有很大差距。美国主要利用这些遥感影像侦察原苏联远程轰炸机和弹道导弹的生产和部署,此外,也向美国国防部和其他部门提供绘图产品。1960 年至 1972 年间,Corona、Argon 和 Lanyard 遥感卫星共采集了地球表面 860 000 帧影像。

表 1-1 KH-系列相机和影像参数

系统	KH-1, KH-2, KH-3, KH-4	KH-4A	KH-4B	KH-5	KH-6
相机类型	全景	全景	全景	画幅	全景
相片宽度/mm	70	70	70	127	127
焦距长/mm	609.6	609.6	609.6	76.2	1 676.4
最佳空间分辨率/m	7.62	2.74	1.83	140.20	1.83
标称轨道高/km	165 ~ 460	185	150	322	172
标称相片比例尺	1 : 275 000 ~ 1 : 760 000	1 : 305 000	1 : 247 500	1 : 4 250 000	1 : 100 000
标称每帧影像地面覆盖面积/km ²	15 × 210 ~ 42 × 580	17 × 232	14 × 188	483 × 483	12 × 64

1972年7月23日,美国发射了第1颗地球资源卫星 ERTS-1,这是遥感卫星步入最初实际应用阶段的标志。空中摄影、光谱辐射测量和扫描成像技术集成后形成了光谱成像传感器,侦察卫星和飞机被改装作运载平台,出现了以多光谱扫描仪为主要搭载仪器的遥感卫星,这一发展使利用遥感卫星对地球进行持续性的资源调查和观测成为可能。

ERTS-1 是美国 1967 年制定的地球资源技术卫星(earth resource technology satellite, ERTS)计划中的首颗卫星,它载荷了多光谱扫描仪(MSS),首次采用数字扫描方式记录和传输探测信息,数字记录和传输不仅延长了卫星服务时间、减轻了有效载荷重量,而且还克服了感光底片保存和复制技术缺陷。继第一颗地球资源技术卫星之后,美国于 1975 年又发射了第二颗地球资源技术卫星,由于在第二颗卫星发射前,整个计划更名为陆地卫星(Landsat)计划,因此第一颗地球资源技术卫星 ERTS-1 被称为 Landsat-1,第二颗卫星 ERTS-1 被称为 Landsat-2。到 1999 年,共发射了七颗陆地卫星,它们分别命名为 Landsat-1 到 Landsat-7,其中 Landsat-6 发射失败,其他六颗卫星发射成功。在搭载的传感器类型和工作方式上,Landsat-1、Landsat-2、Landsat-3 非常接近,Landsat-4 和 Landsat-5 比较接近,Landsat-7 和失败的 Landsat-6 比较接近。

Landsat-1、Landsat-2、Landsat-3 卫星发射到标称高度为 900km,变轨范围为 880~940km 的可重复、圆形、太阳同步近极地轨道上,每 103min 环绕地球一圈,卫星的地面轨迹速度大约为 6.46km/s,通过赤道时刻为地方平均时上午 9:42,以 18 天为周期覆盖地球一次(纬度 82°~90°的极圈除外)。Landsat-1 和 Landsat-2 发射时装有两个相同的遥感系统:①一个三通道的反束光摄像机(RBV)系统;②一个四通道的多光谱扫描仪(MSS)系统。RBV 系统标称的地面分辨率为 80m,光谱感光度类似于单层彩色红外胶片的感光度,工作方式与地面的电视摄像机是一样的。Landsat-3 上的 RBV 系统标称的地面分辨率提高到 30m,并且感光波段集中在单一的宽波段 0.505~0.750 μm (红色区到近红外),而不是多波段,MSS 系统性能与 Landsat-1 和 Landsat-2 相同。由于 RBV 系统的运作受到了多方面技术障碍的困扰,它只起到了次要数据源的作用。而 MSS 系统由于能够连续稳定的提供数字格式的多光谱数据,则得到了广泛的应用。MSS 共包括四个波段:0.5~0.6 μm (绿)、0.6~0.7 μm (红)、0.7~0.8 μm (近红外)和 0.8~0.11 μm (远红外),覆盖幅宽是 185km,瞬时视场角 IFOV 为 80m,每景数据对应地面上 185km \times 175km 的面积。

Landsat-4 和 Landsat-5 同样发射到可重复、圆形、太阳同步近极地轨道上,但轨道高度从 900km 降低到 705km,轨道倾角为 98°,通过赤道时刻为地方平均时上午 9:39,以 16 天为周期覆盖地球,并且载荷了新的传感器系统专题制图仪(TM),探测波段增加到 7 个,在热红外波段空间分辨率为 120m,在其他 6 个波段空间分辨率达到 30m。TM 数据改善了对植被的辨别,还被拓展应用于海洋探测、矿产调查等许多领域。

Landsat-6 上载荷的是一种增强专题成像仪(ETM),它除了包含有与 TM 相同光谱分辨率的 7 个光谱波段外,还增加了一个工作在 0.50~0.90 μm 范围内、分辨率为 15m 的全色波段。Landsat-7 在 1999 年 4 月 15 日发射,轨道高度 705km,轨道倾角为 98.2°,通过赤道时刻为地方平均时上午 9:39,重访周期为 16 天,载荷的是增强专题成像仪(ETM+)和海洋观测宽视场传感器 SeaWiFs。ETM+系统同 Landsat 6 中的 ETM 一样,用于收集 15 m 分辨率的全色波段数据以及 6 个分辨率为 30 m 的多光谱波段数据。此外它还

提供 60m 分辨率的第 7 波段(热波段)数据,而 ETM 在这一波段分辨率仅为 120m,每景 ETM+影像地面覆盖范围为 $183\text{km} \times 170\text{km}$ 。SeaWiFs 传感器分辨率为 $1.13\text{km} \times 4.5\text{km}$,带宽为 2800km。

从 1972 年到 1986 年,Landsat 卫星在遥感应用中占有统治性的地位,这种垄断局面直至 1986 年 2 月 22 日法国成功发射 SPOT-1 卫星后才被打破。从 1986 年开始,遥感卫星在技术和应用方面都开始迅猛发展,1986~1997 年属于遥感卫星的广泛应用阶段,出现了多种不同类型、不同应用方式的遥感卫星,除了在可见光和红外区域探测信息的陆地遥感卫星外,此期间还出现了很多微波遥感卫星。

SPOT-1 卫星发射于 1986 年 2 月 21 号,是第一颗包含线阵列传感器以及采用推帚式扫描技术的地球资源卫星,同时它也是第一颗拥有可瞄准定向的光学系统的卫星,这使得它具有斜侧视进行拍摄的能力和立体成像的能力。它的良好性能和卓越表现奠定了遥感卫星发展史上的又一个新里程碑。此后,许多遥感卫星都纷纷搭载线阵列传感器,并采用推帚式扫描技术探测地球资源信息。SPOT-2 卫星发射于 1990 年 1 月 21 日,SPOT-3 卫星于 1993 年 9 月 25 日发射失败,SPOT-4 卫星发射于 1998 年 3 月 23 日。SPOT 卫星采用高度为 830km、倾角为 98.7° 的太阳同步准回归轨道,SPOT-1,SPOT-2,SPOT-3 上搭载的是两台高分辨率可见光传感器(high resolution visible sensors, HRV),SPOT-4 上搭载的是两台高分辨率可见光红外传感器(high resolution visible and middle infrared sensors, HRVIR)和用于植被监测的仪器。HRV 采用 CCD(charge coupled device)探测元件获取地面目标的图像,它可在多光谱和全色两种模式下工作:多光谱模式的光谱范围为 $0.50\sim 0.59\mu\text{m}$ 、 $0.61\sim 0.68\mu\text{m}$ 、 $0.79\sim 0.89\mu\text{m}$,空间分辨率为 20m;全色模式的光谱范围为 $0.51\sim 0.73\mu\text{m}$,空间分辨率为 10m。HRVIR 与 HRV 相比,一个主要改进就是增加了一个分辨率为 20m 的中红外波段($1.58\sim 1.75\mu\text{m}$),用于增强系统在植被监测、矿物辨别、土壤湿度制图等方面的性能。

俄罗斯在 1985 年发射了 Resours-01 序列中的第一颗卫星,1988 年发射了第二颗卫星,第三颗卫星 1994 年开始运作。Resours-01 卫星装载了 MSU-SK 多光谱扫描仪,共包含 5 个波段,可见光和近红外区域的四个波段绿($0.5\sim 0.6\mu\text{m}$)、红($0.6\sim 0.7\mu\text{m}$)、近红外($0.7\sim 0.8\mu\text{m}$ 以及 $0.8\sim 1.1\mu\text{m}$)的空间分辨率为 170m,热红外波段($10.4\sim 12.6\mu\text{m}$)的空间分辨率为 600m。Resours-01 卫星飞行的高度为 678km,在赤道上卫星再访问隔为 4 天,在高纬度地区每天都能覆盖,Resours-01 每景图像的图幅为 $600\text{km} \times 600\text{km}$ 。MSU-SK 扫描仪采用了独特的圆锥形扫描方法,影像具有较高的辐射精度。

俄罗斯还于 1991 年 3 月 31 日发射了以商用为主的 Almaz-1,成为第一个操作地球轨道雷达系统的国家。Almaz-1 运转了 18 个月于 1992 年 10 月 17 日返回地球。Almaz-1 最初轨道标称高度为 300km,地面覆盖范围近似为北纬 73° ~南纬 73° 。运行中期,轨道高度从 300km 变为 360km。Almaz-1 在 1~3 天的时间间隔内能够提供感兴趣区域的重复观测图像。Almaz-1 上的主要传感器是一个工作于 HH 极化 S 波段(10cm 波长)波谱区间的 SAR 系统,该系统视角随卫星转动而变化,范围从 $20^\circ\sim 70^\circ$ 。依赖于成像区域的距离和方位,有效的空间分辨率从 10~30m 变化,刈幅宽度大约为 350km。

印度于 1988 年发射了第一颗遥感卫星 IRS-1A,1991 年发射了第二颗遥感卫星 IRS-1B,两颗卫星都装备了接收多光谱数据的线阵成像传感器 LISS-I 与 LISS-II,LISS-I

