

航天高分辨率数据几何处理丛书

Space Photogrammetry

航天摄影测量

秦绪文
张过
著



测绘出版社

航天高分辨率数据几何处理丛书

航天摄影测量

Space Photogrammetry

秦绪文 张过 著

测绘出版社

© 秦绪文 张过 2013

所有权利(含信息网络传播权)保留,未经许可,不得以任何方式使用。

内 容 简 介

本书主要介绍了航天摄影测量的最新理论和方法,包括星载传感器严密成像几何模型、有理函数模型、光学卫星影像在轨检校、单片几何纠正、单片外推纠正、区域网平差等。重点介绍了构建单线阵推扫式卫星遥感影像严密成像几何模型和星载合成孔径雷达(SAR)的严密成像几何模型、轨道参数外推实用模型、基于有限元理论的拓展有理多项式系数(RPC)通用成像几何模型的理论和方法,并在此基础上开展了卫星遥感影像在轨检校、单片几何纠正、单片外推纠正和区域网平差等航天摄影测量应用。

本书可作为遥感和测绘工程专业的教材,也可供其他相关专业的师生、工程技术人员和研究人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

航天摄影测量/秦绪文,张过著. —北京:测绘出版社,2013.4

ISBN 978-7-5030-2574-7

I. ①航… II. ①秦… ②张… III. ①航天摄影测量—研究 IV. ①P236

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 073512 号

责任编辑	李 莹	封面设计	李 伟	责任校对	董玉珍
出版发行	测绘出版社	电 话	010—83060872(发行部)		
地 址	北京市西城区三里河路 50 号		010—68531609(门市部)		
邮政编码	100045		010—68531160(编辑部)		
电子信箱	smp@sinomaps.com	网 址	www.chinasmp.com		
印 刷	中煤地西安地图制印有限公司	经 销	新华书店		
成品规格	184mm×260mm				
印 张	8.75	字 数	200 千字		
版 次	2013 年 4 月第 1 版	印 次	2013 年 4 月第 1 次印刷		
印 数	0001—1000	定 价	58.00 元		

书 号 ISBN 978-7-5030-2574-7/P·580

本书如有印装质量问题,请与我社门市部联系调换。

前 言

航天摄影测量是人类获取地球空间信息的重要手段之一,随着航天遥感技术的快速发展,航天摄影测量在经济社会发展和国防建设中发挥着越来越重要的作用。

航天摄影测量从 20 世纪 60 年代初期开始研究,70 年代伴随空间技术和测绘仪器的发展而不断进步,其方案日趋成熟,80 年代趋于实用,90 年代进入提高的新阶段。我国航天摄影测量研究起步比较晚,目前虽然在多个领域开展了一些相关研究,取得了一些重要进展和成果,但大都处于研究、探索阶段,尤其是还没有建立起一套相对成熟的理论体系和技术方法。针对这一现状,本书基于深入研究,建立了一种包含线阵推扫式光学和合成孔径雷达卫星(SAR)遥感影像在内的通用成像几何模型,实现了统一成像几何模型的多源卫星遥感影像的航天摄影测量,为有效利用多源遥感影像数据空间信息奠定了基础,为资源与环境调查、基础测绘、国土管理、国防安全、应急事件快速处置等提供了支撑。

本书共分 7 章,内容主要包括航天影像数据获取平台和传感器简介、星载传感器严密成像几何模型、有理函数模型、光学卫星影像在轨检校、单片几何纠正、单片外推纠正、区域网平差等。重点介绍了构建单线阵推扫式卫星遥感影像严密成像几何模型和星载 SAR 的严密成像几何模型、轨道参数外推实用模型、基于有限元理论的拓展 RPC 通用成像几何模型的理论和方法,在此基础上开展了卫星遥感影像在轨检校、单片几何纠正、单片外推纠正和区域网平差等航天摄影测量应用。相关的研究成果已得到工程实践的检验并在实际生产中得到应用。本书是在秦绪文、张过博士论文的基础上补充了最新的研究成果而形成的,在成书过程中得到李德仁院士、陈建平教授,特别是孙家柄教授的指导和帮助,孙家柄教授最后审阅了全书,在此一并致以诚挚的谢意。

由于作者水平所限,书中可能存在不足与不妥之处,敬请读者不吝指正。

目 录

第 1 章 航天影像数据获取平台和传感器	1
§ 1.1 绪论	1
§ 1.2 国外遥感卫星简介	2
§ 1.3 国内遥感卫星简介	22
第 2 章 星载传感器严密成像几何模型	26
§ 2.1 成像几何关系	26
§ 2.2 严密成像几何模型	27
§ 2.3 严密成像几何模型的正反变换	37
§ 2.4 严密成像几何模型实验验证	45
第 3 章 RPC 模型	51
§ 3.1 RPC 模型概述	51
§ 3.2 最小二乘法求解 RPC 模型	55
§ 3.3 无偏估计法求解 RPC 参数	58
§ 3.4 RPC 模型参数的求解实验	59
§ 3.5 拓展 RPC 模型	68
§ 3.6 拓展 RPC 模型参数的求解实验	72
§ 3.7 RPC 模型的正反算	73
§ 3.8 基于拓展 RPC 模型的正反变换	74
§ 3.9 RPC 模型的综述	75
第 4 章 光学卫星影像在轨检校	77
§ 4.1 国内外卫星几何检校现状	77
§ 4.2 高精度几何定标的严密成像几何模型	79
§ 4.3 内方位元素标定算法	81
§ 4.4 相机和卫星平台之间关系参数定标算法	83
§ 4.5 内方位元素稳定性分析	84
§ 4.6 相机和卫星平台之间稳定性分析	86
§ 4.7 轨道和姿态稳定性分析	86
§ 4.8 检校场需求分析	87
§ 4.9 “资源二号”影像检校实验	89
§ 4.10 “资源一号”02B 星的检校实验	91

