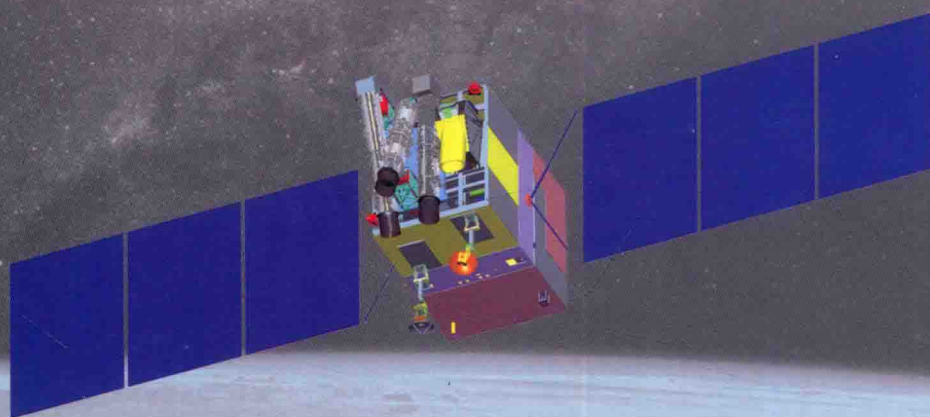


卫星测绘系列专著

# 资源三号卫星 测绘技术总体设计

唐新明 孙承志 高小明 等 / 著



科学出版社

卫星测绘系列专著

# 资源三号卫星 测绘技术总体设计

唐新明 孙承志 高小明 等 著

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书是“卫星测绘系列专著”的第一册,书中针对我国资源三号卫星测绘技术总体设计问题,在介绍国内外光学测绘遥感卫星发展现状基础上,分析我国1:5万比例尺地形测图的需求,研究卫星立体测图的误差来源,阐述轨道、姿态、传感器畸变、影像压缩等因素对测图精度的影响,构建了立体影像仿真方法,提出满足测绘精度要求的卫星总体技术指标体系,并介绍了资源三号卫星发射后的在轨测试和总体指标实现情况。

本书紧密围绕卫星测绘总体设计技术展开,展示了资源三号卫星从总体精度分析到指标实现的全过程,实用性强,可作为测绘、遥感、摄影测量专业及其他相关专业的工程技术人员研究参考书。

审图号:GS(2017)3095号

### 图书在版编目(CIP)数据

资源三号卫星测绘技术总体设计 / 唐新明等著. —北京:科学出版社, 2018.1

(卫星测绘系列专著)

ISBN 978-7-03-054033-1

I. ①资… II. ①唐… III. ①遥感卫星—航天摄影测量 IV. ①V474.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第180943号

责任编辑:彭胜潮 赵 晶 / 责任校对:张小霞

责任印制:肖 兴 / 封面设计:黄华斌

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

\*

2018年1月第一版 开本:787×1092 1/16

2018年1月第一次印刷 印张:16 1/4

字数:382 000

定价:118.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 序 一

人类的活动 80% 和空间位置相关。随着对地观测技术水平的提高, 人民的生活、政府的决策越来越依赖空间信息。现在, 老百姓的出行很多都依靠导航电子地图, 几乎各行各业都需要地理空间信息服务, 政府的规划、管理和决策均离不开地理空间信息。在现代生活中, 我们大家越来越需要精准的地理空间信息服务。

遥感影像是地理空间信息的基本组成部分。随着对地观测技术的不断发展, 光学卫星影像的分辨率和精度不断提高。资源遥感卫星从 20 世纪 70 年代发展至今, 以美国的陆地卫星为代表, 空间分辨率从最初的 70 m 到目前的 0.31 m, 短短 40 多年, 分辨率提高了约 200 倍。具有代表性的有 Landsat-5 卫星, 其分辨率为 30 m, IKONOS 卫星全色谱段分辨率 1 m, GeoEye 卫星全色谱段分辨率 0.41 m, WorldView-3 卫星全色谱段达到 0.31 m。目前, 美国军方还有分辨率更高的卫星。影像无控制点的平面定位精度从 Landsat-5 的 400 m 左右, 发展到 WorldView-3 的 2~3 m; 高程精度从法国 SPOT 5 的 30 m 提高到美国 WorldView-3 的 3 m 左右。在有控制点的情况下, 法国 SPOT 5 卫星的高程定位精度可以达到 5 m 左右, WorldView-3 则可以达到 1 m 以内。

除了光学遥感卫星之外, 其他类型的遥感卫星也如雨后春笋般涌现, 雷达卫星、激光测高卫星、重力卫星、电磁测量卫星等大批新型卫星发展迅猛, 使得卫星遥感测绘能力不断提升。2000 年, 美国发射的航天飞机搭载的 SRTM 系统, 实现了双天线雷达干涉测量, 短短的 11 天内对全球 80% 的陆地表面进行了高精度地形测绘, 高程精度达到 16 m。目前德国的 TerraSAR-X 卫星与 TanDEM-X 构成卫星星座, 提供网格尺寸 12 m、高程精度 4 m 的数字高程模型数据。美国的 ICESat 卫星采用激光测高仪获取地面高程点, 高程精度可以达到 0.15 m。