接收 72.5m 分辨率的数据,LISS-II 接收 36.25m 分辨率的数据,波段均为 0.45~0.52 μm (蓝)、0.52~0.59 μm (绿)、0.62~0.68 μm (红)和 0.77~0.86 μm (近红外),基本上与 TM 的第 1 波段到第 4 波段相同。IRS 的第二代卫星 IRS-1C 与 IRS-1D,于 1995 年和 1997 年发射,它们装载了三个传感器,分辨率为 23m 的 LISS-III 传感器(在中红外波段的分辨率为 70m),分辨率为 5.8m 的全色传感器和分辨率为 188m 的宽扫描场传感器(WiFs)。

欧洲空间局于 1991 年 7 月 17 日发射了遥感卫星 ERS-1,1995 年 4 月 21 日发射了 ERS-2。两颗卫星采用太阳同步轨道,倾角为 98.5°,标称高度为 785 km,重访周期为 16~18 天,设计寿命都至少为 3 年。ERS-1 和 ERS-2 主要携带了三个传感器:①C 波段的主动微波仪器 AMI 舱;②Ku 波段雷达高度计(天底点观察高度、风速和主要波高的测量仪器);③一个沿迹向扫描的辐射计[由一个红外辐射计和一个微波发射器(microwave sounder)组成的被动传感器]。AMI 的 SAR 系统可以工作在图像模式或波模式,还有一个微波散射计用于风模式。在图像模式下,AMI 产生 VV 极化、23°视角(波束中间),四视分辨率大约为 30m 的雷达数据,右视刈幅宽度为 100km。AIM 波模式用于测量受到波浪影响的海洋表面雷达反射率,获得海洋波浪系统的波长和方向。

日本国际空间发展局于 1992 年 2 月 11 日发射了 JERS-1 卫星,它主要包括一个多波段的光学传感器(OPS)和 HH 极化的 L 波段雷达传感器。JERS-1 运行轨道倾角为 98°,高度为 568km,重访周期为 44 天。多光谱光学传感器 OPS 的空间分辨率为 18m \times 24m,扫描列宽为 75km,采用扫帚式扫描方式扫描,工作波段包括 0.52~0.60 μm (绿)、0.63~0.69 μm (红)、0.76~0.86 μm (近红外)、1.60~1.71 μm (中红外)、2.01~2.12 μm (中红外)、2.13~2.25 μm (中红外)、2.27~2.40 μm (中红外)共 7 个波段。雷达系统增加了 L 波段,可获得地面分辨率为 18m,视角为 35°覆盖地面 75km 刈幅宽度的雷达影像。

日本还于 1996 年 8 月 17 日发射了高级对地观测卫星 ADEOS-1,每 101min 环绕地球一圈,主要装载两个传感器系统:高级可见光与近红外辐射计(AVNIR)和海色温度传感器(OCTS)。AVNIR 在四个多光谱波段(0.42~0.50 μm 、0.52~0.60 μm 、0.61~0.69 μm 、0.76~0.89 μm)下的空间分辨率为 16km,在全色模式下(0.52~0.69 μm)的空间分辨率为 8m,仪器的扫描宽度为 80km。OCTS 测量全球海洋的颜色和表面温度,空间分辨率为 700m,扫描宽度为 1400km。ADEOS 由于太阳能电池板结构损坏,只服务了大约 1 年时间。

1995 年 11 月 28 日加拿大第一颗遥感卫星 Radarsat-1 发射成功,该卫星采用太阳同步轨道,高度为 798km,倾角为 98.6°运行周期 100.7min,回访周期 24 天,工作波段为 HH 极化的 C 波段(5.6cm)。系统可以工作于多样波束的选择模式,提供变化的刈幅宽、分辨率和视角。在精细模式下,Radarsat SAR 可达到 8m 的分辨率,在宽扫描 ScanSAR 模式下,Radarsat SAR 的最差分辨率为 100m。Radarsat-1 是第一颗分辨率突破 10m 的雷达遥感卫星,它显示了雷达传感在测绘制图也具有极大的潜力。

除了上述介绍的陆地遥感卫星和微波遥感卫星外,期间还出现了海洋大气进行监测的海洋卫星和气象卫星,如美国国家海洋与大气管理局发射的 NOAA 系列卫星、国防气象卫星计划(DMSP)、地球同步环境卫星(GOES)、雨云 7(Nimbus-7)海洋监测卫星、海洋卫星 Seasat-1,以及印度的 IRS-P4(Oceansat)卫星。

在遥感卫星的最初应用和广泛应用时期,中空间分辨率和多光谱为遥感卫星的典型特点,地球观测有限公司于 1997 发射的 EarlyBird 虽然运行时间不长,但它提供的 3m 分辨率的全色影像标志着高空间分辨率遥感卫星时代的真正到来。此后,遥感卫星发展进入了高空间分辨率发展时期,高分辨率遥感卫星纷纷亮相。

美国太空成像(Space Imaging)公司 1999 年 4 月 27 日发射 IKONOS-1 失败后,紧接在 1999 年 9 月 24 日发射成功 IKONOS-2。IKONOS 系列卫星采用 682km 高的太阳同步轨道,穿过赤道的时间为上午 10:30,系统的地面轨迹每 11 天重复一次,但再访时间少于 11 天。它具有纬度和倾斜度的选择功能,可以拍摄任意指定地区的图像,而且能够提供横向的(垂直航迹方向)和纵向的(沿航迹方向)立体图像。在星下点,IKONOS 系统的扫描宽度为 11km,一幅典型的 IKONOS 图像的大小为 11 km × 11km。IKONOS 采用线性阵列技术,在一个空间分辨率为 1m 的全色波段(0.45~0.90 μm)和 4 个空间分辨率为 4m 的多光谱波段[0.45~0.52 μm (蓝)、0.52~0.60 μm (绿)、0.63~0.70 μm (红)和 0.76~0.85 μm (近红外)]上收集数据,数据的灰度达 2048 级(11 个二进制位存储)。

在 1997 年 EarlyBird 发射失败和 2000 年 QuickBird-1 发射失败后,美国地球观测有限公司(DigitalGlobe)终于在 2001 年 10 月 18 日发射成功 QuickBird-2 卫星。QuickBird 卫星系统设计的飞行高度为 600 km,轨道倾角为 66°,平均再访时间为 1~5 天,时间长短取决于连续度和倾斜度。在天底点 QuickBird-2 全色影像(0.445~0.900 μm)的分辨率为 0.61m,多光谱影像[0.45~0.52 μm (蓝)、0.52~0.60 μm (绿)、0.63~0.69 μm (红)和 0.76~0.90 μm (近红外)]分辨率为 2.44m,每景影像地面覆盖范围 16.5km × 16.5km。同样,数据记录也使用 11 个二进制位(11bit)。DigitalGlobe 公司当前正在研制 World-View 卫星,有效载荷为单线阵 CCD 扫描仪,影像的地面分辨率为 0.5m,能够沿航向和旁向形成立体影像,可用于大比例尺地形图测绘,预计在 2006 年发射。

美国 ORBIMAGE 公司于 2001 年发射了 OrbView-3、OrbView-4 两颗卫星,其中 OrbView-4 没有成功进入轨道,OrbView-3 发射成功。卫星采用 470km 高,97°倾角的太阳同步轨道。OrbView-3 的星载传感器系统包括一个 1m 分辨率全色波段和四个 4m 分辨率多光谱波段,星下点扫描宽度为 8km。Orbview-3 系统的光谱波段在功能上与 IKONOS 和 QuickBird 系统的光谱波段接近。

美国军方的高分辨率卫星是 KH 光学卫星和 Lacrosse 合成孔径雷达卫星。KH 系列已发展到 KH-11/12,它的地面分辨率是 10cm,可沿航向和旁向形成立体影像。美军当前正在研发一种称为“未来成像体系(FIA)”系统,以取代 KH-11/12。FIA 由体积小、重量轻、功能强、数量多的小卫星构成星座,包括可见光/近红外成像卫星和 SAR 卫星两部分。此外,美国还在研制具备隐形能力的侦察定位测图卫星。所谓隐形技术,就是指这种卫星在太空中不会被其他国家的雷达系统发现,可以悄无声息地对地面目标进行拍照和侦察。而通常的卫星则会暴露行踪,并且会被对方预测出轨道。隐形卫星项目一直在一个名为“朦胧”的高度机密计划下得到资助,主要由美国洛克希德·马丁公司负责研发。1990 年 3 月 1 日发射的“阿特兰蒂斯”号载人航天飞机上搭载了首颗隐形卫星,2000 年,美国又发射了第二颗经过改进的隐形卫星,目前仍在太空运行。当前美国正在研制第三代隐形摄影卫星,预计未来 5 年里将投入使用。

加拿大的 Radarsat-2 卫星最初计划在 2001 年发射,但为支持 Radarsat-2 和 Radar-

sat-3 形成编队 SAR 干涉测量飞行,获取全球高精度的 DEM,加拿大空间局调整了发射时间,以便进行编队飞行的再设计。2006 年原计划发射 Radarsat-2,卫星高度为 800km,可覆盖南北纬 82°地区,可在条带式、扫描式和聚束式三种模式下工作,影像的最高分辨率是 3m。还计划 2007 年发射 Radarsat-3,Radarsat-2 和 Radarsat-3 两颗卫星将形成编队 SAR 干涉测量飞行,能够生成全球 2m 精度的 DEM。

法国 SPOT 公司 2002 年 5 月 4 日发射的第三代 SPOT-5 卫星,搭载了高分辨率几何成像装置(HRG)、高分辨率立体成像装置(HRS)和植被探测器(VEGETATION)。HRG 装置能够获得 5m、2.5m 分辨率(超模式 Supermode)的全色影像、10m 分辨率的多光谱影像和 20m 分辨率的短波红外影像,每景影像地面覆盖范围 60km×60km。HRG 装置由前视、后视相机组成,工作在全色波段,能够获得同一轨道上的立体像对,沿轨道飞行方向分辨率 5m,于轨道飞行方向垂直的扫描方向分辨率为 10m,每一扫描行含 12 000 个像素,刈幅宽度为 120km,每一立体条带地面覆盖面积 600 km × 120 km。