第 5 章 单片几何纠正	96
§ 5.1 一般影像几何纠正过程	96
§ 5.2 基于 RPC 模型的几何纠正	96
§ 5.3 基于 RPC 模型的遥感影像几何纠正实验	99
§ 5.4 基于拓展 RPC 模型的遥感影像几何纠正	105
第 6 章 单片外推纠正	108
§ 6.1 遥感卫星轨道参数外推模型	108
§ 6.2 传感器姿态精化模型	111
§ 6.3 扫描侧视角修正模型	111
§ 6.4 外推对地目标定位的理论精度	112
§ 6.5 外推对地目标定位实验	113
第 7 章 区域网平差	117
§ 7.1 区域网平差概述	117
§ 7.2 无地面控制点的卫星遥感影像区域网平差数学模型	118
§ 7.3 基于拓展 RPC 模型的空间前方交会	119
§ 7.4 区域网平差实验	120
参考文献	129

第 1 章 航天影像数据获取平台和传感器

§ 1.1 绪 论

1957 年苏联将全球首颗人造地球卫星成功送入预定轨道,开创了空间科学研究和技术应用的新局面。虽然人造地球卫星上天迄今仅有短短 50 余年的时间,但它已经在空间检测、资源调查、通信、导航、气象、测绘和军事侦察等领域获得了广泛的应用。

从广义上讲,遥感卫星包括照相侦察卫星、气象卫星、地球资源卫星和海洋卫星;从狭义上讲,主要指的是地球资源卫星。本书所要叙述的遥感卫星是狭义概念上的遥感卫星。由于卫星遥感获得资料迅速,成本相对较低,并且不受区域限制,可以自由地获得境外军事目标的信息,具有巨大的应用潜力,因此从首颗卫星发射之日起,人们就意识到卫星遥感的重要性,开始了对航天遥感应用技术的研究工作。

20 世纪 70 年代初,美国成功发射了世界上第一颗真正的地球观测卫星——陆地卫星 Landsat 1,其多光谱扫描仪的空间分辨率达到 80 m。利用 Landsat 影像,美国编制了全国 1:100 万的影像图,这样不仅显著地降低了生产成本,更大大提高了作业效率。1986 年 2 月法国 SPOT 卫星成功发射,其高分辨率可见光传感器(high resolution visible,HRV)的地面分辨率达到 10 m,并能通过侧视观测在相邻轨道间构成异轨立体,其良好的基高比很适合立体测图,对卫星影像的测绘应用产生了重大影响。在 1991 年开始的海湾战争中,以美军为首的多国部队采用 SPOT 影像,不仅修测了大量军事地形图,而且还为多国部队空袭目标的定位和空袭效果的评估做出了重要贡献,推动了航天影像测图技术走向实用。

20 世纪 90 年代,随着“冷战”的结束,俄罗斯将苏联解体前从空间拍摄的高分辨率影像以低廉的价格出售给其他国家,为国际遥感图像市场提供了新的选择。随后,美国政府于 1994 年取消了对 1~10 m 级分辨率卫星遥感影像数据的商业销售禁令,从而揭开了发展高分辨率商业遥感卫星的序幕。在不太长的时间里,美国国内便有 4 家公司提出 5 套高分辨率卫星遥感系统方案并获得发射许可。其中,数字地球(DigitalGlobe)公司即原地球观测(Earth Watch)公司,提出了 EarlyBird 卫星系统和 QuickBird 卫星系统;GDE 公司提出了 GDE 卫星系统;轨道成像(OrbImage)公司提出了 OrbView 卫星系统;空间成像(Space Imaging)公司提出 IKONOS 卫星系统。随后,以色列的 EROS-2 和法国的 SPOT 5 等高分辨率遥感卫星系统也相继面世。

中巴地球资源卫星(China-Brazil earth resource satellite,CBERS)是 1988 年由中国和巴西两国政府联合议定书批准,在中国“资源一号”卫星原方案基础上,由中、巴两国共同投资、联合研制的卫星,并规定该卫星投入运行后,由中、巴两国共同使用。CBERS 1-01 于 1999 年升空,是我国第一代传输型地球资源卫星,星上 3 种遥感相机可昼夜观测地球,利用高码速率数据传输系统将获取的数据传输回地面接收站,经加工、处理成各种所需的

图片,供各类用户使用。CBERS 1-02 是 CBERS 1-01 的接替星,于 2003 年 10 月 21 日在太原卫星发射中心发射升空,并经在轨测试后于 2004 年 2 月 12 日投入应用运行,其功能、组成、平台、有效载荷和性能指标的标称参数等与 CBERS 1-01 相同。目前,CBERS 1-02 仍在轨道上正常运行,其数据在网上免费分发,用户可以申请使用。

