

提高光学遥感卫星图像几何精度总体设计分析

金 涛, 李 贞, 李 婷, 杨 冬

(中国空间技术研究院总体部, 北京 100094)

摘 要: 针对如何提高我国光学遥感卫星图像几何定位精度问题,从影响几何成像质量的关键要素——内外方位元素出发,介绍地面几何处理方法,并基于多颗卫星研制、地面量测试验及在轨验证情况,对高分辨率光学遥感卫星和多线阵观测卫星的几何精度的星-地全链路影响误差项进行对比分析,通过理论分析找出了约束我国高分辨率遥感卫星几何精度的关键问题,最后探讨了如何通过星上设计配合地面处理提高高分辨率遥感卫星的几何精度。

关键词: 高分辨率光学遥感卫星; 几何精度; 随机误差; 系统误差; 内检校; 外检校

中图分类号: P228.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1328(2013)08-1159-07

DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2013.08.018

System Design and Analysis for Improving Geometric Accuracy of High-Resolution Optical Remote Sensing Satellite Image

JIN Tao, LI Zhen, LI Ting, YANG Dong

(Institute of Spacecraft System Engineering, CAST, Beijing 100094, China)

Abstract: At the present, how to improve the geometric accuracy optical remote sensing satellite image in China is getting more and more attention. Starting with the key geometric elements affeting the imaging quality - interior and exterior orientation elements, the ground geometric processing of the spaceborne optical image is introduced in this paper. Then by combining the development and manufacture, ground measurement trials and on-board calibration results of multiple optical satellites, the satellite-ground link factors affecting the geometric accuracy of both high-resolution optical remote sensing satellites and observation satellites with multiple linear arrays are compared and analyzed in detail. Based on the summed effect factors, the key constraints in system design and ground processing are accordingly pointed out. Finally, how to improve the geometric accuracy of high-resolution optical image is discussed by implementing specific system designs and means in the satellite development to cooperate with the ground processing.

Key words: High-resolution optical remote sensing satellite; Geometric accuracy; Radom errors; Systematic errors; Interior calibration; Exterior calibration

0 引 言

目前,我国的航天测绘功能还依靠专门的测绘卫星来实现,而国外的光学商业卫星,如美国 GeoEye1/2、WorldView-1/2 卫星等,采用传统的长焦距、大口径全反射式侦察型相机,在不断提高空间分辨率的同时,凭借其先进的星地一体化成像链路设

计、仿真验证以及在轨检校技术,使其高分辨率图像的几何定位精度达到了米级水平^[1-4];此外,强大的姿态控制能力(如 WorldView-2 卫星侧摆控制加速度为 $15^\circ/\text{s}^2$,速率为 $35^\circ/\text{s}$,9s 摆动地面 $300\text{km}^{[2]}$)使得单个卫星可通过姿态机动对同一目标获取立体像对,从而实现测绘与高分辨率对地观测功能一体化。

相比之下,我国现阶段的光学遥感卫星空间分

分辨率虽然不断提高,但其图像几何精度却不高,尤其是几何绝对定位精度仍停留在百米量级,与国外高分辨率遥感卫星、国内测绘卫星还存在量级上的差距,远不能满足用户对图像高几何精度的需求。要使我国高分辨率光学遥感卫星实现从“有无”到“好用”,关键要充分识别前期传统的高分辨率光学遥感卫星在星地几何成像质量总体设计方面与国内外具有高几何精度能力卫星的差异,辅以在轨有效验证手段,进而大力推动提高几何精度的系统总体设计和地面检校等新技术的应用。

本文从影响几何成像质量的关键要素——内外方位元素出发,介绍地面几何处理方法,针对卫星研制、地面量测试验及在轨验证情况,对影响几何精度的星地全链路误差项进行分解分析,找出了约束我国高分辨率遥感卫星几何精度的关键问题,最后探讨了星上提高几何精度的总体设计方案及施行措施。

