



地球观测与导航技术丛书

高分辨率光学卫星遥感影像 高精度几何处理与应用

王 密 杨 博 潘 俊 金淑英 著



科学出版社

地球观测与导航技术丛书

高分辨率光学卫星遥感影像 高精度几何处理与应用

王 密 杨 博 潘 俊 金淑英 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书主要介绍高分辨率光学卫星遥感影像高精度几何处理与应用,重点围绕星地一体化的高精度无地面控制几何定位和几何处理的模型、方法和关键技术进行全面论述,全书共包括10章,综合介绍近20年来国内外高分辨率光学遥感卫星的技术发展现状和未来发展趋势,围绕高分辨率光学遥感卫星的高精度几何定位和几何处理关键问题,重点介绍高分辨率光学卫星的遥感影像成像几何模型构建、成像链路几何误差分析、轨道与姿态数据处理、遥感影像在轨几何定标、遥感影像传感器校正理论与方法、平台震颤检测与建模方法、遥感影像的区域网平差方法与应用、大区域遥感影像镶嵌理论与方法和遥感影像产品的几何质量分析与评价。

本书可供遥感科学与技术、地球空间信息科学、航空航天科学等学科领域和高分辨率光学遥感卫星应用领域的工程开发人员、科研人员、管理人员阅读参考,也可作为对地观测领域硕士和博士研究生的教材。

图书在版编目(CIP)数据

高分辨率光学卫星遥感影像高精度几何处理与应用 / 王密等著. —北京:科学出版社, 2017.7

(地球观测与导航技术丛书)

ISBN 978-7-03-053055-4

I. ①高… II. ①王… III. ①高分辨率-遥感卫星-遥感图象-图象处理 IV. ①V474.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 124749 号

责任编辑:苗李莉 李 静 / 责任校对:张小霞

责任印制:肖 兴 / 封面设计:图阅社

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>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年7月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2017年7月第一次印刷 印张:15 3/4 插页:6

字数:380 000

定价:129.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《地球观测与导航技术丛书》编委会

顾问专家

徐冠华 龚惠兴 童庆禧 刘经南 王家耀
李小文 叶嘉安

主 编

李德仁

副主编

郭华东 龚健雅 周成虎 周建华

编 委 (按姓氏汉语拼音排序)

鲍虎军	陈 戈	陈晓玲	程鹏飞	房建成
龚建华	顾行发	江碧涛	江 凯	景贵飞
景 宁	李传荣	李加洪	李 京	李 明
李增元	李志林	梁顺林	廖小罕	林 琿
林 鹏	刘耀林	卢乃锰	闫国年	孟 波
秦其明	单 杰	施 闯	史文中	吴一戎
徐祥德	许健民	尤 政	郁文贤	张继贤
张良培	周国清	周启鸣		

《地球观测与导航技术丛书》编写说明

地球空间信息科学与生物科学和纳米技术三者被认为是当今世界上最重要、发展最快的三大领域。地球观测与导航技术是获得地球空间信息的重要手段，而与之相关的理论与技术是地球空间信息科学的基础。

随着遥感、地理信息、导航定位等空间技术的快速发展和航天、通信和信息科学的有力支撑，地球观测与导航技术相关领域的研究在国家科研中的地位不断提高。我国科技发展中长期规划将高分辨率对地观测系统与新一代卫星导航定位系统列入国家重大专项；国家有关部门高度重视这一领域的发展，国家发展和改革委员会设立产业化专项支持卫星导航产业的发展；工业和信息化部、科学技术部也启动了多个项目支持技术标准化和产业示范；国家高技术研究发展计划(863 计划)将早期的信息获取与处理技术(308、103)主题，首次设立为“地球观测与导航技术”领域。

目前，“十一五”规划正在积极向前推进，“地球观测与导航技术领域”作为 863 计划领域的第一个五年计划也将进入科研成果的收获期。在这种情况下，把地球观测与导航技术领域相关的创新成果编著成书，集中发布，以整体面貌推出，当具有重要意义。它既能展示 973 计划和 863 计划主题的丰硕成果，又能促进领域内相关成果传播和交流，并指导未来学科的发展，同时也对地球观测与导航技术领域在我国科学界中地位的提升具有重要的促进作用。

为了适应中国地球观测与导航技术领域的发展，科学出版社依托有关的知名专家支持，凭借科学出版社在学术出版界的品牌启动了《地球观测与导航技术丛书》。

从书中每一本书的选择标准要求作者具有深厚的科学研究功底、实践经验，主持或参加 863 计划地球观测与导航技术领域的项目、973 计划相关项目以及其他国家重大相关项目，或者所著图书为其在已有科研或教学成果的基础上高水平的原创性总结，或者是相关领域国外经典专著的翻译。

我们相信，通过丛书编委会和全国地球观测与导航技术领域专家、科学出版社的通力合作，将会有一大批反映我国地球观测与导航技术领域最新研究成果和实践水平的著作面世，成为我国地球空间信息科学中的一个亮点，以推动我国地球空间信息科学的健康和快速发展！

