

高分辨率视频卫星 标准产品分级体系

张 过 蒋永华 汪韬阳 著
李立涛 吴佳奇 卜丽静



科学出版社

高分辨率视频卫星标准产品 分级体系

张 过 蒋永华 汪韬阳 著
李立涛 吴佳奇 卜丽静

科学出版社

北 京

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229、010-64034315、13501151303

内 容 简 介

本书主要介绍国内外高分辨率视频卫星的发展现状以及相应的产品标准化现状。针对星载光学视频传感器的特点,结合国内外标准产品分级的优缺点,提出一套适用于高分辨率光学视频卫星的标准产品分级体系,包括传感器校正帧序列产品、传感器校正视频产品、超分辨率重建产品、动态变化检测产品和三维重建产品等。在此基础上,详细叙述各级产品的制作流程,并针对分级体系方案,利用 Skysat、吉林一号视频卫星数据进行验证。为便于科研和生产人员实现本书提出的分级方案,书中还介绍了星载视频产品制作所涉及的关键算法。

本书可供测绘、国土、航天、规划、农业、林业、资源环境、遥感、地理信息系统等空间地理信息相关行业的生产技术人员和科研工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

高分辨率视频卫星标准产品分级体系/张过等著. —北京:科学出版社, 2017.2
ISBN 978-7-03-051817-0

I. ①高… II. ①张… III. ①高分辨率—视频—卫星—分级—产品标准—研究 IV. ①V474.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 033154 号

责任编辑:杨光华 / 责任校对:董艳辉

责任印制:彭 超 / 封面设计:苏 波

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>

武汉中远印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

开本:787×1092 1/16

2017年2月第 一 版 印张:8 1/2

2017年2月第一次印刷 字数:140 000

定价:88.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

2013年,美国 Skybox Imaging 公司发射了 Skysat-1,并于 2014 年发射了 Skysat-2。加拿大 UrtheCast 公司将视频相机安置在国际空间站上。视频卫星可实现对地球表面的秒级连续监测。为了适应不同用户遥感影像处理能力以及对定位精度要求的差异,影像供应商会制作不同处理级别的影像,以供用户选择。由于卫星设计的差异以及处理方案的不同,各个卫星公司的影像产品分级方式差异很大,处理精度各不相同。

本书从星载视频传感器特点出发,分析了各种高分辨率卫星视频影像产品分级方案的优缺点;基于高分辨率视频卫星影像的特点,针对不同的几何处理级别,提出了一套影像产品的分级方案。本书提出的高分辨率卫星视频产品分级方案,可为我国自主研发发射的高分辨率视频影像分级方案提供借鉴。

全书共 6 章:第 1 章介绍国内外高分辨率光学视频卫星的发展现状及趋势,介绍常见的国内外高分辨率卫星传感器及其特点;第 2 章介绍高分辨率光学视频卫星影像产品标准化现状以及相应的优缺点;第 3 章提出高分辨率光学视频卫星标准产品分级,给出各个产品的定义;第 4 章给出各个产品的制作流程;第 5 章利用 Skysat 和吉林一号视频卫星数据对本书提出的分级方案进行验证,结果表明本书提出的方案是一种可行、通用的方案;第 6 章介绍星载视频产品制作所涉及的关键算法,用于进一步补充第 4 章中所用到的技术。

本书的编写感谢 Skybox Imaging、UrtheCast 和长光卫星技术有限公司提供的相关卫星参数及卫星视频数据支持。

本书的分工为:张过负责本书总体内容框架以及视频产品分级体系的制定,同时负责编写第 1~3 章;在第 4~6 章中,蒋永华负责传感器校正、仿真及稳像内容,汪韬阳负责三维重建内容,李立涛负责辐射校正内容,吴佳奇负责运动检测和跟踪内容,卜丽静负责超分重建相关内容。

由于作者水平有限,书中难免存在许多不足,敬请各位同人批评、指正!

