

TANG Xinming, ZHANG Guo, ZHU Xiaoyong, 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. (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.)

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

唐新明¹, 张 过^{1,2}, 祝小勇¹, 潘红播², 蒋永华², 周 平¹, 王 霞¹, 郭 莉¹

1. 国家测绘地理信息局 卫星测绘应用中心, 北京 100830; 2. 武汉大学 测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北武汉 430079

Triple Linear-array Imaging Geometry Model of Ziyuan-3 Surveying Satellite and Its Validation

TANG Xinming¹, ZHANG Guo^{1,2}, ZHU Xiaoyong¹, PAN Hongbo², JIANG Yonghua², ZHOU Ping¹, WANG Xia¹, GUO Li¹

1. Satellite Surveying and Mapping Application Center, National Administration of Surveying, Mapping and Geo-information, Beijing 100830, China; 2. State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract : The Ziyuan-3 (ZY-3) surveying satellite is the first civilian high-resolution stereo mapping satellite of China. Its objective is oriented to plot the 1 : 50 000 and 1 : 25 000 topographic maps. Comparing with foreign commercial mapping satellite imagery, the establishment of our own imaging geometry model is the core technical problem for different products and various applications of ZY-3 surveying satellite. This paper analyses the key problem on precision geometry processing based on the overall design, and proposes the ZY-3 surveying satellite imaging geometry model with the technology of virtual CCD line-array imaging. In addition, this paper utilizes the first orbit imagery of ZY-3 satellite with coverage of the region of Dalian, and produces forward, backward and nadir cameras calibration products. Different ground control points are selected for the block adjustment experiment, and the digital surface model (DSM), digital ortho map (DOM) are generated. The accuracy is validated by check points. It can be seen from the experiment that the planar and vertical accuracy are better than 3 meters and 2 meters, respectively. The experiment demonstrates the effectiveness of ZY-3 surveying satellite imaging geometry model. **Key words :** Ziyuan-3 surveying satellite; imaging geometry model; virtual CCD array; block adjustment; space intersection

摘 要: 根据资源三号测绘卫星的总体设计, 分析资源三号卫星高精度几何处理的关键问题, 结合资源三号测绘卫星几何特性, 提出基于虚拟 CCD 线阵成像技术的资源三号测绘卫星成像几何模型。利用资源三号卫星第一轨影像大连地区数据, 完成前视、正视、后视的传感器校正产品的生产试验, 不同控制点情况下进行平差试验, 初步生产该地区的数字表面模型(DSM)和数字正射影像(DOM), 精度验证结果表明在试验区四角布设控制点的情况下 DOM 平面精度优于 3 m, DSM 高程精度优于 2 m。与国外相近分辨率的卫星相比, 资源三号测绘卫星可以达到较高的几何精度。

关键词: 资源三号测绘卫星; 成像几何模型; 虚拟 CCD 阵列; 区域网平差; 空间前方交会

中图分类号: P236

文献标识码: A

文章编号: 1001-1595(2012)02-0191-08

基金项目: 国家科技支撑计划(2011BAB01B01; 2011BAB01B02; 2012BAH28B04; 2011AA120404); 国防科工局“资源三号卫星数据处理、应用及在轨测试关键技术研究”项目; 国家自然科学基金(40930532)

1 引 言

资源三号测绘卫星是中国首颗民用高分辨率光学传输型立体测图卫星, 主要搭载有一台地面分辨率 2.1 m 的高分辨率正视全色延时积分成像(TDI CCD)相机、两台地面分辨率优于 3.6 m 的前视、后视全色 TDI CCD 相机和一台地面分辨率优于 6.0 m 的正视多光谱相机。资源三号测绘卫

星集测绘和资源调查功能于一体, 用于长期、连续、稳定、快速地获取覆盖全国的高分辨率立体影像和多光谱影像以及辅助数据, 生产全国基础地理信息 1 : 5 万测绘产品, 开展 1 : 2.5 万以及更大比例尺地图的修测和更新, 开展国土资源调查和监测(参见 http://www.sasmac.cn/portal_space)。因此与采用国外商业卫星遥感影像进行测图相比, 建立中国自主的测绘卫星的成像几何

模型,进而生产影像产品和测绘产品,是卫星测绘应用的核心技术问题。

资源三号测绘卫星是线阵推扫式光学卫星,3台全色相机采用的透射式测绘相机,幅宽均大于50 km。相机的 CCD 采用了线阵拼接的方案。其中,前后视相机是4片 TDI CCD 拼接,正视相机是3片 TDI CCD 拼接,如图1所示。正视相机是将3片 CCD 在焦面上交错安装在透射区和反射区上,形成近似直线的一条连续 CCD 阵列。