李德仁

2009 年 10 月

前 言

1999 年,第一颗高分辨率商业遥感卫星 IKONOS 的成功发射(美国 Space Imaging 公司研制,分辨率达到 1m)开启了商业高分辨率光学遥感卫星的新时代。高分辨率光学遥感卫星带来巨大军事与经济效益,引起全球民用与军事应用领域的高度重视,在过去的十几年里,世界各国掀起了全球高分辨率光学遥感卫星研制的高潮,高分辨率光学遥感卫星已进入一个“百花齐放”的全面发展和广泛应用的崭新时期。

在李德仁院士等多名院士的联合建议下,《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020 年)》适时地将“高分辨率对地观测系统”列入重大专项,并已全面启动实施。到 2020 年,我国将新研制数十颗高分辨率遥感卫星,实现 30~50 颗遥感卫星同时在轨工作,保守估计每天获取的数据量将达到数百个太字节。在高分系统的推动下,我国高分辨率光学遥感卫星数据获取和处理技术取得了飞速发展,北京二号、吉林一号和高景一号等商业卫星的成功发射,我国卫星遥感应用进入到蓬勃发展的新时期。

几何属性是高分辨率光学卫星遥感影像的基本属性之一。20 世纪 70 年代至 90 年代,由于卫星在轨定标技术、定姿定轨技术及时间同步技术的落后,光学卫星遥感影像几何定位和处理对地面控制点的依赖很强;而且出于对卫星参数和相机参数的保密,用户通常无法获取几何定位和几何处理的相关参数,只能依赖大量地面控制点基于经验模型(如二维多项式模型、三维多项式模型、直接线性变换模型等)进行几何定位和几何纠正。随着定标、定姿、定轨及时间同步等技术的发展和复杂高分辨率光学相机设计,卫星设计和地面处理也更趋于一体化,光学卫星的几何定位和处理逐步从依赖地面控制向稀少控制和无地面控制发展。在此背景下,本书作者及研究团队结合多年来从事高分辨率光学遥感卫星地面处理算法研究成果和系统研制经验,以星地一体化为主线,系统阐述高分辨率光学卫星的遥感影像成像几何模型构建、成像链路几何误差分析、轨道与姿态数据处理、遥感影像在轨几何定标模型和方法、遥感影像传感器校正理论与方法、平台震颤检测与建模方法、遥感影像的区域网平差方法与应用、大区域遥感影像镶嵌理论与方法和遥感影像产品的几何质量分析与评价内容。

本书是作者及研究团队近 20 年来承担 30 余颗国产光学遥感卫星地面数据处理研究和系统研制工作的总结,同时也吸收了本领域国内、外同行的研究成果和经验。感谢项目组的朱映、范城城、田原、程宇峰等博士生对本书所做的大量工作。

本书的出版得到了国家自然科学基金项目(项目编号:41371430,91438203,91438112,91438111)的资助,在此一并致谢!

限于作者的专业范围和水平有限,错漏之处在所难免,敬请读者批评指正。

目 录

《地球观测与导航技术丛书》编写说明

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 高分辨率光学遥感卫星发展现状与趋势	1
1.2 高分辨率光学卫星遥感影像的高精度几何定位与几何处理	15
1.3 本书的内容与组织结构	18
参考文献	19
第 2 章 高分辨率光学卫星遥感影像成像几何模型构建	21
2.1 引言	21
2.2 高分辨率光学遥感卫星的时间系统与坐标系统	21
2.3 光学卫星遥感影像严密成像几何模型	25
2.4 光学卫星遥感影像有理函数模型	34
2.5 本章小结	38
参考文献	38
第 3 章 高分辨率光学遥感卫星成像链路几何误差分析	39
3.1 引言	39
3.2 光学遥感卫星定位误差来源	39
3.3 光学遥感卫星定位精度关键影响因素	53
3.4 光学遥感卫星几何定位精度指标论证方法与应用	60
3.5 本章小结	65
参考文献	65
第 4 章 高分辨率光学遥感卫星轨道与姿态数据处理	66
4.1 引言	66
4.2 高分辨率光学遥感卫星轨道数据处理与建模	66
4.3 高分辨率光学遥感卫星姿态数据处理与建模	75
4.4 本章小结	89
参考文献	89
第 5 章 高分辨率光学卫星遥感影像在轨几何定标	91
5.1 引言	91
5.2 高分辨率光学遥感卫星相机特点	91
5.3 基于探元指向角的通用几何定标模型构建	95
5.4 光学遥感卫星在轨几何定标解算与评价	96
5.5 光学遥感卫星典型载荷几何定标方案及应用	103
5.6 本章小结	116
参考文献	116