中国“资源二号”(CBERS 2)卫星是传输型遥感卫星,主要用于国土资源勘查、环境监测与保护、城市规划、农作物估产、防灾减灾和空间科学实验等领域。CBERS 2-01 和 CBERS 2-02 分别于 2000 年 9 月 1 日和 2002 年 10 月 27 日发射升空,至今仍在轨正常运行,已发回了大量数据。而 CBERS 2-03 也于 2004 年 11 月 6 日上午在太原卫星发射中心发射升空,其总体性能和技术水平对比前两颗有所改进和提高,已经将全中国扫描了 4 遍,存档数据非常全,可以满足不同用户的需求。CBERS 2 可利用数字式方式向地面传送对地观测数据,其三轴稳定平台的精度达到我国的最高水平,再经过电荷耦合器件(charge-coupled device, CCD)摄像机进行改进,分辨率完全可以达到 3 m。而且不同于其他卫星的是,CBERS 2 的运行轨道可以随时调整,使得其数据的每一个点的分辨率都能达到 3 m,而其他一些卫星的数据不能保证每一个点都具有星下点的较高分辨率。另外,CBERS 2 还具有轨道机动能力,利用 CCD 摄像机所具有的 $\pm 32^\circ$ 侧摆角和定标功能,可使卫星连续 3 天对重点关注地物进行重复观测。

在合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)卫星项目方面,比较有代表性的有 20 世纪 90 年代欧洲空间局的 ERS-1(1991 年发射)、ERS-2(1995 年发射)星对以及 2000 年美国的航天飞机雷达地形测绘任务(shuttle radar topography mission, SRTM)。目前,除了 ERS-1 和 ERS-2 外,星载合成孔径雷达干涉测量技术(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)的可用数据源还包括日本的 JERS-1(1992 年发射)、美国的 SIR-C/X-SAR(1994 年发射)、加拿大的 Radarsat-1(1995 年发射)等。这些 SAR 卫星几乎都属于以美、德为首的欧美国家,而这些国家正借助这一优势进一步大力发展星载 InSAR 技术。

§ 1.2 国外遥感卫星简介

无论从数量上还是从应用的需求上,光学遥感卫星数据一直占据着遥感卫星数据的主体地位,各国发射的大多数遥感卫星携带的都是光学传感器。国外常用的遥感卫星包括美国的 Landsat 卫星和 IKONOS 卫星、法国的 SPOT 卫星、印度的 IRS-1C 卫星等,下面对这些遥感卫星分别加以介绍。

1.2.1 北美洲遥感卫星

1. 美国遥感卫星

美国是最早发射遥感卫星的国家,也是目前遥感卫星系列最多、实力最强的国家。

在陆地卫星方面,美国最具代表的是 Landsat 系列卫星,从 1972 年发射 Landsat 1 以来,这一系列卫星共发射了 7 颗。其中,Landsat 5 目前仍正常运行,至今已经连续对地观测近 30 年。为保证 Landsat 数据的连续性,美国还计划于 2013 年执行陆地卫星数据连续任务(landsat data continuity mission, LDCM)。

美国也很重视高分辨率商业遥感卫星的发展,其代表是 IKONOS、QuickBird 系列卫星。IKONOS 全色影像分辨率是 1 m,多光谱影像分辨率是 4 m,刈幅宽度是 11 km,利用侧摆功能可以获得 2.9 天的重访周期,具有 11 bit 的量化分层。QuickBird-2 的全色影像分辨率是 0.61 m,多光谱影像分辨率是 2.44 m,刈幅宽度是 16.5 km,也具有 11 bit 的量化分层。2008 年 9 月 6 日,美国地球之眼(GeoEye)公司发射了目前世界上最高空间分辨率和定位精度的商业卫星 GeoEye-1,该卫星采用太阳同步轨道,高度 684 km,全色影像分辨率是 0.41 m、多光谱影像分辨率是 1.65 m,其几何定位精度在没有控制点条件下达到了 3 m。

美国卫星测绘的研究始于 1962 年,经历了返回式测绘卫星到传输式测绘卫星的发展过程。1990 年发射的 KH-12 侦察卫星地面分辨率均达到了 0.1 m,通过侧摆实现了立体测绘功能。进入 21 世纪以来,美国发射了多颗高分辨率商业卫星,大都具有立体测图能力,如具有目前世界上最高空间分辨率和定位精度的 GeoEye-1。1995 年 11 月和 1997 年 8 月,美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)利用火星观测激光高度计(Mars observer laser altimeter, MOLA)和航天飞机有效载荷计划中的标准化激光高度计(shuttle laser altimeter, SLA)进行了两次航天飞机搭载激光高度计实验。另外,2003 年发射的地球科学激光测高系统(geoscience laser altimeter system, GLAS)也为相关实验提供了基础测绘数据。

1) Landsat

Landsat 是美国陆地观测卫星系统。第一颗陆地卫星于 1972 年 7 月 23 日发射,是世界上第一个真正的地球观测卫星,原名叫做地球资源技术卫星(earth resource technology satellite, ERTS),1975 年更名为陆地卫星(Landsat)。Landsat 卫星共发射了 7 颗,但第 6 颗卫星发射失败,现在运行的是 Landsat 5 和 Landsat 7。