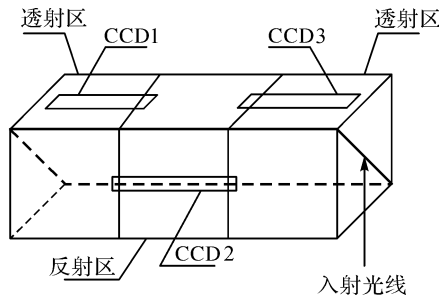


图1 资源三号测绘卫星正视相机 CCD 拼接示意图

Fig. 1 ZY-3 surveying satellite nadir camera's CCD splicing

由于多个 CCD 线阵的安装精度以及 TDI CCD 沿轨方向宽度等因素的限制,多 CCD 在焦平面不可能形成一条严格意义上的 CCD 线阵。在实际的摄影测量数据生产中,一般使用卫星影像供应商提供的按照成像几何特性和辐射特性拼接后的影像,如 IKONOS^[1] 和 WorldView-2^[2-3] 等进行摄影测量处理。影像的拼接精度会直接影响后续摄影测量生产的精度,如在利用 IKONOS-2 立体像对匹配生产数字高程模型 (DEM) 时,拼接精度不高会导致 DEM 精度的损失^[4]。因此利用拼接后的影像建立成像模型是实现卫星高精度立体测图的关键问题^[5]。法国、美国等国家由于有各自本国的卫星,对这一问题研究较为深入,如何对中国自主的首颗测绘卫星进行拼接,进而构建中国民用测绘卫星的成像几何模型是实现国产民用测图卫星高精度测图的关键。

针对上述问题,本文利用基于虚拟 CCD 线阵成像技术的视场拼接方案,在焦平面上构造出无畸变的 CCD 阵列,对原始多个 CCD 的影像按照理想的线中心投影成像方式进行重新排列,实现了多个 CCD 影像的几何和辐射无缝拼接。在此基础上,建立拼接后影像的严密成像几何模型和有理函数模型 (RFM),利用资源三号测绘卫星传

感器校正产品进行不同控制点情况下的区域网平差试验,生产 DSM 和 DOM,验证了资源三号测绘卫星传感器校正产品的几何精度。

2 资源三号测绘卫星三线阵成像几何模型的构建

2.1 基于虚拟 CCD 阵列的传感器校正产品要求

为满足国产民用卫星立体测图的需求,需要对卫星的原始数据进行辐射和几何处理,形成不同级别的影像产品。资源三号测绘卫星的传感器校正产品是对 0 级产品经辐射校正和传感器校正处理后形成的影像产品,产品带有严密成像几何模型和 RFM 模型,但未作系统几何纠正,是进行实际测图的标准影像(该产品和 Worldview-2 的 basic 产品^[3]以及 Pleiades 的 level1 类似^[5])。

资源三号测绘卫星相机采用多片 CCD 拼接而成,为了形成“整景”和“整条带”的影像,采用虚拟 CCD 的方法,即以多个 CCD 沿轨道方向安装的位置为基准,将虚拟 CCD“安装”在多个 CCD 沿轨道方向的中心线上。如图 2 所示,其中实线表示实际的多个 CCD 线阵,虚线表示虚拟的 CCD, d_1 、 d_2 分别表示虚拟 CCD 与真实 CCD 沿着轨道方向的最大距离。

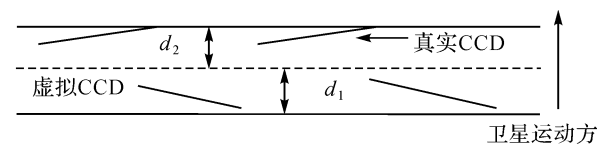


图2 虚拟 CCD 和实际 CCD 在焦面位置相对关系示意图
Fig. 2 Relative position for virtual CCD and practical CCD in the focal plane

虚拟 CCD 影像需达到如下要求:① 垂直轨道方向的影像为理想的无畸变的线中心投影;② 沿轨道方向的虚拟线阵的积分时间一致,无积分时间跳变。

2.2 虚拟 CCD 和实际 CCD 沿轨方向像差分析

虚拟 CCD 的“安装”位置和真实 CCD 的安装位置在沿轨方向上存在偏差,该偏差将导致同轨立体或二/三线阵同轨立体成像处理高程精度的损失。图 3 为推扫式成像过程中垂直于 CCD 线阵的截面图。图中虚拟 CCD、实际 CCD 与截面的交点(图中黑点所示)成像光线指向存在 $\delta\alpha$ 的角度差, ϕ 为 $\delta\alpha$ 的角平分线与垂线的交角。

当虚拟 CCD 探元光线的物方投影点的高程

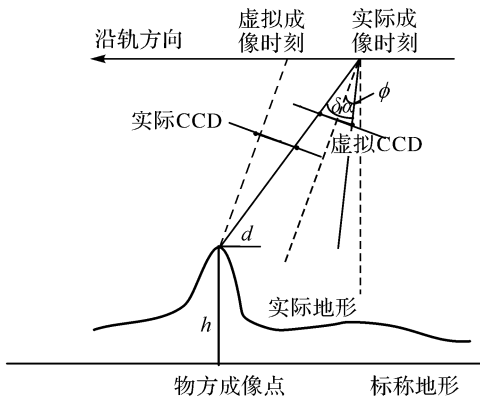


图 3 CCD 影像拼接误差影响因素图

Fig. 3 Factors for the CCD image splicing error

(图中为标称地形高程)与该点真实高程的差值为 h 时(如图 3 所示),该地形起伏产生的像差 d (为物方距离)为

$$d = h \tan(\phi + \delta\alpha/2) - h \tan(\phi - \delta\alpha/2) \quad (1)$$

根据三角函数性质,将公式(1)展开得到公式(2)

$$d = 2h \tan(\delta\alpha/2) [(1 + \tan^2 \phi) / (1 - \tan^2 \phi \cdot \tan^2 \delta\alpha/2)] \quad (2)$$