第 6 章 高分辨率光学卫星遥感影像传感器校正理论与方法.....118

6.1 引言118

6.2 高分辨率光学遥感卫星传感器校正内涵.....118

6.3 传统传感器校正原理与方法.....120

6.4 稳态重成像的传感器校正原理.....123

6.5 基于稳态重成像的推扫成像传感器校正方法及应用.....129

6.6 本章小结142

参考文献143

第 7 章 高分辨率光学遥感卫星平台震颤检测与建模方法.....144

7.1 引言144

7.2 平台震颤对推扫成像几何特性影响分析.....145

7.3 基于分时成像的平台震颤检测方法.....150

7.4 基于视差成像的平台震颤姿态建模.....163

7.5 实验与分析165

7.6 本章小结168

参考文献169

第 8 章 光学卫星遥感影像的区域网平差方法与应用.....171

8.1 引言171

8.2 光学卫星遥感影像区域网平差模型.....171

8.3 光学卫星遥感影像区域网构建与求解.....180

8.4 光学卫星遥感影像区域网平差技术的最新发展.....185

8.5 资源三号卫星全国一张图工程平差实验.....192

8.6 本章小结196

参考文献196

第 9 章 大区域高分辨率光学卫星遥感影像镶嵌理论与方法.....198

9.1 引言198

9.2 大区域整体相对辐射校正.....199

9.3 基于顾及重叠的面 Voronoi 图的接缝线网络生成.....208

9.4 基于接缝线网络的影像镶嵌及应用.....222

9.5 本章小结225

参考文献225

第 10 章 高分辨率光学卫星遥感影像产品的几何质量分析与评价.....228

10.1 引言228

10.2 几何质量评价主要指标.....228

10.3 几何质量评价方法.....234

10.4 几何精度评价参考.....237

10.5 本章小结238

参考文献239

彩图

第1章 绪论*

1.1 高分辨率光学遥感卫星发展现状与趋势

1.1.1 高分辨率光学遥感卫星发展现状

1957年,第一颗人造卫星升空,标志着人类进入了太空时代;1972年,美国发射了第一颗陆地卫星 Landsat,开辟了遥感对地观测的新纪元;1999年,第一颗高分辨率商业遥感卫星 IKONOS 的成功发射(美国 Space Imaging 公司研制,分辨率达到 1m)开启了商业高分辨率光学遥感卫星的新时代。高分辨率光学遥感卫星带来的巨大军事与经济效益,引起全球民用与军事应用领域的高度重视,在过去的十几年里,世界各国掀起了全球高分辨率光学遥感卫星研制的高潮,高分辨率光学遥感卫星已进入一个“百花齐放”的全面发展和广泛应用的崭新时期,美国、法国、俄罗斯、欧洲空间局、日本、印度等国家/机构都相继发射了大量高分辨率光学遥感卫星,大多采用与太阳同步的近极地圆轨道,轨道高度一般为 500~1000km。

1. 国外高分辨率光学遥感卫星发展现状

高分辨率光学遥感卫星的行业应用已经成为国际潮流,美国、欧洲、以色列、印度、日本等主要航天大国(地区)纷纷推出了自己的高分遥感卫星系统。美国和法国代表了当前高分辨率光学遥感卫星发展的最先进水平,引领光学遥感卫星不断向高空间分辨率、高光谱分辨率、高时间分辨率、多角度、小型敏捷等方向发展(朱仁璋等,2015;朱仁璋等,2016a, b)。表 1-1 统计了近 15 年来国外发射的高分辨率光学遥感卫星情况。下面分别对美国、法国及以色列、俄罗斯、日本等其他国家的高分辨率光学遥感卫星的发展情况进行说明。

1) 美国

美国高分辨率光学遥感卫星的研制起步较早,加上政府大力支持,一直处于世界领先水平。其高分辨率商业遥感卫星以 IKONOS、QuickBird、GeoEye-1、WorldView-1/2/3/4 为主。下面分别对这 7 颗卫星进行简要介绍。

IKONOS 卫星发射于 1999 年,是全球首颗空间分辨率优于 1m 的商业光学遥感卫星。IKONOS 运行状态如图 1-1 所示。同时,IKONOS 卫星具有较强的机动成像能力,通过侧摆、俯仰角灵活调整对地成像,不仅缩短了卫星重访周期,还可以获取异轨立体和同轨立体影像,实现了单星立体测图。

