

LI Deren. China's First Civilian Three-line-array Stereo Mapping Satellite: ZY-3[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2012, 41(3):317-322. (李德仁. 我国第一颗民用三线阵立体测图卫星——资源三号测绘卫星[J]. 测绘学报, 2012, 41(3):317-322.)

## 我国第一颗民用三线阵立体测图卫星——资源三号测绘卫星

李德仁

武汉大学 测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430079

### China's First Civilian Three-line-array Stereo Mapping Satellite: ZY-3

LI Deren

State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

**Abstract:** On January 9th, 2012, China launched its first civilian three-line-array stereo mapping satellite - ZY-3. ZY-3 is equipped with 2 front and back view TDI CCD cameras having the resolution better than 3.5 m and the width better than 50 km, 1 TDI CCD camera with the resolution better than 2.1 m and the width better than 50 km and 1 multispectral camera with the resolution better than 5.8 m. In order to ensure accuracy and reliability, ZY-3 adopts a large platform which is equipped with double-frequency GPS and more gyroes. ZY-3 obtains its geolocation accuracy better than 15 m without GCPs, geolocation accuracy better than 3 m and plane geolocation accuracy better than 4 m with GCPs which completely satisfies 1 : 50 000 mapping precision.

**Key words:** ZY-3 survey satellite; precision testing

**摘 要:** 2012 年 1 月 9 日, 我国成功发射了第一颗民用三线阵立体测图卫星“资源三号测绘卫星”, 资源三号测绘卫星配置 2 台分辨率优于 3.5 m、幅宽优于 50 km 的前后视全色 TDI CCD 相机, 1 台分辨率优于 2.1 m、幅宽优于 50 km 的正视全色 TDI CCD 相机和 1 台分辨率优于 5.8 m 的多光谱相机; 为了保证精度精度和可靠性, 资源三号测绘卫星采用大平台, 并配置双频 GPS 以及多个陀螺, 经过处理, 资源三号无控制点直接定位优于 15 m, 带控制点高程精度优于 3 m, 平面精度优于 4 m, 完全满足 1 : 50 000 测图精度。

**关键词:** 资源三号测绘卫星; 精度验证

中图分类号: P23

文献标识码: A

文章编号: 1001-1595(2012)03-0317-06

## 1 概 述

2012 年 5 月 18 日是王之卓院士逝世 10 周年纪念日, 王之卓院士在 1965 年的《测绘通报》的“航空摄影测量科学技术的现代发展”一文中写到:“将来人造卫星会为测图人员提供编制或者修订地球上地形图的像片, 由于像片的摄影高度很大, 影像的解译能力和比例尺将是一个问题。在 200 英里高空摄影的像片不能够满足大比例尺地图所需的碎步资料, 但是对于中小比例尺地图来说, 获得的资料还是十分丰富的, 这样高速取得的大量测图资料据说将会显著减少现有测图方面的时间和成本”<sup>[1]</sup>, 科学预测到“将来人造卫星会为测图人员提供编制或修订地球上地形图的像片”<sup>[1]</sup>。

2012 年是我国民用航天卫星测绘取得重要进展的一年。2012 年 1 月 9 日北京时间 11 时 17 分, 我国在太原卫星发射中心用长征四号乙运载火箭, 成功将我国第一颗高分辨率立体测图卫星“资源三号测绘卫星”送入太空, 火箭点火起飞约

12 min 后, 西安卫星测控中心传来的数据表明, “资源三号测绘卫星”卫星与火箭分离, 成功进入高度约 500 km、倾角约 97.5°的太阳同步轨道, 卫星发射取得圆满成功, 1 月 11 日上午星上 4 台相机成功开机, 获取了第一批卫星图像。资源三号测绘卫星是我国自主设计和发射的第一颗民用高分辨率立体测图卫星, 主要用于 1 : 50 000 立体测图及更大比例尺基础地理产品的生产和更新以及开展国土资源调查与监测 (<http://www.sasmac.cn/>)。“资源三号测绘卫星”的成功发射凝聚了测绘人的心血, 在总结国外测图卫星的经验基础上, 我国资源三号卫星参数决定采用 10 bit 量化, 将正视图像的分辨率提高到 2.5 m, 同时加 5.8 m 多光谱图像, 以保证地物解译能力, 要求全色和多光谱采用相同的幅宽, 尽可能保证三线阵相机为无畸变系统的测绘相机。为保证定轨精度, 采用星载双频 GPS 接收机。为保证成像质量选用大卫星平台, 并多配备易损器件(主要指陀螺), 以保证卫星有效寿命<sup>[2]</sup>。国家测绘地理信息