由于虚拟 CCD 和实际 CCD 安装相对于投影中心的角度 $\delta\alpha \approx 0$,因此 $\tan(\delta\alpha/2) \approx \tan(\delta\alpha)/2$ 。在实际形成同轨立体中, $\phi < 45^\circ$ (资源三号测绘卫星为 22°),因此 $\tan \delta\alpha \approx 0, \tan \phi < 1$,则有 $1 - \tan^2 \phi \cdot \tan^2 \delta\alpha/2 \approx 1$ 。公式(2)可以近似为

$$d \approx h \tan(\delta\alpha) (1 + \tan^2 \phi) \quad (3)$$

在摄影测量中,有

$$\delta_h = \frac{H}{B} \delta_\rho (m) \quad (4)$$

式中, H 为航高; B 为基线; δ_ρ 为视差的标准差; δ_h 为高程误差。根据误差传播定律,视差的标准差 δ_ρ 可以表示为

$$\delta_\rho = \sqrt{d^2 + d^2} = \sqrt{2} d \quad (5)$$

在航天摄影测量中,高基比 H/B 可以由立体像对的交会角求得

$$H/B = 1 / (2 \tan(\Phi/2)) \quad (6)$$

式中, Φ 为立体像对的交会角,在资源三号测绘卫星前、后视形成的立体像对中,根据卫星的设计参数可知,交会角为 $22^\circ + 22^\circ$ (前视、后视的测摆角度相加)。

将式(5)、(6)代入式(4)中有

$$\delta_h = \frac{H}{B} \delta_\rho (m) = \sqrt{2} d / (2 \tan(\Phi/2)) = \sqrt{2} h \tan(\delta\alpha) (1 + \tan^2 \phi) / (2 \tan(\Phi/2)) \quad (7)$$

由式(3)可知,虚拟成像过程中,当 $\delta\alpha$ 趋近 0 时,

即虚拟 CCD 安装位置与真实 CCD 位置偏差很小时,因采用平均高程面引起的像差 D 也趋近为 0,由此引起的高程误差 δ_h 可以忽略。在该情况下,可采用该成像区域平均高程,而不需要精确的 DEM。

当 $\delta\alpha$ 取值不能被忽略,即虚拟 CCD 安装位置与真实 CCD 安装位置偏差较大时,需要根据 $\delta\alpha$ 和对高程精度 δ_h 的要求,来选取合适精度的 DEM 用于拼接;此时, h 便体现为 DEM 的精度,根据式(3),当 DEM 精度足够高时, h 足够小, d 的取值也趋近为 0。以资源三号测绘卫星前视相机为研究对象,分析重成像过程引起的像差,进而分析该像差对高程精度的影响。根据实验室的前视相机的多片 CCD 沿着轨道向的安装范围测量值,虚拟 CCD 与原始各 CCD 沿轨道向的指向角 $\delta\alpha < 0.00075^\circ$,前视 $\phi = \pm 22^\circ$ 。根据式(3),对于本文试验区——大连地区,地形起伏所引起的像差为

$$d_{\max} < 800/2 \times \tan(0.00075^\circ) [1 + \tan^2(22^\circ)] = 0.006(m) \quad (8)$$

根据公式(7),把像差换算为高程精度,则对于大连地区有

$$\delta_h < \sqrt{2} d_{\max} / (2 \tan(\Phi/2)) = \sqrt{2} \times 0.006 / (2 \tan(22^\circ)) m = 0.0107(m) \quad (9)$$

考虑到摄影测量过程中的选点误差,该高程精度损失相对较小。因此,在实际算法应用中使用平均高程带来的高程精度损失可以忽略不计。

2.3 基于虚拟 CCD 重成像算法

各片 CCD 中的每个 CCD 探元在相机坐标系下的指向角为 (ψ_x, ψ_y) ,表示每个探元摄影光束在相机坐标系下的几何关系^[5-6]。同样,根据虚拟 CCD 的“安装”位置,按照理想线中心投影成像原理,计算虚拟 CCD 每个探元在相机坐标系的指向角。在此基础上,按照如下步骤进行基于虚拟 CCD 的影像拼接:

- (1) 将虚拟 CCD 影像上任意一个像点,利用像点所对应探元的指向角、实际轨道参数和姿态参数,建立虚拟 CCD 影像严密成像几何模型^[7],利用该模型将像点投影到 SRTM-DEM 或该成像区域平均高程面上,得到该点对应的大地坐标;
- (2) 根据实际 CCD 影像的严密成像几何模型,将第 1 步中求得的大地坐标投影到实际 CCD 影像上;
- (3) 对实际 CCD 成像影像灰度进行重采样,赋予虚拟探元重成像对应的像素;
- (4) 重复以上步骤获取整个成像范围的重成

像影像。

2.4 传感器校正产品的成像几何模型

传感器校正产品的几何模型指的是地物点的影像坐标 (x, y) 和地面坐标 (X, Y, Z) 之间的数学关系^[7-8], 包含 2 类, 第 1 类是严密成像几何模型, 第 2 类是通用成像几何模型。

基于线阵 CCD 成像瞬间各 CCD 探元扫描地面的视线方向矢量构建资源三号测绘卫星传感器校正产品的严密成像几何模型, 通过求解成像瞬间各 CCD 探元的视线方向与地球椭球模型的交点, 建立像点与地面点之间一一对应的关系^[6-8]。

针对资源三号测绘卫星下传数据, GPS 测定的是 GPS 相位中心的位置, 姿态敏感器测定的是星敏到 J2000 坐标系下的指向。为了得到相机主光轴的位置和姿态, 需要将 GPS 和星敏测定的数据转为相机的位置和指向。因此需通过地面测定 GPS 相位中心在卫星本体坐标系中 3 个偏移 $[D_x$

D_y $D_z]^T$ 以及星敏感器本体系和卫星本体系之间的坐标旋转关系 R_{star}^{body} 、相机在卫星平台上安装矩阵 R_{camera}^{body} 和 $[d_x$ d_y $d_z]^T$ 以及虚拟 CCD 线阵上每个像素在相机坐标系的指向角 (ψ_x, ψ_y) 等。据此在不考虑大气折射影响的条件下, 构建资源三号测绘卫星传感器校正产品的严密成像几何模型, 即

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{WGS-84} = \begin{bmatrix} X_{GPS} \\ Y_{GPS} \\ Z_{GPS} \end{bmatrix} + mR_{J2000}^{WGS-84} R_{Star}^{J2000} (R_{star}^{body})^T \cdot \left\{ \begin{bmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \end{bmatrix} + R_{camera}^{body} \begin{bmatrix} \tan(\psi_y) \\ \tan(\psi_x) \\ -1 \end{bmatrix} f \right\} \quad (10)$$

式中, $[X$ Y $Z]^T_{WGS-84}$ 表示地面一点 P 在 WGS-84 下的三维笛卡儿坐标; m 为比例系数; f 为相机主距。

为了方便资源三号测绘卫星的数据处理, 本文在构建传感器校正产品严密几何模型的基础上, 同样构建资源三号测绘卫星的 RFM 模型。

RFM 模型将地面点大地坐标与其对应的像点坐标用比值多项式关联起来。为了增强参数求解的稳定性, 将地面坐标和影像坐标正则化到 -1 和 1 之间。对于一个影像, 定义如下比值多项式^[7,9]

$$\left. \begin{aligned} Y &= \frac{Num_L(P, L, H)}{Den_L(P, L, H)} \\ X &= \frac{Num_s(P, L, H)}{Den_s(P, L, H)} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

根据文献^[7, 9-10], 求解 RFM 模型参数: 根据影像覆盖范围, 利用美国地质调查局提供的

全球 1 km 分辨率 DEM, 根据公式(11)计算该传感器校正产品覆盖区域的最大最小椭球高。然后, 在高程上以一定间隔分层, 在平面上, 以一定的格网大小建立地面规则格网, 生成控制点地面坐标, 最后利用传感器校正产品的严密几何模型的反变换模型(公式(12)), 计算控制点的影像坐标。通过加密控制格网和层, 建立独立检查点。利用控制点坐标用计算传感器校正产品坐标和地面坐标的归一化参数, 将控制点和检查点坐标归一化。采用最小二乘平差原理解求 RFM 模型参数^[7], 从而获得资源三号测绘卫星传感器校正产品的 RFM 模型参数, 并用检查点进行精度检查。

3 资源三号测绘卫星摄影测量处理

3.1 资源三号测绘卫星传感器校正产品区域网平差模型

资源三号测绘卫星影像的 RFM 模型采用与地面无关的模式, 采用传感器校正产品的严密几何成像模型, 存在一定的系统性误差^[7,10]。因此可以通过影像自身之间的约束关系和一定数量的控制点补偿有理函数模型的系统误差来提高定位精度, 这就是基于有理函数模型的区域网平差。