* 本章中图 1-1~图 1-5 均来自于 DigitalGlobe 公司官方网站,网址: <http://www.digitalglobe.com>

表 1-1 1999~2016 年国外高分辨率光学遥感卫星统计

所属国家	发射年月	卫星名称	轨道高度/km	传感器	空间分辨率/m	重访周期/天	条带宽度/km	立体成像能力	几何定位精度/m
美国	1999.09	IKONOS	681	全色(PAN)/ 多光谱四波段(MS)	PAN: 0.82 MS: 3.2	3	11.3	双线阵	CE90:9
	2001.10	QuickBird	450	全色/多光谱四波段	PAN: 0.61 MS: 2.44	3~4	16.5	异轨立体	CE90:23 LE90:17
	2007.09	WorldView-1	496	全色	PAN: 0.5	1.7	17.7	同轨立体	CE90:4
	2008.09	GeoEye-1	684	全色/多光谱四波段	PAN: 0.41 MS: 1.65	<3	15.3	同轨立体	CE90:2.5 LE90:3
	2009.10	WorldView-2	770	全色/多光谱八波段	PAN: 0.46 MS: 1.80	1.7	16.4	同轨立体	CE90:3.5
	2013.11	SkySat-1	578	全色/多光谱四波段	PAN: 0.9 MS: 2	—	8	同轨立体	—
	2014.07	SkySat-2	637	全色/多光谱四波段	PAN: 0.9 MS: 2	—	8	同轨立体	—
	2014.08	WorldView-3	617	全色/多光谱八波段/短波 红外八波段/12个CAVIS 波段	PAN: 0.31 MS: 1.24	<1	13.1	同轨立体	CE90:3.5
	2016.11	WorldView-4	681	全色/多光谱四波段	PAN: 0.34 MS: 1.36	<3	13.1	同轨立体	CE90:3.5
法国	2002.05	SPOT-5	822	全色/多光谱四波段	PAN: 2.5 MS: 10	2~3	60	同轨立体/ 双 线阵	—
	2011.11	Pleiades-1A	695	全色/多光谱四波段	PAN: 0.5 MS: 2.0	<1	20	同轨立体	CE90:10
	2012.09	SPOT-6	695	全色/多光谱四波段	PAN: 1.5 MS: 6	—	60	同轨立体	CE90:10

续表

所属国家	发射年月	卫星名称	轨道高度/km	传感器	空间分辨率/m	重访周期/天	条带宽度/km	立体成像能力	几何定位精度/m
法国	2012.12	Pleiades-1B	695	全色/多光谱四波段	PAN: 0.5 MS: 2.0	<1	20	同轨立体	CE90: 10
	2014.07	SPOT-7	695	全色/多光谱四波段	PAN: 1.5 MS: 6	—	60	同轨立体	CE90: 10
以色列	2000.12	EROS-A	530	全色(PAN)	PAN: 1.9	4	14	异轨立体	—
	2006.04	EROS-B	520	全色	PAN: 0.7	4	7	异轨立体	—
俄罗斯	2006.06	Resurs-DK1	椭圆 360~610	全色/多光谱四波段	PAN: 1 MS: 1.5~2	6	28.3	—	CE90: 100
	2013.06	Resurs-P1	477.5	全色/多光谱五波段/高光谱 216 波段	PAN: 0.9 MS: 3~4	3	38	—	—
	2014.12	Resurs-P2	477.5	全色/多光谱五波段/高光谱 216 波段	PAN: 0.9 MS: 3~4	3	38	—	—
日本	2006.01	ALOS	692	全色/多光谱四波段	PAN: 2.5 MS: 10.0	2	70	三线阵	CE90: 200
韩国	2006.07	KompSAT-2	685	全色/多光谱四波段	PAN: 1.0 MS: 4.0	3	15	—	—
	2012.05	KompSAT-3	685	全色/多光谱四波段	PAN: 0.7 MS: 2.8	—	15	同轨立体	CE90:48.5
	2015.03	KompSAT-3A	528	全色/多光谱四波段/红外	PAN: 0.55 MS: 2.20	—	12	同轨立体	—
印度	2005.05	CartoSAT-1	618	全色	PAN: 2.5	5	30	双线阵	CE90: 80
	2007.01	CartoSAT-2	635	全色	PAN: 0.8	5	9.6	双线阵	—
泰国	2008.10	THEOS	822	全色/多光谱四波段	PAN: 2 MS: 15	3	22	—	CE90:<300

QuickBird 卫星发射于 2001 年 10 月，与 IKONOS 卫星类似，具备敏捷成像能力，

可获取立体成像数据，立体成像的基高比为 0.9~1.2，适合三维信息提取。QuickBird 卫星星下点成像的幅宽为 16.5km，比 IKONOS 宽 60%。QuickBird 运行状态如图 1-2 所示。

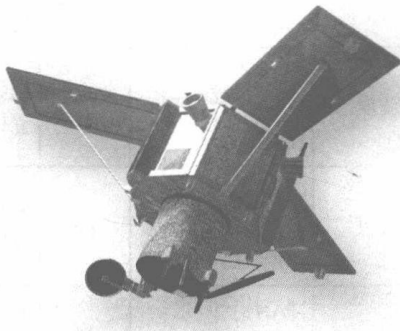


图 1-1 IKONOS 卫星

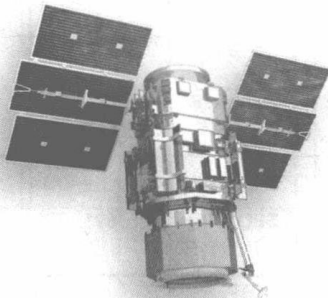


图 1-2 QuickBird 卫星

GeoEye-1 卫星由 GeoEye 公司 (2013 年被 DigitalGlobe 公司并购) 于 2008 年 9 月成功发射，其采用了成熟的卫星平台 (SA-200HP) 和新一代的光学成像载荷，卫星飞行状态如图 1-3 所示。在硬件设计方面采用星载一体化设计思路，卫星构型以星上主要载荷为中心进行布局，打破了传统卫星平台与载荷分而置之的设计思想，提高了有效载荷比；采用双军用高精度星敏、高精度陀螺、10 芯太阳敏感器、3 个磁力矩器，以及 2 个 GPS 构成姿态敏感器群，高精度姿态敏感器群的协同工作，指向角精度可达 75"，姿态稳定度可达 0.007"/s；姿态控制选用了 8 个零动量偏置飞轮来提供灵活的敏捷机动动力，使得卫星具备敏捷的姿态机动能力；成像载荷采用了全新的全视场 FFTMC (full field three mirror Cassegrain) 光学成像系统，大幅提高成像效率。GeoEye-1 影像定位精度达到平面 2.5m (CE90)、高程 3m (LE90)。

