

高分辨率卫星遥感影像 地学计算

周成虎 骆剑承 等 著



科学出版社
www.sciencep.com

高分辨率卫星遥感影像 地学计算

周成虎 骆剑承 等 著

国家重点基础研究发展计划2007CB701305 项目专著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是国家重点基础研究发展计划 2007CB701305 项目专著,在《遥感影像地学理解与分析》理论上,探讨了高空间分辨率遥感影像信息计算理论、模型、方法和应用,重点突出了面向特征基元的高分辨率遥感影像信息提取和目标判别分析的原理和方法,及其高效能计算环境下的实践与应用技术。

本书共分为五章。第一章分析了高分辨率卫星遥感技术的发展,引出高分辨率卫星遥感影像处理与分析存在的难点及其研究发展方向;第二章论述了高分辨率遥感信息计算的基础理论和方法,重点阐述基元、格局和尺度等基本概念问题,提出了“像元-基元-目标”的遥感影像分析方法体系及其高效能计算模型;第三与第四章主要围绕高分辨率遥感影像计算方法研究与技术开发,重点探讨了高分辨率遥感影像分割、特征基元计算、目标分类与识别等模型方法及其应用实例,并介绍了目标识别原型系统的设计开发思路;第五章着重展望高效能计算环境下对分布式影像处理与分析的探索研究,提出了目标识别系统的网格化发展思路及其网络服务模式。

本书可供广大地学和空间科学领域从事遥感、地理信息系统、地球信息科学的科研人员及相关高等院校教师和研究生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

高分辨率卫星遥感影像地学计算/周成虎,骆剑承等著. —北京:科学出版社, 2009

ISBN 978-7-03-022648-8

I. 高… II. ①周…②骆… III. 高分辨率-遥感图像-图像处理 IV. TP75

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 115042 号

责任编辑:彭胜潮 关 焱 / 责任校对:包志虹

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:张 放

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>

天时彩色印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009 年 1 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2009 年 1 月第一次印刷 印张: 19 1/2

印数: 1—3 000 字数: 451 000

定价: 89.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈双青〉)

序

1957年10月4日苏联成功研制和发射了第一颗人造地球卫星,1961年4月12日又成功地将人类第一艘载人宇宙飞船“东方号”送入太空;美国于1958年2月发射第一颗人造卫星,1962年2月发射了第一艘载人宇宙飞船“水星号”;中国于1970年4月发射了第一颗人造卫星“东方红一号”,2003年10月发射了第一艘载人宇宙飞船“神舟五号”;……这些卫星技术的伟大成就掀开了人类对地观测的新篇章:1960年4月1日,美国把能拍摄地球天气系统照片的第一颗人造气象卫星“TIROS-1”送上轨道,使人类第一次有机会看到地球整体天气布局情况;1972年7月23日第一颗地球资源卫星(ERTS-1,后改称陆地卫星 Landsat)成功发射,并运行服务至今,成为遥感技术发展的重要里程碑。今天,我们的太空遥感卫星星罗棋布,一个全球性的综合对地观测卫星网络正在形成。

50年来,全球对地观测技术得到了快速发展,人类实现了在地球之外对地球的全方位观测和监测,并且随着技术的进步,这种观测能力还在不断提高与改进。高空间分辨率、高光谱分辨率、高辐射分辨率、高时间分辨率是当今对地观测技术发展的总体趋势,也是遥感科学技术不断追求与发展的目标;特别是近十年来,高空间分辨率遥感的发展深得世界各国的高度重视,应用领域不断拓展,产业化发展势头猛进,并成为经济建设、国防安全和大众信息服务等方面最重要的空间信息源。与此同时,业界也深刻地意识到,信息提取与目标识别是高分辨率遥感从数据转换为信息进而服务于各行各业的关键环节,也

是整个高空间分辨率遥感应用与服务链的核心之一。高空间分辨率卫星遥感影像可精细地刻画地物丰富的几何特征，但同时，高空间分辨率遥感的背景信息复杂，噪声信息干扰严重，“同物异谱”和“异物同谱”现象明显，进而使得高精度、高效率的目标自动识别和专题信息提取成为大规模高分辨率遥感应用的“瓶颈”，高空间分辨率遥感影像处理与分析已成为遥感科学研究的热点与前沿问题。