我国的对地观测技术也取得了大力发展。1999 年发射首颗中巴地球资源卫星, 其影像分辨率达到 20 m, 定位精度在 1.4 km 左右; 资源一号卫星 02B 星的分辨率达到 2.36 m, 无控制点的定位精度达到 700 m。

卫星测绘对我国的测绘事业发展起着举足轻重的作用。但直到 20 世纪末、21 世纪初, 我国的地形测绘主要还是依靠航空摄影测量, 由于天气、空域等方面的影响, 航空摄影测量的效率一直不是很高, 每年完成的航空摄影测量的面积只占国土面积的 10% 左右, 致使我国 1:5 万地形图的更新周期在 10 年以上。在国民经济迅猛发展的时期, 10~20 年的更新周期完全不能满足国家需求。和航空摄影测量相比, 航天摄影测量可以不受地域和时间的限制, 而且一次成像可以获得大范围的遥感影像, 大大缩短成图周期。

我国对测绘卫星发展非常重视, 从 20 世纪 90 年代就开展了相关方面研究。对卫星测绘来说, 分辨率和定位精度是两个最重要的方面。到 21 世纪初, 我国卫星影像的分辨率取得了较大突破, 但卫星定位的精度还是不高。如何提高卫星影像的定位精度迫在眉睫。在国家测绘地理信息局的领导下, 在国家国防科技工业局的鼎力支持下, 我国开展

了资源三号卫星的立项研制工作。资源三号卫星的核心是要解决卫星测图问题,能否测图的关键之一是卫星影像的定位精度和高程精度能否达到 1:5 万比例尺的要求。该书作者及其团队围绕这一问题,开展了大量的理论探索和实践,对涉及卫星影像精度的问题进行了全方位的梳理;他们对影响卫星影像精度的几乎所有参数都进行了论证和分析,并完成大量实验。实践证明,他们的工作是卓有成效的。资源三号卫星已经在轨运行近五年,经过地面几何检校和数据处理之后,卫星影像的无控制点定位精度从开始的 25 m 提高到目前的 10 m,高程精度从开始的 15 m 提高到 5 m;在有控制点条件下,影像的平面精度为 3~5 m,高程精度为 2~3 m。卫星影像的定位精度比原先的设计有较大提高,整体上完成了资源三号卫星测绘技术上的突破,全面实现了 1:5 万立体测图技术指标,获取大量的卫星影像,结束我国遥感卫星难以测图的历史,向国家交上了一份圆满的答卷,为我国的卫星测绘事业做出了重要贡献。

这套“卫星测绘系列专著”就是他们对这一工作的理论和技术总结。系列专著回顾了资源三号卫星的技术发展历程,开展了资源三号卫星的需求分析,在理论推导和仿真分析基础上,提出资源三号卫星的总体技术指标。系列专著的作者以满足高程精度要求为突破口,对卫星的几乎所有几何误差源进行了分析论证,包括卫星的轨道误差、姿态误差、CCD 安装误差以及成像模型误差等方面进行了深入地探讨,建立了资源三号卫星的轨道模型、姿态模型、CCD 指向角模型,提出了卫星几何检校的方法,构建了高精度的严密成像模型和有理函数模型,实现了国产 1:5 万立体测图。在此基础上,他们还建立了资源三号卫星数据处理系统、影像数据库管理系统和分发服务系统,完成资源三号卫星应用系统的工程化,处理后的卫星影像已经广泛应用于测绘、国土、水利、农业、林业、城市建设、环境保护和科学研究等诸多方面,实现我国卫星应用从试验应用到应用服务型的转变。

2015 年,我国发布了国家空间基础设施中长期规划,提出要发展更高精度、更高水平的测绘遥感卫星,包括资源三号后续卫星、1:1 万立体测图卫星、干涉测量卫星、重力测量卫星等,希望他们继续努力,不断创新,取得突破,谱写卫星测绘的新篇章,为实现卫星测绘强国梦而努力奋斗!

中国工程院院士 张祖勋

2016 年 9 月

## 序 二

岁月荏苒，光阴似箭。一眨眼，8年过去了。2008年资源三号卫星立项的情景还历历在目。如果从2004年开展资源三号卫星的前期论证算起，到现在已经有12年了。12年前，我们国家卫星遥感事业正处于蓬勃发展的起步阶段。那时候，资源卫星已经发射了01星、02星和02B星，环境减灾小卫星星座也已经起步。1999年中巴地球资源卫星的发射，开创了我国资源卫星的先河，为我国的生态环境监测与保护提供了大量的遥感影像。2007年资源卫星02B的发射，将我国卫星遥感的分辨率从20 m提高到2.36 m，实现了我国高分辨率民用遥感的突破。