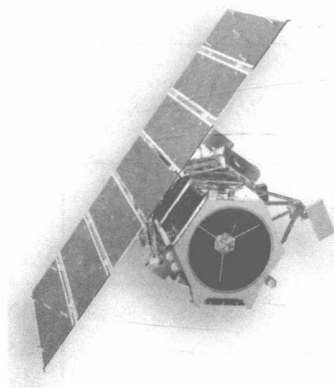


图 1-3 GeoEye-1 卫星

WorldView 系列卫星是由美国 DigitalGlobe 公司在 QuickBird 卫星基础上发展起来的，当前已经制造并发射了四颗，分别为 WorldView-1、WorldView-2、WorldView-3 和 WorldView-4。相对于 QuickBird 卫星，WorldView 卫星设计指标较高，采用了控制力矩陀螺 (control moment gyros, CMG) 技术，提供了 10 倍于其他姿态控制器的加速度，可以大幅度改进传感器的机动性和确定目标方向性，使得 WorldView 卫星具有最大的镜头转向敏捷性，从而可以在扫描成像时快速地从—个目标调到另一个目标，加快立体像

对的采集。

WorldView-1 卫星(图 1-4) 仅能进行全色成像,无地面控制的定位精度为 3.5m(CE90), 可以进行双向扫描。WorldView-2(图 1-5) 在 WorldView-1 卫星基础上, 首次将多光谱相机由 4 个谱段增加到 8 个。

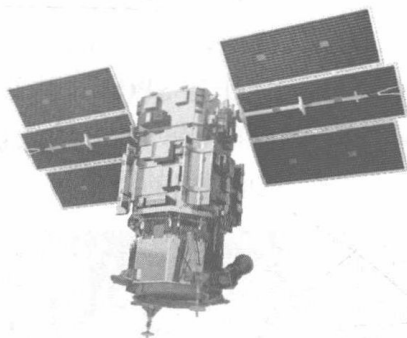


图 1-4 WorldView-1 卫星

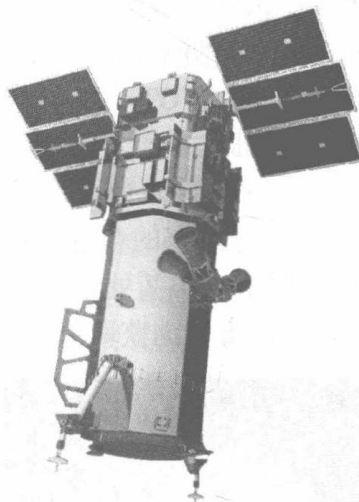


图 1-5 WorldView-2 卫星

WorldView-3 是第一颗多负载、超高光谱、高分辨率的商业卫星, 并且是迄今为止分辨率最高的遥感卫星, 可提供分辨率 0.31m 全色、1.24m 多光谱、3.7m 短波红外和 30mCAVIS 影像。短波红外波段可透过雾霾、烟尘, 以及其他空气颗粒进行精确图像采集。CAVIS 装置也可透过雾霾、烟尘, 以及其他空气颗粒, 甚至可穿过海洋表面进行精确成像, 实现对气象条件监测和大气校正。WorldView-3 的平均回访时间不到 1 天, 每天能够采集全球 680000km² 的范围, 开创了更高级别清晰度的卫星影像新时代, 也使 DigitalGlobe 进一步扩展了其图像产品范围, 将为各大地图供应商提供更好的卫星影像解决方案。

WorldView-4 卫星为原计划 2013 年发射的 GeoEye-2 卫星。GeoEye-2 卫星是由 GeoEye 公司 2007 年提出, 但由于公司并购, 导致 GeoEye-2 卫星推迟发射。2014 年 7 月, Digital Globe 公司正式将 GeoEye-2 卫星更名为 WorldView-4。WorldView-4 已于 2016 年 11 月成功发射, 可获取 1.36m 分辨率的多光谱影像和 0.34m 的全色影像, 与 WorldView-3 卫星组成对地观测星座, 实现协同对地观测。WorldView-4 卫星的发射将使 DigitalGlobe 公司近乎垄断美国的高分辨率商业影像市场。

2) 法国

法国在高分辨率光学遥感卫星的研制上一直走在世界前列。1982 年法国空间研究中心(CNES)创建了 SPOT Image 公司, 奠定了法国卫星商业化的基础。从 1986 年第一颗卫星 SPOT 发射以来, 至今已发射 SPOT 卫星 1~7 号。继 SPOT 系列后 CNES 发展了 Pleiades 双星观测星座, 是世界上首个可提供每日重访的高分辨率光学遥感卫星星座。