作 者

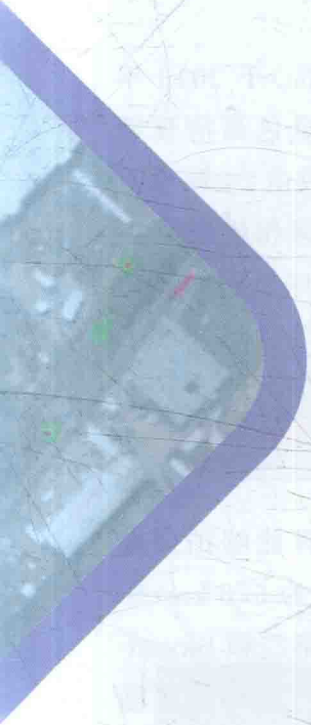
2016 年 9 月于武汉

目 录

第 1 章 高分辨率视频卫星发展现状及趋势	1
1.1 国外高分辨率视频卫星发展现状	2
1.2 国内高分辨率视频卫星发展现状	7
1.3 高分辨率视频卫星发展趋势	8
第 2 章 高分辨率视频卫星产品标准化现状	9
2.1 Skysat 产品分级体系	10
2.2 UrtheCast 产品分级体系	10
2.3 吉林一号视频卫星产品分级体系	11
第 3 章 高分辨率视频卫星产品分级概述	13
3.1 0 级数据	14
3.2 传感器校正帧序列产品	14
3.3 传感器校正视频产品	14
3.4 超分辨率重建产品	14
3.5 动态变化检测产品	14
3.6 三维重建产品	14
第 4 章 高分辨率视频卫星标准产品制作	17
4.1 传感器校正帧序列产品	18
4.1.1 定义	18
4.1.2 产品制作流程	18
4.1.3 元数据内容	21
4.2 传感器校正视频产品	29
4.2.1 定义	29
4.2.2 产品制作流程	29
4.2.3 元数据内容	29
4.3 超分辨率重建产品	39

4.3.1	定义	39
4.3.2	产品制作流程	39
4.3.3	元数据内容	41
4.4	动态变化检测产品	48
4.4.1	定义	48
4.4.2	产品制作流程	48
4.4.3	元数据内容	49
4.5	三维重建产品	50
4.5.1	定义	50
4.5.2	产品制作流程	51
4.5.3	元数据内容	53
第5章	高分辨率视频卫星标准产品体系验证	57
5.1	仿真验证	58
5.1.1	试验数据	58
5.1.2	原始视频几何模型试验	58
5.1.3	帧间运动估计试验	58
5.1.4	稳像后卫星视频配准精度试验	59
5.2	Skysat 验证	60
5.3	吉林一号视频卫星验证	62
5.3.1	吉林一号视频卫星辐射校正处理	62
5.3.2	吉林一号视频稳像	68
5.3.3	吉林一号视频卫星超分辨率重建	71
5.3.4	吉林一号视频卫星动态变化检测	75
第6章	高分辨率视频卫星标准产品制作基本算法	79
6.1	视频辐射校正	80
6.1.1	贝尔插值	80
6.1.2	视频影像相对辐射校正	81
6.1.3	异常探元处理	82
6.1.4	基于靶标色彩校正技术	84
6.2	传感器校正	86
6.2.1	单帧卫星视频严密几何成像模型	86
6.2.2	虚拟面阵严密几何成像模型	91

6.2.3 RPC 模型	92
6.3 视频稳像	95
6.3.1 卫星视频单帧定向模型	96
6.3.2 基于固定帧的帧间运动估计模型	97
6.3.3 基于固定帧的卫星视频运动补偿	98
6.4 动目标检测与跟踪	98
6.4.1 动目标检测	99
6.4.2 动目标跟踪	101
6.5 超分辨率重建	102
6.5.1 图像降质模型	103
6.5.2 降质模糊函数估计	105
6.5.3 亚像素级全局运动估计方法	105
6.5.4 超分辨率重建算法	108
6.5.5 图像复原算法	112
6.5.6 超分辨率重建质量评价	113
6.6 三维重建	114
6.6.1 立体影像定向技术	114
6.6.2 影像密集匹配技术	115
参考文献	125