在军事测图和侦察卫星方面,法国 1995 年 7 月 7 日发射了分辨率为 1m 的太阳神 1A(Helios-1),1999 年 12 月 3 日发射了太阳神 1B。“太阳神 1”卫星运行在高约 680km、倾角 98°的太阳同步圆形极地轨道上,地面分辨率为 1.0m。重访周期 48h,设计寿命 5 年。卫星重约 2.5t,基于遥感卫星 SPOT-4 的平台设计成型,但其光学成像系统和磁带记录仪的性能比 SPOT-4 卫星大大提高。2004 年 10 月,法国军方宣布,“太阳神 1B”工作了近 5 年后,因电源系统出现故障被迫停止工作,而 1995 年发射的“太阳神 1A”仍运行正常。“太阳神 1”卫星不失为欧洲最出色、最有效的卫星成像侦察工具,被誉为“欧洲军队的眼睛”。“太阳神 2”侦察卫星的方案论证工作在 1994 年 4 月正式启动,该计划也包括两颗卫星。卫星采用 SPOT-5 卫星相同的平台,重 4.2t,设计寿命 5 年,卫星运行在高约 680km、倾角 98°的太阳同步圆形极地轨道上,地面分辨率高达 0.5m。与“太阳神 1”相比,“太阳神 2”系统将提供更高的分辨率、更强的成像能力、更多的图像、更快的图像获取和分发速度、更大的目标瞄准敏捷性、更新的情报资料,还具备一定的夜视成像能力。“太阳神 2A”卫星已于 2004 年 12 月 18 日发射成功,“太阳神 2B”原计划于 2005 年交货,预计在 2008 年发射。

当前法国正在开发军民两用型的 Pleiades,它由两颗光学卫星构成,卫星轨道高为 696km,全色影像地面分辨率为 0.7m,多光谱为 2.5m,带宽 21km,重访时间 24h,卫星的位置和姿态将由 Doris 系统和 3 个星跟踪仪测定,卫星具有更好的成像质量、更大的灵活性和更高的定位精度。预计在 2008 年发射。

法国国家空间研究中心(CNES)还正在研制一种称为“干涉测量双轨”(interferometric cartwheel)的系统,该系统由 3 颗微卫星组成,星上搭载有被动 SAR 接收机,用以接收某主动 SAR 卫星(发射和接收微波信号)的信号,形成干涉测量影像。微卫星被放置在一个与主动 SAR 卫星十分相似的轨道上,与主卫星在同一个轨道面并具有相同的轨道周期,但椭圆形状稍有不同。“干涉测量双轨”能够以较低的成本生产全球 1m 精度的 DEM。法国与日本已签订协议,共同开发该系统,利用日本 ALOS 卫星上的 L 波段 PALSAR 作为 SAR 发射源,预计该卫星将在 2006 年后发射。

德国在 20 世纪 80~90 年代曾研发了三线阵 CCD 航天传感器,并搭载在美国的航天飞机和俄罗斯的国际空间站上,获取了地球大量的中分辨率影像,生成了各类地图产品。

目前其重点已转到研发高分辨率 SAR 卫星上。从 2005 年开始,德国的 SAR-Lupe 和 TerraSAR-X 卫星将开始发射。SAR-Lupe 由 5 颗小卫星(重量 770kg)组成,5 颗卫星将被放置在三个不同的近极地轨道,保证全球覆盖,卫星上的 SAR 传感器可在条带式、扫描式和聚束式三种模式下工作,获取的影像的地面分辨率最高可达 1m,通过传统的雷达立体摄影测量和 SAR 干涉测量,能够提取高精度的 DEM 和制作 SAR 正射影像图。德国的 TerraSAR-X 卫星原预期在 2006 年由俄罗斯的火箭送入太空,该卫星使用 X 波段,可在条带式、扫描式和聚束式三种模式下工作,卫星高度为 514km,轨道倾角 97° ,影像的地面分辨率最高可达 1m,可进行雷达立体摄影测量和 SAR 干涉测量,获取大面积的 DEM。德国目前还在论证 TanDEM-X 卫星,该卫星将与 TerraSAR-X 形成编队飞行,通过单通道干涉测量方式获取全球高精度 DEM,达到美国 DTED-3 的标准,即 DEM 间距小于 12m,高程精度优于 2m。该卫星计划在 2008 年发射。

COSMO-Skymed 是意大利最新的军民两用星载 SAR 项目,它由 4 颗 X 波段的 SAR 卫星组成星座,卫星高度为 600km,每颗卫星重 1.7t,可在条带式、扫描式和聚束式三种模式下工作。其中聚束式下的影像地面分辨率为 1m,卫星的重访时间是 12h。2006 年下半年将发射首颗卫星,2008 年整个星座将进入运转。

英国 2005 年 10 月 27 日发射了高分辨率卫星 TopSat,该卫星由英国国家空间中心和英国国防部联合资助,卫星平台是微卫星,有效载荷是 CCD 扫描仪。卫星高度 600km,能够形成旁向立体,最大的指向能力为 30° 。全色影像的分辨率为 2.5m,多光谱影像的分辨率为 5m,摄影覆盖宽度 15km。

俄罗斯军事卫星系统搭载的空间信息 2 测量仪(SPIN-2),采用一种焦距为 1m 的 KUR-1000 全景照相机,在 220km 高度的平台上工作,以 $0.51\sim 0.76\mu\text{m}$ 的全色照片为记录介质,可采集到平均比例尺为 1:220 000,单景覆盖面积为 $40\text{ km} \times 160\text{ km}$,星下点地面分辨率约为 1m 的照片。照片数字化后每个像元平均地面单元的大小为 1.56m。在没有地面控制时,SPIN-2 提供的 10m 分辨率的 DEM 产品,在垂直高度上的精度为 10m,而有地面控制时,其精度可达 5m。第一个 SPIN-2 系统于 1998 年 2 月 18 日在哈萨克斯坦的拜科努尔(Baikonur)人造卫星发射基地发射。

除了 SPIN-2 外,俄罗斯当前高分辨率光学卫星主要是 DK-1、DK-2、DK-3 系列,这些卫星获取的全色影像的分辨率为 $0.4\sim 1.5\text{ m}$,多光谱影像的分辨率为 $2\sim 3\text{ m}$ 。此外,还有 SOKOL 系列光学卫星,全色影像分辨率为 $0.5\sim 1\text{ m}$,Condor-E 是俄罗斯最新的 SAR 卫星,具有 1m 的地面分辨率。

以色列主要发展军用和商业两类卫星。军事卫星主要是地平线(Ofeg)系列,自 1988 年发射成功首颗地平线-1 以来,已发展到当前的最新成员地平线-7。这些卫星能够形成立体影像,进行精确目标定位和测图。地平线卫星分辨率由 2m 提升到当前的 0.25m。

以色列的商业高分辨率卫星是 EROS 系列,由 8 颗光学卫星组成,ImageSat 国际性组织(它是由以色列飞行器工业和核心软件技术联合创立的)于 2000 年 12 月 5 日发射了 EROS-A。EROS-A 卫星采用全色推帚式扫描成像系统,全色影像分辨率为 1.8m,扫描宽度为 12.5km,利用“超采样”技术(半像元交错 CCD 影像合成),能够获得 0.9m 分辨率的影像。2006 年将发射 EROS-B,2009 年将发射 EROS-C。

2001 年 10 月,印度成功发射了技术试验卫星(TES),TES 的分辨率为 1m,卫星具有

航向和旁向指向能力,可形成航向和旁向立体影像。印度 2005 年 5 月 5 日发射了 CartoSat-1(IRS-P5)制图卫星,卫星主要传感器是双线阵 CCD 推扫扫描相机,两个线阵 CCD 相机相对于底视的夹角分别是 $+26^{\circ}$ 和 -5° ,以 31° 交会角形成航向立体影像,影像的地面分辨率为 2.5m ,卫星高度 618km ,倾角 98° ,摄影带宽 30km ,主要用于测制全球的 DEM 和进行数字地形图绘制。CartoSat-2 制图卫星当前正在研发中,它具有 0.6m 的地面分辨率和 10km 的带宽,与 CartoSat-1 卫星不同,CartoSat-2 卫星采用单线阵 CCD,其立体成像通过灵活的指向能力实现,其航向和旁向的最大指向能力可达到 $\pm 45^{\circ}$ 。RISAT 是印度的第一个 SAR 卫星,原计划在 2006 年发射。RISAT 在 C 波段的成像,可在条带式、扫描式和聚束式三种模式下工作。最高地面分辨率为 3m 。

日本的高分辨率卫星主要分为情报收集卫星(IGS)系列和测图卫星系列。IGS 由光学卫星和 SAR 卫星组成,2003 年 3 月,两颗 IGS 卫星发射成功,其中的光学卫星的分辨率为 1m 。原计划在 2006 年发射第二代 IGS 卫星,2009 年发射地面分辨率 0.5m 的第三代卫星,2015 年开始研究第四代卫星。

测图卫星(advanced land observing satellite, ALOS)于 2003 年夏天发射成功,轨道高度 720km ,倾角 98° ,每 99min 环绕地球一周,共搭载了三种传感器:①全色立体测图仪(panchromatic remote-sensing instrument for stereo mapping, PRISM);②高级可见光近红外辐射仪(advanced visible near-infrared radiometer-2, AVNIR-2);③相控阵 L 波段合成孔径雷达(phased array L-band synthetic aperture radar, PALSAR)。其中 PRISM 的全色影像空间分辨率为 2.5m ,多光谱影像空间分辨率为 10m ,摄影覆盖宽度 35km ,在航向形成瞬时立体影像,卫星高度为 691km ,轨道倾角 98° 。PALSAR 在精细工作模式下,距离分辨率为 10m ,方位分辨率从 10m 到 20m 。ALOS 主要目的是测绘 $1:2.5$ 万比例尺地形图和生成高精度的 DEM 以及制作数字正射影像图。日本还在开发分辨率更高的光学和 SAR 测图卫星。

韩国摄影卫星虽然起步较晚,但近年来发展很快,1999 年成功发射了 KOMPSAT-1,原来还计划 2006 年将发射 KOMPSAT-2 卫星。KOMPSAT-2 卫星将位于 685km 高度的太阳同步轨道,全色影像地面分辨率为 1m ,多光谱影像地面分辨率为 5m ,带宽 15km ,通过卫星前后左右的倾斜获取立体影像,最大横向摇摆为 $\pm 56^{\circ}$,最大纵向摇摆为 $\pm 30^{\circ}$ 。后继的 KOMPSAT-3、KOMPSAT-4 当前正在研发之中,其地面分辨率将提升到 0.5m ,计划在 2006 年发射。此外, EKOSAT 和 MAPSAT 也将在未来几年中发射。