Landsat 7 卫星于 1999 年发射,装备有增强型专题测图仪(enhanced thematic mapper plus, ETM+)设备,ETM+被动感应地表反射的太阳辐射和散发的热辐射,有 8 个波段的感应器,覆盖了从红外到可见光的不同波长范围。ETM+比起在 Landsat 4、Landsat 5 上面装备的专题测图仪(thematic mapper, TM),在红外波段的分辨率更高,因此有更高的准确性。

Landsat 7 部分总体数据如下。

- (1)拥有 7 个光谱波段和 1 个全色波段。
- (2)观察宽度达 185 km。
- (3)具有 15 m、30 m、60 m、80 m 的精度。
- (4)具有离地 705 km 的太阳同步轨道。
- (5)运行周期 16 天。
- (6)覆盖范围在南纬 81°至北纬 81°之间。

ETM+的波段范围如下。

- (1)0.45~0.52 μm 蓝绿波段:用于水体穿透,土壤植被分辨,分辨率为 30 m。
- (2)0.52~0.60 μm 绿色波段:用于植被分辨,分辨率为 30 m。

(3)0.63~0.69 μm 红色波段:处于叶绿素吸收区域,观测道路、裸露土壤和植被种类的效果很好,分辨率为 30 m。

(4)0.76~0.90 μm 近红外波段:用于估算生物数量,尽管这个波段可以从植被中区分出水体,分辨潮湿土壤,但是对于道路辨认效果不如 0.63~0.69 μm 的红色波段,分辨率为30 m。

(5)1.55~1.75 μm 中红外波段:被认为是所有波段中最佳的一个,用于分辨道路、裸露土壤和水,该波段在不同植被之间具有较好的对比度,并且穿透大气、云雾的能力较强,分辨率为 30 m。

(6)10.5~12.5 μm 热红外波段:感应发出热辐射的目标,分辨率为 60 m。

(7)2.08~2.35 μm 中红外波段:对于岩石和矿物的分辨很有用,也可用于辨识植被覆盖和湿润土壤,分辨率为 30 m。

(8)0.52~0.90 μm 全色波段:ETM+增加的波段(TM 没有),得到的是黑白图像,用于增强分辨率,提高分辨能力,分辨率为 15 m。

2)QuickBird

QuickBird 是美国 DigitalGlobe 公司于 2001 年 10 月 18 日发射成功的高分辨率商业遥感卫星。QuickBird 是目前世界上商业卫星中分辨率较好、性能较优的一颗卫星,其全色波段分辨率为 0.61 m,彩色多光谱波段分辨率为 2.44 m,幅宽 16.5 km。QuickBird 卫星具体参数如表 1-1 所示。

表 1-1 QuickBird 卫星参数

成像方式			推扫式成像
成像波段	全色波段		450~900 nm
	多光谱波段	蓝波段	450~520 nm
		绿波段	520~600 nm
		红波段	630~690 nm
		近红外波段	760~900 nm
分辨率(星下点)	全色波段		0.61 m
	多光谱波段		2.44 m
视角			分为航向和旁向两个方向,均为±25°
轨道类型			太阳同步轨道
轨道高度			450 km
轨道倾角			98°
重访周期			最短为 3 d
辐照宽度			以星下点轨迹为中心,左右各 272 km
每景幅宽			16.5 km×16.5 km

3)IKONOS

1999 年 9 月 24 日,美国空间成像(Space Imaging)公司率先将 IKONOS 卫星送入预定轨道并成功接收卫星影像,这是高分辨率卫星遥感影像商业化的一个里程碑。

IKONOS 卫星采用线阵列电荷耦合器件(CCD)探测器,最高能获取空间分辨率为 0.82 m 的全色影像。IKONOS 卫星的传感器系统包括一个 1 m 分辨率的全色传感器和一个 4 m 分辨率的多光谱传感器。其中,全色传感器由 13 816 个 CCD 单元以线阵列排列,CCD 单元的物理尺寸为 12 μm×12 μm;多光谱传感器分 4 个波段,每个波段由 3 454 个 CCD 单元组成。传感器光学系统的等效焦距为 10 m,视场角(field of view,FOV)为

0.931°。因此,当卫星在 681 km 的高度飞行时,其星下点的地面分辨率在全色波段最高可达 0.82 m,多光谱可达 3.28 m,扫描宽度约为 11 km;当传感器倾斜 26°时,平均地面分辨率降为 1 m 左右,此时扫描宽度约为 13 km。IKONOS 的多光谱波段与 Landsat TM 的 1~4 波段大体相同,并且全部波段都具有 11 bit 的动态范围,从而使其影像包含更丰富的信息。此外,IKONOS 卫星传感器还采用了灵活的机械设计,可以获取无明显时间差的同轨立体影像。IKONOS 卫星具体参数如表 1-2 所示。