分析卫星系统参数对影像几何精度的影响, 需要改正两类误差, 一类参数纠正行方向的误差, 一类参数纠正列方向的误差。其中行参数吸收轨道、姿态在行方向上的影响, 列参数吸收轨道、姿态在列方向上的影响^[11-15], 因此可以采用定义在影像面的仿射变换、平移变换、比例变换等来校正此类误差。可以在影像上定义变换

$$\left. \begin{aligned} F_x &= px_0 + px_1 \cdot sample + px_2 \cdot line + sample - x = 0 \\ F_y &= py_0 + py_1 \cdot sample + py_2 \cdot line + line - y = 0 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

$$\left. \begin{aligned} F_x &= px_0 + px_2 \cdot line + sample - x = 0 \\ F_y &= py_0 + py_2 \cdot line + line - y = 0 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

$$\left. \begin{aligned} F_x &= px_0 + sample - x = 0 \\ F_y &= py_0 + line - y = 0 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

式中, (x, y) 是控制点在传感器校正产品影像上的量测坐标; $(sample, line)$ 为地面控制点利用 RFM 模型参数投影到影像面的投影值, 该变换参数和 RFM 模型参数一起等同传感器校正产品的严密几何模型的卫星系统参数, 本文采用直接列改化法方程的策略, 消除一类连接点地面坐标未知数, 仅仅保留像面的变换系数, 然后采用和经典

光束法平差一样的模式进行平差^[7]。

3.2 资源三号测绘卫星传感器校正产品立体定向模型

本文通过基于 RFM 模型的空间前方交会进行立体定向。根据 RFM 模型公式(11)进行公式变形可得

$$\left. \begin{aligned} F_X = Num_s(P,L,H) - X \cdot Den_s(P,L,H) = 0 \\ F_Y = Num_L(P,L,H) - Y \cdot Den_L(P,L,H) = 0 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

分别对经纬度以及高程求导线性化,所得误差方程为

$$V = Bx - l, \quad W \quad (16)$$

式中, $B = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_X}{\partial lat} & \frac{\partial F_X}{\partial lon} & \frac{\partial F_X}{\partial hei} \\ \frac{\partial F_Y}{\partial lat} & \frac{\partial F_Y}{\partial lon} & \frac{\partial F_Y}{\partial hei} \end{bmatrix}$; $l = \begin{bmatrix} -F_X^x \\ -F_Y^x \end{bmatrix}$; $x =$

$[lat \quad lon \quad hei]^T$; W 为权矩阵。

由于公式(16)是公式(15)线性化得近似公式,所以在求解的过程中需要初值进行迭代计算。经纬度的初值可由平均高程和像点坐标利用 RFM 模型正算获得^[7]。

4 试验验证和分析

4.1 试验数据

本文试验数据采用 2012 年 1 月 11 日获取的大连地区的资源三号测绘卫星三线阵影像,影像大小为 50 km×50 km,为平原和丘陵地形,为了验证资源三号测绘卫星的几何精度,利用 CORS,在地面量测了 18 个 GPS 点,其中 2 个点位附近为双点,精度优于 0.1 m,像点量测精度为 0.5 像素。

4.2 RFM 模型传感器校正产品精度

利用 2.4 节的处理技术,对大连地区资源三号测绘卫星的三线阵数据进行 RFM 模型替代严密几何模型的精度试验,采用 400 像素×400 像素的像面格网,采用高程分层为 15,求解分母不相等的三阶 RFM 模型参数^[7],精度如表 1 所示。资源三号测绘卫星正视的 RFM 模型替代严密几何模型的精度 0.04%像素,前视和后视均为 0.1%像素,因此资源三号测绘卫星前正后视传感器校正产品的 RFM 模型替代严密几何模型的精度均优于 5%像素,满足摄影测量生产的需求^[7]。

表 1 资源三号测绘卫星正视、前视、后视 RFM 模型参数求解精度

Tab. 1 Errors for ZY-3 surveying satellite nadir/ forward/ backward RFM model 像素

		X		Y		平面	
		最大	中误差	最大	中误差	最大	中误差
正视	检查点	1.50E-03	3.47E-04	-1.26E-03	3.19E-04	1.72E-03	4.72E-04
	控制点	-1.52E-03	3.46E-04	-8.01E-04	2.86E-04	1.59E-03	4.48E-04
前视	检查点	-4.14E-03	1.16E-03	-2.83E-03	6.33E-04	4.90E-03	1.32E-03
	控制点	-4.20E-03	1.16E-03	-1.84E-03	5.46E-04	4.25E-03	1.28E-03
后视	检查点	3.21E-03	1.04E-03	-2.54E-03	6.51E-04	3.77E-03	1.23E-03
	控制点	-4.22E-03	1.08E-03	-1.63E-03	5.78E-04	4.32E-03	1.23E-03

4.3 区域网平差试验

为了验证哪种 RFM 参数精化模型适合于资源三号测绘卫星的传感器校正产品,特进行分组试验,具体试验方案见表 2,并进行了前正后三视和前后两视试验,验证正视影像加入平差,对提高平面精度或者高程的作用。表 3 为三视影像平差

结果,表 4 为两视影像平差结果。对比表 3 和表 4,三视和两视影像的平差结果,高程精度基本一致,平面精度略有提升,符合资源三号测绘卫星设计思路,高程精度决定于前后视的交会角,增加一个正视的影像,增加了观测值,提高了平面定位精度。