SPOT-1/2/3 卫星采用近极地圆形太阳同步轨道, 轨道倾角 93.7°, 平均高度 832km, 搭载两台 HRV 传感器, 可获取分辨率 10m 的全色影像和分辨率 20m 的多光谱影像, 并可通过交向观测获得立体像对, 便于进行立体测图。SPOT-4 卫星在第一代 SPOT 系列卫

星 SPOT-1/2/3 的基础上增加了一个短波红外波段, 可以获取分辨率 10m 的全色影像和分辨率 20m 的多光谱数据; 增加了宽视域植被探测仪, 用于全球和区域两个层次上, 对自然植被和农作物进行连续监测, 对大范围的环境变化、气象、海洋等应用研究很有意义。SPOT-5 卫星在 SPOT-1~SPOT-4 号卫星的基础上进一步提高了立体成像能力, 可以获取同轨或异轨立体影像, 是世界上首颗具有同轨立体成像能力的商业卫星。SPOT-5 星上载有 2 台高分辨率几何成像装置(HRG)、1 台高分辨率立体成像装置(HRS)、1 台宽视域植被探测仪(VGT)等, 空间分辨率最高 2.5m, 通过前、后视成像实时获得立体像对, 运营性能有很大改善。同时, 在数据压缩、存储和传输性能等方面也均有显著提高。SPOT-6 卫星可采用同轨前、后视立体或前、下、后三视立体成像, 具有 60km 的大幅宽, 获取 1.5m 分辨率的全色影像和 6m 分辨率的多光谱影像。作为 SPOT-6 的双子卫星, SPOT-7(图 1-6)与其处于同一轨道高度, 彼此相隔 180°, 同样具有 60km 的大幅宽, 两颗卫星在轨时每天的获取能力将达到 600 万 km², 相当于法国面积的十倍。

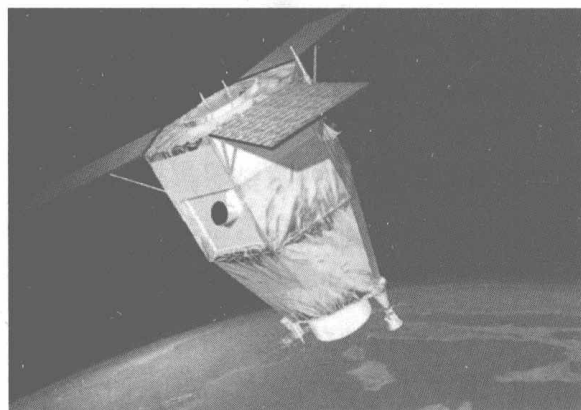


图 1-6 SPOT-7 卫星^①

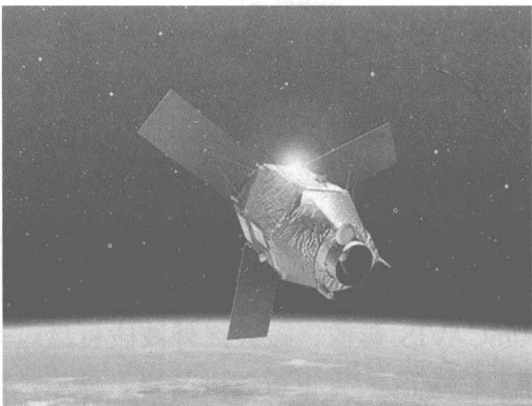


图 1-7 Pleiades 卫星^①

Pleiades 卫星(图 1-7)为 CNES 研制的超高分辨率对地观测发展计划卫星, 是 SPOT 系列的后续星, 由 Pleiades-1A 和 Pleiades-1B 组成, 分别于 2011 年 12 月 17 日、2012 年 12 月 2 日成功发射, 两者在轨道高度 695km 的同一太阳同步轨道上相距 180°, 保证 Pleiades 星座的重访周期为 1 天。Pleiades 卫星带地面控制点的影像定位精度达到 1m, 无地面控制点的定位精度达到 10m(CE90), 可整体绕滚动轴、俯仰轴大角度侧摆, 在很短的时间内调整观测角度, 灵活地实现对不同目标的观测。这使得 Pleiades 卫星可以对直径 20km 的点状目标进行瞬时成像, 也可以沿飞行轨道方向近实时获取立体像对, 大幅提高成像效率。

2014 年 7 月, SPOT-7 的成功发射标志着空中客车防务与空间公司此前规划的由 SPOT-6&7 与 Pleiades-1A&1B 组成四颗卫星星座的计划终于得以完成, 由 SPOT 卫星提供高分辨率影像, Pleiades 提供极高分辨影像。