中国台湾空间计划始于 20 世纪 80 年代中期,最初的方案名叫“五年卫星发展计划”。1995 年,台湾当局最终确定了名为“空间科技发展长远计划”的空间远景规划方案。一期工程预计到 2006 年结束,计划投入资金总计新台币 150 亿元,采用自主或合作方式研制并发射“中华卫星(ROCSAT)”一、二、三号三套卫星系统;二期工程将在 2008 年发射两颗新型卫星,并在 2011 年至 2018 年间陆续发射 5 颗微型卫星和 $10\sim 15$ 枚探空火箭。

2004 年 5 月,台湾发射“中华卫星-2”,该卫星是“空间科技发展长远计划”中的第二颗卫星,是一颗高分辨率成像卫星。卫星采用 891km 高的太阳同步轨道,倾斜角 99.1° ,每天可绕地球 14 圈,其上安装的高分辨率传感器具有 1 个全色通道和 4 个多光谱通道,可在 8min 内完成对台湾全岛的拍摄工作,带宽 24km ,全色影像的分辨率是 2m ,多光谱影像的分辨率是 8m 。它可改变星体的前后仰角或左右侧摆角(最大 $\pm 45^{\circ}$),对目标进行

立体摄影,具有同时提供台湾及周边区域高清晰度图像和 3D 立体测绘的能力。

在高光谱航天遥感方面,1997 年,美国国家航天航空局 NASA 发射的克拉克(Clark)卫星携带了一个带有 384 波段的传感器系统,虽然在发射后不久,由于地面通信问题和控制问题,它没有进入工作状态,但还是打破多光谱探测信息局限于数个狭窄的、相邻的光谱波段局面,开创了光谱遥感在连续的、较宽范围的光谱波段内收集信息的新局面。

1999 年 12 月 18 日,美国国家航空航天局成功发射了地球观测系统 EOS 的第一颗先进的极地轨道环境遥感卫星 TERRA(EOS-AM1),这颗卫星上搭载的中等分辨率成像分光计(MODIS),是一个具有 36 个波段的光学遥感器,它可以在 $0.4\sim 14\mu\text{m}$ 的波谱段内工作,地面分辨率分别为 250m、500m、1000m,扫描宽度为 2300km,每日或每两日可获得一次全球观测数据,至少能够提供 15 年、36 个波段的地球综合信息。虽然从波谱数目上归类,MODIS 只是中等光谱分辨率的传感器,但它的成功应用,无疑对高光谱遥感卫星的发展注入了信心和希望。

美国航天航空局 2000 年 11 月 21 日成功进行的 EO-1 卫星计划中搭载了高级陆地成像仪(advanced land imager,ALI)和超光谱传感器 Hyperion,Hyperion 提供了 220 个光谱波段的数据,光谱范围在 $0.4\sim 2.5\mu\text{m}$ 之间,地面分辨率为 30m,每景图像覆盖地面大小为 $7.5\text{km}\times 100\text{km}$ 。ALI 和 Hyperion 数据引起广泛的兴趣,美国计划于 2005 年 9 月再次执行 EO-1 卫星计划。

ORBIMAGE 公司 2001 年 9 月发射了一个设计用于收集 200 个波段数据的超光谱光谱传感器,这些波段的范围在 $0.45\sim 2.5\mu\text{m}$ 之间,地面分辨率为 8m 或 24m,扫描宽度为 5km,系统横向的定向扫描能力使得系统对于指定区域的再访问时间少于 3 天。

日本于 2002 年 12 月 1 日发射的 ADEOS-2(Advanced Earth Observing Satellite-2)遥感卫星平台上,也搭载了一个具有 36 个波段的全球成像仪(GLI),它的分辨率范围为 $250\sim 1000\text{m}$,扫描宽度为 1600km,可在全球范围内成像。

澳大利亚原计划于 2002 年发射的 ARIES-1 卫星(Australian resource information and environment satellite)是一颗超光谱资源绘图卫星,它同时搭载了一个 10m 分辨率的全色高空间分辨率成像仪和一个超分辨率传感器(可在 $0.4\sim 2.5\mu\text{m}$ 的 105 个连续波段范围内收集到 30m 空间分辨率的影像数据)。但因各种因素,澳卫星尚未发射。

美国海军的海军大地地图观测者(NEMO)卫星计划中的海岸海洋成像分光计(COIS)是一个能够在 210 个光谱波段上接收数据的超光谱仪器,它的光谱范围为 $0.4\sim 2.5\mu\text{m}$,在 $0.4\sim 1.0\mu\text{m}$ 中有 60 个光谱波段,在 $1.0\sim 2.5\mu\text{m}$ 范围内有 150 个光谱波段,扫描分辨率为 30m 或 60m,扫描宽度为 30km。除了 COIS 之外,NEMO 还装载了一个分辨率为 5m 的全色成像仪(PIC),扫描宽度同样为 30km。

在高空间分辨率和超光谱分辨率阶段,遥感卫星的发展呈现出以下两个特点:

(1) 卫星的自主导航定位和控制精度进一步提高,采用 GPS 接收设置可提供分米级的轨道测量定位精度,采用恒星相机和惯性测量器件能够提供高精度的传感器姿态角度数据,如 SPOT-5 卫星采用的先进卫星集成多普勒定轨和无线电定位设备(Doppler orbitography and radiopositioning integrated by satellite,DORIS)在与轨道平面垂直的方向、与轨道相切的方向及径向三轴方向可提供 0.71 m、0.67 m 和 0.36 m 的定位精度。

(2) 星上图像处理功能将大大增强,美国的 NEMO 卫星、欧洲航天局(ESA)的 PRO-

BA (project for on-board autonomy) 卫星以及德国的 BIRD (bispectral infrared detection) 卫星都具有星上图像处理功能,能够实现星上图像的自动处理、分类、分析和特征提取。自动导航功能和星上图像处理功能在遥感卫星的未来发展中将会得到进一步增强。

1.2 遥感影像的几何处理

在过去近半个世纪中,卫星遥感影像的数据量在不断增多,影像的数据类型也在不断变化,虽然传感器的设计工艺和制造水平都在不断地提高,但由于卫星遥感成像时受到自身结构因素和各种环境因素的影响,卫星遥感影像必定存在一定的几何畸变。根据卫星遥感影像的类型和成像方式,研究卫星遥感影像几何畸变的各种因素,采用正确的方法消除各种因素的畸变影响,获得无几何畸变的卫星遥感影像,是卫星遥感影像应用于地球资源环境观测、土地利用和土地覆盖分析、气候季节和年际变化研究、自然灾害分析和研究的前提与基础。

遥感影像的几何变形表现为影像上像元在图像坐标系中的坐标与其在地图坐标系等参考系统中的坐标之间的差异。遥感影像上的几何变形依形成环境可分为静态变形和动态变形两大类。静态变形指在一景影像的形成过程中传感器相对于地球表面呈静止状态时,除去卫星运动因素外,其他各种因素所引起的各种变形误差;动态变形是一景影像的形成过程中由于传感器的运动造成的影像变形。

在静态变形中,又可分为内部误差和外部误差两类。内部误差是由传感器结构等因素引起的,如摄影机的焦距变动、像主点偏移、镜头畸变,以及光机扫描仪的扫描线首末点成像时间差、不同波段上相同位置的扫描线成像时间差、扫描棱镜旋转速度不均匀、扫描线的非直线性和非平行性等,内部误差大小因传感器结构而异,由于遥感卫星在发射入太空之前,传感器要经过严格的检校和测试,内部误差一般较小。外部误差是指传感器本身处在正常工作的条件下,由传感器以外的各因素所造成的误差,如传感器的外方位变化、传感介质的不均匀、地球曲率、地形起伏、地球旋转等因素所引起的误差。外部误差是引起影像变形的主要因素。遥感影像几何处理的主要目的是消除传感器外部误差和传感器搭载平台运动引起的动态误差。

在 1.1 节介绍的多种卫星遥感影像中,一些较著名的商业遥感卫星影像,如法国的 SPOT、印度的 IRS、美国 Space Imaging 公司的 IKONOS、美国 QuickBird 公司的 Quick-Bird 等,其运行商都会提供不同级别的影像产品。虽然不同影像产品分类的具体级别不同,但总体可以概括为三类:①第一类产品属于原始级别产品,只进行影像辐射纠正处理,没有进行任何几何处理;②第二类产品经过简单的近似几何纠正,只消除了平面的影像变形,没有消除地形起伏引起的影像变形,定位精度有限;③第三类产品,经过严格几何纠正,消除了地形起伏引起的影像变形,定位精度最高。

第二类产品的几何处理,可以认为是粗纠正,一般采用传感器通用成像模型,如多项式、直接线性变换、有理函数模型等,直接描述影像像元在图像坐标系中的坐标与其在地图坐标系等参考系统中的坐标间的几何关系,不需要考虑传感器成像的物理因素和了解传感器的成像方式和成像机理,纠正过程与具体的传感器无关,也不需要 DEM 地形高程数据的支持,模型形式简单,处理较为简便,但无法消除地形起伏引起的影像变形误差,一

般只适用于平坦地区影像的纠正。

第三类产品的几何处理,可以认为是精纠正,一般也称为严格几何纠正,处理时要考虑传感器成像的投影方式和地形起伏、地球曲率、大气折射、地球自转、相机透镜畸变以及卫星的位置、姿态变化等各种因素,依据传感器的成像几何关系,利用成像瞬间地面点、透视中心和相应像点三点共线的几何关系建立复杂的严密传感器成像模型。这种严密传感器成像模型数学形式较为复杂,且需要较完整的传感器成像参数,但其理论严密,定位精度最高。在摄影测量处理中最具有代表性和最广泛的严密传感器模型一般都以共线方程为基础,根据不同传感器成像投影方式的类型建立。但由于传感器的共线方程成像模型涉及传感器物理构造、成像方式和成像参数,一些遥感卫星的运行商出于商业技术保密的目的(如 IKONOS 影像的运行商 Space Imaging 公司),不公开传感器的共线方程成像模型和其中的重要参数,只提供严密传感器成像模型的拟合模型——有理函数模型 RFC,用户可以根据 RFC 模型,生成正射纠正影像产品。

对遥感影像进行几何处理,获得消除几何畸变的遥感影像,是遥感影像应用于地球资源环境观测、土地利用和土地覆盖分析、气候季节和年际变化研究、自然灾害分析等多种领域中的必要前提和先决条件,本书中将主要研究画幅式影像、线阵 CCD 影像和合成孔径雷达影像三种影像的精纠正即严格几何校正方法,以及多项式、直接线性变换、有理函数模型等用于粗纠正的通用成像模型。