表 1-2 IKONOS 卫星参数

成像波段	全色波段		0.45~0.90 μm
	多光谱波段	波段 1(蓝色)	0.45~0.53 μm
		波段 2(绿色)	0.52~0.61 μm
		波段 3(红色)	0.64~0.72 μm
		波段 4(近红外)	0.77~0.88 μm
制图精度	无地面控制点		12 m(水平精度);10 m(垂直精度)
	有地面控制点		2 m(水平精度);3 m(垂直精度)
重量			817 kg
轨道类型			太阳同步轨道
轨道高度			681 km
轨道倾角			98.1°
轨道周期			98 min
速度			6.5~11.2 km/s
影像采集时间			每天上午 10:30
重访周期			2.9 d(1 m 分辨率);15 d(5 m 分辨率)

4) GeoEye-1

世界上规模最大的商业卫星遥感公司——美国地球之眼(GeoEye)公司于 2008 年 9 月 6 日成功发射了 GeoEye-1 卫星。该卫星具有以下特点。

(1)真正的半米卫星:全色影像分辨率为 0.41 m,多光谱影像分辨率为 1.65 m,定位精度达到 3 m。

(2)大规模测图能力:每天采集近 $7 \times 10^5 \text{ km}^2$ 的全色影像数据或近 $3.5 \times 10^5 \text{ km}^2$ 的全色融合影像数据。

(3)重访周期短:3 天(或更短时间)内重访地球任一点进行观测。

GeoEye-1 卫星具体参数如表 1-3 所示。

表 1-3 GeoEye-1 卫星参数

成像波段	全色波段		450~800 nm
	多光谱波段	蓝波段	450~510 nm
		绿波段	510~580 nm
		红波段	655~690 nm
		近红外波段	780~920 nm
分辨率	全色波段		0.41 m(星下点);0.5 m(侧视 28°)
	多光谱波段		1.65 m(星下点)
幅宽	星下点幅宽为 15.2 km,单景覆盖面积为 225 km^2 (15 km $\times$ 15 km)		

续表

成像角度	可任意角度成像
轨道类型	太阳同步轨道
轨道高度	684 km
轨道速度	约 7.5 km/s
轨道倾角	98°
轨道周期	98 min
重访周期	2~3 d
过境时间	10:30 am

5) WorldView

2007年9月18日,波音公司利用 Delta-2 火箭成功发射数字地球(DigitalGlobe)公司的 WorldView-1 卫星。作为新一代地球图像卫星,WorldView-1 的拍摄效果能精确到 45 cm 左右,该卫星预计工作时间为 7 年。继 WorldView-1 之后,数字地球公司于 2009 年秋季又发射了 WorldView-2 卫星。WorldView-2 卫星设计使用寿命为 7.25 年,飞行高度 770 km,可以为全球带来更快捷、更精确、更大容量、更多波段扫描能力的商业卫星服务。WorldView-2 卫星具有以下特点。

(1)更灵活的运转。WorldView-1 和 WorldView-2 卫星是全球第一批使用了控制力矩陀螺 CMGs 的商业卫星。这项高性能技术可以提供多达 10 倍以上加速度的姿态控制操作,从而可以更精确地瞄准和扫描目标。WorldView 卫星的旋转速度可从 60 s 减少至 9 s,覆盖面积达 300 km²。所以,WorldView-2 卫星能够更快速、更准确地从一个目标转向另一个目标,同时也能进行多个目标地点的拍摄。

(2)更高容量、更快回访。WorldView-2 卫星运转非常灵活,它在太空中的角色就像一支神奇的画笔,能灵活地前后扫描、拍摄大面积的区域,还可以在单次操作中完成多频谱影像的扫描。WorldView-2 卫星独有的大容量系统,能达到每日 1×10^6 km² 的数据采集量,而卫星集群则可以保证每日近 2×10^6 km² 的数据采集量。WorldView-2 卫星无与伦比的灵活性能在 1.1 天内两次访问同一地点。如果算上卫星集群,甚至能实现在一天之内两次访问同一地点,由此可以为用户提供同一地点同一天内的高清晰商业卫星集群影像。

(3)更精确的拍摄。WorldView-2 卫星先进的地理位置技术,使其在扫描精确度上有了非常大的进步。在没有经过处理,没有地面控制,也没有高程模型的情况下,WorldView-2 卫星的数据精确度已经达到了 6.5 m(CE90^①)。目前,就 WorldView-1 和 WorldView-2 卫星而言,精确度可以达到 4.1 m(CE90)。

(4)多波段、高清晰影像。WorldView-2 卫星能提供独有的 8 波段高清晰商业卫星影像。除了 4 个常见的波段外(蓝色波段:450~510 nm;绿色波段:510~580 nm;红色波段:630~690 nm;近红外波段 NIR 1:770~895 nm),WorldView-2 卫星还能提供以下新彩色波段的分析。

——400~450 nm 海岸波段:该波段支持植物鉴定和分析,也支持基于叶绿素和渗水的规格参数表的深海探测研究,由于该波段经常受到大气散射的影响,已经应用于大气纠正领域。