周成虎研究员及其团队早在“九五”初期，在国家“863 计划”航天航空领域项目的支持下，就组织开展高空间分辨率遥感影像的应用研究工作，并在“十五”期间进一步深化研究。通过十多年的努力，紧抓高空间分辨率遥感影像处理与分析中的基础理论与方法问题，面向地物目标识别与遥感专题信息提取等应用需求，建立了以“像元-基元-目标”为核心的遥感影像计算体系，在概念与模型、计算方法与技术等方面均取得显著的研究进展和突破，多项研究成果获得国家 and 北京市的科学技术进步奖，在国家土地利用精细调查、海岸带资源与环境详查等重大任务中得到应用检验。这本专著是他们多年工作的总结与成果的综合体现，并充分反映了当今高空间分辨率遥感影像处理分析的发展方向。

21 世纪是一个空间的时代、信息化的社会，随着我国航天技术的发展，我国也必将发展迈入世界航天强国的行列。遥感数据的自动化处理、专题信息的智能化提取、物理参数的定量化反演等将成为关键性的研究领域。我相信，该书的出版将会是我国高空间分辨率遥感研究事业中的一件大事，同时期望高空间分辨率遥感取得更大的发展。

周成虎
2008年11月4日

前 言

在《遥感影像地学理解与分析》专著出版后的八年多时间里,对地观测技术得到了空前的发展,已成为 21 世纪最具发展潜力的战略性高技术领域之一,并是国家竞争力的重要体现。美国、欧盟等都已经或正在构建天地一体化的高分辨率对地观测体系,对地观测的约束条件越来越少,数据获取越来越快捷、智能,更新能力不断提高,应用领域的深度和广度不断拓展。我国《中长期科学和技术发展规划(2006~2020 年)》、《航天发展规划》等均对发展高分辨率对地观测系统做出了部署,从太空、临近空间、航空、地面等多层次立体观测平台上获取高分辨率遥感数据,再通过对空间数据信息产品的规模化加工,建立起综合性的应用与服务系统,从而满足社会各界的广泛应用需求,推动空间科技和空间信息产业的快速发展,促进我国高分辨率对地观测系统的可持续发展,将我国建设成为对地观测的应用强国、技术强国和科学强国。

高空间分辨率是高分辨率遥感的重要体现之一,也是目前广大应用者普遍关注的指标,而高空间分辨率卫星遥感所具有的巨大军事价值和经济效益,更引起全球军事和民用应用领域的高度重视,已成为经济建设、国防安全和社会大众信息服务等方面最重要的空间信息源,也是空间信息产业规模化发展的信息支柱。信息提取与目标识别是高空间分辨率遥感从数据转换为信息,进而服务于各行各业的中间环节,也是整个高分辨率遥感应用服务链的核心技术。高空间分辨率卫星遥感影像中的目标地物信息表现丰富和多样,具有精细的地物空间结构和分布信息。同时,其数据量巨大,背景信息复杂,噪声干扰严重,“同物异谱”和“异物同谱”现象明显,使得高精度、高效率目标自动识别成为很大的技术难点,是开展大规模高分辨率遥感应用的“瓶颈”。因此,近年来高空间分辨率遥感影像处理与分析已成为遥感科学研究的热点与前沿。在本书中,为了便于描述方便,我们将高空间分辨率遥感简称为“高分辨率遥感”,高光谱遥感等不在本书研究范畴。

长期以来,中国科学院地理科学与资源研究所资源与环境信息系统国家重点实验室“高性能空间计算”研究团队,以遥感影像地学分析研究为核心,在结合城市环境、海岸带等遥感综合性应用研究工作的基础上,逐步深入到高空间分辨率遥感影像分析与计算的研究领域,提出了面向特征基元的高效能遥感信息计算理论方法体系,研制、开发了遥感信息提取与目标识别原型系统。本书的出版,既是团队对近年来高

空间分辨率卫星遥感信息提取和目标识别研究成果的系统总结与提炼,也是团队从事高空间分辨率遥感信息计算研究的一个新起点。本书传承了智能化遥感影像地学理解与分析的基本思想,针对高分辨率卫星遥感信息的特点,从理论方法和应用实践上对基于特征基元的遥感影像处理与分析问题进行了深入探讨,建立了高空间分辨率卫星遥感信息计算方法与技术体系,重点研究了高空间分辨率遥感特征基元计算方法和高效能计算环境下目标识别的具体实践与应用,试图为实现高空间分辨率卫星遥感高效率、高精度、自动化信息计算提供理论和方法基础。