1.3 卫星遥感影像的融合处理

1.3.1 遥感影像融合处理的意义

航天遥感技术经过 50 多年的发展和应用,一个多层次、立体型、多角度、全方位和全天候的地球信息获取技术系统已经形成(郭华东等,2000),并由此带来了地球观测数据量的迅猛增长。面对如此数量巨大、覆盖范围广阔的遥感数据,现有的对地信息处理技术则相对滞后。海量数据的存储、管理、处理、传输、应用等实实在在的问题已经成为制约地球信息技术发展的瓶颈。尽管目前计算机硬件技术的发展速度已经达到每半年翻一番,但以目前最先进的计算机软硬件设备,要想同时处理多传感器、多时相、多分辨率的遥感数据,从中获取所需要的信息也不是一件容易的事。而多源遥感图像数据融合技术的出现则为解决这些问题提供了一条崭新的思路。

多源遥感图像数据融合技术是对地观测信息获取与处理技术的高级发展,它根据遥感图像数据产生的真实过程,更全面、更完整汇聚目标所表露的客观证迹,突破常规信号处理方法的限制,在证据和动态等更高的等级上进行推理,利用智能技术从数据中提取所需信息。多年的研究实验表明,多源遥感图像数据融合技术是解决海量遥感图像数据问题的一个有效途径。

融合(fusion)的概念开始出现于 20 世纪 70 年代初期,当时称之为多源相关、多传感器混合和数据融合。1973 年,美国国防部资助进行了声纳信号理解系统的研究,数据融合技术在这一系统中得到了最早体现(何国金等,1999)。80 年代以来,多传感器数据融合技术的研究以军事领域的研究为开端,迅速扩展到军事和非军事的各个应用领域,其称谓也逐渐统一为数据融合或信息融合。

从本质上讲,数据融合就是以多源数据为对象,具有按一定准则组织、关联和综合数据的数据融合引擎(data fusion engine),目的是获取更高质量的数据信息,并最终为决策应用提供依据。

多源遥感图像数据融合是多源数据融合中一个重要部分,贾永红等(2000)根据大量实验和实际工作总结提出了多源遥感图像数据融合的定义:多源遥感影像数据融合是将同一环境或对象的多源遥感影像数据综合的方法和工具的框架,以获得满足某种应用的高质量信息,产生比单一信息源更精确、更完全、更可靠的估计和判决。这个定义对多源遥感图像数据融合进行了比较全面的概括,主要包括以下几个方面:

第一,认为多源遥感图像数据融合的对象不仅仅是遥感图像,还包括其他非图像形式的遥感数据,例如数字地图、GPS 导航信息、地理信息等;

第二,认为多源遥感图像数据融合是各种方法和工具的一个框架,将其与具体的技术方法区分开来,上升为一种结构体系;

第三,强调了要产生高质量的信息,明确表示产生的信息必须能够比原始数据更好地满足用户的需要;

第四,明确了目的,就是要产生比单一信源更精确、更完全、更可靠的估计和判决,即多源遥感图像数据融合最终要解决决策层的问题。

在遥感应用领域中,单一传感器影像数据通常不能提取足够的信息来满足某些应用的需要,它所能提取的信息是有限的、不完整的。因为目标的特征是由包括电磁辐射在内的所有表征媒介来表达,某一波段的电磁辐射图像仅能表达与其相关的特征。而多传感器图像数据通过融合可以得到更多的信息,减少理解的模糊性,提高遥感数据的利用率(罗忠,1999)。图像数据融合不是简单的叠加,它产生新的蕴含更多有价值信息的图像,即达到 1 加 1 大于 2,甚至是远大于 2 的效果(周荫清等,1996)。

和单一传感器影像数据相比,多源遥感影像数据的主要特色是具有冗余性、互补性和合作性。冗余性表示它们对环境或目标的表示、描述或解译结果相同;互补性是指信息来自不同的自由度且相互独立,互补信息的应用,能减少系统总的不确定性,增加提取特征的精确性,在部分传感器发生错误情况下仍然能保证数据的可靠性,能提高最终结果的可信度;合作信息是不同传感器在观测和处理信息时对其他信息有依赖关系,合作信息的应用,可提高协调性能。

总的来说,多传感器图像数据融合的优点可以归纳如下:

(1) 可靠的数据来源。在有若干传感器不能被利用或受干扰,或某个目标/事件不在覆盖范围内时,至少有一种传感器可以提供图像信息。

(2) 增加测量维数,增加了置信度。利用对同一目标的多波段、多时相、多角度的图像数据可以更全面地揭示目标的本质特性,提高目标判别结果的可靠性。

(3) 容错性好,性能稳定。在一个或多个传感器失灵,或者图像数据出现错误时,仍可以保证融合后的信息及其产生的决策正确。

(4) 改进探测性能,增加响应的有效性。各个传感器信息的有效互补,对某个目标/事件产生更全面的响应。

(5) 扩展了空间的覆盖。通过多个交叠覆盖的传感器作用区域,扩展了空间的覆盖范围,总有一种传感器可以探测到其他传感器探测不到的地方。

(6) 扩展了时间的覆盖。用多传感器的协同作用提高了检测概率,某个传感器可以探测其他传感器不能顾及的目标/事件。

(7) 改进系统的可靠性和可维护性。多传感器的联合信息降低了目标/事件的不确定性,而对单个传感器的改进会更好地在系统中体现出来。

(8) 提高了空间分辨率。利用多传感器孔径可以获得比任何单一传感器更高的图像分辨率。

(9) 降低了对单个传感器的性能要求。这样可以大大降低系统的成本而不会影响获得信息的质量。

1.3.2 增强光谱信息的图像融合技术

在设计同一平台上的遥感成像装置时,要采用全色、多光谱或高光谱传感器获取同步影像,由于波谱段逐渐变窄,要保持获取影像的信噪比,必须逐渐增大瞬时视场 IFOV 以采集更多的光,因此导致获取的影像空间分辨率逐渐下降,全色影像具有较高的空间分辨率但缺乏光谱信息,多光谱影像光谱分辨率高,光谱信息丰富,但其空间分辨率低。如何获取高空间分辨率的多光谱影像来满足军事目标判读、植被研究、农业详查、土地利用和城市资源调查等的要求,是需要遥感影像数据融合技术来解决的一个问题。这类数据融合技术被称为增强图像光谱信息的数据融合技术。

增强图像光谱信息的数据融合技术的作用对象主要是原始影像数据,根据所用到的影像类型可以将该技术划分为几个类型(贾永红等,2000),即单一传感器的多时相影像融合、多传感器的多时相影像融合、单一平台多传感器的多空间分辨率影像融合、多平台单一传感器的多时相影像融合和同一时相多传感器影像融合。

根据当前数据融合结果的性质,IEEE 国际遥感数据融合技术委员会将遥感数据融合分为三级,即数据(像素)级、特征级和决策级(马建文等,2001)。

1. 像素级融合

像素级融合是最低层次的信息融合,其实现过程是直接在采集到的原始图像数据层上进行的,即在可见光、红外及 SAR 影像等原始数据基础上进行数据的综合分析。像素级融合的目的主要是图像增强、图像分割和图像分类,为人工判读图像或更进一步的特征融合提供良好的基础数据。

2. 特征级融合

特征级融合属于中间层次,其处理方法是首先对来自不同传感器的原始信息进行特征抽取,然后再对从多传感器获得的多个特征信息进行综合分析和处理,以实现多传感器数据的分类、汇集和综合。一般来说,提取的特征信息应是像素信息的充分表示量或充分统计量,包括目标的边缘、方向、运动速度等。

目前,特征级数据融合的主要方法有聚类分析法、Dempster-shafer 推理法、贝叶斯估计法、熵法、加权平均法、表决法以及神经网络法等。

3. 决策级融合

决策级融合是一种高层次信息融合,其结果将为各种控制或决策提供依据。因此必须结合具体的应用及需求特点,有选择地利用特征级融合所抽取或测量的有关对象各类特征信息,才能实现决策级别融合的目标,其结果也将直接影响最后的决策水平。

由于对预处理及特征抽取有较高要求,所以决策级融合的代价较高。目前,常用的决策级数据融合的方法主要有贝叶斯估计法、神经网络法、模糊聚类法及专家系统等。

关于增强图像光谱信息的融合技术具体内容将在第四章中详细介绍。

1.3.3 增强几何信息的图像融合技术

增强图像几何信息的数据融合就是从一系列低分辨率(low resolution, LR)图像复原(或重建)出更高分辨率的图像(或图像序列),以增强图像的空间分辨率,这种技术也称之为超分辨率图像重建技术。重建后的图像称之为超分辨率重建图像或增强分辨率图像,超分辨率图像的像素密度比原始图像更密,能够提供更多的细节信息。在超分辨率图像上,更易于识别微小目标。从1970年开始,CCD电荷耦合器件和CMOS影像传感器就已经被广泛用于采集数字图像了,尽管现在的分辨率水平能够满足大多数应用中的成像要求,但人们仍希望出现更高分辨率的数字相机,但同时能尽量控制制造成本。

提高空间分辨率的最直接措施是采用传感器制造工艺减少像元尺寸,也就是增加单位面积内的像素数。但是当像元尺寸减少时,它接受的电磁波辐射能量也减少了,因此很容易引起噪声,降低图像质量。为了避免像素尺寸减小引起的图像质量下降,像元尺寸大小存在一个最低下限。据估算, $0.35\mu\text{m}$ 规格的CMOS元件,最小允许的像元尺寸为 $40\mu\text{m}^2$,目前的图像传感器制造工艺已经达到了这一极限水平。

提高空间分辨率的另一种措施是增加集成电路板的尺寸,但这会导致电容的增加。大的电容很难加快电荷转移速率,因此这种措施也不认为是一种有效措施。同时,在商业应用中制造高空间分辨率的光学和CCD传感器的高成本也是要考虑的一个主要因素,因此有必要考虑一种能够克服这些传感器制造技术限制的新措施来提高图像空间分辨率,这种技术就是超分辨率图像重建技术,它的主要优势是成本较低,同时能够利用现有的低分辨率成像传感器。