然而，当时我国卫星影像的定位精度不高，影像质量欠佳。国产卫星影像的无控制点定位精度和国外同类卫星相比存在较大差距，影像直接定位误差有时甚至超过1 km，难以满足测绘等行业的精度要求。而法国的SPOT 5卫星影像的地面分辨率从原来的10 m提高到2.5 m，影像无控定位精度达到30 m左右；美国的IKONOS卫星影像分辨率达到1 m，无控定位精度达到12 m左右；这个精度可以直接满足1:5万地形图的测图和更新要求。GeoEye-1、WorldView-3等卫星的分辨率更是达到分米级，无控定位精度在10 m以内。由于国外卫星的影像质量和精度大大优于国产卫星，长期以来，我国每年不得不花费数亿美元采购国外卫星影像数据。高精度卫星影像数据基本依赖进口，使得我国的国家安全、民族权益难以得到有效保障，高质量、高精度遥感数据的获取已经成为制约我国测绘地理信息发展的最大瓶颈。

卫星测绘的难点是精度，如何在距离地球500 km的太空实现5 m的高程精度，是一项巨大的挑战。我和本书作者一起，从卫星的天地一体化大总体设计开始，不断探索卫星影像高精度定位的理论和方法。对摄影测量来说，卫星测绘实际上是航空摄影测量学向航天摄影测量学的发展。这种发展，不仅仅是从原来的中心投影变成多中心投影，还涉及卫星及载荷的参数设计、卫星发射过程以及在轨运行时参数的变化。因此，在卫星的总体设计时，必须仔细推敲所有可能发生的情况。航天摄影测量还有一个显著特点，就是卫星发射上天后，所有参数只能通过地面方法去验证，不可能像航空摄影测量那样拿回实验室重新测量。另外，航天摄影测量需要考虑过度参数化的问题，因为地面和卫星相距遥远，卫星平台和相机的参数都集中在卫星本体内，过度的参数化会导致模型的不一致性。需要考虑的问题很多，需要试验的内容也很多，需要解决的事情则更多。

通过几年的努力，我们终于厘清了1:5万光学卫星立体测绘的技术途径，以及影响成像质量与测图精度的主要因素。这套“卫星测绘系列专著”实际上就是我国首颗立体测图卫星进行技术攻关的结晶。针对立体测图卫星需要解决的各种问题，作者从卫星的指标设计与论证开始，提出了卫星测图误差指标分解方法，解决了卫星与传感器精度指标设计的理论难题，论证了资源三号卫星影像高程精度达到5 m的技术方案，构建了资源三号卫星的总体技术指标体系。在此基础上，建立高分辨率光学遥感卫星辐射几何—

体化仿真平台,构建星地闭环验证的卫星与传感器精度指标预估体系,解决了测绘卫星总体技术指标设计的仿真难题。针对卫星几何检校问题,提出了天地一体化几何检校技术和几何检校场建设方案,自主研制了高分辨率光学遥感卫星的几何检校系统,攻克了光学遥感卫星几何检校的技术难题,实现了我国高分辨率卫星几何检校技术的重大创新。针对卫星测图,提出了高精度的成像几何模型,实现了测绘卫星的高精度事后定姿和定轨,突破了航天摄影测量的大规模区域网平差技术、数字高程模型与数字正射影像高精度快速处理等核心技术,最终形成了基于资源三号卫星的1:5万立体测图技术体系。

资源三号卫星上天后,有关部门对卫星的总体技术指标、仿真系统、几何检校等诸多技术进行了一系列验证,全面证明了该书方法的可行性和可用性。由于卫星系统的改进,有些指标比最初设计得更为先进。

资源三号卫星已经顺利在轨运行4年多,在基础测绘、国土资源、生态环境、防灾减灾等多个领域发挥了巨大作用,已经成为测绘及相关部门不可或缺的数据源。

希望能发射更多、更好的测绘卫星,解决数据覆盖不足的问题。同时,也希望大家再接再厉,攻克更高精度的光学测绘卫星,发展更多的其他测绘卫星,为我国攀登世界卫星测绘高峰而努力奋斗!

中国科学院院士



2016年9月

## 前 言

测绘是对自然地理要素或者地表人工设施的形状、大小、空间位置(包括经度、纬度和高程)及其相关信息等进行测定、采集、表述,以及对获取的数据、信息、成果进行处理和提供的活动,是一个技术密集型行业。20 世纪末,人类在空间技术和信息技术领域取得了一系列重大突破,对测绘行业产生了新的变革,也正在全方位地影响着测绘的发展。对地观测系统的发展正深刻地改变着测绘产品的形式和地图更新的手段,卫星遥感数据已成为继航空摄影之后最重要的信息源之一,可被用于制作多种满足精度要求的测绘地理信息产品,为国民经济建设和社会发展、国家安全及人民生活等提供基础保障。

测绘卫星是遥感卫星的重要组成部分。一般来说,我们把能够制作测绘产品的、满足测绘精度要求的卫星称为测绘卫星,其主要特征是几何精度高,包括平面精度、高程精度及重力测量精度。按照工作方式划分,测绘卫星主要有 5 种类型,即高分辨率光学测图卫星、干涉雷达卫星、激光测高卫星、重力卫星和导航定位卫星。光学测绘卫星及雷达卫星可以用于多种比例尺地形图的测制;激光测高卫星主要用于获取全球高程点,甚至是直接获取数字高程模型;重力卫星主要用于反演地球重力场,提高高程基准精度;导航定位卫星主要用于获取地面物体的高精度平面和高程,为各种导航和定位提供服务。