全书以高空间分辨率卫星遥感影像分析与计算的基础理论方法、计算技术和应用系统为主线展开,各章节具体内容和撰写分工如下:第一章介绍了国内外高分辨率卫星遥感技术的发展,并通过对高分辨率卫星遥感影像信息处理难点的分析,提出面向信息提取和目标识别的遥感影像信息计算的研究思路,由周成虎、骆剑承撰写;第二章论述了高分辨率遥感信息分析与计算的基础理论和方法,重点阐述基元、格局和尺度等基本概念问题及其理论方法,提出了“像元-基元-目标”的信息提取方法体系及其高效能计算模型,由骆剑承、周成虎、明冬萍撰写;第三章探讨了高分辨率遥感影像的分割方法,由陈秋晓、周成虎、郑江撰写;第四章阐述了特征基元模型基础上的影像计算方法,开展了具体特征基元提取和目标识别等模型方法及其应用的研究,并介绍了目标识别原型系统的设计开发思路,由骆剑承、明冬萍、沈占锋、汪闽撰写;第五章展望了高效能计算环境下分布式遥感影像处理与分析的探索研究方向,提出了目标识别系统的网格化发展思路及其网络服务模式,介绍了分布式目标识别系统的集成与应用,由沈占锋、骆剑承撰写。周成虎和骆剑承负责全书定稿。

在写作过程中,还得到许多专家、学者的大力协助,特别感谢香港中文大学梁怡教授、西北工业大学张艳宁教授、中国科学院对地观测与数字地球科学中心郭华东研究员、中国科学院遥感应用研究所龚建华研究员、四川师范大学杨存建教授、中国科学院地理科学与资源研究所杨晓梅博士和苏奋振博士,他们给予作者大量理论和方法上的指导,并提供了大量的宝贵资料。感谢资源与环境信息系统国家重点实验室同仁给予的热情支持和帮助。罗正琴、程熙、吴炜、郇丽静、乔程、刘雯等为本书的修改、编排也做了大量工作,在此表示感谢。

由于作者才疏学浅,书中难免存在错漏和不足之处,殷切希望同行专家和读者给予批评指正。

目 录

序

前言

第一章 高空间分辨率卫星遥感技术的发展	1
1.1 高空间分辨率遥感卫星系统的发展	2
1.2 高分辨率卫星遥感应用的发展与挑战	11
1.3 高分辨率遥感影像分析、理解与计算	14
第二章 高分辨率遥感影像计算的理论基础	27
2.1 空间计算与遥感影像计算模式	27
2.2 特征基元的尺度选择与转换	37
2.3 特征基元的复杂度判别分析	57
2.4 特征基元的空间格局判别分析	63
2.5 面向特征基元的高分辨率遥感影像计算	78
2.6 高效能遥感影像计算	82
第三章 高分辨率遥感影像分割	95
3.1 遥感影像分割方法综述	95
3.2 RPCCL 聚类分割法	98
3.3 区域增长与合并分割法	105
3.4 GMRF 分割与小波分割法	119
3.5 遥感影像分割算法的集群化	131
3.6 整合波谱和空间特征的快速分割法	155
第四章 遥感影像特征基元计算与地物目标识别	174
4.1 特征基元表达方法	174
4.2 特征基元分类方法	186
4.3 神经网络分类算法的并行化	198

4.4	目标区域划分与特征基元提取方法	211
4.5	高分辨率遥感影像分析与计算系统	226
4.6	典型地物单元识别案例	241
第五章	分布式目标识别系统的探索研究	255
5.1	目标识别系统的网格化发展	255
5.2	目标识别系统的网络服务模式	266
5.3	TARIES 分布式系统的应用集成	276
主要参考文献		292

第一章 高空间分辨率卫星遥感技术的发展

自 1957 年苏联发射第一颗人造地球卫星以来,世界各国已向太空发射了 5000 多颗卫星或空间飞行器,其中相当一部分用于对地观测;1960 年美国发射的第一颗气象卫星掀开了人类对地观测的新时代。从太空观测地球并获取其影像,是 20 世纪人类的重大技术进步,卫星遥感已成为人类观察、分析、描述所居住地球环境的行之有效的手段。经过 50 年的发展,航天与航空、探空火箭与气球等遥感技术体系,构成了多维、立体、动态的全球综合观测系统,为人类认识地球系统、开发资源、保护环境、监测灾害、分析全球变化等找到了新的途径。