1 几何处理原理

遥感图像的几何成像过程是建立被照物体与像面之间几何关系的过程,只要确定了投影中心及像面在物方空间中的位置,并确定摄影中心到地面物体这道“投影光束”的空间指向(即视轴指向),配合高程信息,就可计算出像面该点对应真实世界的地理位置。对应的,描述摄影中心与像面之间相互位置关系的参数,包括焦距、像主点坐标,称为内方位元素;描述摄影中心和像片在地面坐标系中的位置和姿态的参数称为外方位元素^[5]。

对于线阵推扫式光学传感器,是逐行以时序扫描的方式获得二维卫星影像,成像方式如图 1 所示。影像上每一行像元在同一时刻为中心投影,多波段或多片 CCD 因位置的不同存在不同的内方位元素误差;对于每一个曝光时刻,均存在一套外方位元素。由于卫星入轨后不可避免存在实验室标定参数不准确以及卫星入轨运行状态相对地面变化的情况,地面应用系统需有针对性地进行在轨各片 CCD、各波段内方位元素检校(简称内检校)、外方位元素检校(简称外检校)以及 CCD 拼接及(多光谱)波段配准。

1.1 内检校

内方位元素的检校主要是标定相机的内部参数,包括光学镜头畸变、CCD 畸变、以及焦距和像主

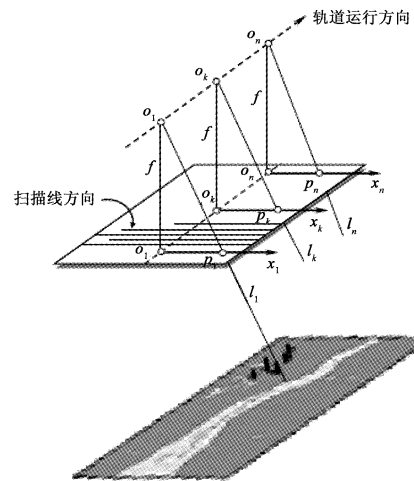


图 1 阵推扫式成像几何关系

Fig. 1 Geometry of linear push broom imaging

点坐标的误差。这里介绍 CCD 逐探元检校的方法:对参与内检校的所有影像,通过高精度影像配准算法从已有的 DOM(数字正摄地图)中获取控制点;再利用影像上第 p 列的控制点基于最小二乘解求 CCD 第 p 探元的指向角(见图 1)。这些指向角是综合了各种内方位元素误差的标定后的结果^[6-7]。

1.2 外检校

外方位元素检校是为获得相机真实的主光轴的位置和姿态。针对 GPS 相位中心偏移误差及载荷、星上安装误差,由于载荷安装误差可以等效于姿态测量误差;GPS 相位中心偏移误差虽然对几何定位精度的影响特性与姿态误差有所差异,但是两者可以依据一定的几何关系进行等效处理(如图 2,轨道误差 DX 可以等效成姿态误差 $d\theta$),所以可通过引入偏置矩阵,直接修正几何处理中的成像光线指向,即计算实际观测方向与理论观测方向之间三个夹角所构成的正交旋转矩阵^[8-9]。

1.3 CCD 拼接及波段配准

高分辨率光学卫星相机为获取大幅宽,将多个 CCD 在焦面上交错安装,如 IKONOS、QuickBird 和 WorldView-2 等。由于多 CCD 在焦面上不是严格意义上的一条 CCD 线阵,需要地面进行拼接处理。而对于多光谱线阵推扫相机,相机也要按严密几何关系安置 CCD 阵列,以保证配准精度。图 3 以给出了 CCD 拼接和波段配准的情形。