表 2 试验分组情况表

Tab. 2 Different experimental groups

类别序号	描述
1	所有点利用 RFM 模型参数进行直接空间前方交会
2	1 个控制点采用公式(14)作为 RFM 模型参数精化模型进行区域网平差,其余点当做检查点
3	2 个控制点采用公式(13)作为 RFM 模型参数精化模型进行区域网平差,其余点当做检查点
4	3 个控制点采用公式(12)作为 RFM 模型参数精化模型进行区域网平差,其余点当做检查点
5	4 个控制点采用公式(12)作为 RFM 模型参数精化模型进行区域网平差,其余点当做检查点
6	所有的点控制点采用公式(12)作为 RFM 模型参数精化模型进行区域网平差,无检查点

表 3 前正后三视影像各组试验结果

Tab. 3 Experimental group results for forward,backward and nadir imagery

	控制点				检查点			
	X	Y	平面	高程	X	Y	平面	高程
1					4.292	6.119	7.475	36.580
2	0.000	0.000	0.000	0.001	4.008	5.549	6.845	37.443
3	0.000	0.000	0.000	0.000	2.260	3.484	4.153	16.031
4	0.000	0.000	0.000	0.000	2.341	2.154	3.181	1.768
5	2.151	1.113	2.422	0.570	2.037	2.169	2.975	1.787
6	2.011	1.944	2.797	1.299				

表 4 前后两视影像各组试验结果

Tab. 4 Experimental group results for forward and backward imagery

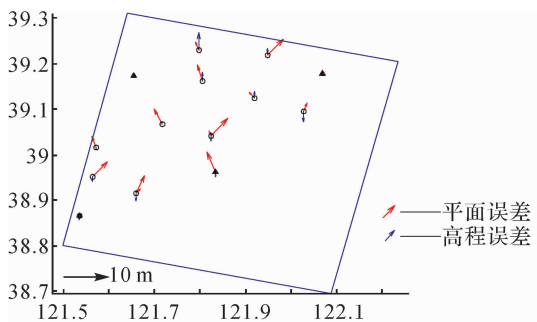
	控制点(RMS)				检查点(RMS)			
	X	Y	平面	高程	X	Y	平面	高程
1					4.188	9.676	10.543	37.000
2	0.000	0.000	0.000	0.000	4.183	8.920	9.852	38.185
3	0.000	0.000	0.000	0.000	3.470	6.229	7.130	16.394
4	0.000	0.000	0.000	0.000	2.412	2.203	3.266	1.801
5	1.893	1.379	2.342	0.570	2.193	2.185	3.095	1.816
6	1.920	1.926	2.720	1.303				

根据文献[16],在采用仿射变换的 RFM 模型参数精化模型时,四角布控方案可以获得最高的平差精度,三视和两视情况的区域网平差中的平面和高程残差如图 4(a)和(b)所示,无论哪种

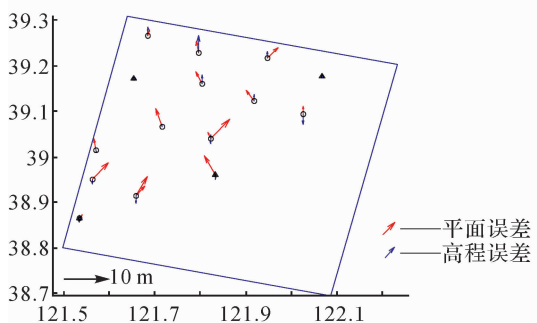
情况基本符合控制点控制区域重心位置的高程残差小,越靠近边缘,高程的残差大的规律,因此控制点布设应尽可能靠近立体重叠影像边缘,充分控制感兴趣区域。

4.4 DSM 和 DOM 生产试验结果

将前正后视影像利用 4 个控制点平差后,采用密集匹配技术^[17-19]生产该区域的 DSM(如图 5 所示),在此基础上生产正射影像^[7](如图 6 所示),利用其余 14 个 GPS 点作检查点,检查结果如图 7 所示,其中 DSM 的高程中误差为 2.07 m,最大误差为 3.767 m,正射影像的平面中误差为 2.93 m,最大误差为 4.38 m。