超分辨率图像重建技术在卫星遥感成像、医学成像、视频成像等多个领域都具有广泛的应用。例如,在卫星遥感成像中,当能够获取同一地区的多幅卫星遥感影像时(如SPOT影像、Landsat影像),就可以利用超分辨率图像重建技术提高目标图像的空间分辨率;在医学成像中,超分辨率图像重建技术可以利用多幅CT或MRI图像提高病变组织观察的清晰程度;在视频监测或观察录像中,可以采用超分辨率图像重建技术提高感兴趣目标如违章车牌或犯罪嫌疑人面部的清晰度;超分辨率图像重建技术还可以用于将NTSC号转变成HDTV信号。

图像超分辨率重建的前提是一系列对同一地区或同一目标观察的多幅低分辨率图像间存在微小的偏移,从中可以提取出新的图像信息。图像超分辨率重建的目标就是从一系列质量较差、分辨率较低的图像来重建质量更好、分辨率更高的图像。

图像超分辨率重建问题可以进行如下描述:

设 $y_k[m, n]$ 是第 k 帧采样尺寸为 $M \times N$ 的低分辨率图像,其中, $m \in \{1, 2, \dots, M\}$, $n \in \{1, 2, \dots, N\}$, $k \in \{1, 2, \dots, K\}$ 对于任一给定的增强因子 τ , 重建(复原)采样尺寸为 $\tau M \times \tau N$ 的高分辨率图像 $\hat{y}[\tau M, \tau N]$ 。

图1-1是上述定义的一个简单表示。图中显示了4帧 4×4 的低分辨率图像(分别用菱形、矩形、三角形及交叉符号进行表示)在 8×8 的高分辨率图像网格中的位置关系。超

分辨率的目标就是重建高分辨率网格中采样点的值。在考虑时间分辨率(如视频图像)超分辨率重建的情况下,图像超分辨率重建问题可以按如下更一般的方式进行描述:设 $f(x_1, x_2, t)$ 是像平面坐标系统中随时间发生改变的场,分别在时刻 $t_1 < t_2 < t_3 < \dots < t_r < \dots < t_R$ 对 $f(x_1, x_2, t)$ 的成像进行采样,得到 R 帧低分辨率采样图像 $y[m_1, m_2, r]$, 其中 $m_1 \in \{1, 2, \dots, M_1\}$, $m_2 \in \{1, 2, \dots, M_2\}$, $r \in \{1, 2, \dots, R\}$ 。超分辨率重建的目标就是对超分辨率采样网格在任一时刻 $t_s \leq \tau < \tau_3 < \dots < \tau_s < \dots \leq t_R$ 的结果进行估计,得到 S 帧重建的超分辨率图像 $\hat{f}[n_1, n_2, s]$, $n_1 \in \{1, 2, \dots, N_1\}$, $n_2 \in \{1, 2, \dots, N_2\}$, $s \in \{1, 2, \dots, S\}$ 通常取 $N_1 > M_1$, $N_2 > M_2$, r, s 是任意的常数。

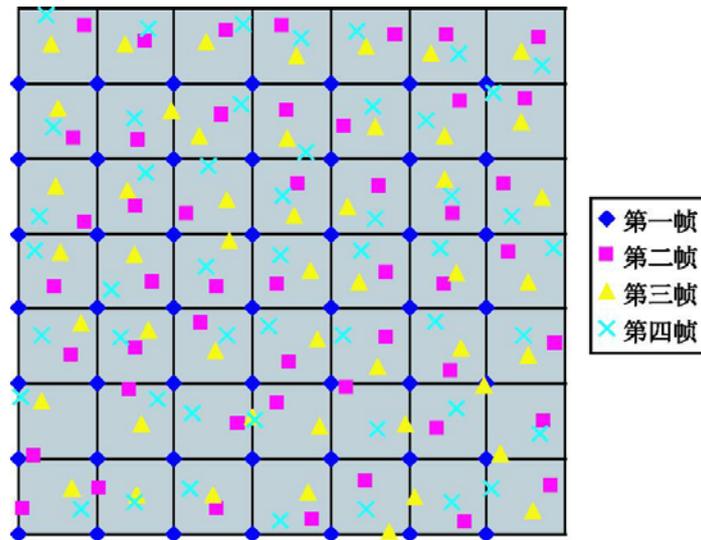


图 1-1 低分辨率图像采样点在高分辨率网格的位置关系

为了实现对未知 HR 影像的超分辨率重建,首先需要对影像获取的退化过程进行分析和建模,以建立联系理想的超分辨率图像和观测到的低分辨率图像的观测模型,假设 x 表示理想高分辨率影像,在影像的获取过程中许多因素都会导致影像质量的下降或退化,造成影像的模糊和变形,尽管在不同的成像过程中,图像的降质过程和模糊的效果并不完全相同,但一般都可以用几何变形、模糊及欠采样这三个相对独立的步骤对退化过程进行描述,此外每帧图像还受到噪声的影响(图 1-2)。根据如上分析,建立第 k 帧低分辨率图像与理想高分辨率图像的观测模型如下

$$f_k = DT_k Cx + n_k \quad (1-3-1)$$

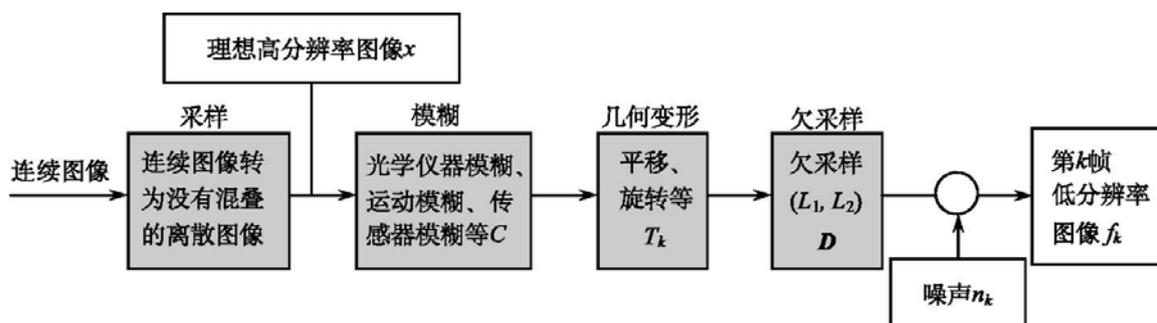


图 1-2 低分辨率图像与高分辨率图像间的观测模型

图 1-2 中 L_1 , L_2 分别代表水平方向和垂直方向的欠采样系数。公式中 D 表示欠采样矩阵, T_k 表示第 k 帧影像的几何变形, n_k 表示第 k 帧影像的噪声, 并假设其为不相关的零均值加性噪声, 乘性噪声也可以采取对数方法将其转换为加性噪声进行处理。从公式 (1-3-1) 中看出图像超分辨率重建过程实际就是图像成像过程的逆过程, T_k 表示影像间的运动变形参数, 根据某一选定的参考影像, 对 f_k 的运动参数进行估计; 欠采样矩阵 D 的逆与分辨率增强因子具有间接的关联关系, 对于单帧影像来说, 影像超分辨率重建是一个病态问题, 但 D 逆的求解可以通过适当数量的低分辨率 (LR) 影像中的额外信息将其转化为一良态问题; 模糊操作 C 可以用成像系统的点扩散函数 (point spread function, PSF) 直接进行表示, 通常情况下, 由于成像系统 PSF 的不可测性和不可预知性, 一般通过序列 LR 影像进行估计; n_k 表征了第 k 帧影像的噪声污染程度, 在图像重建过程中需要根据一定的滤波方法对其进行剔除和抑制。

现有的大多数图像超分辨率重建算法一般都包括三个步骤: 配准或运动估计、内插和复原 (图 1-3)。这三步操作可以同时进行也可以分开进行, 具体情况要取决于采用的重建算法。配准或运动估计步骤要根据某一选定的参考图像, 估计出序列 LR 图像间的子像素级精度的相对位移, 精确的估计对于超分辨重建图像的质量至关重要。因为序列 LR 图像间的相对位移是任意的, 所以配准后的高分辨率图像像点并不是位于均匀分布的规则格网上的, 需要采用不规则内插算法由一系列不均匀空间分布的低分辨率图像序列中内插获得均匀格网分布的高空间分辨率图像。最后采用图像复原算法去除内插后图像的模糊效应和噪声影响。

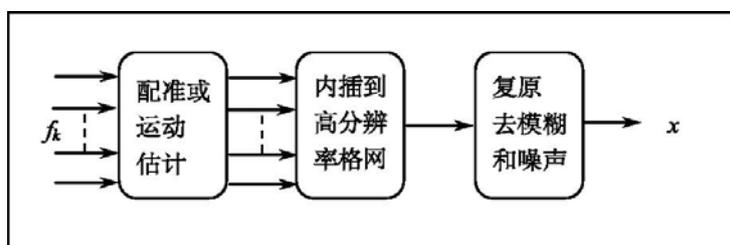


图 1-3 超分辨率图像重建步骤图

自从 Tsai 与 Huang 于 20 世纪 80 年代初首先提出了超分辨率重建的概念并给出了一种基于频域逼近的图像超分辨率重建方法以来 (Tsai et al., 1984), 超分辨率重建技术已经取得长足的发展与进步, 全部方法大致可以归结为频率域方法和空间域方法两类。

频率域方法通过在频率域消除频谱混叠而改善图像的空间分辨率。目前频率域图像重建方法主要是消混叠重建方法 (reconstruction via alias removal)。最早是由 Tsai 和 Huang 在 1984 年开始研究。在原场景信号是带宽有限的假设下, 利用离散傅里叶变换和连续傅里叶变换之间的平移、混叠性质, 给出一个由一系列欠采样观测影像数据重建 HR 影像的公式, 使得多帧观察图像经混叠的离散傅里叶变换系数与未知场景的连续傅里叶变换系数以方程组的形式联系起来, 方程组的解就是原始场景的频率域系数, 再对频率域系数进行傅里叶逆变换实现对原始场景的精确重建。该方法要求对图像间位移参数的估计达到子像素精度, 而且每一帧观察图像都必须只对方程组中的一个不相关的方程做出贡献。Tsai 和 Huang 的方法具有理论直观、计算简单的优点, 不足之处在于模型没