地面进行 CCD 拼接或波段配准处理,必须还原各片 CCD 间几何特性。但由于 CCD 安装精度及

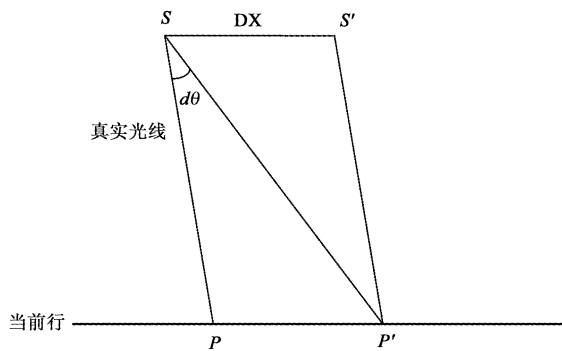


图 2 轨道误差等效成姿态误差示意图

Fig. 2 The sketch of orbit error equivalent to attitude error

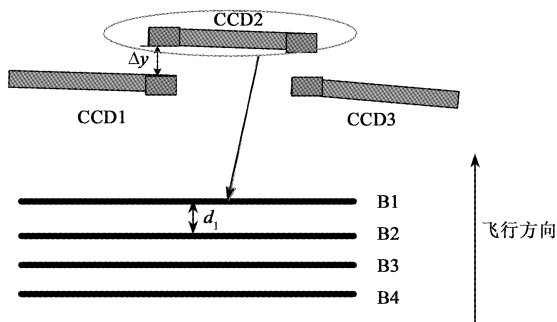


图 3 CCD 拼接及谱段的配准(红色部分为搭接像元)

Fig. 3 CCD mosaicking and band-to-band registration
(The red part is the mosaicking pixels)

CCD 阵列不“共线”的几何特性,其所建立各 CCD 间及各谱段间沿轨道方向的几何精度依赖于沿轨道方向 CCD 间隔谱段间隔及地面处理所采用的高程信息精度^[10],见图 4。

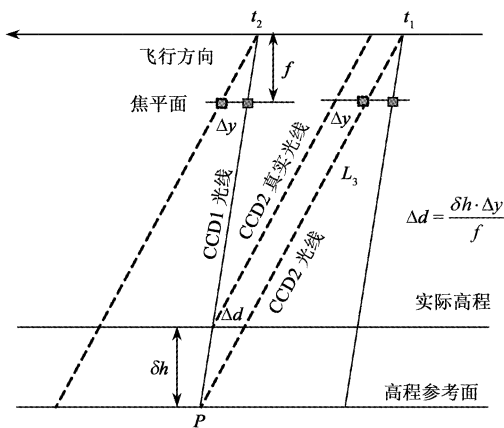


图 4 地形引起的几何关系还原不准确

Fig. 4 Inaccuracy reconstruction of geometry due to terrain

2 影响几何精度要素理论分析

本节从内、外方位元素出发,针对多颗卫星研制、

地面量测试验及在轨验证情况^[6,8,11-12],对高分辨率遥感卫星及三线阵测绘相机的影响几何处理精度的随机、系统因素进行对比分析及归纳,如表 1 所示。

相对定位精度:针对图像内部几何变形,如长度变形、角度变形和放射变形等,对其变形的绝对量和整幅图像变形的一致性的评价,又叫内部几何精度。

(1) 景内垂轨向相对定位精度主要受内方位元素中的物镜畸变和 CCD 大小变形影响;沿轨向除 CCD 倾斜等因素外,还受到来自外方位元素影响,然而只要保证外方位元素相对变化量较小(如提高姿态稳定度或采用高频精密测姿设备),并保证内方位元素的在轨稳定性,即可通过在轨内检校将内部精度控制在像元级水平。对于当前分辨率的光学卫星,可保证 2~5m 的相对定位精度。

(2) 相比测绘卫星小型无畸变光学系统,高分辨率光学卫星采用大口径、长焦距的光学系统,对光机结构热稳定性控制有更大难度,易造成物镜畸变及内方位元素的不稳定,从而影响相对定位精度。

(3) 对于我国 1 米分辨率以下的高分辨率遥感卫星,相比几米分辨率的测绘卫星图像,需要更高精度 DOM 来获取高精度的地面控制点进行内方位元素标定,因而对当前地面检校手段提出更高要求。

