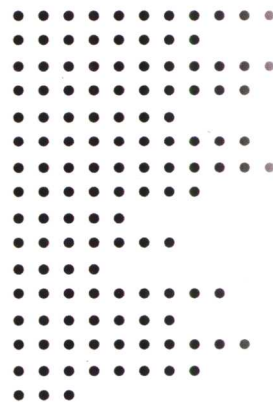




徐 青 张 艳 耿则勋
邢 帅 谭 兵 编著



遥感影像融合 与分辨率增强技术



 科学出版社
www.sciencep.com

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 978-7-03-017738-4

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>

源海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

*

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、空间技术等高新技术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术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 $82^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 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 $0.505\sim 0.750\mu\text{m}$ (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: $0.5\sim 0.6\mu\text{m}$ (绿)、 $0.6\sim 0.7\mu\text{m}$ (红)、 $0.7\sim 0.8\mu\text{m}$ (近红外) 和 $0.8\sim 0.11\mu\text{m}$ (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 $185\text{km} \times 175\text{km}$ 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 $0.50\sim 0.90\mu\text{m}$ 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。Resurs-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。Resurs-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,Resurs-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×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)和海面温度传感器(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,期间还出现了对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 WorldView 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计(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 10~15 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