有考虑光学系统的点扩散函数(PSF)、运动模糊和观测噪声的影响。由于模型建立在整体平移的基础上,缺少灵活性,从而限制了频率域方法在大多数实际应用中的适用性。

Tekalp 等(1992)针对 Tsai 方法的限制,对 Tsai 的方法进行了扩展,提出了一种改进方法,该方法的模型中考虑了线性平移不变(linear shift invariant, LSI)的点扩散函数(PSF)和观测噪声的影响。Kaltenbacher 和 Hardie 于 1996 年在 Tsai 算法的基础上提出了一种估计帧间整体平移参数的解算方法,该方法在计算整体平移时与 Tsai 方法相比有重大的进步,对提高计算效率方面有很大的帮助。郝鹏威^①从分辨率较低的欠采样图像会导致相应频率域频谱混叠的理论出发,给出了多帧欠采样图像在频率域消混叠的更一般公式。后来还出现了递归最小二乘方法(Bose et al., 1993;潘明海等,1999)、递归总体最小二乘方法(Bose et al., 1993)以及基于多通道采样定理的方法(郝鹏威,1997^①; Brown,1977)。但总的说来,这些方法都只是对 Tsai 方法的改进,都存在着与 Tsai 方法中整体平移假设相似的缺点,通过频率域解混叠方法进行超分辨率重建的理论目前仍然没有取得实质意义上的重大突破。钦桂勤^②对基于频率域的解混叠方法也进行了研究,提出了分块重建和循环重建的思想,并将有偏估计用于重建理论中,提高了影像重建的效率和影像数据的利用率。

空间域方法是图像超分辨率重建中的另一类重要方法,它将复杂的运动模型与插值及滤波重采样放在一起处理,作为影像重建的全部内容,其线性空域观测模型涉及全局和局部运动、光学模糊、帧内运动模糊、空间可变点扩散函数、非理想采样、压缩影像以及其他一些内容。空间域影像超分辨率重建方法主要包括非均匀间隔样本内插(interpolation of non-uniformly spaced samples)、代数滤波后向投影(algebraic filtered backprojection)、概率论方法(probabilistic methods)、集合论方法(set theoretic methods)、混合 MAP/POCS 方法以及自适应滤波方法等。

非均匀间隔样本内插法,低分辨率观测影像序列经过配准后,形成一幅由非均匀间隔采样格网点上的样本值组成的复合影像,这些非均匀间隔样本点经过内插和重采样可形成超分辨率的采样网格。Delaunay 超分辨率重建方法,该方法比较适用于超分辨率重建过程中的快速处理。代数滤波后向投影方法是 Friden 和 Aumman 在 1987 年提出的,当时的研究并不是针对影像序列进行影像超分辨率重建,而是一个与超分辨率重建相关的、由线阵列对一固定景物进行多次一维扫描时的重建问题。Friden 和 Aumman 研究的问题和超分辨率重建仅仅在成像系统的 PSF 方面不同。Friden 和 Aumman 重建公式中假定线阵列传感器的分辨率高于光学系统的有限分辨率,成像几何能够提供给定景物区域的重叠扫描,但没有考虑观测值噪声,对高频噪声非常敏感。基于概率论的方法,就是将超分辨率复原问题解释为一个统计估计问题。因为超分辨率重建问题是一病态(ill-posed)问题,欲使病态问题转化为可解的良态(well-posed)问题,必须施加一定的先验附加条件和限制。在最近几年,本质上就包含着以先验概率密度函数为先验限制条件的 Bayesian 方法,由于其较好的重建结果已经赢得了越来越多人的重视,成为处理病态问题最有前景的(most promising)方法之一。Bayesian 方法实际上就是极大后验概率估计

① 郝鹏威. 1997. 数字图像空间分辨率改善的方法研究. 北京:中国科学院遥感应用研究所博士论文.

② 钦桂勤. 2002. 超分辨率影像重建技术的研究. 郑州:信息工程大学硕士学位论文.

(maximum a posteriori probability estimate, MAP)方法,它的含义就是在已知低分辨率影像序列的前提下,使出现高分辨率图像的后验概率达到最大。解决超分辨率重建问题的另一著名方法就是基于集合理论的凸集投影(projection onto convex sets, POCS)方法。在这种理论中,限制集定义为超分辨率解空间中可行解的限制条件(如正定性、能量有界性、观测一致性以及光滑性等),并将每一个限制条件都定义为向量空间中的凸集(convex sets),通过对这些限制集进行求交,形成超分辨率重建问题的最终解空间。此外,还有一种将统计理论与集合论有机统一在一起的混合 MAP/POCS 方法,该方法在最大后验概率方法的迭代优化过程中加入了一些先验约束,能同时考虑观察图像的随机统计特征和凸集特征。

在超分辨率技术的具体应用方面,国际著名的光学仪器制造公司 Leica/Hellawa 公司、法国国家航天研究中心(CNES)已经把有关的理论研究成果转化到硬件产品——半个像元交错 CCD 阵列传感器的设计中,并将其应用于他们的遥感设备 ADS40 和 SPOT 5 卫星,取得了相当理想的效果。以色列的 EROS-A 卫星全色影像分辨率为 1.8m,在采用“过采样”(over-sampling)技术的情况下,能够获得 0.9m 分辨率的影像,2006 年将发射的 EROS-B,预期分辨率能达到 0.85m,据称在采用“过采样”的情况下其分辨率能进一步提高到 0.5m;2001 年 8 月的 *SPACE NEWS* 报道,空间分辨率为 0.5m 的第二代 IKONOS 卫星将采用与空间分辨率为 1m 的第一代 IKONOS 卫星相同的基础平台,和一种经过改进的有可能会采用超分辨率模式来提高分辨率的相机。在国内,中国科学院西安光学仪器与精密仪器机械研究所、北京大学等也进行了这一方面的研究,并取得了一些初步的成果,但是都局限于进行模拟试验。

纵观遥感卫星的发展历程(图 1-4),可以发现,遥感卫星每经历 13 左右时间要经历一次变革性地发展,预测在 2010 后遥感卫星将步入一个新的发展阶段,“智能型”的遥感卫星将出现,多颗对地观测遥感卫星将组成强大的对地观测卫星网络,卫星的驱动方式将更加灵活,将智能地检测地球表面发生的事件,并根据情况自动调整观测区域、观测目标和观测方式,采用生物传感器、化学传感器、神经网络传感器等高级传感器的卫星系统也是未来的发展趋势之一。

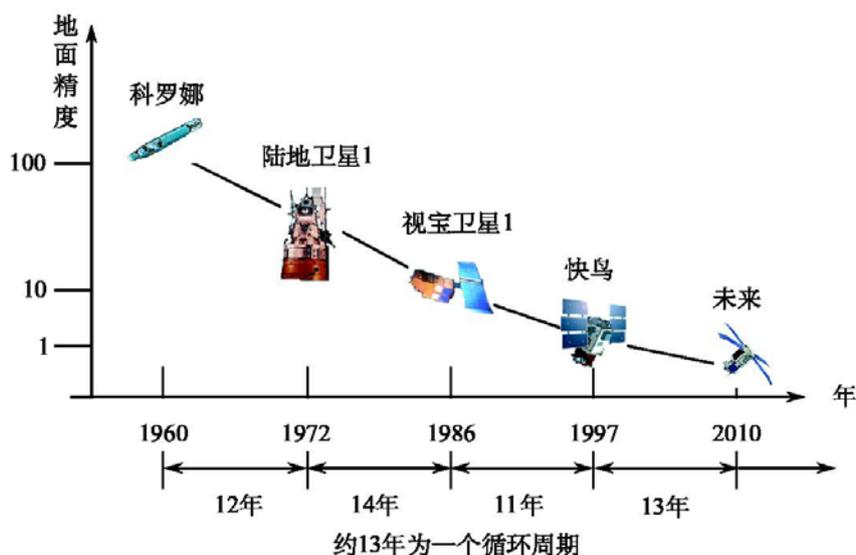


图 1-4 遥感卫星发展历史图

第二章 卫星遥感影像几何处理

在卫星遥感成像过程中,由于受到传感器结构的内部因素和传感器外方位变化、传感介质不均匀、地球曲率、地形起伏、地球旋转等外部因素的影响,卫星遥感图像必然存在一定的几何畸变。对卫星遥感图像进行几何处理获取无几何畸变的遥感图像是进行高级的图像融合处理分析操作的必要前提,是从图像中提取有用信息的先决条件。卫星遥感图像的几何处理按照处理原理分类可以分为严格几何纠正和近似几何纠正。严格几何纠正依据严格的成像模型——共线条件方程进行纠正;近似几何纠正依据简单、近似的通用成像模型(如多项式、直接线性变换、有理函数模型)进行纠正。严格几何纠正理论严密,精度较高,但计算复杂、运算量较大,而且不同类型的卫星遥感图像处理方法不同;近似几何纠正理论不如严格几何纠正严密,精度略低,但形式简单,计算量较小,并且与卫星遥感图像的成像方式无关。本章将分别介绍画幅式影像、线阵推扫式影像的严格成像模型和严格几何纠正方法,合成孔径雷达图像的严格成像模型和几何精纠正,以及多项式、直接线性变换、有理函数模型等多种通用成像模型和近似几何纠正算法。

2.1 画幅式影像的几何处理

画幅式影像是利用画幅式摄影照相机获得的像片,在摄影的瞬间,地面上视场范围内目标的辐射信息一次性地通过镜头中心后在焦平面上成像。测图用的卫星遥感画幅式摄影照相机的成像原理与普通照相机相同,但由于高空间轨道作业的特点,相机制造要求非常严格,而且必须采取特殊的措施。卫星遥感照相机一般具有较长的焦距,选用表面质量和光学均匀性极好的熔石英或高抗弯强度的玻璃制造窗口,安装自动曝光控制、自动聚焦设备以及补偿胶片变形的格网摄影装置,并要求控制飞行舱内保持合适的温度、压力和湿度。卫星遥感画幅式摄影照相机种类很多,代表性的有欧洲空间局的 RMKA30/23 摄影机,美国宇航局的 LFC、S-190A 和 S-190B 摄影机,原苏联的 KATЭ-140、KATЭ-200、KΦA-1000、MKΦ-6 和 MKΦ-6M 摄影机。

2.1.1 画幅式影像严格成像模型

画幅式影像是面中心投影影像,每景影像有唯一的一个投影中心(摄影机物镜中心 S),所摄地区地面上各点的反射光线通过投影中心到达像平面上形成影像,如图 2-1 所示,其中 $O-XYZ$ 为地面坐标系, $S-X'Y'Z'$ 为原点在摄站的摄影测量坐标系, $o-xy$ 为像平面坐标系, So 为主光轴方向。