(a) 前正后视影像平差残差分布



(b) 前后视影像平差残差分布

图 4 四角点布设控制点位残差分布图

Fig. 4 Ground control points residual plots in four corners

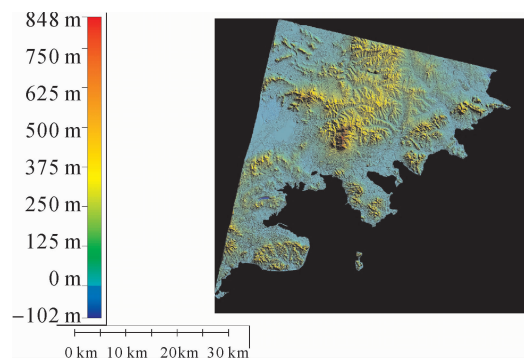


图 5 前后视影像自动匹配生成的 DSM 示意图

Fig. 5 DSM generated from forward and backward image matching

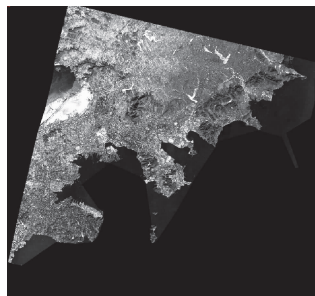


图 6 利用正视影像和自动匹配生成的 DSM 生产的 DOM 示意图

Fig. 6 DOM generated from forward and backward image matching's DSM

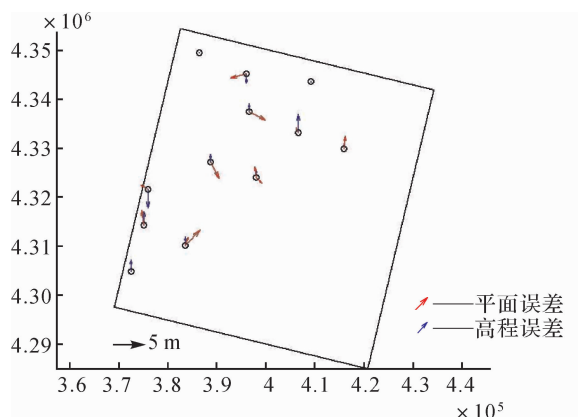


图 7 DSM 和 DOM 独立检查点残差图

Fig. 7 DSM and DOM check points residual plots

4.5 试验结果分析

试验结果分析如下:

从表 2~4 可以看出,资源三号测绘卫星三线阵传感器校正产品 RFM 模型替代严密几何模型的精度均优于 0.1%,满足摄影测量对几何模型的要求。

从表 6、7 可以看出,无控制点条件下的直接空间前方交会获得的地面点坐标的精度比较差,前正后三线阵影像平面中误差为 7.475 m,高程中误差为 36.580 m,前后视两线阵影像平面中误差为 10.543 m,高程中误差为 37.000 m;四角点布设控制点条件下的前方交会获得的地面点坐标的精度大幅度提高,前正后三线阵影像平面中误差为 2.975 m,高程中误差为 1.787 m,前后视两线阵影像平面中误差为 2.266 m,高程中误差为 1.816 m;在有少量控制点后平面高程精度大幅度提高说明三线阵影像有明显的系统偏差。

从表 6、7 第 5 组、第 6 组试验可以看出,采用

4 个点和所有点都当做控制点时高程精度没有很明显的提高,说明 4 个控制点建立的像面仿射变换精化 RFM 模型参数能完全消除资源三号测绘卫星的误差。

5 结论及建议

根据资源三号测绘卫星第一景影像的处理结果,虚拟 CCD 拼接重成像引起的高程损失为 0.010 7 m,相对于资源三号测绘卫星前后视沿着轨道方向的分辨率 3.6 m 而言,损失为 0.003 像素,基本无损。该方法可以用于资源三号测绘卫星应用系统建设。RFM 模型替代前正后视影像的严密几何模型的及高度均优于 0.1% 像素,也可用于资源三号测绘卫星严密几何模型的替代,精度无损。

本文采用的像面仿射变换模型加 RFM 模型在四角点布控方案可以获得较高的平差精度,平面为 3.2 m,高程为 1.8 m;在此基础上进行 DSM 产生和 DOM 生产,DSM 精度为 2.07 m,DOM 精度为 2.92 m,可以满足 1:5 万地形测图规范要求可为后续资源三号测绘卫星的 4D 产品生产提供指导作用。

本文主要针对第一颗民用测绘卫星的第一轨影像进行快速处理得到的初步成果。由于卫星的轨道还没有完全稳定,相机还要进行一系列调整,姿态数据还没有全部下传,因此后续还需要进行大量的轨道、姿态后处理、几何检校、以及开展不同地形、不同轨道等区域的大量在轨测试工作。

资源三号测绘卫星三线阵影像从平差结果和生产的 DSM/DOM 检查精度来看,已经达到了国外成熟商业卫星同等分辨率情况下的平面高程几何精度,标志着中国几何高精度卫星载荷平台研制水平和地面处理水平达到了国际先进水平。资源三号测绘卫星是国产卫星有过去几何定性到高精度定量的里程碑,有着广阔的应用前景。

致谢:感谢黑龙江省测绘地理信息局测量了大连区域的 GPS 点;感谢北京吉威数源信息技术有限公司、中国测绘科学技术研究院和航天五院 503 所在软件方面的支持。

参考文献:

[1] DIAL G F, BOWEN H, GERLACH B, et al. IKONOS Satellite, Sensor, Imagery, and Products [J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 88(1-2): 23-36.