绝对定位精度:指从经过几何校正后的遥感图像产品上选定的多个参考目标的坐标位置与其实际位置之间的偏差,也就是图像上像点的地理位置和真实地理位置之间的差异,也称外部几何精度。

(1) 在要求内部精度的基础上,卫星外方位元素的准确性,决定了卫星对地面的绝对指向的正确性。

(2) 外检校可通过计算偏置矩阵消除因 GPS 测量中心偏移、载荷、星敏安装矩阵误差及姿态测量误差(可测部分)、力环境带来的星敏相机夹角变化等因素带来的影响。其中,对姿态测量误差的标定,应针对多种星敏(+陀螺)组合方式进行分别标定。

(3) 影响外方位元素的几项随机项:时间同步精度、星敏定姿误差、相机与星敏夹角误差和整星姿态颤动和定轨精度;尤其是卫星相机光轴与星敏间的夹角随机变化几十角秒量级角度范围时,所带来的定位误差已接近百米左右,而该项难以及时准确标定,将大大影响几何定位精度的提高。

内、外元素拼接精度——CCD 拼接和谱段配准:由地面参考 DEM 精度引起的各片 CCD 几何特

性不一致,对更高分辨率的光学遥感图像会产生更 对定位精度和绝对定位精度。
大的影响,同时影响了 CCD 拼接或谱段配准后的相

表 1 影响几何处理精度的因素
Table 1 The elements effecting the geometric accuracy

内、外方位元素	影响因素	误差分类	高分辨率光学遥感卫星			我国三线阵测绘相机			设计及处理	
			相对定位精度		绝对定位精度	相对定位精度		绝对定位精度		
			垂轨	沿轨		垂轨	沿轨			
内方位元素	相机内部误差	物镜畸变误差	系统项	次要	次要	次要	主要	次要	次要	1) CCD 安装精度保证 2) 实验室测量 3) 内检校(逐点探元指向角)
		CCD 的大小不一致、CCD 不平行于焦面上	系统项	主要	次要	次要	主要	次要	次要	
		CCD 安装倾斜以及不共线	系统项	次要	主要	次要	次要	主要	次要	
		实验室主点、主距测量误差	系统项	重要	重要	次要	重要	重要	次要	
	内方位元素稳定性	随机项	最主要	最主要	次要	主要	主要	次要	测绘星为无畸变系统设计	
	地面处理误差	DOM 精度	随机项	最主要	最主要	次要	主要	主要	次要	通过地面控制,高分辨图像的控制难度更大
控制点选取精度(配准精度)		随机项	最主要	最主要	次要	主要	主要	次要	通过地面控制,配准精度受大姿态机动影响	
外方位元素	星敏定姿误差	星敏(+陀螺)测量精度	随机项	次要	次要	最主要	次要	次要	最主要	现仅依赖采用高精度星敏,设计手段有限
		星敏低频漂移误差	随机项+系统项	次要	次要	主要	次要	次要	主要	系统项由地面测量+在轨验证
	相机星敏间夹角误差	相机地面安装误差	系统项	-	-	主要	-	-	主要	1)地面测量 2)外检校(偏置矩阵),对多种星敏组合方式进行标定
		多星敏地面安装误差	系统项	-	-	主要	-	-	主要	
		在轨热环境导致夹角变化	随机项+系统项	次要	次要	最主要	次要	次要	最主要	
	整星姿态误差	高频颤振	随机项	次要	次要	主要	次要	次要	主要	目前我国在轨星上无相应设计
		姿态稳定度	随机项	次要	次要	主要	次要	次要	主要	
	轨道误差	GPS 量测中心偏移量误差	系统项	-	-	主要	-	-	主要	1)地面测量 2)外检校(偏置矩阵)
		实时解算精度	随机项	次要	次要	非主要	次要	次要	非主要	实时精密定轨十几米级
		地面解算精度	随机项	次要	次要	非主要	次要	次要	非主要	事后精密定轨已达亚米级,甚至更高
时间精度	定轨、定姿、成像时间同步误差	随机项	次要	次要	主要	次要	次要	主要	星上时统设计保证	
	GPS 时间精度	系统项	-	-	非主要	-	-	非主要		
地面处理误差	控制点选取精度	随机项	-	-	主要	-	-	主要	通过地面控制,选取精度亚像素内	
内外方位元素拼接	CCP 拼接、谱段配准	沿轨道方向 CCD 间隔/谱段间隔	间接引起随机误差	-	主要	主要	-	主要	主要	CCD 拼接方式、多光谱探测器的选择
	地面处理误差	DEM 精度	随机项	-	主要	主要	-	主要	主要	通过地面控制,高分辨图像的要求精度更高