第 1 章

高分辨率视频卫星 发展现状及趋势

经过 30 多年的发展,我国航天技术取得了巨大进步,已形成资源、气象、海洋、环境、国防系列等构成的对地观测遥感卫星体系。特别是在“高分辨率对地观测系统”国家科技重大专项建设的推动下,通过在平台传感器研制、多星组网、地面数据处理等方面的创新,我国遥感卫星的空间分辨率、时间分辨率、数据质量大幅提升,为我国现代农业、防灾减灾、资源环境、公共安全等重要领域提供了信息服务和决策支持。随着遥感应用的深入,应用需求已从定期的静态普查向实时动态监测方向发展,利用卫星对全球热点区域和目标进行持续监测,获取动态信息已经成为迫切需求。

由于视频卫星可获得一定时间范围内目标的时序影像,具备了对运动目标的持续监视能力,视频卫星成像技术已成为遥感卫星发展的一大热点。

1.1 国外高分辨率视频卫星发展现状

美国 Skybox Imaging 公司(2016 年 3 月更名为 Terra Bella)于 2013 年发射的米级分辨率视频卫星 Skysat-1,是全球首颗能够拍摄全色高清视频的卫星。之后该公司于 2014 年又发射了 Skysat-2,并计划建成由 24 颗小卫星组成的 Skysat 卫星星座。加拿大的 UrtheCast 公司,将视频相机安置在国际空间站上,可提供近实时的全彩色高清视频,实现了对地球表面的高动态监测,在环境监测、人道主义救助、社会活动以及农业土地等领域开展了业务。

1. Skysat 系列

2013 年 11 月 21 日, Skybox Imaging 公司发射了全球首颗能够拍摄高清卫星视频的小卫星 Skysat-1,卫星运行的太阳同步轨道高度为 578 km,标志着遥感 2.0 时代的到来;该公司于 2014 年 7 月 8 日发射了第二颗 Skysat-2,卫星运行的太阳同步轨道高度为 637 km。Skysat 是首个采用面阵传感器的米级分辨率对地观测卫星,重 120 kg 左右,体积为 $60\text{ cm} \times 60\text{ cm} \times 95\text{ cm}$ 。装备安置了 Ritchey-Chretien Cassegrain 望远镜,反光镜由碳化硅材料制造,焦距为 3.6 m,其焦面由三个低噪声、高频率的 5.5 megapixels CMOS (complementary metal-oxide semiconductor) 图像探测器组成,呈品字形排列,如图 1.1 所示。每个 CMOS 的上半部分(PAN)用来拍摄全色视频,三个 CMOS 拼接影像尺寸可达到 $2\,560 \times 2\,160$ 像素(每个像素的物理尺寸为 $6.5\text{ }\mu\text{m}$),影像覆盖范围约为 $2\text{ km} \times 2\text{ km}$,采用 JPEG 2000 格式进行压缩并下传,下传率为 450 Mbit/s。同时采用数字 TDI(digital time delay inteyral, Digital TDI)技术进行地面图像处理,生成的标准视频产品影像分辨率达 1.1 m,每一帧大小尺寸为 $1\,920 \times 1\,080$ 像素,视频帧率为 30 帧/s,持续时间为 90 s。图 1.2 为 Skysat 拍摄的迪拜哈里法塔视频的其中一帧影像,能够清晰地看到天空中的飞机和地面行驶的汽车。