3) 其他国家

A. 以色列

EROS 系列卫星是以色列代表性的高分辨率遥感卫星。目前成功发射运行的卫星包

^① 来自于网站 <http://www.satimagingcorp.com>

括 EROS-A 和 EROS-B, 分别由以色列国际影像卫星公司 (ImageSat) 于 2000 年和 2006 年发射。EROS-A 重量 250kg, 全色分辨率 1.8m, 幅宽 14km; EROS-B 重 280kg, 全色分辨率 0.7m, 幅宽 7km, 目标定位精度较 A 星大幅提高, 并与 EROS-A 构成高分辨率卫星星座, 提高目标影像的获取能力、获取频率及获取质量。ImageSat 公司成立于 1997 年, 是一家主要由以色列和美国共同投资组建的国际商业遥感公司, 公司主要股东有以色列航空工业有限公司 (IAI)、光电工业公司和美国的核心软件公司组成。IAI 负责卫星制造, 光电工业公司负责星上相机系统的设计和制造, 核心软件公司则负责卫星影像的管理和分发。

B. 俄罗斯

俄罗斯 2006 年发射了民用高分辨率遥感卫星 Resurs-DK1 提供商业图像服务。Resurs-DK1 是俄罗斯新一代传输型陆地资源卫星, 全色分辨率 1m, 多光谱分辨率 2m。作为 Resurs-DK1 星的后续, 俄罗斯计划发射 Resurs-P 系列共五颗卫星 (2013 年已发射 P1/2014 年已发射 P2), 全色分辨率可达 1m, 并搭载多光谱 (5 波段) 及高光谱 (216 波段) 传感器, 工作性能大幅度提升。俄罗斯地球监测研究中心负责卫星数据的获取、处理、存档和分发, 同时代理其他国家高分辨商业遥感卫星数据, 并通过互联网向全球用户发送数据并提供增值服务。

C. 日本

日本宇宙航空研究开发机构 (JAXA) 研制的先进陆地观测卫星 (ALOS-1) 于 2006 年 1 月发射升空, 为三线阵立体测图卫星, 全色分辨率 2.5m。ALOS-1 影像主要供商业使用, 可用于制图、区域观测、灾害监测和资源调查等。2011 年 4 月, ALOS-1 卫星到寿失效, 后续卫星包括 ALOS-2 (SAR) 及 ALOS-3 (光学)。ALOS-3 卫星设计全色分辨率 0.8m, 幅宽 50km, 双线阵立体成像, 具备多光谱及高光谱数据获取能力 (VIS-NIR, 4 波段; VIS-SWIR, 185 波段; TIR), 尚在研制阶段。

D. 韩国

近年来, 韩国通过吸收引进国外先进遥感技术, 推动对地观测卫星迅速发展。韩国航空宇宙研究院 (KARI) 研制了 KOMPSAT 系列遥感卫星, 1999 年发射的 KOMPSAT-1 光学成像卫星, 全色分辨率近 6m; 2006 年发射的 KOMPSAT-2 卫星, 分辨率已提升为全色 1m、多光谱 4m; 2012 年发射的 KOMPSAT-3 卫星, 分辨率为全色 0.7m, 多光谱 3.2m; 而 2015 年发射的 KOMPSAT-3A 卫星, 全色分辨率已达 0.55m。

E. 印度

印度国家空间研究组织 (ISRO) 下设 Antrix 公司负责运营的 CartoSat-2 制图卫星于 2007 年 1 月成功发射, 可提供 0.8m 分辨率全色影像。该卫星是继以色列 EROS-B 后全球第二颗由非美国机构运营的亚米级商业遥感卫星。ISRO 又于 2008 年和 2010 年分别发射了 0.8m 分辨率的 CartoSat-2A 和 CartoSat-2B 卫星, 形成了全面的高分对地观测能力。

2. 我国高分辨率光学遥感卫星发展现状

相对于美国、法国等国, 我国高分辨率光学遥感卫星的研制和应用起步较晚。目前具有代表性的高分辨率光学遥感卫星主要包括天绘、资源、高分等系列卫星。自 2007 年起先后发射了资源一号 02B 卫星、天绘一号卫星、资源一号 02C 卫星、资源三号卫星、

高分一号卫星和高分二号卫星等高分辨率光学遥感卫星，卫星基本参数如表 1-2 所示。

表 1-2 我国高分辨率光学遥感卫星基本参数

发射年月	卫星名称全称/简写	轨道高度/km	传感器类型	空间分辨率/m	成像幅宽/km
2007.09	资源一号 02B/ZY-02B	778	高分相机 (HR)	2.36	54 (2 台)
			CCD 相机	20	113
2010.08	天绘一号/TH-1	500	三线阵相机 (TLC)	5	55
			全色相机 (PAN)	2	
			多光谱相机 (MS)	10	
2011.12	资源一号 02C/ZY-02C	780	高分相机 (HR)	2.36	54 (2 台)
			全色多光谱相机 P/M	5/10	60
2012.01	资源三号/ZY-3	504	三线阵相机 (TLC) 下视/前后视	2.1/3.5	51/52
			多光谱相机 (MS)	5.8	51
2013.04	高分一号/GF-1	645	全色多光谱相机 P/M	2/8	60 (两台)
			多光谱相机 (MS)	16	800 (4 台)
2014.08	高分二号/GF-2	631	全色多光谱 P/M	1 / 4	45 (2 台)