由表 1 和上述分析可见,约束我国高分辨率遥感卫星几何精度的关键在于:星敏(+陀螺)测量精度和相机星敏间夹角热变形。

3 星上提高几何精度的总体设计

针对第 1、2 章的分析介绍,在轨内、外检校能将

影响几何精度的系统误差项扣除,针对随机误差项,在卫星研制过程中,需要在设计中充分借鉴国内外卫星成功经验,对引起随机误差的各项环节采取相应控制措施,以尽可能提高几何定位精度。下面针对,我国新一代高分辨率光学遥感卫星在研制过程中提高几何精度的总体设计手段进行探讨、总结,并对可实现的几何定位精度进行了预估。

3.1 畸变稳定性及实验室标定

针对高分辨率遥感卫星这类大型空间相机对热稳定性控制难度大的问题,采取以下措施保证畸变控制:

(1) 反射镜采用高比刚度、低膨胀系数材料如 SiC 或 ULE,并进行轻量化结构设计;支撑材料采用热稳定性好的碳纤维材料,膨胀系数几乎实现零膨胀水平;

(2) 通过精准的热控能力(0.3°C)实现相机等温化设计,保证相机在轨热变形量小;

(3) 采取无应力装调;

(4) 实验室采用精密测角法标定相机畸变,测量精度约 5 个像元。

3.2 定姿精度误差

当前卫星系统主要通过双星敏联合定姿获得卫星惯性系姿态指向,再通过星敏安装矩阵和相机安装矩阵的转换获得相机光学系统的空间指向。

3.2.1 星敏定姿误差

星敏传感器的定姿误差主要包括测量误差和低频短周期误差两项。测量误差受星敏自身能力约束属随机项,且内插精度受到星敏数据的输出频率和连续性影响。而低频误差,主要是星敏光轴在轨受外部力热环境等影响、随轨道周期出现的低频变化。

针对星敏测量误差,采取以下措施减小随机项:

(1) 采用高精度星敏传感器作为主要姿态测量部件,可实现光轴精度约 $3''$,通过合理布局保证大角度姿态机动下仍实现双星敏联合定姿;

(2) 为进一步提高控制系统定姿算法输出的惯性系精度,将三个星敏在惯性系的四元素姿态测量信息随图像辅助数据下传,由地面应用系统解算卫星相机光轴的对地指向,从而验证和修正控制系统计算机在轨输出的惯性系 q 值精度;

(3) 下传高精度陀螺数据实现定姿,以保证卫

星成像期间定姿数据的连续性和准确性,同时提高星敏和陀螺数据输出频率,为地面解算卫星姿态提供了更精确的数据。

针对星敏低频漂移短周期项,采取以下措施:

(1) 高精度星敏本体热控措施以及与卫星、相机结构的隔热设计;

(2) 星敏支架的温度遥测加入辅助数据,配合地面分析星敏的低频漂移规律,为低频误差修正提供周期性参考;