- [2] Digital Globe. DigitalGlobe Core Imagery Products Guide. [EB/OL]. [2012-01-01]. http://www.digitalglobe.com/digitalglobe2/file.php/811/DigitalGlobe_Core_Imagery_Products_Guide.pdf.
- [3] De VALENCIA K J, PAREDES Jr F, WALKER A S. Rigorous Sensor Modeling and Triangulation for Orbview-3 [EB/OL]. [2012-01-01]. <http://www.asprs.org/a/publications/proceedings/reno2006/0030.pdf>.
- [4] ZHANG L, GRUEN A. Multi-image Matching for DSM Generation from IKONOS Imagery[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2006, 60 (3): 195-211.
- [5] De LUSSY F, KUBIK P, GRESLOU D, et al. Pleiades-HR Image System Products and Quality Pleiades-HR Image System Products and Geometric Accuracy [EB/OL]. [2012-01-01]. <http://cmsv021.rrzn.uni-hannover.de/fileadmin/institut/pdf/075-delussy.pdf>.
- [6] GAEL Consultant. SPOT 123-4-5 Geometry Handbook [EB/OL]. [2012-01-01]. <http://www-igm.univ-mlv.fr/~riazano/publications/GAEL-P135-DOC-001-01-04.pdf>.
- [7] ZHANG Guo. Rectification for High Resolution Remote Sensing Image Under Lack of Ground Control Points[D]. Wuhan: Wuhan University, 2005. (张过. 缺少控制点的高分辨率卫星遥感影像的几何纠正[D]. 武汉: 武汉大学, 2005.)
- [8] ZHU Xiaoyong, ZHANG Guo, TANG Xinming, et al. Research and Application of CBRS02B Image Geometric Exterior Calibration[J]. Geography and Geo-information Science, 2009, 25(3): 16-18. (祝小勇, 张过, 唐新明, 等. 资源一号 02B 卫星影像几何外检校研究及应用[J]. 地理与地理信息科学, 2009, 25(3): 16-18.)
- [9] OGC (OpenGIS Consortium). The OpenGIS Abstract Specification, Topic 7: the Earth Imagery Case[EB/OL]. [2012-01-01]. <http://www.opengis.org/public/abstract/99-107.pdf>.
- [10] TAO V C, HU Yong. A Comprehensive Study of the Rational Function Model for Photogrammetric Processing [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2001, 67 (12): 1347-1357.
- [11] GRODECKI J, DIAL G. Block Adjustment of High-resolution Satellite Images Described by Rational Polynomials [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2003, 69: 59-68.
- [12] DIAL G, BOWEN H, GERLACH F, et al. IKONOS Satellite, Imagery, and Products[J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 88(1-2): 23-36.
- [13] FASER C S, HANLEY H B. Bias-compensated RPCs for Sensor Orientation of High-resolution Satellite Imagery [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2005, 71(8): 909-915.
- [14] ZHANG Guo, LI Deren, YUAN Xiuxiao, et al. The Mapping Accuracy of Satellite Imagery Block Adjustment [J]. Journal of Zhengzhou Institute of Surveying and Mapping, 2006, 23(4): 239-241. (张过, 李德仁, 袁修孝, 等. 卫星遥感影像的区域网平差成图精度[J]. 测绘科学技术学报, 2006, 23(4): 239-241.)
- [15] LI Deren, ZHANG Guo, JIANG Wanshou, et al. SPOT-5 HRS Satellite Imagery Block Adjustment without GCPS or with Single GCP[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2006, 31(5): 377-381. (李德仁, 张过, 江万寿, 等. 缺少控制点的 SPOT-5 HRS 影像 RPC 模型区域网平差[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2006, 31(5): 377-381.)
- [16] ZHANG Guo, LI Zhen, PAN Hongbo, et al. Orientation of Spaceborne SAR Stereo Pairs Employing the RPC Adjustment Model[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(7): 2782-2792.
- [17] JIANG Wanshou. Multiple Aerial Image Matching and Automatic Building Detection [D]. Wuhan: Wuhan University, 2004. (江万寿. 航空影像多视匹配与规则建筑物自动提取方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2004.)
- [18] ZHANG Li, ZHANG Jixian. Multi-image Matching for DEM Generation from Satellite Imagery[J]. Science of Surveying and Mapping, 2008, (S2): 35-39. (张力, 张继贤. 基于多基线影像匹配的高分辨率遥感影像 DEM 自动生成[J]. 测绘科学, 2008, (S2): 35-39.)
- [19] ZHANG Guo, CHEN Tan, PAN Hongbo, et al. Patch-based Least Squares Image Matching Based on Rational Polynomial Coefficients Model [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2011, 40(5): 592-597. (张过, 陈钊, 潘红播, 等. 基于有理多项式系数模型的物方面元最小二乘匹配[J]. 测绘学报, 2011, 40(5): 592-597.)

(责任编辑: 雷秀丽)

收稿日期: 2012-02-06

修回日期: 2012-03-15

第一作者简介: 唐新明(1966—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事 GIS 和航天摄影测量的研究与应用工作。

First author: TANG Xinming (1966—), male, PhD, researcher, PhD supervisor, majors in GIS, Space photogrammetry and related application.

E-mail: tangxinming99@gmail.com