——585~625 nm 黄色波段:该波段过去经常被认为是“yellow-ness”的特征指标,是

① 即 circular error of 90%,表示一定置信水平下的定位误差。

重要的植物应用波段;该波段用于辅助纠正真色度,以符合人类视觉的欣赏习惯。

——705~745 nm 红色边缘波段:该波段可以直接反映出植物健康状况有关信息,主要用于辅助分析有关植物生长的情况。

——860~1 040 nm 近红外波段 NIR 2:该波段部分重叠在 NIR 1 上,但较少受到大气层的影响;该波段支持植物分析和单位面积内生物数量的研究。

6) SRTM

SRTM 的全称是 Shuttle Radar Topography Mission,即航天飞机雷达地形测绘任务。SRTM 数据主要是由美国国家航空航天局(NASA)和美国影像制图局(National Image Mapping Agency, NIMA)联合测量的雷达影像数据。

2000年2月11日,美国“奋进”号航天飞机成功发射升空,上面搭载的 SRTM 系统共计进行了 222 h 23 min 的数据采集工作,获取了北纬 60°至南纬 56°、东经 180°至西经 180°之间面积超过 $1.19 \times 10^8 \text{ km}^2$ 的所有区域的雷达影像,覆盖全球陆地表面的 80%以上,数据量达 9.8 万亿字节,所获取的雷达影像数据经两年多的处理制成了数字地形高程模型,该计划共耗资 3.64 亿美元。SRTM 测量数据覆盖中国全境。

SRTM 数据对每个经纬度方格提供一个文件,精度有 1"和 3"两种,称作 SRTM1 和 SRTM3,或者称作 30 m 和 90 m 数据,SRTM1 的文件里面包含 $3\,601 \times 3\,601$ 个采样点的高度数据,SRTM3 的文件里面包含 $1\,201 \times 1\,201$ 个采样点的高度数据。目前能够免费获取中国境内的 SRTM3 文件(90 m 数据),每个 90 m 的数据点是由 9 个 30 m 的数据点算术平均得来的。

7) Seasat

海洋卫星 Seasat 卫星属于美国地球资源卫星系列,是世界上第一颗专门用于海洋观测实验的卫星,于 1978 年 6 月发射。Seasat 卫星的主要任务是鉴定利用微波遥感器从空间观测海洋及其有关海洋动力学现象的有效性。

Seasat 卫星上有以下 5 种主要传感器。

(1) L 波段合成孔径雷达(SAR):它是第一台空间对地遥感的成像雷达,观测带宽为 100 km,分辨率为 50 m,可在各种天气条件下观测海水特征、海冰漂移、水陆界面、海水波浪,确定鱼群和测绘海流图;雷达成像的数据速率高达 15~24 Mb/s,在地面接收站视界内遥控卫星进行直接的实时传输。

(2) 雷达高度计(ALT):它测量卫星到星下点海面的距离,为测量海洋水准面提供数据;雷达高度计还测量海面的粗糙度,以便获得 1~20 m 高度范围内的波浪数据,误差为浪高的 10%。

(3) 微波散射计系统(SASS):它是主动式的微波遥感器,用来估测海面风的大小和方向;测定风速误差为 $\pm 2 \text{ m/s}$ 或风速值的 10%,测定风向的误差为 $\pm 20^\circ$ 。

(4) 扫描式多信道微波辐射计(SMMR):能测定海面温度、海水分布和海面风(测至小于 5 m/s 风速)。

(5) 可见光和红外扫描辐射计(VIR):用以辅助微波遥感器,提供海洋、海岸、大气的可见光和热红外图像,有助于识别云层、海流、海冰、暴风雨和岛屿等。

2. 加拿大遥感卫星

1) Radarsat-1

Radarsat-1 卫星是加拿大与美、英等国合作研制的第一颗地球观测卫星,是到目前为

止世界上最先进的 SAR 卫星,于 1995 年 11 月发射,1996 年 4 月正式工作。Radarsat-1 卫星重量超过 3 000 kg,设计寿命 5 年;卫星轨道为太阳同步轨道,轨道高度为 790 km,轨道倾角为 98.6°;重访周期为 24 天,但通过控制成像幅宽,可每天覆盖北极地区(北纬 73°以北),3 天可以覆盖整个加拿大。该卫星载有 C 波段(5.6 cm 波长)SAR,有 7 种工作模式及多种波束、入射角可调(详见表 1-4),最高分辨率(精细模式)可达 8 m,能满足海情监测、灾情观测、植被填图等多领域遥感应用的需要。

表 1-4 Radarsat-1 工作模式参数

工作模式	波束位置	入射角/(°)	标称分辨率/m	标称景大小/ (km×km)
精细	F1~F5 (5 个波束位置)	37~48	10	50×50
标准	S1~S7 (7 个波束位置)	20~49	30	100×100
宽	W1~W3 (3 个波束位置)	20~45	30	150×150
窄幅 scanSAR	SN1	20~40	50	300×300
	SN2	31~46	50	300×300
宽幅 scanSAR	SW1	20~49	100	500×500
超高入射角	H1~H6 (6 个波束位置)	49~59	25	75×75
超低入射角	L1	10~23	35	170×170

2)Radarsat-2

Radarsat-2 是一颗搭载 C 波段传感器的高分辨率商用雷达卫星,由加拿大空间局与麦克唐纳·迪特维利联合有限公司(MacDonald Dettwiler and Associates Ltd,MDA)合作,于 2007 年 12 月 14 日发射升空。该卫星设计寿命 7 年而预计使用寿命可达 12 年。