1) 天绘系列卫星

天绘一号卫星实现了中国传输型立体测绘卫星零的突破。天绘一号 01 星、02 星、03 星分别于 2010 年 8 月 24 日、2012 年 5 月 6 日、2015 年 10 月 26 日发射成功并组网运行。三星组网极大地提高了测绘效率和几何控制能力，加快了测绘区域影像获取速度。无地面控制点条件下，天绘一号卫星的相对精度为 12m/6m (平面/高程 1σ)，达到与美国 SRTM 同等的技术水平。

2) 资源系列卫星

资源一号 02B 卫星是具有高、中、低三种空间分辨率的对地观测卫星，搭载的 2.36m 分辨率的 HR 相机，改变了国外高分辨率卫星数据长期垄断国内市场的局面，开启了我 国民用高分辨率遥感时代，在国土资源、城市规划、环境监测、减灾防灾、农业、林业、水利等众多领域发挥重要作用。

资源一号 02C 卫星搭载有全色多光谱相机和全色高分辨率相机，可广泛应用于国土 资源调查与监测、防灾减灾、农林水利、生态环境、国家重大工程等领域；配置的两台 2.36m 分辨率 HR 相机使数据的幅宽达到 54km，从而大幅增加数据覆盖能力、缩短重访 周期。

资源三号卫星是我国第一颗民用高分辨率立体测图卫星，实现了我国民用高分辨率 测绘卫星领域零的突破，主要用于 1：50000 立体测图及更大比例尺基础地理产品的生产 和更新，可同时用于开展国土资源调查与监测。

3) 高分系列卫星

中国高分辨率对地观测系统 (简称“高分专项”)，是《国家中长期科学和技术发展

规划纲要(2006—2020年)》所确定的16个重大专项之一,于2010年批准启动实施。“十二五”阶段,高分专项建设成绩斐然。目前,高分专项中已有高分一号、高分二号、高分八号、高分九号四颗高分辨率光学遥感卫星成功发射。

高分一号卫星能同时获取2m分辨率全色影像、8m分辨率多光谱影像、2m全色与8m多光谱融合和16m多光谱宽幅影像组图,具有多模式同时工作的能力。

高分二号卫星的空间分辨率优于1m,同时还具有高辐射精度、高定位精度和快速姿态机动能力等特点,标志着中国光学遥感卫星进入亚米级“高分时代”。

高分八号和高分九号,分别发射于2015年6月26日和2015年9月14日,空间分辨率可达亚米级,主要应用于资源调查、城市规划、路网设计、农作物估产和防灾减灾等国民经济建设和国家战略实施等领域。

1.1.2 高分辨率光学遥感卫星未来发展趋势

过去15年高分辨率光学遥感卫星技术发展迅猛,光学遥感卫星的分辨率越来越高,成像模式也越来越多样。纵观光学遥感卫星的发展现状,可以预见未来高分辨率光学遥感卫星的主要发展趋势,主要体现在以下三个层面。

(1)新一代高分辨率光学遥感卫星单星性能越来越高,其成像空间分辨率、时间分辨率、光谱分辨率、成像定位精度等水平均大幅度提升。

(2)由传统单星观测模式转变为组建星座观测,低成本、高效率实现更优的对地观测性能。

(3)将卫星观测资源、通信/导航星群资源、地面处理资源,以及用户之间相互集成,构建网络化的天基智能对地观测系统,结合脑科学与认知科学等领域的理论知识,增强天基空间信息网络的感知、认知、决策能力,形成对地观测脑(earth observation brain, EOB)。

1. 单星性能不断提升

伴随着人们对于遥感影像越来越精细化、实时化的应用需求,高分辨率光学遥感卫星的性能将越来越高,其发展趋势可以用“更高、更准、更稳、更短、更小、更多”来描述。

(1)“更高”,即卫星获取影像的空间分辨率将更高。最近发射的高分辨率卫星系统的成像分辨率都在0.5m内,其中WorldView-3更是达到了0.31m,相信未来的高分辨率卫星的分辨率将会越来越高,如此高的空间分辨率堪比航空影像,将极大地促进遥感市场的发展。

(2)“更准”,即高分辨率卫星获取目标的位置将更准。卫星系统获取目标位置的准确性得益于卫星的高指向精度和高定位精度。GeoEye-1卫星的指向角精度达到了75",其姿态的稳定度0.007"/s,同时卫星上的星历姿态测量精度的进一步提高使得卫星的定位精度达到2m。当前高分辨率光学遥感卫星的无控精度已从10m发展到2~3m,有控精度优于15cm,未来的高分辨率卫星将使得卫星可以更准地获取目标的位置。

(3)“更稳”,即卫星整星的刚度结构增强,采用整形一体化和结构化、刚性化设计,以及采用顶装太阳翼结构,使平台的几何性能更稳定,为高精度几何定位奠定了基础。同时,通过优化结构设计,使得卫星在高机动能力的情况下可以获取高的稳定度。