测绘卫星是对地观测卫星中难度较大的卫星。卫星测绘的特点是高精度测量地球。除了要看清地球表面物体之外,还要满足可量测的要求。卫星测绘实际上是国家高新技术的标志。随着对地观测应用的进一步深入,各国都把测绘卫星的发展列为重点,并积极发展自主的测绘卫星。法国、美国、印度等国都制定了本国的高精度测绘卫星和卫星测绘的发展计划,已经发射了多颗高分辨率、高定位精度的卫星,并且其数据产品在包括中国在内的国家得到了推广应用。美国在全球卫星技术领域处于优势地位,高分辨率卫星连续发射,并且还将不断增加,仅在商业应用方面,在轨分辨率优于 1 m 的卫星已经达到 6 颗,其中 WorldView-3 卫星分辨率高达 0.31 m。美国卫星对地观测已根据不同的应用领域、应用尺度分工明确,形成了系列化、系统化和常态化的态势;同时美国卫星产业已经不单纯依靠政府出资,商业化卫星公司的运作模式较为成功。

相比而言,我国的测绘卫星还处于起步阶段,在卫星性能和星系运行体系上与国际先进水平尚存在一定差距,研制高分辨率立体测绘卫星的能力亟待加强。由于我国经济基础和工业基础还比较薄弱,基础工业水平,尤其是原材料、元器件和工艺技术等方面与发达国家尚有差距,并且发达国家对我国航天技术、航天材料等实行封锁和限制,致使我国超高、甚高分辨率测绘卫星,以及雷达测图卫星、重力测量卫星等的研制能力与美国、加拿大、法国、俄罗斯、德国等航天强国相比还有一定差距。过去,由于缺少高分辨率国产测绘卫星系统,我国卫星测绘长期处于零散状态,一直在利用国外高分辨率遥感卫星进行测图和资源调查。遥感数据源依赖于国外卫星,给我国测绘应用工作的顺利开展带来了极大限制,进一步深化发展具有我国自主知识产权的民用遥感卫星事

业迫在眉睫。

党和国家领导人对测绘工作高度重视,李克强总理在视察国家测绘地理信息局时指出,要发展我国的立体测图卫星。国家测绘局于2005年编制的《测绘部门“十一五”航天规划(草案)》中建议启动测绘卫星计划,研制发射我国自主的高分辨率测绘系列卫星,建立自主知识产权的测绘卫星综合应用服务体系。《国务院办公厅关于促进地理信息产业发展的意见》(国办发〔2014〕2号)指出:“用5至10年时间,使我国地理信息获取能力明显提升,发展测绘应用卫星,形成光学、雷达、激光等遥感数据获取体系,加强遥感数据处理技术研发,进一步提高数据处理、分析能力”。国务院已经批复的《国家地理信息产业发展规划(2013~2020)》指出:“要加快产业发展基础设施建设,加快我国卫星遥感基础设施建设,尤其是光学立体测图卫星、干涉雷达卫星、激光测高卫星等的建设”。我国是发展中国家,国民经济建设和社会发展迅速、变化频繁。为满足测绘部门和国民经济各部门对地理信息的需求,必须大力发展我国自主的测绘卫星,满足国家对地理信息的迫切需求。根据目前国内测绘卫星发展现状和国际遥感卫星发展趋势,以及国家基础测绘和地理信息产业发展的需求特点,我国测绘卫星的发展应在注重数据精度和保持连续稳定数据源的基础上,发展满足国民经济和社会发展、国家安全和人民生活需求的多种测绘卫星,服务政府、服务行业、服务大众。

在国家测绘地理信息局、国家国防科技工业局、国家发展和改革委员会、财政部以及国土资源部等多个部门的支持下,资源三号高分辨率立体测图卫星作为我国首颗民用测绘卫星,于2008年3月经国务院批准立项。卫星装载三线阵测绘相机,其中,正视全色相机分辨率2.1 m,前后视相机3.5 m,一台多光谱相机,分辨率为5.8 m;卫星基高比为0.89,轨道高度为505 km,回归周期为59天,重访周期为5天。卫星主要用于全国,乃至全世界高分辨率基础地理信息的获取,进行1:5万立体测图和1:2.5万地图修测,以及国土资源详查、区域地质、矿产资源调查等。卫星影像还将在城市规划和建设、生态环境调查、农业、林业、交通、通信等各个行业发挥巨大作用,为国土资源、生态环境和防灾减灾等领域服务。

自资源三号卫星发射以来,截至2015年年底,已累计获取原始数据6850轨,原始数据总量为1027.8 TB,影像数据为176万景。中国区域有效覆盖面积达1121万km<sup>2</sup>,已实现中国全国陆地国土面积98.8%的有效覆盖。全球范围内有效覆盖面积达7122.4万km<sup>2</sup>,有效覆盖率接近14%。资源三号卫星的成功应用,促使国外同类卫星影像及其产品的价格在国内大幅下降。