地面点 $P(X, Y, Z)$ 和像点 $p(x, y)$ 以及投影中心 S 共线,画幅式影像的严格成像模型为

$$x = -f \frac{a_1(X - X_s) + b(Y - Y_s) + c(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \quad (2-1-1)$$

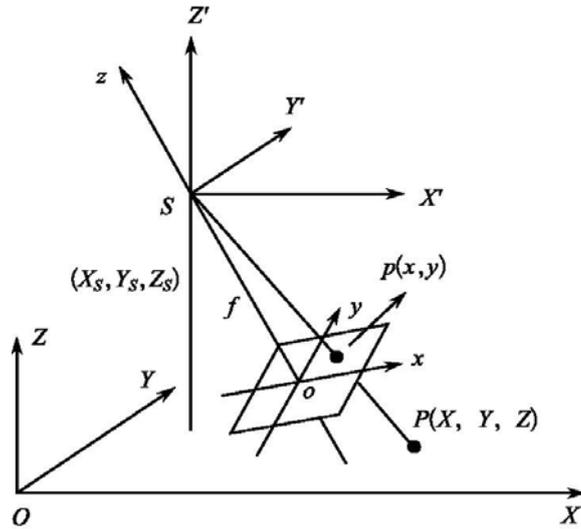


图 2-1 画幅式像片的物像关系

$$y = -f \frac{a_2(X - X_s) + b_2(Y - Y_s) + c_2(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \quad (2-1-2)$$

式中, f 为摄影像机的焦距, (x, y) 为像点 p 在 $o-xy$ 中的像平面坐标, (X, Y, Z) 是地面点 P 在地面坐标系 $O-XYZ$ 中的坐标, (X_s, Y_s, Z_s) 为摄站 S 在地面坐标系 $O-XYZ$ 中的坐标, 是画幅式影像外方位元素中的线元素, $a_i, b_i, c_i (i=1, 2, 3)$ 为 φ, ω, κ 三个外方位角元素所确定的旋转矩阵中的元素。每一景画幅式影像共有 6 个外方位元素, 采用 3 个以上分布均匀的地面控制点就可以求解影像 6 个外方位元素, 确定影像在地面坐标系中的方位。

2.1.2 画幅式影像严格几何纠正

画幅式影像的严格几何纠正建立在画幅式影像严格成像模型的基础上, 根据给定的或求解得到的外方位元素得到消除几何变形的正射影像。

画幅式影像的严格几何纠正一般包括内定向、外定向和重采样三个步骤。由于数字图像以像素为单位, 每一像元的位置由它在扫描坐标系中的坐标即它所在的行号 i 和列号 j 确定, 与以毫米为单位的像平面坐标系并不一致, 所以需要采用仿射变换式(2-1-3)完成数字影像的内定向, 确定扫描坐标系与像平面坐标系之间的对应关系。

$$\begin{cases} x = m_0 + m_1 \cdot i + m_2 \cdot j \\ y = n_0 + n_1 \cdot i + n_2 \cdot j \end{cases} \quad (2-1-3)$$

式中, $m_i, n_i (i=0, \dots, 2)$ 为内方位元素。在内定向后, 根据画幅式影像的严格成像模型进行影像的外定向, 确定每景影像的外方位元素, 即每景影像的姿态和位置。式(2-1-1)和式(2-1-2)是外定向的理论基础, 当不考虑地面控制点本身的误差和影像的内方位元素已知时, 其线性化处理后可得误差方程式, 形式如下

$$\begin{cases} C_{11} dX_s + C_{12} dY_s + C_{13} dZ_s + C_{14} d\varphi + C_{15} d\omega + C_{16} d\kappa - l_x = 0 \\ C_{21} dX_s + C_{22} dY_s + C_{23} dZ_s + C_{24} d\varphi + C_{25} d\omega + C_{26} d\kappa - l_y = 0 \end{cases} \quad (2-1-4)$$

式中, 各误差项的系数为

$$\left\{ \begin{array}{ll} C_{11} = \frac{f}{Z}; & C_{21} = 0 \\ C_{12} = 0; & C_{22} = \frac{f}{Z} \\ C_{13} = \frac{x}{Z}; & C_{23} = \frac{y}{Z} \\ C_{14} = -\left[f + \frac{x^2}{f} \right]; & C_{24} = -\frac{xy}{f} \\ C_{15} = -\frac{xy}{f}; & C_{25} = -\left[f + \frac{x^2}{f} \right] \\ C_{16} = y; & C_{26} = -x \\ lx = x_{\text{观}} - x_{\text{计}}; & ly = y_{\text{观}} - y_{\text{计}} \end{array} \right. \quad (2-1-5)$$

在式(2-1-5)中, Z 和 $x_{\text{计}}$ 、 $y_{\text{计}}$ 应参照式(2-1-6)和式(2-1-7)计算, 即

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & a & a \\ b_1 & b & b \\ c_1 & c & c \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} X - X_s \\ Y - Y_s \\ Z - Z_s \end{bmatrix} \quad (2-1-6)$$

$$\begin{cases} x_{\text{计}} = -f \frac{X}{Z} \\ y_{\text{计}} = -f \frac{Y}{Z} \end{cases} \quad (2-1-7)$$

对于每一个地面控制点, 都可以按式(2-1-4)列出两个方程式, 只要有三个以上不在一条直线上的控制点, 就可以按照最小二乘法解算出 6 个外方位元素。

内定向和外定向确定每景影像的内外方位元素后, 就可以进行几何纠正的重采样操作。重采样操作有直接法和间接法两种不同的实现方案, 直接法纠正从原始影像出发, 按式(2-1-8)确定每一个原始像点在纠正后影像上的像点坐标, 然后将原始像点的灰度值赋给纠正后的像点。间接法纠正从纠正后影像出发, 按式(2-1-9)求出每一个纠正后的像点在原始影像上的像点坐标, 然后将原始影像的灰度值赋给纠正后的像点。

$$\begin{cases} X = F_x(x, y) \\ Y = F_y(x, y) \end{cases} \quad (2-1-8)$$

$$\begin{cases} x = G_x(X, Y) \\ y = G_y(X, Y) \end{cases} \quad (2-1-9)$$

直接法方案纠正后的影像, 像元可能出现空白或重复现象, 难以获得规则排列的数字纠正影像, 所以一般采用间接法纠正方案。

间接法重采样包括以下四个计算步骤:

(1) 计算纠正后影像的地面图廓范围和影像尺寸。首先依据式(2-1-1)和式(2-2-2), 确定影像四个角点的地面坐标, 然后取四个角点地面坐标的最小矩形作为纠正后影像的地面图廓范围, 或人工任意裁定纠正后影像的地面图廓范围, 并根据纠正后影像的比例尺或地面分辨率确定待纠正影像的几何尺寸。

(2) 计算像点坐标。从待纠正影像出发,根据待纠正影像上每一像元 P 的地面坐标值,应用式(2-1-9)计算待纠正像元在原始影像上的对应像元坐标 p ;对于画幅式影像,式(2-1-9)的具体形式为式(2-1-1)和式(2-1-2)。

(3) 灰度内插和赋值。由于计算得到的像元坐标不一定位于像素中心位置,一般可采用最邻近法或双线性内插法确定像点 p 的灰度值,并赋给待纠正像元 P ,完成待纠正像元 P 的几何纠正。

(4) 依次对待纠正影像上的每个像元进行上述运算,就能获得几何纠正后的画幅式数字影像。

2.2 线阵 CCD 影像的几何处理

线阵 CCD 影像由线阵 CCD 传感器收集得到。线阵 CCD 传感器由收集器、分光器、探测器、处理器和输出器等部分组成,收集器采用透镜系统,探测器由多个 CCD(charge coupled device)电荷耦合器件组成,成一维线状排列。线阵 CCD 传感器成像时,地面上扫描线对应的辐射信息经光学系统收集,聚集在 CCD 线阵列元件上(若要取得多光谱图像要先经过分光器),CCD 的输出端以一维时序视频信号输出,在瞬间能同时得到垂直于航线的一条影像线。随着平台的向前移动,以“推扫”的方式获取沿轨道的连续影像条带。代表性的线阵 CCD 传感器有法国的 SPOT 系列卫星上搭载的 HRV 和 HRS 传感器,印度的 IRS-1C 资源卫星的单线阵推扫式传感器,德国与俄罗斯的 MOMS-2P 上搭载的三线阵推扫式扫描仪,美国的 Space Imaging 公司发射的 IKONOS 卫星搭载的传感器。

线阵 CCD 传感器按结构和摄影测量原理可分为三种:单线阵 CCD 传感器,由焦平面上的一条线阵 CCD 推扫成像获取,例如法国 SPOT 卫星上的 HRV 相机和美国的 Eye-glass 相机;双线阵 CCD 传感器,由航天飞行器内两条具有一定交会角的线阵 CCD 推扫构成,例如美国提出的 MAPSAT 和 STEREOSAT 传感器;三线阵 CCD 传感器,由具有一定交会角的前视、下视和后视线阵 CCD 构成,例如德国的 MOMS-01、MOMS-02、MOMS-2P。

线阵 CCD 影像具有以下优点:①几何关系稳定,由于传感器采用了 CCD 电荷耦合器件没有复杂的机械装置,所以图像与地面可以保持稳定的几何关系而且分辨率较高,可以满足中小比例尺的地形图测制和修测;②覆盖区域广,现时性强,更新速度快,搭载线阵列推扫式传感器的卫星运行周期一般为十几天或二十几天,并且进行实时传输,利用线阵列推扫式影像可以进行全球范围内的长期观察和实时监测;③具有立体观测能力,线阵列推扫式影像可以构成立体像对,以测绘等高线或生成 DEM,也可以进行空中三角测量,如 SPOT-1, SPOT-2, SPOT-3, SPOT-4 系列卫星具有异轨立体观测能力; SPOT-5 和 MOMS-2P 具有同轨立体观测能力。

线阵 CCD 影像的优越特性使它得到了广泛的应用,但它独特的成像方式要求必须采用特殊的几何处理方法,下面将重点研究线阵 CCD 影像的严格成像模型和几何处理方法。

2.2.1 线阵 CCD 影像严格成像模型

线阵 CCD 影像是由线性阵列传感器沿飞行方向推扫而成的,可获得长条连续的航带