卫星遥感是综合对地观测的重要组成部分,也是国际对地观测技术竞争的关键点之一,呈现出“三高”(高空间分辨率、高光谱分辨率和高时间分辨率)和“三多”(多平台、多传感器和多角度)的发展趋势(李德仁,2003),一个多层次、多角度、全天候、多分辨率互补的全球观测网络正在逐步形成。对地观测卫星遥感影像的空间分辨率在 20 世纪每十年提高一个数量级,1~5m 的空间分辨率已经成为 21 世纪前十年新一代民用遥感卫星的基本指标;中等空间分辨率遥感卫星的时间分辨率已经达到 1 天以内,意味着人类已经具备每天对地球任意区域进行卫星监测的能力;遥感卫星的光谱分辨率已经从 20 世纪 70 年代的 50~100 μm 发展到目前的 5~10 μm ;能够穿透云层和植被的微波遥感及其自动测图技术,使人类不受天气的影响,实现全天候对地观测。

高空间分辨率卫星遥感所具有的巨大军事价值和经济效益,引起了全球民用与军事应用领域的高度重视,商业化遥感卫星的发展掀开了高空间分辨率卫星遥感及其应用的新时代。在 20 世纪 90 年代“冷战”结束以后,俄罗斯将原苏联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,美国政府也于 1994 年取消了对 10~1m 级的空间分辨率卫星遥感数据的商业销售禁令。特别是美国政府在 2003 年发布了美国商用遥感新政策,明确地将商业高分辨率遥感卫星影像纳入到国家影像体系之中,政府明文规定各部、局要充分利用商业高分辨率卫星影像。美国这一新政策的主要目的是扶持本国商业高分辨率卫星产业,促进这一技术及其应用的进一步发展,以民养军,以获得最大的经济利益与军事效益。同时,美国的政策也客观上促进了全球高分辨率遥感卫星的发展。当前,几乎任何人都能在互联网上浏览其所在城市的高分辨率卫星影像,甚至可以识别出人们的居住地,高分辨率卫星遥感影像已进入百姓的日常生活之中。在科学研究方面,高分辨率遥感影像处理和分析也成为遥感科学研究的热点与前沿。

1.1 高空间分辨率遥感卫星系统的发展

广义的高分辨率涵盖高空间分辨率、高时间分辨率、高光谱分辨率和高辐射分辨率四方面内容，而狭义的高分辨率多指高空间分辨率。就当前看，高空间分辨率遥感卫星是指空间分辨率优于 5m 的卫星系统。但随着遥感技术的进步和发展，高空间分辨率遥感卫星的技术指标将会进一步提高，达到亚米级。本书主要研究和分析米级的高空间分辨率卫星遥感影像，为方便描述，以下各章节均采用狭义的高分辨率遥感概念。

随着航天技术的发展与遥感器性能的不断改进，尤其是商用小卫星的快速发展，卫星遥感影像的空间分辨率已经发展到了一个崭新水平。自 1999 年美国空间成像公司(Space Image)发射世界首颗商业高分辨率遥感卫星 IKONOS 以来，世界各国竞相研究和开发高分辨率遥感卫星。目前，在轨运行的各种民用高分辨率遥感卫星有十余颗(表 1-1)。例如，法国 SPOT 5 的可见光传感器 HRV 的地面分辨率由 10m 提高到 2.5m，德国 SAR-Rupe 计划中的雷达卫星的空间分辨率达到 1m 分辨率，以色列于 1997 年发射的 EROS 2B 的分辨率为 1m，俄罗斯的侦察卫星 SIS 和俄罗斯国家资源机关属下由军方开发的 Resource F-3 卫星所用 KVR-1000、DK-5 和 KFA-3000 型的分辨率都达 2~3m。此外，南非、西班牙、韩国、日本、台湾等国家和地区都已经或计划发射各自的高空间分辨率系列小卫星。

表 1-1 国际高分辨率遥感卫星技术参数

卫星名称 (国家/地区)	重量/kg	寿命/a	高度 /km	倾角/(°)	重访/覆盖 周期/d	有效载荷性能		
						类型	幅宽/km	分辨率/m
SPOT 5(法)	2755	5	832	98.7	1~2	CCD	60	2.5, 5, 10
EROS 1A(以)	250		480		4	CCD	12	1.8
EROS 2B(以)	350	2	600	97.3	4	CCD	16	0.8
IRS-P 5(印)	1560	5	618	97.87	5	CCD 摆扫	30	2.5
QuickBird(美)	825	7	450	98	3~5	CCD	16.5	0.61, 2.44
OrbView-3(美)	356	5	470	98.3	2.5	CCD	8	1, 4
IKONOS-1(美)	817	5	674	98.2	3	CCD	11	1, 4
ROCSAT(台)	620	5	891	98.99		CCD	60	2, 15
ALOS(日本)	4000	3~5	691	98.16	46	CCD	35, 70, 350	2.5, 10, 7~100
NEMO(美)	574	3~5	605	97.81	2.5~7	CCD 高光谱	30	5, 30