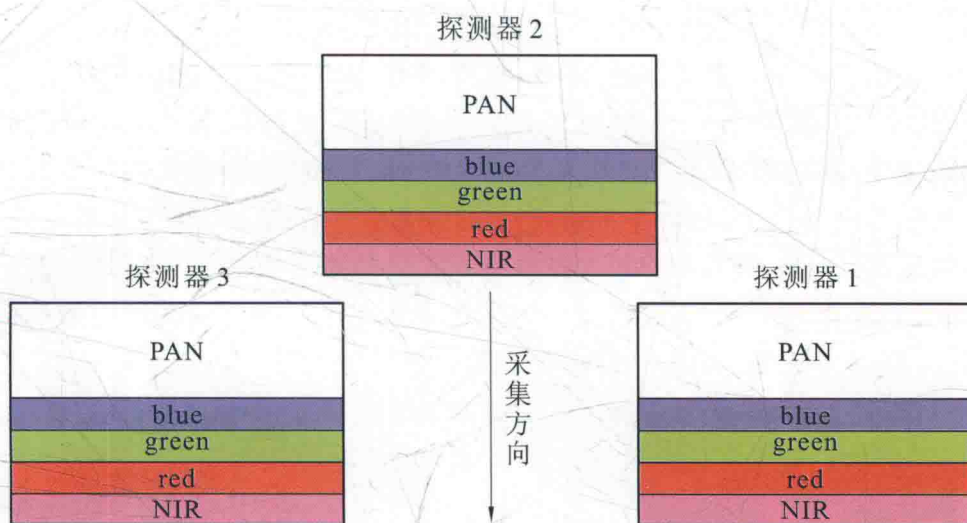


图 1.1 Skysat 焦面 CMOS 排列及结构



图 1.2 Skysat 哈里法塔单帧影像

2. UrtheCast

总部位于加拿大温哥华的 UrtheCast 公司,具有国际化的协作背景,它由英国、加拿大、俄罗斯三个参与了国际空间站建设的国家共同投资创设。2013 年底和 2014 年初,UrtheCast 将两台地球成像相机安置在国际空间站舱外的敏捷指向平台上,国际空间站运行在距离地球表面 300 多千米的轨道上,每天绕地球 16 圈,速度是 26 000 km/h。安置的两台摄像机分别是一架名为 Iris 的高解析度照相机(分辨率为 1.1 m)以及一台名为 Theia 的中等解析度相机(分辨率为 5.5m),其中 Iris 可以拍摄并生产时长 60s 的高清全彩色视频,载荷具体参数如表 1.1 所示。UrtheCast 视频产品参数如表 1.2 所示,Iris 所拍摄的伦敦一帧影像如图 1.3 所示。

表 1.1 Iris 相机参数

参数项	指标及内容
平台	双轴指向
传感器类型	CMOS
孔径/mm	317.5
焦距/mm	2.54
光谱带	RGB(贝尔彩色滤光阵列)
帧率/(帧/s)	3

表 1.2 UrtheCast 视频产品参数

参数项	指标及内容
持续时间/s	60
入射角/(°)	<40
帧率/(帧/s)	30
帧尺寸/像素	4 096×2 160(超高清) 1 920×1 080(高清)
分辨率/m	1
覆盖范围	约 4.1 km×2.2 km(超高清) 约 1.9 km×1.1 km(高清)
视频文件格式	H264(MPEG-4)