Radarsat-2 卫星具有 3 m 高分辨率成像能力,多种极化方式使用户选择更为灵活,其可根据指令进行左右视切换获取图像,从而缩短了卫星的重访周期,增加了立体数据的获取能力。另外,该卫星具有强大的数据存储功能和高精度的姿态测量及控制能力。Radarsat-2 卫星参数和工作模式如表 1-5 和表 1-6 所示。

表 1-5 Radarsat-2 卫星参数

轨道类型	太阳同步轨道
轨道高度	798 km(赤道上空)
轨道周期	100.7 min
日轨道数	14
重访周期	24 d
侧视方向	左右侧视
特征	11 种波束模式; 左右侧视缩短了重访周期; 丰富的极化信息

表 1-6 Radarsat-2 工作模式参数

工作模式	极化方式	入射角/ (°)	标称分辨率/m		标称景大小/ (km×km)
			距离向	方位向	
超精细	可选单极化:	30~40	3	3	20×20
多视精细	HH,VV,HV,VH	30~50	8	8	50×50
精细	可选单极化:	30~50	8	8	50×50
标准	HH,VV,HV,VH	20~49	25	26	100×100
宽	可选双极化: HH+HV,VV+VH	20~45	30	26	150×150
四极化精细	四极化:	20~41	12	8	25×25
四极化标准	HH+VV+HV+VH	20~41	25	8	25×25
高入射角	单极化:HH	49~60	18	26	75×75
窄幅 scanSAR	可选单极化: HH,VV,HV,VH	20~46	50	50	300×300
宽幅 scanSAR	可选双极化: HH+HV,VV+VH	20~49	100	100	500×500

1.2.2 欧洲遥感卫星

在陆地卫星方面,法国陆地卫星的代表是 SPOT 系列卫星,采用 CCD 阵列推扫成像,还具有侧视功能,可偏离视场中心±27°。于 2002 年 5 月 4 日发射的 SPOT 5 属于第三代遥感卫星,其分辨率有 5 m 和 10 m,还可通过亚像元技术获得 2.5 m 的分辨率,具有同轨立体测绘的能力。法国研制的 Pleiades 系统则是由两颗光学小卫星组成的星座。Pleiades 系统的卫星全色分辨率为 0.7 m,多光谱分辨率为 2.8 m,幅宽 20 km,具有左右侧摆各 30°和前后俯仰各 30°的能力,两颗卫星在轨道上相隔 180°,可在 4 天内重访全球任何地区。另外,Pleiades 系统还与意大利负责研制的 COSMO-SkyMed 雷达卫星星座系统组成了军民两用的光学与雷达联合地球观测(optical and radar federated earth observation,ORFEO)系统。

在卫星测绘方面,德国的多光谱光电立体扫描仪(MEOSS)三线阵 CCD 测绘相机采用 3 片 CCD 以扫帚方式工作,共享一个镜头,是最早的三线阵卫星。该卫星的 3 片 CCD 以 23.6°的交会角进行前视、正视(垂直向下)和后视,摄影高度 400 km,地面像元分辨率为 52 m×80 m,地面幅宽 255 km。法国卫星 SPOT 5 获取立体影像时,两台高分辨立体(high resolution stereoscopic,HRS)相机顺序进行照相,其间隔约为 90 s,最大的摄影带长度为 600 km,平面相对定位精度为 3 m,地形高程确定的均方差为 10 m。而法国 Pleiades 系统的无地面控制点定位精度为 20 m,有地面控制点定位精度则达到了 1 m。

1. 法国遥感卫星

法国是能代表整个欧洲地区空间技术水平的国家之一,它在积极参加欧洲空间局计划的同时,保持了一个规模相当的本国航天计划。SPOT 系列地球资源卫星计划及其后继的遥感卫星计划就是其中的杰出代表。

1)SPOT

(1)SPOT 1 卫星:于 1986 年 2 月发射,卫星重 19 000 kg,轨道高 832 km,重访周期为 26 天;卫星所载两台高分辨率可见光相机(high resolution visible,HRV),每台重 250 kg,有全色单波段和多波段两种工作模式(见表 1-7)。其中,全色模式 P 采用 6 000 像元的 CCD 探测器,信号采集时间约为 1.504 ms,可获取地面分辨率为 10 m×10 m 的图像数据;多光谱模式 XS 同样是 6 000 像元的 CCD 探测器,但采用的是合并相邻像元和延长信号采集时间至 3.008 ms 的方法,图像的地面分辨率为 20 m×20 m。

表 1-7 SPOT 1 的波段参数

成像波段	多光谱波段	波段 1	0.50~0.59 μm
		波段 2	0.61~0.68 μm
		波段 3	0.78~0.89 μm
	全色波段		0.50~0.73 μm
分辨率	多光谱波段		20 m
	全色波段		10 m

(2)SPOT 2 卫星:于 1990 年 1 月发射,遥感仪器和性能与 SPOT 1 相同,但发射后星上磁记录仪出现问题,误码率太高,因而不再使用。

(3)SPOT 3 卫星:于 1993 年 9 月 26 日发射,遥感仪器和性能与 SPOT 1 相同,但于 1996 年 11 月突然发生故障导致卫星失效。为了保持 SPOT 卫星的图像获取能力,已经停止工作的 SPOT 1 卫星被重新激活。