近 5 年内, 全球计划发射的高分辨率卫星有数十颗(见表 1-2), 不仅高空间分辨率的光学卫星发展迅速, 而且高分辨率的合成孔径雷达也得到不断发展。美国数字地球公司继“快鸟”卫星的成功运作后, 分别于 2006 年、2008 年发射具备优秀机动性和几何定位精度、分辨率优于 0.5m 的商业遥感卫星 WorldView-1 和 WorldView-2; 法国的 Pleiades 小卫星预计在 2008 年和 2009 年各发射一颗, 幅宽 20km, 星下点分辨率全色 0.7m, 多光谱(4 波段)2.8m; 德国发射 Terra-SAR 雷达卫星, 其点模式地面分辨率 1~3m, 幅宽 10km; 条幅模式地面分辨率 3~15m, 幅宽 40~60km; 宽扫描式地面分辨率 15~30m, 幅宽 100~200km。

表 1-2 国际主要高分辨率卫星计划一览表

国 家	卫星名称	发射时间	载荷类型	空间分辨率/m	其他特点
俄罗斯	Resource-DK	2005	光学	全色 1, 多光谱 2~3	星上记录能力 140G
美国	WorldView-1 WorldView-2	2006, 2008	光学	优于 0.5	机动性强、 几何定位精度高
加拿大	Radarsat-2	2006	雷达	3	多极化
德国	Terra-SAR	2006, 2008	雷达	1	多极化
法国	Pleiades	2008, 2009	光学	0.7	机动性强
意大利	Comos-Skymed	2006	雷达	1~100	星座组网

1.1.1 IKONOS 遥感卫星

美国空间成像公司的 IKONOS-2 卫星已于 1999 年 9 月 24 日发射升空, 成为世界上首颗提供优于 1m 分辨率的商业光学遥感卫星(卫星参数见表 1-3)。该卫星由洛马公司研制, 设计寿命为 5~7 年, 长、宽、高为 1.83m×1.83m×1.57m; 卫星轨道为太阳同步轨道, 重复周期 1~3 天; 下降角在上午 10:30, 卫星在地面上空速度是 6.79km/s, 每分钟可拍摄超过 2000km² 的地面范围; 卫星采用本体旋转同步取样方式进行倾斜摄影, 最大倾角可达 40°, 并具有立体测图能力。图像数据可实时下传给有关地面站, 或暂存在星载固态存储器上待机下传。

IKONOS 的 CCD 数字相机系统由美国依斯曼柯达公司研制, 包括一个光学 1m 分辨率遥感器和一个 4 波段 4m 分辨率的多光谱遥感器, 系统总重 171kg, 焦距 10m, 主镜直径 0.7m, 能同时拍摄优于 1m 分辨率全色图像和 4m 分辨率的多波段图像, 地面成像带宽 11~13km。全色和多光谱共享一个光学系统, 彼此在 0.5s 之内同时获取图像。遥感器由 3 个 CCD 阵列构成三线阵推扫成像系统, 全色和多光谱相机的视场角均为 0.931°。在标准设计情况下(即在 681km 高的赤道上空), 全色和多光谱相机的地面像素大小分别为 0.82m 和 3.26m, 以 11 个比特记录地面反射的强度(灰度)。

表 1-3 IKONOS 基本参数

发射日期	1999 年 9 月 24 日
发射平台	雅典娜 2 号
发射地点	美国加利福尼亚范登堡空军基地
卫星制造商	Lockheed Martin
传输及数据处理系统制造商	Raytheon
光学系统制造商	Kodak
轨道高度	681km
轨道倾角	98.1°
轨道运行速度	6.5~11.2km/s
影像采集时间	每日上午 10:00~11:00
重访频率	1m 分辨率数据: 2.9d
	1.5m 分辨率数据: 1.5d
轨道周期	98.3min
轨道类型	太阳同步
重量	817kg

IKONOS 传感器是三线阵 CCD 推扫式成像, 相机光轴可左右向或前后向偏转 $\pm 45^\circ$, 从而保证在很大范围内获取所需地点的单视图像或在同一圈轨道上获取立体像对。在正常模式下, 它可取得正视、后视和前视推扫成像。在三线阵构成的单个生产锥体内, 相应地面区域可在 9 分钟内完成该地面窗口的推扫成像, 其在底点上的推扫宽度为 11~13km(对应于地面分辨率 0.82~1.0m); 在偏离底点推扫成像模式下, 可以构成准核线的立体图像, 而且中间图像与前或后图像组成不同立体, 同时提供三维测量的能力。