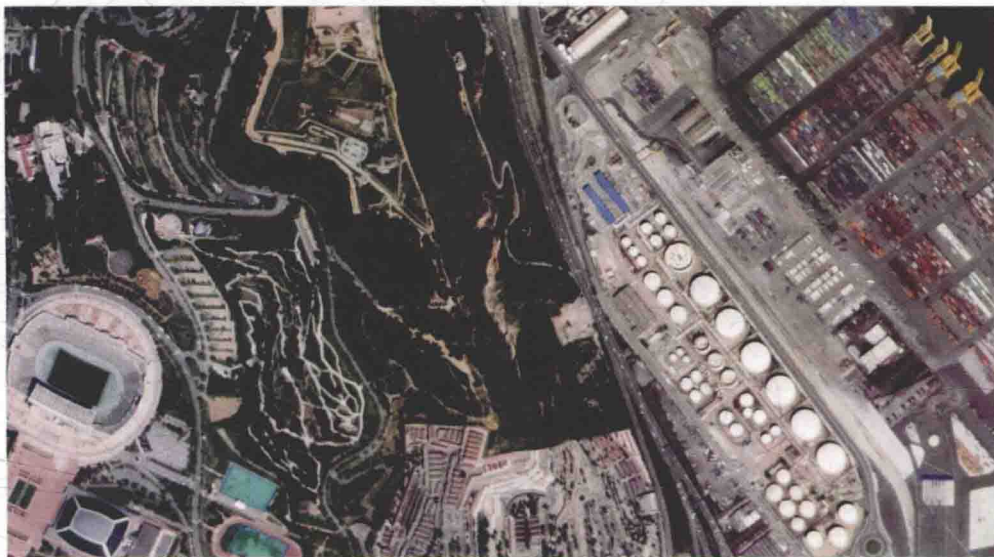


图 1.3 Iris 相机拍摄的伦敦视频一帧影像

3. 美国 MOIRE 项目

MOIRE 项目由美国鲍尔宇航技术公司为主承包商,负责光学系统设计、地面原理样机研制和测试,美国 NeXolve 材料公司负责衍射薄膜研制,美国劳伦斯-利弗摩尔国家实验室(Lawrence Livermore National Laboratory, LLNL)负责衍射镜研制。2014 年 5 月,鲍尔宇航技术公司完成了两块分块镜和其衍射薄膜镜片支撑结果与展开链接结果的热真空测试工作,标志项目合同的完成。其业务型的实用系统由美国国家侦查局开发,整个业务成本 5 亿美元,光学系统采用菲涅尔波带片或者光子筛形式的主镜,口径达 20 m,发射时处于折叠状态,入轨后展开。系统可在静止轨道实现 1 m 高分辨率,视场为 $10\text{ km} \times 10\text{ km}$,成像帧率为 1 帧/s,实现对敌方军事目标的连续监视,将大幅提升对动态目标的监视能力。

4. GO-3S 卫星

GO-3S 卫星系欧洲静止轨道空间监视系统卫星,分辨率为 3 m,幅宽为

100 km, 5 帧/s 的视频拍摄能力, 设计装配 4 m 口径光学成像系统, 整个卫星质量约 8 t。GO-3S 卫星共有三个视频工作模式, 分别为快速连拍模式、持续视频模式和时延视频模式。阿斯特里姆公司正在寻求外部资金以启动项目, 该公司已经向研发工作投资。投资于项目的国家将获得卫星的部分能力, 还将获得卫星服务收益。目前该项目已经引起新加坡等国的兴趣, 阿斯特里姆公司可能与新加坡进行技术合作和商业合作。阿斯特里姆公司 2012 年底完成了项目可行性分析, 研发工作将在 2013~2015 年进行, 计划 2016 年开始制造卫星, 2020 年正式运行卫星。

5. 印度尼西亚 LAPAN 卫星

印度尼西亚 LAPAN-TUBSAT 卫星质量为 56 kg, 采用太阳同步轨道, 高度 635 km。其有效载荷包括 1 台高分辨率摄像机和 1 台低分辨率摄像机。高分辨率摄像机主要由索尼公司的高清晰度 DXC-990P 型民用摄像机和尼康公司制造的 1 m 焦距、 $f/11$ 相对孔径的折射望远镜组成, 空间分辨率为 6 m, 幅宽为 3.5 km。DXC-990P 由 3 个 CCD 组成, 每个 CCD 像素数为 752×582 , 像素尺寸为 $7 \mu\text{m}$ 。

印度尼西亚 LAPAN-A2 卫星平台尺寸 $47 \text{ cm} \times 50 \text{ cm} \times 36 \text{ cm}$, 在俯仰和滚动向可侧摆正负 30° , 发射质量 76 kg。卫星携带 4 个有效载荷, 其中的视频相机与 LAPAN-TUBSAT 相同, 还包括试验型空间数字相机、船舶自动识别系统和无线电通信载荷。

6. 南非“先锋卫星”

“先锋卫星”有个特殊工作模式, 称为 Viewfinder 取景器模式, 当卫星地面站可以访问卫星时, 操作人员通过 Viewfinder 系统先发现感兴趣区域, 然后通过姿态调整, 同时调整成像仪对目标区域成像, 该系统还可用于人工云判。Viewfinder 系统包括 1 台宽视场视频相机, 幅宽为 120 km; 1 台窄视场视频相机, 分辨率为 5~10 m, 幅宽为 3~6 km。该卫星具有 4 级前向运动补充机构, 使得卫星对目标的扫描速度比卫星轨道速度慢 4 倍, 在对目标进行连续观测的同时可以获得足够的光量, 保证成像质量。

7. 美国 VIC 型小卫星

VIC 型小卫星空间分辨率优于 1 m,地面幅宽为 10 km,帧率高达 100 帧/s。该卫星基于 SSTL-X50 卫星平台研制,同时具有星上大数据存储能力。