卫星测绘的难点是精度,如何在500 km的太空实现5 m的高程精度是一项巨大的挑战。在此之前,我国卫星影像在无控制点情况下的定位精度可以达到300 m左右,影像定位误差有时甚至超过1 km,影像常常需要数十个、甚至上百个控制点才能进行较高精度的平面纠正,影像质量和国外相比存在较大差距;国产卫星影像基本不能测图,无法满足测绘等高精度需求。

实现1:5万立体测图是资源三号卫星重大而艰巨的使命。笔者和项目组其他同仁一起,在院士和专家的大力帮助下,在航天科技集团五院以及相关单位的支持下,开展了艰难的探索。经过5年左右的技术攻关,资源三号卫星终于突破我国卫星测绘的技术难

题,建立起高精度光学卫星立体测图理论和技术体系,圆满实现了1:5万高精度立体测图,填补了我国民用自主高分辨率卫星测绘的空白,实现了我国资源卫星从难以测图到立体测图的技术跨越,促进了航天摄影测量学的发展,推动了我国航天测绘的关键技术创新。资源三号卫星打破国外的技术封锁和数据垄断,实现我国1:5万测绘从依赖国外卫星到使用国产卫星的根本性变革,使我国一举成为国际上少数几个掌握成套卫星测绘技术的国家,是我国测绘行业技术进步的划时代标志。

资源三号卫星几何数据处理的核心是航天摄影测量。过去,由于我国没有发射传输型测绘卫星,我国的航天摄影测量重点研究的是如何对国外已经处理好的传感器校正产品进行平差等处理,生成满足各种比例尺要求的地理信息产品。而在航天摄影测量中,特别是卫星指标体系设计和与卫星传感器相关的几何处理研究不多。王任亨院士提出了等效框幅的卫星设计方法,张祖勋院士提出了高精度影像匹配以及大区域网平差理论和方法,李德仁院士提出了发展我国测绘卫星的设想,刘先林院士建立的JX3、JX4摄影测量系统可直接用于卫星测图。胡莘、方勇等为测绘卫星的设计提出了不少建设性方案。

对航天摄影测量来说,我们不仅需要对卫星获取的影像进行平差、接边等数据处理,还需要对影响测绘精度的卫星参数进行总体设计和分析。卫星升空过程对卫星的几何参数将产生重要影响,卫星上天后,由于重力的释放,也使卫星的技术参数发生变化。为保证卫星的测绘精度达到要求,需要天地一体化的检校。这些问题是航天摄影测量与其他摄影测量的主要差别,也是航天摄影测量必须解决的难题。

“卫星测绘系列专著”实际上是摄影测量在航天领域的延伸,这种延伸不仅是从航空摄影测量到航天摄影测量的延伸,还包括卫星的精密定轨等大地测量学方面;是摄影测量在卫星指标设计、卫星精密定轨、卫星几何检校和数据处理方面对方法和技术的拓展。

本套系列专著是资源三号卫星测绘在理论、技术和实现方面的总结,共分三册。第一册是《资源三号卫星测绘技术总体设计》,主要分析卫星测绘误差的来源,研究卫星测绘的总体技术指标,从理论上推导卫星测图精度,并进行仿真分析,建立资源三号卫星影像仿真系统,并对模拟的影像进行测图精度验证。第二册是《资源三号卫星数据几何处理方法》,包括卫星轨道的数据处理、姿态的数据处理、成像模型的建立、卫星几何检校场建设方法和卫星几何检校方法,并对资源三号卫星实际的测图精度进行验证。第三册是《资源三号卫星影像产品及其应用》,重点阐述资源三号卫星各类各级产品的生产方法、流程,介绍资源三号卫星海量影像管理技术和服务系统构建技术,最后概括资源三号卫星影像产品的应用情况,包括在测绘地理信息、国土资源、农林水利、生态环境、城市建设、交通和防灾减灾等领域的应用情况。

本书是本套系列专著中的第一册,主要介绍资源三号卫星测绘技术总体设计。第1章绪论,主要介绍资源三号的总体设计和实现情况,由唐新明执笔。第2章国内外光学测绘遥感卫星概况,主要介绍国内外光学测绘遥感卫星现状和发展,由高小明执笔。第3章卫星需求分析和指标要求,主要介绍资源三号卫星的需求分析和指标要求,从基础测绘、资源调查等方面对立体测图卫星的需求进行了详细分析,由唐新明、孙承志、胡芬执笔。第4章几何精度理论分析,是指标精度分析,主要介绍光学测绘卫星的指标分析方法,由唐新明、黄文超执笔。第5章仿真分析方法,详细介绍了资源三号卫星几何

精度仿真技术，由张过、黄文超执笔。第6章是辐射几何一体化仿真，由岳庆兴、唐新明、邱振戈执笔。第7章仿真分析与验证，介绍卫星的仿真分析实验，由黄文超执笔。第8章影像压缩指标设计，介绍卫星影像压缩对测图精度的影响，由翟亮、高小明执笔。第9章仿真测图及精度分析，是卫星模拟影像的立体测图和结果分析，由潘红播执笔。第10章资源三号卫星在轨测试与验证，由唐新明、朱广彬执笔。全书由唐新明统稿，高小明和莫凡协助。