IKONOS 卫星升空后, 经过近 100 天的调整和试验, 于 2000 年 1 月 3 日正式发布销售图像。IKONOS 图像产品分为 GeoTIFF 和 NITF2.0 两种格式, 投影系统和椭圆参数也可按用户实际需要和实际情况来选择。自 2006 年 1 月 ORBIMAGE 公司成功收购空间成像公司, 并创办了 GeoEye 公司以来, GeoEye 将 IKONOS 影像的精度分为不同级别。在每一个交付的 IKONOS 影像产品中用 90% 圆点误差 (CE90) 表示精度, 例如 2mCE90, 即影像中 90% 以上两点之间测得的结果与实测值之间的误差在 2m 以内; 同时也采用均方根误差 (RMSE) 和美国国家地图精度标准 (NMAS)。根据这些标准, IKONOS 影像产品可分为 Geo、Standard Ortho、Reference、Pro、Precision 等。

(1) Geo: 该类产品经过了几何纠正, 即通过统一的地面采样间距 (GSD) 和地图投影来调整影像, 以消除影像在采集过程中引起的几何变形。Geo 产品没有经过拼接和调色。IKONOS 影像 1m 和 4m 分辨率的 Geo 产品可用于浏览和应用, 如有价资产

评估和影像浏览。

(2) Geo Ortho Kit: 该类影像产品是专门为需要定位精度的专业客户而制作的, 影像采集时的摄像机几何参数也一起提供。Geo Ortho Kit 产品可以让用户通过使用商业 COTS 软件, 利用数字高程模型和地面控制点制作出高精度的正射产品。IKONOS 采集 1m 和 4m 的 Geo Ortho Kit 产品的高度角在 $60^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 范围内, 为了提高最终正射纠正影像的位置精度, 用户可要求提高 IKONOS 采集角至 $72^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 。

(3) Standard Ortho: 该产品是为 GIS 专业基础制图和影像分类分析而设计制作, Standard Ortho 产品的精度要高于 Geo 产品, 分发速度也较之要快一些, 成本却低于其他正射校正产品。

(4) Reference: 该产品适合大地区制图和中比例尺正射校正影像产品制图应用。Reference 影像产品经过正射纠正和拼接处理, 最低圆点误差为 25mCE90。

(5) Pro: 该产品针对地面控制点采集困难的地区。在无地面控制点条件下, 1m 和 4m 的 Pro 产品的原点误差为 10mCE90。

(6) Precision: 该产品可支持大范围及大比例尺城市规划项目, 可满足 1:4800 比例尺的精度。为了增加精确度, SI 利用地面控制点和高质量的高程模型对影像进行处理, 圆点误差为 4.1mCE90。

(7) 立体产品: 立体影像可以提供 1m 分辨率的 Reference 和 Precision 两种类型产品数据。SI 提供的立体像对都带有 RPC 参数, 每个立体像对都有一个低采集角(大于 60°)和一个高采集角(大于 70°)两个影像, 两者之间为 $30^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 角。Reference 立体产品横向精度为 25mCE90, 纵向精度为 22mCE90。Precision 立体产品横向误差为 4mCE90, 纵向误差为 5mCE90。

1.1.2 QuickBird 遥感卫星

数字全球公司(Digital Global)的“快鸟”(QuickBird)卫星已于 2001 年 10 月 18 日发射升空, 为当今全球最高分辨率的商业遥感卫星(详细参数见表 1-4)。该卫星由鲍尔航天技术公司(Ball Aerospace & Technologies Corp)、柯达公司和福柯空间公司(Fokker Space)联合研制, 由 Delta II 运载火箭携带发射升空。卫星为太阳同步卫星, 重 953kg, 长约 3m, 设计寿命为 7 年; 轨道高度为 450km, 倾角为 98° , 卫星重访周期为 1~3.5 天, 轨道周期为 93.4min, 其视角沿轨道方向和垂直轨道方向均可调整; 成像方式为本体旋转同步取样方式; 每轨拍摄约 57 景, 主要景幅宽星下点为 16.5km, 可达到的地面宽度为 544km; 卫星姿态控制系统为三轴稳定、恒星跟踪稳定、惯性平台、飞轮、GPS 系统联合控制, 卫星图像目标定位精确, 有少量地面控制点时精度可达 2m; 星载固态数据记录仪的存储容量为 128GB。