(3) 在实验室模拟在轨热环境下的星敏低频漂移误差,经过地面整星试验验证,可将低频误差控制在 $6'' \sim 8''$ 。

3.2.2 相机星敏间夹角误差

对于大型长焦距相机,为了减小在轨热环境下温度变形对几何特性的影响,在设计和地面验证过程中采取如下设计:

(1) 支架选用低膨胀复合材料,减小温度梯度的变形影响;

(2) 相机与星敏采用一体化和等温化设计的思想,减少温度梯度传递造成相机光轴与星敏光轴指向间的非同向的随机变化;

(3) 根据仿真分析以及温度拉偏试验实现小于 $10''$ 的夹角变化控制。

3.2.3 整星姿态误差

成像过程中,两次星敏有效定姿之间,卫星指向出现的无法测量的漂移范围(包括低频姿态稳定度以及高频颤振):

(1) 高精度姿态稳定度控制,实现 $(5 \times 10^{-4})^{\circ}/\text{s}$ 。

(2) 针对 CMG 等采取专项隔振措施,对振动源进行数学模型建模和仿真分析计算,进行全物理仿真试验,修正数学模型仿真计算结果,验证隔振抑制措施的有效性。

(3) 借鉴日本 ALOS 卫星^[12],安装采用频率 10KHz 的高频角位移传感器,测量数据通过秒脉冲计时与图像曝光时间、卫星姿态时间严格同步,可配合星敏数据进行姿态内插后组合定姿,可解决姿态数据点过稀,及快速姿态机动下稳定度不高的问题。

3.3 定轨精度

整星需通过导航系统获知其在太空中的位置,

结合当前姿态指向获得相机指向地球的那个区域。借鉴国内测绘卫星,采用双频接收机,基于轨道动力学模型的 Kalman 滤波算法,可以测量在地球固联坐标系下卫星的 XYZ 位置信息,事后轨道确定精度可至厘米级^[13-14]。当前,定轨精度已不是影响定位精度的关键。

3.4 时间同步误差

星上通过采用的基于秒脉冲的守时和授时方案:采用高精度时间同步基准、高达 $1\mu\text{s}$ 精度基准计数脉冲可以准确地确定每行图像的成像时刻。通过 GPS 发送的秒脉冲信号,将星上 GPS 定轨数据时间、控制定姿数据时间和相机的辅助数据打入时间进行同步,最终保证时间同步误差为 $50\mu\text{s}$,因时间误差带来的定位误差已可忽略。

3.5 CCD 拼接、配准精度

(1) 采用五谱合一 CCD 探测器,提高谱段配准精度;

(2) 合理设计 CCD 错位间隔,减小沿轨方向错位宽度引起的各 CCD 几何特性不一致。

(3) 经仿真处理,配准精度可实现 0.3 个像元。

3.6 小结

综上,在传统高分辨率光学遥感卫星的星上设计基础上,借鉴国外商业光学卫星和国内测绘卫星,可针对影响几何精度各环节采取一系列设计手段。表 2 对星上对提高几何精度的措施进行了归纳总结,并对一给定 500km 轨道高度,空间分辨率 1m 的相机可实现的定位精度进行预估。

表 2 星上对提高几何精度措施方案对比

Table 2 The comparison of satellite system designs to improve the geometric accuracy