(4)SPOT 4 卫星:于 1998 年 3 月 23 日发射,是 SPOT 系列卫星中的改进型卫星。卫星重 2 700 kg,轨道高 832 km,轨道倾角为 98.721°,重访周期为 26 天,设计寿命为 5 年。星载仪器为 2 台推扫式高分辨率可见光红外成像仪(high resolution visible and infrared,HRVIR),每台扫描幅宽 60 km,最大侧视能力为 27°。

与 SPOT 1~SPOT 3 不同,SPOT 4 的 HRVIR 传感器采用与多光谱模式 XI 中波段 2 光谱范围相同的单色模式 M,取代了原来的全色模式 P;而多光谱模式 XI 增加了一个短波红外(short wave infrared,SWIR)波段,提高了 SPOT 卫星在农业和森林资源调查、地表积雪覆盖的监测及地质矿产资源勘探等方面的应用潜力。SPOT 4 的波段参数见表 1-8。此外,SPOT 4 还搭载了一些其他探测仪器,如为欧盟国家合作项目开发的植被探测器 Vegetation。该仪器选用 HRVIR 传感器的波段 2、波段 3 和短波红外波段,外加一个波段 0(0.43~0.47 μm),可提供幅宽 2 000 km、地面分辨率约 1 km 的观测数据,用于观察全球环境的变化。

表 1-8 SPOT 4 的波段参数

成像波段	多光谱波段	波段 1	0.50~0.59 μm
		波段 2	0.61~0.68 μm
		波段 3	0.78~0.89 μm
		短波红外波段	1.58~1.75 μm
	全色波段		波段 2:0.61~0.68 μm
分辨率	多光谱波段		20 m
	全色波段		10 m

(5)SPOT 5 卫星:于 2002 年 5 月发射升空。它有着前几颗卫星所不可比拟的优势:分辨率几乎提高了一个数量级,最高可达 2.5 m;以后后模式实时获取立体像对;在运营性能上也有了大大的提高;在数据压缩、存储和传输等一系列方面都有了显著的提高。

SPOT 5 相比于 SPOT 1~SPOT 4 卫星,对星上主载进行了重大改进,除了高分辨率几何装置(high resolution geometric,HRG)和植被探测器(Vegetation)外,SPOT 5 更有一个高分辨率立体成像装置(high resolution stereoscopic,HRS),HRS 能获取 120 km×120 km 的全色影像。它使用 2 个相机沿轨道方向(一个向前,一个向后)实时获取立体影像,较异轨立体成像模式(轨道间立体成像)而言,SPOT 5 几乎能在同一时间和同一辐射条件下获取立体像对。SPOT 5 各个探测器的参数如表 1-9 所示。

表 1-9 SPOT 5 的探测器参数

探测器			HRG	Vegetation	HRS
成像波段 及其分辨率	全色波段(PA)	0.49~0.69 μm	2.5 m 或 5 m	—	—
	波段 0(B0)	0.43~0.47 μm	—	1 km	—
	波段 1(B1)	0.49~0.61 μm	10 m	—	—
	波段 2(B2)	0.61~0.68 μm	10 m	1 km	—
	波段 3(B3)	0.78~0.89 μm	10 m	1 km	—
	短波红外波段(SWIR)	1.58~1.75 μm	20 m	1 km	—
视场宽度			60 km	2 250 km	120 km

2)3S 系统

3S(SPOT successor system 或 small satellite system)系统是 SPOT 5 之后的遥感卫星计划,采用目前法国正在研制的 Proteus 小卫星平台,每颗卫星重 500 kg,分辨率为 2.5 m,由若干颗卫星组网,至少有 2 颗卫星在轨工作。

3)Pleiades 系统

2001 年 1 月 26 日,法国和意大利开始联合研制军民两用遥感卫星系统——光学与雷达联合地球观测(optical and radar federated earth observation,ORFEO)系统,开发 6 颗军民两用卫星,其中 2 颗光学卫星组成的 Pleiades 系统由法国研制,4 颗高分辨率雷达卫星 COSMO-SkyMed 由意大利研制。

Pleiades-1A 卫星已于 2011 年 12 月 17 日发射,而 Pleiades-1B 卫星已于 2012 年 12 月 1 日发射。每颗 Pleiades 卫星的发射质量不到 1 000 kg,卫星的设计寿命为 5 年,星上功率为 1 kW。除了能够获得与 SPOT 卫星系统相同幅宽的全多光谱谱段图像外,Pleiades 卫星的装配更紧凑,地面分辨率达到 0.7 m,幅宽为 20 km,高灵敏度能使卫星沿着轨迹获得几幅连续的图像从而拼凑出地面的景象,星上数据的存储容量可增加到 600 GB,而下行数据传输速率可达到 450 Mb/s。

2. 意大利遥感卫星

光学与雷达联合地球观测系统 ORFEO 中的 COSMO-SkyMed 系统由意大利研制。该系统是由 4 颗军民两用雷达成像卫星组成的星座,能够在任何气象条件下日夜观测地球,可服务于民间、公共机构、军事和商业,提供环境风险管理、防务与国家安全、科学与商业所需的资料和数据。

2007 年 6 月 8 日,作为意大利首颗军民两用雷达卫星的 COSMO-SkyMed 1 由