表 1-4 美国 QuickBird 卫星及所携传感器

卫星及轨道		波段及波谱范围/nm		地面分辨率/m
轨道类型	太阳同步	Band 1	450~520	2.44
轨道高度	450km	Band 2	520~600	2.44
运行周期	93.4min	Band 3	630~690	2.44
像元比特数	11bit/s	Band 4	760~900	2.44
幅宽	16.5km	全色	445~990	0.61
重量	953kg			
降交点时间	10:00			
扫描角	$\pm 25.5^{\circ}$			
立体成像能力	沿轨/横轨方向			
精度	14m(RMSE)			
星上存储器	128G			

卫星遥感器为推扫式线性 CCD 数组, 具有 30° 倾斜侧视能力。遥感器分辨率与光谱波段技术参数分别为: 全色星下点影像空间分辨率为 0.61m, 光谱范围 445~990nm; 多光谱星下点影像空间分辨率为 2.44m, 光谱范围分别是 450~520nm(蓝波段)、520~600nm(绿波段)、630~690nm(红波段)和 760~900nm(近红外)。在没有地面控制点的情况下, 地面定位圆误差精度可达 23m; 采用 11bit/s 数据格式, 增加了灰度级数, 减少了阴影部分信息的损失。

1.1.3 SPOT 5 遥感卫星

法国分别于 1986 年、1990 年、1993 年、1998 年、2002 年发射了 SPOT 1、2、3、4、5 共 5 颗卫星。2002 年 5 月 3 日发射升空的 SPOT 5 是该卫星家族中最耀眼的一颗卫星。与前几颗卫星相比, SPOT 5 具有不可比拟的优势: 空间分辨率几乎提高了一个数量级, 最高可达 2.5m; 采用了 DORIS 轨道定位系统和卫星姿态跟踪测算调整技术, 使 SPOT 5 卫星的绝对定位精度提高到数十米以内; 以前后模式实时获取立体像对, 具备立体测绘能力; 在数据压缩、存储和传输等一系列技术方面均有显著提高。

SPOT 5 卫星搭载了高分辨率几何成像仪(HRG)、植被探测器(VEGETATION)和高分辨率立体成像仪(HRS)3 种先进的遥感器。HRG 采用了像元尺寸为 $6.5\mu\text{m}$ 的线阵 CCD 传感器, 可提供 2.5m 和 5m 分辨率的全色波段($0.49\sim 0.69\mu\text{m}$)、10m 分辨率的多光谱(绿: $0.50\sim 0.59\mu\text{m}$; 红: $0.61\sim 0.68\mu\text{m}$; 近红外: $0.79\sim 0.89\mu\text{m}$)和 20m 分辨率的短波红外波段($1.58\sim 1.75\mu\text{m}$)。这些波段基本覆盖了沙土、水体、植被、冰雪等主要地物特征的响应峰值。

SPOT 5 的 2.5m 分辨率的全色影像采用了先进的亚像元成像处理技术。在 HRG 的同一焦平面上放置两个 12000 个像元的线阵 CCD 传感器,两个线阵传感器在沿卫星飞行方向和垂直于飞行方向均相互错开 $1/2$ 个像元。两个线阵 CCD 传感器可同时获取同一地区两幅 5m 分辨率的影像,两个 CCD 相机错位半个像元成像,通过地面处理,可以获得 2.5m 分辨率的影像。

SPOT 5 卫星搭载一个专门用来获取像对的高分辨率立体成像仪(HRS)。HRS 配有前视和后视两套光学望远镜系统,焦距为 0.58m,共用一个像元尺寸为 $6.5\mu\text{m}$ 的 12000 个像元的线阵全色波段 CCD 传感器,其前向和后向视角均为 20° ,立体像对的最大覆盖范围为 $120\text{km} \times 600\text{km}$;其 DORIS 高精度定位技术、恒星观察姿态角测量技术和同轨立体观测技术等集成使 SPOT 5 HRS 影像与其他高分辨率遥感影像相比,在正射影像、DEM、空三测量与区域网平差、稀少或无控制纠正等方面,技术更全面,更具有代表性,成为卫星测绘具有革命性的成就,为测绘提供了一种有效的先进技术手段。

SPOT 5 影像数据为 DIMAP 格式,包括影像文件(image data)和参数文件(metadata)。影像文件为 GeoTIFF 格式,表达为 Imagery.tif,绝大多数商业软件和 GIS 软件均支持该数据格式;参数文件为 XML 格式,表达为 Metadata.dim,可以用任何网络浏览器阅读。