1.2 国内高分辨率视频卫星发展现状

2015 年 10 月初,长光卫星技术有限公司通过搭载方式发射两颗高分辨率视频卫星——吉林一号视频卫星(1 星、2 星),是国内首个能够拍摄全彩色高清视频的卫星,其分辨率、幅宽、稳定性等主要技术指标均达到较高水准,同时具有敏捷快速机动能力,一段时间内对目标进行实时动态的监测,可根据情况迅速调整观测区域和重点。视频 1 星、2 星的轨道高度为 656 km,相机焦面采用大面阵 CMOS 传感器,影像尺寸可达 $4\,093 \times 3\,072$ 像素,幅宽为 $4.33\text{ km} \times 2.44\text{ km}$,分辨率为 1.1 m。采用 Bayer 模板的成像方式,视频压缩算法采用 JPEG 2000,压缩比达 30~100 倍;拍摄帧率为 25 帧/s。该卫星具体参数如表 1.3 所示。

表 1.3 吉林一号视频星参数

参数项	指标及内容
轨道类型	太阳同步轨道
视频格式	MP4(FLV)
最大姿态机动角速度/(°/s)	2
机动平稳度/(°/s)	0.005
机动指向精度/(°)	0.1
卫星总质量/kg	<95
测控	USB,上传 2000 bit/s,下载 4096 bit/s
数传	X 波段,100 Mbit/s

吉林一号视频卫星拍摄的墨西哥杜兰戈区域的视频一帧影像如图 1.4 所示。



图 1.4 吉林一号拍摄杜兰戈视频一帧影像

1.3 高分辨率视频卫星发展趋势

视频卫星可通过一定时间范围内对目标的凝视成像形成视频,实现对热点区域和目标的动态实时监测。2013 年第一颗米级视频卫星发射以来,视频卫星迎来了爆发式发展时期,视频卫星成为遥感卫星发展的一大热点。

视频卫星为目标动态监测提供了技术手段和数据源,是实现静态遥感到动态遥感跨越的重要标志,视频卫星将成为未来一段时间内遥感卫星发展的热点;与传统地面视频相比,卫星视频幅宽大、分辨率低、对比度低,且存在帧间几何辐射差异,给卫星数据处理带来了诸多挑战,亟须深入开展卫星视频处理与应用技术研究,拓展卫星视频的应用领域;随着卫星视频应用的深入,低轨卫星类视频、高轨卫星类视频、SAR 视频等新型视频成像技术将成为视频卫星发展的新方向,丰富高分辨率卫星动态监测手段。



第 2 章

高分辨率视频卫星 产品标准化现状

目前,为了卫星产品的商业化运作,各个卫星运营商定制了独立的卫星影像产品分级,用户可以根据不同需求,选择所需的不同级别产品,但各种卫星影像产品的分级标准并不一样。本章概述 Skysat、UrtheCast 和吉林一号视频卫星的产品分级体系,并分析每类产品分级体系的特点。

2.1 Skysat 产品分级体系

Skysat 的产品分级是按照视频产品生产工序来定级(Skybox,2014),如表 2.1 所示。该分级体系的优点是分级简单,统一管理,将预处理部分整合在一起,能直接凸显出最终的标准视频产品;元视频产品中附带的 RPC (rational polynomial camera,有理多项式函数)模型文件和元数据便于用户灵活使用,支持后续高级精处理。缺点是不能很好地描述数据处理的过程,且稳像视频产品不包含每一帧影像及对应 RPC 模型文件,只有元数据文件,后续高级处理和用户应用有限。

表 2.1 Skysat 产品分级

级别	英文名称	描 述
元视频	Raw Video	针对地面固定目标拍摄的全色高清视频产品,帧率为 30 帧/s,内容包括元视频、元视频每一帧(附带 RPC 模型文件)、拇指图和元数据文件等。
稳像视频 (标准视频)	Stabilized Video	经过辐射、几何、平差和定向处理后的标准视频产品。内容包括标准视频、拇指图和元数据文件

2.2 UrtheCast 产品分级体系

UrtheCast 的产品分级同样是按照视频产品生产工序来定级,如表 2.2 所示。优点是将每一关键处理步骤很好地描述出来,生产工序开放,用户选择余地较大。缺点是产品的分级不够严密,没有考虑产品的使用性,辐射处理只作为关键的一个步骤,一般不能作为产品直接使用;几何处理分级过细,没有很好的整体性,产生冗余且没有后续高级产品分级,而 1 级产品 RPC 模型文件精度不够高,有 1~2 个像素误差。