影响因素		星上采取措施		经过地面处理几何定位误差预估
		传统高分辨率光学遥感卫星	新一代高分辨率遥感卫星	
内方位元素	相机内部误差	① 采用高比刚度、低膨胀系数及热稳定性好的材料,进行轻量化结构设计; ② 相机采取高精度热控和无应力装调; ③ 严格控制相机光学系统畸变,对内方位元素进行高精度标定	① 采用高比刚度、低膨胀系数及热稳定性好的材料,进行轻量化结构设计; ② 相机采取高精度热控和无应力装调; ③ 严格控制相机光学系统畸变,对内方位元素进行高精度(5个像元)标定。	1~2 像元, 即 1~2 米。
	星敏定姿误差	① 采用高精度星敏,保证单星敏定姿; ② 下传星敏 q 值,未下传陀螺数据。	① 采用高精度星敏(光轴 $3''$),调整三星敏安装位置关系,最大程度保证双星敏定姿模式; ② 下传星敏 q 值和陀螺原始数据; ③ 提高星敏和陀螺数据输出频率至 8Hz。	$500000 \times \tan(3'')$ $\approx 7.6\text{m}$
外方位元素	星敏低频漂移误差	高精度星敏热控措施	① 高精度星敏热控措施 0.3°C ② 试验室标定星敏低频漂移误差 $6\sim 8''$ 。 ③ 提供星敏支架的温度遥测	$500000 \times \tan(8'')$ $\approx 20.3\text{m}$
	相机与星敏光轴间的夹角变化	无一体化等温设计,仅采用星敏支架与载荷舱板同膨胀系数材料以及热控措施。	星敏与相机的一体化安装和等温化设计,以及高精度热控,小于 $10''$	$500000 \times \tan(10'')$ $\approx 25.4\text{m}$
	整星姿态误差	高精度姿态稳定度控制 $(5 \times 10^{-4})^\circ/\text{s}$	① 高精度姿态稳定度控制 $(5 \times 10^{-4})^\circ/\text{s}$; ② 对 CMC 等采用隔振阻尼装置; ③ 增加 10kHz 采样频率的高频定姿设备(角位移测量单元),将测量数据下传。	-
	定轨精度	采用单频 GPS	采用双频 GPS,实现事后 5cm 定位精度	换算至姿态角度, 可忽略
时间同步误差	未采用秒脉冲进行时间同步	采用秒脉冲,严格保证星上高时间同步精度 $50\mu\text{s}$	可忽略	
提高探测器拼接、配准精度	采用五谱合一 CCD 探测器	采用五谱合一 CCD 探测器,合理设计 CCD 错位间隔	-	

由表 2 看出,传统高分辨率光学遥感卫星对相机内部误差的已进行有效控制,可保证内方位元素的稳定性,获得较好的相对定位精度;而在采取了星敏和相机一体化安装、秒脉冲高时间同步以及安装

高频角位移后,可在最大程度上去除系统误差,从而实现大口径长焦距的高分辨率遥感卫星的绝对几何定位精度 50m 以下,改变传统光学遥感卫星动辄几百米的绝对几何定位精度的局面。目前相机与星敏

在轨情况下的光轴指向的随机误差,受地面测试条件和环境设备的限制,并不能实地验证,成为大大影响高几何定位精度稳定性的“最短板”,还需要通过在轨摸索和标定,进行卫星方与地面系统联合分析。

4 结 论

通过对上述影响我国高分辨率遥感卫星几何精度的星上设计要素的准确识别以及在轨验证,可以总结以下几点结论:

(1) 除了不断减小星上随机误差外,主要应对影响内外方位元素的系统误差的在轨稳定性方面加强设计与验证工作;

(2) 采用与高分辨率影像相匹配的在轨地面检校方法和手段,可以从另一方面验证星上系统误差的在轨稳定性是否存在变化而导致精度下降;

(3) 采用高精度高采样频率的相对姿态测量设备进行星上成像时的同步采样,可有效提高高分辨率卫星高姿态机动成像任务下的内插定姿精度。

综上,在采取以上具有普遍适用性的星地一体化提高几何精度的设计措施下,有效缩短我国高分辨率遥感卫星与测绘卫星以及国外高分辨率遥感卫星的几何精度差距,将不再是遥不可及了。