1.1.4 印度 IRS 系列卫星

印度是世界上少数几个成功开发、发射并运行本国遥感卫星的国家之一。从 20 世纪 80 年代中期开始,印度开始研发自主遥感卫星系统(IRS),并于 1988 年发射了 IRS-1A,1991 年发射了性能相同的 IRS-1B,IRS-1A/B 都装备了分辨率为 72.5m 和 36.25m 的多光谱传感器,分别与 Landsat 的 MSS 和 TM 相当。卫星携带的线性图像自扫描传感器(LISS)共有 4 个光谱波段,这些波段相当于 TM 的 Band 1~Band 4,十分适用于植被识别和土地覆盖制图。1995 年和 1997 年发射的 IRS-1C 和 IRS-1D,装备了分辨率为 23m 的多光谱传感器 LISS-III、分辨率为 5.8m 并具备立体成像能力的全色波段传感器 Pan 和分辨率为 188m 的宽视场传感器 WiFS 三种遥感器。LISS-III 和前两颗卫星的 LISS-I、LISS-II 相比,不仅分辨率提高,波段也作了调整,去掉了相当于 TM 1 的蓝波段,增加了相当于 TM 5 的短波红外波段,调整后的波段能产生更实用的一些波段组合。Pan 用于高分辨率和立体成像,而 WiFS 则可进行大范围的遥感观测,WiFS 所选波段和美国 NOAA 卫星 AVHRR 的两个通道接近。2003 年 10 月,印度发射 RESOURCESAT-1(P6),卫星搭载了多光谱传感器 LISS-4 和 LISS-3 以及高级广角传感器 AWiFS 3 种传感器(表 1-5)。LISS-4 传感器具备全色(MN)和多光

谱(MX)两种工作模式；在 MN 模式下，传感器可传送波段 2、3、4 中任意一个波段数据。传感器可侧视 $\pm 26^\circ$ ，相当于地面 $\pm 398\text{km}$ 的范围。

表 1-5 印度 P6 LISS-3、LISS-4、AWiFS 传感器特性

传感器	LISS-4	LISS-3	AWiFS
CCD 数目	每波段 1 个 12000 探元 CCD	每波段 1 个 6000 探元 CCD	每波段 2 个 6000 探元 CCD
波段频谱	波段 2: $0.52\sim 0.59\mu\text{m}$ 波段 3: $0.62\sim 0.68\mu\text{m}$ 波段 4: $0.77\sim 0.86\mu\text{m}$	波段 2: $0.52\sim 0.59\mu\text{m}$ 波段 3: $0.62\sim 0.68\mu\text{m}$ 波段 4: $0.77\sim 0.86\mu\text{m}$ 波段 5: $1.55\sim 1.70\mu\text{m}$	波段 2: $0.52\sim 0.59\mu\text{m}$ 波段 3: $0.62\sim 0.68\mu\text{m}$ 波段 4: $0.77\sim 0.86\mu\text{m}$ 波段 5: $1.50\sim 1.70\mu\text{m}$
幅宽/km	23.9(MX 模式，在 70 范围内可调)； 70(MN 模式)	141	737
几何分辨率/m	5.8(星下点)	23.5	56(星下点)， 70(边缘)
侧视能力	$\pm 26^\circ$	无	无
波段配准精度/p	<0.25	<0.25	<0.25
重访周期/d	5	24	5

印度于 2005 年 5 月成功发射了高分辨率测绘卫星 CARTOSAT-1(P5)，该卫星搭载有两个分辨率为 2.5m 的前-后视全色 CCD 相机，两个相机可提供立体像对，卫星带有精确的姿态和轨道控制系统(AOCS)，利用立体航带空三测量模块处理数据与地面控制点数据库数据，能测绘 1：1 万比例尺的地图。

1.1.5 中国民用高空间分辨率遥感卫星

中巴地球资源一号(CBERS)02B 卫星于 2007 年 9 月 19 日发射升空，成为我国第一颗民用高空间分辨率遥感卫星，也是第一颗同时具有高、中、低三种空间分辨率载荷的资源卫星(表 1-6)。该卫星载有空间分辨率为 2.36m 的光学相机，成像幅宽 27km。2008 年 1 月 29 日卫星数据正式对用户发布，图像清晰，质量较好，达到总体技术要求。在不同试验场得到的辐射定标系数结果基本一致，表明相机辐射响应基本稳定，发射后绝对辐射定标系数具有较高的实用价值，并具有一定的量化反演能力。02B 星 HR 数据可满足 1：5 万资源与环境调查、制图的精度要求。