资源三号卫星已经顺利运行五年，本书的许多内容来自2004年开始的论证分析和卫星应用系统建设工程。由于本书时间跨度较长，当时的认识不够全面，虽然做了很多修改，但书中疏漏之处在所难免，请各位读者批评指正。

唐新明

2016年1月30日

# 目 录

序一

序二

前言

|                            |    |
|----------------------------|----|
| 第1章 绪论 .....               | 1  |
| 1.1 引言 .....               | 1  |
| 1.2 测绘卫星分类 .....           | 2  |
| 1.3 资源三号卫星总体情况 .....       | 3  |
| 1.4 资源三号卫星技术指标与实现 .....    | 4  |
| 1.5 资源三号卫星测绘的特点 .....      | 7  |
| 1.6 主要技术设计思路 .....         | 11 |
| 第2章 国内外光学测绘遥感卫星概况 .....    | 14 |
| 2.1 国外发展现状 .....           | 14 |
| 2.1.1 美国光学遥感卫星 .....       | 14 |
| 2.1.2 欧洲光学遥感卫星 .....       | 21 |
| 2.1.3 亚洲光学遥感卫星 .....       | 25 |
| 2.2 国内发展现状 .....           | 30 |
| 2.3 国内外光学遥感卫星发展特点与趋势 ..... | 36 |
| 第3章 资源三号卫星需求分析和指标要求 .....  | 40 |
| 3.1 卫星需求分析 .....           | 40 |
| 3.1.1 背景和意义 .....          | 40 |
| 3.1.2 需求分析 .....           | 47 |
| 3.2 指标要求 .....             | 61 |
| 3.2.1 卫星主要任务和使用要求 .....    | 61 |
| 3.2.2 平台指标要求 .....         | 63 |
| 3.2.3 传感器指标要求 .....        | 63 |
| 3.2.4 星地一体化指标要求 .....      | 67 |
| 3.2.5 工程化要求 .....          | 69 |
| 第4章 几何精度理论分析 .....         | 72 |
| 4.1 定位误差项分析 .....          | 74 |
| 4.1.1 定轨误差分析 .....         | 74 |
| 4.1.2 定姿误差分析 .....         | 76 |
| 4.1.3 相机误差分析 .....         | 81 |
| 4.1.4 时间误差分析 .....         | 84 |
| 4.2 几何精度理论分析 .....         | 85 |
| 4.2.1 成像几何关系分析 .....       | 85 |

|       |                |     |
|-------|----------------|-----|
| 4.2.2 | 轨道误差理论分析       | 88  |
| 4.2.3 | 姿态误差理论分析       | 88  |
| 4.2.4 | 内方位元素误差理论分析    | 89  |
| 4.2.5 | 平面精度理论分析       | 91  |
| 4.2.6 | 高程精度理论分析       | 91  |
| 4.3   | 几何精度理论分析结果     | 98  |
| 4.3.1 | 原始影像几何精度理论分析结果 | 98  |
| 4.3.2 | 传感器校正影像理论分析结果  | 99  |
| 4.4   | 存在的问题和后续的工作    | 104 |
| 第5章   | 仿真分析方法         | 105 |
| 5.1   | 国内外研究现状        | 105 |
| 5.2   | 轨道仿真           | 111 |
| 5.3   | 姿态仿真           | 115 |
| 5.3.1 | 姿态建模方法         | 116 |
| 5.3.2 | 标称姿态仿真         | 116 |
| 5.3.3 | 误差姿态仿真         | 118 |
| 5.4   | 内方位元素仿真        | 118 |
| 5.4.1 | 标称内方位元素仿真      | 118 |
| 5.4.2 | 误差内方位元素仿真      | 120 |
| 5.5   | 时标仿真           | 120 |
| 5.6   | 几何模型构建         | 120 |
| 5.6.1 | 几何成像模型正算       | 120 |
| 5.6.2 | 几何成像模型反算       | 121 |
| 5.7   | 定位精度仿真分析方法     | 122 |
| 5.7.1 | 平面定位精度分析方法     | 122 |
| 5.7.2 | 高程精度分析方法       | 123 |
| 5.8   | 影像仿真方法         | 124 |
| 5.8.1 | 影像重采样方法        | 124 |
| 5.8.2 | 影像仿真方法         | 127 |
| 第6章   | 辐射与几何一体化仿真     | 129 |
| 6.1   | 地面场景建模         | 129 |
| 6.1.1 | 几何描述及建模        | 129 |
| 6.1.2 | 辐射描述与建模        | 131 |
| 6.1.3 | 连续地面辐射场构建      | 133 |
| 6.2   | 仿真相机入瞳辐亮度计算    | 134 |
| 6.2.1 | 自然光源计算         | 135 |
| 6.2.2 | 入瞳辐亮度建模        | 136 |
| 6.3   | 大气折光与大气点扩散函数   | 138 |
| 6.4   | 相机静态MTF建模      | 140 |
| 6.4.1 | 相机静态MTF分解      | 140 |
| 6.4.2 | 相机静态MTF仿真方法    | 143 |