参 考 文 献

- [1] Digital Globe, Inc. WorldView-1 specifications [EB/OL]. 2007 [2013]. <http://www.digitalglobe.com/downloads/WorldView1-DS-WV1-Web.pdf>.
- [2] GeoEye, Inc. GEOEYE-1: the world's highest resolution commercial earth - imaging satellite [EB/OL]. 2008 [2013]. http://www.geoeye.com/CorpSite/assets/docs/brochures/GeoEye-1_Fact_Sheet.pdf.
- [3] Digital Globe, Inc. WorldView-2 specifications [EB/OL]. 2009 [2013]. <http://www.digitalglobe.com/downloads/WorldView2-DS-WV2-Web.pdf>.
- [4] Boulder, Co. Pleiades constellation capability overview [EB/OL]. 2011 [2013]. http://calval.cr.usgs.gov/JACIE_files/JACIE11/Presentations/WedPM/235_Stussi_JACIE_11.135.pdf.
- [5] 张剑清,潘励,王树根. 摄影测量学[M]. 武汉:武汉大学出版社,2009: 12 - 13.
- [6] Bouillon A, Bernard M, Gigord P, et al. SPOT 5 HRS geometric performances; using block adjustment as a key issue to improve quality of DEM generation [J]. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2006, 60(3): 134 - 146.
- [7] Bouillon A, Breton E, Lebegue L, et al. Spot image quality performances [R]. French: Centre National d'Etudes Spatiales, May 2004.
- [8] 中国资源卫星应用中心. 资源一号卫星 02 星在轨测试报告 [R]. 北京:中国资源卫星应用中心, 2004. [China Centre for Resources Satellite Data and Application. The on-orbit test report of ZY-1 (02) [R]. Beijing: China Centre for Resources Satellite Data and Application, 2004.]
- [9] 张过. 缺少控制点的高分辨率卫星遥感影像几何纠正[D]. 武汉:武汉大学, 2005. [Zhang Guo. Rectification for high resolution remote sensing image under lack of ground control points[D]. Wuhan: Wuhan University, 2005.]
- [10] 唐新明,张过,祝小勇,等. 资源三号测绘卫星三线阵成像几何模型构建与精度初步验证[J]. 测绘学报, 2012, 41(2): 191 - 198. [Tang Xin-ming, Zhang Guo, Zhu Xiao-yong, et al. Triple linear-array imaging geometry model of Ziyuan-3 surveying satellite and its validation[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2012, 41(2): 191 - 198.]
- [11] 唐新明,谢俊峰. 高分辨率遥感卫星测绘关键技术研究综述 [C]. 中国卫星应用大会,北京:2011 年 10 月 26 - 28 日. [Tang Xin-ming, Xie Jun-feng. The key technology research overview of the high resolution remote sensing satellite surveying and mapping [C]. Chinese Satellite Application Assembly, October 26 - 28, 2011.]
- [12] Iwata T. Precision attitude and position determination for the Advanced Land Observing Satellite (ALOS)[C]. SPIE Conference 5659: Enabling Sensor and Platform Technologies for Spaceborne Remote Sensing, Honolulu, USA, November 8, 2004.
- [13] 刘洋,易东云,王正明,等. 基于双频 GPS 观测信息和星间距离测量的高精度星间相对定位方法[J]. 宇航学报, 2007, 28(2): 315 - 321. [Liu Yang, Yi Dong-yun, Wang Zheng-ming, et al. The high-precision inter-satellite relative positioning method based on measurement information of dual-frequency GPS and inter-satellite distance[J]. Journal of Astronautics, 2007, 28(2): 315 - 321.]
- [14] 邢楠,曹建峰,李培佳,等. DORIS 系统自主在轨实时定轨的实现与精度分析[J]. 宇航学报, 2012, 33(5): 533 - 540. [Xin Nan, Cao Jian-feng, Li Pei-jia, et al. Realization and accuracy analysis of real-time orbit determination for DORIS System[J]. Journal of Astronautics, 2012, 33(5): 533 - 540.]

作者简介:

金涛(1973 -),男,副总师,主要从事高分辨率遥感卫星总体设计工作。

通信地址:北京 5142 信箱 362 分箱(100094)

电话:(010)68113242

E-mail: jin920@sohu.com

(编辑:张宇平)