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| 6.5 TDI CCD 相机信噪比建模            | 144 |
| 6.6 相机静态辐射响应建模                 | 147 |
| 6.7 相机几何建模                     | 149 |
| 6.7.1 相机安装模型                   | 150 |
| 6.7.2 相机光学系统几何模型               | 150 |
| 6.7.3 探测器安装几何模型                | 151 |
| 6.8 轨道建模                       | 152 |
| 6.9 姿态建模                       | 153 |
| 6.10 基于光线追踪的仿真链路设计             | 156 |
| 6.10.1 光线追踪算法                  | 156 |
| 6.10.2 传统光线追踪在卫星相机成像仿真中的局限     | 159 |
| 6.10.3 卫星 TDICCD 相机成像仿真的光线追踪方法 | 161 |
| 6.11 卫星影像仿真实验                  | 166 |
| 6.11.1 光线出发点采样方法对比实验           | 167 |
| 6.11.2 静态 MTF 对分辨率的影响          | 168 |
| 6.11.3 动态 MTF 对分辨率的影响          | 170 |
| 6.11.4 不同积分级数下的 MTF-SNR 综合响应   | 171 |
| 6.11.5 三线阵 TDI CCD 影像模拟        | 172 |
| 第 7 章 仿真分析与验证                  | 174 |
| 7.1 仿真精度和理论精度对比分析              | 174 |
| 7.1.1 定轨误差分析                   | 175 |
| 7.1.2 定姿误差分析                   | 176 |
| 7.1.3 定姿设备安装误差分析               | 178 |
| 7.1.4 相机安装误差分析                 | 179 |
| 7.2 仿真精度和实际精度对比分析              | 180 |
| 7.2.1 平面定位精度分析                 | 180 |
| 7.2.2 高程精度分析                   | 182 |
| 第 8 章 影像压缩指标设计                 | 185 |
| 8.1 遥感影像压缩主观质量评价               | 185 |
| 8.1.1 专家打分法                    | 185 |
| 8.1.2 模糊综合评判方法                 | 186 |
| 8.2 遥感影像压缩构像质量评价               | 187 |
| 8.2.1 影像特征分析                   | 187 |
| 8.2.2 影像对比分析                   | 189 |
| 8.3 遥感影像压缩几何质量评价               | 191 |
| 8.3.1 影像匹配精度评价                 | 191 |
| 8.3.2 数字表面模型精度评价               | 192 |
| 8.3.3 定位精度评价                   | 192 |
| 8.4 影像压缩比试验                    | 193 |
| 8.4.1 主观评价试验与结果分析              | 193 |
| 8.4.2 构像质量评价试验与结果分析            | 197 |
| 8.4.3 数字表面模型精度评价实验             | 201 |

|                                   |            |
|-----------------------------------|------------|
| 8.4.4 定位精度评价实验 .....              | 204        |
| <b>第 9 章 仿真测图及精度分析</b> .....      | <b>208</b> |
| 9.1 连云港试验区验证 .....                | 208        |
| 9.2 嵩山试验区仿真验证 .....               | 213        |
| 9.3 结论 .....                      | 217        |
| <b>第 10 章 资源三号卫星在轨测试与验证</b> ..... | <b>218</b> |
| 10.1 在轨测试要求 .....                 | 218        |
| 10.2 方法和内容 .....                  | 219        |
| 10.2.1 卫星工程参数测试 .....             | 219        |
| 10.2.2 卫星业务测试 .....               | 223        |
| 10.2.3 相关系统指标测试 .....             | 230        |
| 10.3 在轨测试成果及结论 .....              | 233        |
| 10.3.1 在轨测试成果 .....               | 233        |
| 10.3.2 在轨测试结论 .....               | 235        |
| <b>参考文献</b> .....                 | <b>237</b> |
| <b>致谢</b> .....                   | <b>242</b> |

# 第1章 绪 论

## 1.1 引 言

人类的活动时时刻刻都离不开地理空间信息。作为测绘成果的地理信息,客观地表现地球表面重要的自然地理要素与人工设施的空间位置、形态特征和相关关系,准确地描述地名、境界等人文要素所对应的空间位置和空间范围。测绘所涉及的时空基准、基础地理信息、国家系列地图等信息作为国民经济与社会信息化建设的基础性产品,已经成为国家空间信息基础设施的核心组成部分。现势性强、精度高的地理信息数据可广泛应用于地方、国家和全球事务中,在资源管理、国家安全、防灾减灾、城市建设、交通运输、环境保护等各个领域发挥重要作用。

随着我国国民经济的高速发展,传统测绘技术如航空摄影测量已经远远不能满足我国信息化建设的要求,必须采用航天手段,依靠测绘遥感卫星,实时获取各种空间信息,以建立和维持我国高精度的时空基准,及时更新各种比例尺的基础地理信息,快速生产现势性强的国家系列地图。我国正在实施国家空间信息基础设施建设等重大工程,各行业部门对高分辨率基础地理信息提出了强烈需求,因此亟须发展我国自主的高分辨率立体测图卫星,以生产现势性强、精度高的基础地理信息数据,供各行业部门使用。

由于测绘技术的迅速发展,测绘已经越来越依赖于卫星影像资料。据 2005 年的数据统计,测绘部门使用的卫星遥感数据 90%以上来自于美、法、加等国的遥感卫星,卫星的数据源基本由国外所控制。一旦外部环境发生变化,我国在地理信息建设方面将极为被动。只有建立了我国长期、稳定、连续的国产高分辨率立体测图卫星,才能自主地、不依赖任何外国数据源进行空间数据基础设施建设,大幅提升我国自主信息保障能力和全球空间信息获取能力,全面提高我国信息安全和国防安全水平,更好地为国民经济、国防建设和社会发展服务。

进入 21 世纪以来,我国的航天技术得到了空前发展,已经具备了研制发射我国自主的高分辨率立体测图卫星的能力。发射高分辨率立体测图卫星,可以为国家基础地理信息系统建设、维护和更新提供数据源,满足 1:5 万所要求的影像地面分辨率及其相应的平面和高程的精度要求,同时兼顾更大比例尺地图修测及资源、环境、水利、交通、城市建设、灾害评估和国家安全、寓军于民等方面的需求。高分辨率立体测图卫星的研制、发射及应用,将会带动我国航天与测绘高科技的发展,打破国外对高分辨率遥感信息资源的垄断,推动我国地理空间信息产业的发展,提高我国的国际地位,增强我国在国际竞争中的综合实力。

我国测绘部门经过“八五”“九五”“十五”等几个五年计划的建设,已经建立了较为完整的地理信息处理和数字化测绘生产体系。2005 年,全国基础测绘有 2 万人的队伍从事数字化测绘生产,其中技术人员约占 60%。全国从事测绘的单位从业人员总计 19

万人,从业人员每年明显递增。测绘部门已基本形成以数字栅格图、数字正射影像、数字高程模型、数字线划图等为基础产品的基础地理信息数据生产流程,以及数字化测绘生产的能力;建立了集遥感数据处理、应用和分发于一体的航空航天遥感数据处理系统,形成了一定规模的仪器装备和生产科研队伍,为我国高分辨率立体测图卫星的数据处理奠定了基础。

发射高分辨率立体测图卫星可为国家基础地理信息系统建设、维护和更新提供必不可少的数据源,满足1:5万比例尺基础地理信息的生产和更新需求,同时兼顾更大比例尺地图修测及资源、环境、水利、交通、城市建设、防灾减灾以及国家安全等方面的需求,带动我国航天与测绘高科技的发展,提高我国的国际地位,增强国际竞争的實力,打破西方国家对高分辨率遥感信息资源的垄断,推动我国地理空间信息产业的发展。

从20世纪90年代开始,我国的航天工业得到了空前的发展。“十一五”期间已经初步建立了导航、气象、海洋、资源卫星系列和环境与减灾卫星星座,开始形成国家对地观测体系,已经具备了自主研制发射的高分辨率立体测图卫星的能力。根据国民经济和社会信息化建设的需要,要求加快我国空间信息基础设施建设和测绘信息产品的生产更新速度,急需发展我国独立自主的测绘卫星。

## 1.2 测绘卫星分类

资源三号卫星是测绘卫星大家庭中的一员,主要用于立体测图。一般来说,测绘卫星是指具备大地测量和摄影测量等测绘能力的卫星,这些卫星必须具备较高的平面、高程或者重力测量精度。若从传感器的类型来区分,测绘卫星主要包括高分辨率光学测图卫星、干涉雷达卫星、激光测高卫星、重力测量卫星和导航定位卫星等五种类型。其中光学测绘卫星、干涉雷达卫星、激光测高卫星主要采用光学相机、微波合成孔径雷达、激光雷达等手段获取光学影像、雷达影像和激光测高数据,满足大中比例尺测图需求,这三种卫星一般称为测绘遥感卫星。在光学卫星中,以立体测图为主要功能的卫星一般称为光学立体测绘遥感卫星(或立体测图遥感卫星),简称光学测绘遥感卫星,或者直接称为光学测绘卫星。而只能获取平面影像的卫星,或者以平面影像获取为主、立体影像获取为辅的卫星一般称为遥感卫星。但必须指出,高分辨率光学遥感卫星由于影像分辨率高、影像定位精度高,完全可以满足基础地理信息更新的需求,因此从广义的角度说,也是一种测绘卫星。光学测绘卫星还可以根据比例尺进行细化,满足1:5万比例尺精度要求的卫星可以称为1:5万立体测图卫星;满足1:1万精度要求的称为1:1万立体测图卫星。干涉雷达卫星主要采用主动发射微波的方式获取地面的雷达影像,并采用干涉测量的手段形成数字高程模型,卫星的种类同样也可以细分。激光测高卫星采用发射和接收激光的方式获取地面高程信息,也可以按照传感器的不同进行细分。重力卫星主要采用重力加速度计或者重力梯度仪获取地球重力数据,从而恢复全球重力场。而导航定位卫星则依靠卫星的高精度时钟对地面可以获得卫星信号的物体(或人)进行精确定位,是一种对目标进行定位测量的卫星。测绘卫星的分类见图1.1。