局卫星测绘应用中心和武汉大学相关科技人员研制了全链路辐射和几何仿真系统,最终提出了资源三号测绘卫星的研制总要求,并对资源三号测绘卫星的研制过程进行全过程监控。资源三号测绘卫星的成功发射,对我国测绘事业的发展具有革命性意义,也是对王之卓院士 40 多年前的航天测绘梦想和蓝图愿景的实现。

## 2 资源三号测绘卫星平台和载荷的基本参数

根据我国航天卫星平台的发展和应用经验,资源三号测绘卫星采用我国资源卫星系列使用的大卫星平台,卫星平台的主要参数如表 1 所示<sup>[2]</sup>。

表 1 资源三号测绘卫星平台参数

Tab. 1 Parameters of ZY-3's satellite platform

平台指标	指标参数
卫星重量/kg	2650
星上固存容量/TB	1
平均轨道高度/km	505.984
轨道倾角/(°)	97.421
降交点地方时	10 点 30 分
轨道周期/min	97.716
回归周期/d	59
设计寿命/a	5

资源三号测绘卫星上搭载 4 台光学相机,其中 3 台全色相机按照前视 22°、正视和后视 22°设计安装,构成了三线阵立体测图相机;另一台多光谱相机包含红、绿、蓝和红外 4 个谱段,用于与正视全色影像融合和地物判读与解译。为了保证卫星影像的辐射质量,4 台光学相机的影像都是按照 10 bit 进行辐射量化,资源三号测绘卫星 4 台相机的主要参数见表 2。

表 2 资源三号测绘卫星载荷主要参数

Tab. 2 Parameters of ZY-3's satellite load

载荷参数	三线阵相机	多光谱相机
光谱范围/ $\mu\text{m}$	0.5~0.8	蓝:0.45~0.52
		绿:0.52~0.59
		红:0.63~0.69
		近红外:0.77~0.89
地面像元分辨率/m	下视 2.1	5.8
	前后视 3.5	
焦距/mm	1700	1750
量化比特数/bit	10	10
像元尺寸	下视 24 576(8192× 3)×7 $\mu\text{m}$	9216(3072× 3)×20 $\mu\text{m}$
	前后视 16 384(4096× 4)×10 $\mu\text{m}$ ;	

续表 2

载荷参数	三线阵相机	多光谱相机
静态传函	优于 0.2	优于 0.2
幅宽/km	52	52
视场角/(°)	6	6

## 3 资源三号测绘卫星地面应用处理流程

资源三号测绘卫星三线阵卫星影像产品的生产主要实现从卫星下传原始数据,在完成数据解扰、解密、解压等工作后,生成商业软件可以接受的影像产品,该产品是对 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 RPC 模型,但未作系统几何纠正,是进行实际测图的标准影像产品(该产品和 Worldview-2 的 basic 产品<sup>[3]</sup>以及 Pleiades 的 level 1 类似<sup>[4]</sup>),产品生产流程如图 1 所示。

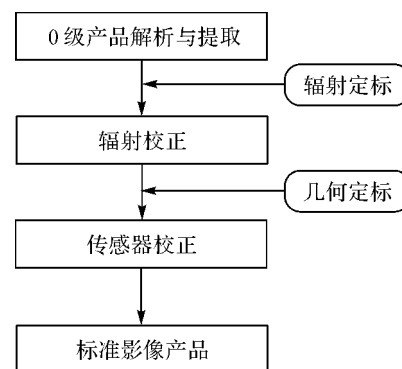


图 1 资源三号测绘卫星三线阵数据处理流程

Fig. 1 The process flow of ZY-3's three-line-array data

## 4 资源三号测绘卫星几何性能分析

### 4.1 资源三号测绘卫星严密几何模型和 RPC 模型

资源三号测绘卫星的 4 台相机都是采用线阵推扫行中心投影的方式获取影像数据,为了保证影像成像时刻的时间同步精度,资源三号测绘卫星在获取图像的同时,相机为成像的每一行影像数据提供了精确的成像时刻,根据该成像时刻可以精确地内插出每一行成像对应的轨道和姿态参数。资源三号测绘卫星的轨道测量包括星上单频 GPS 测量数据和事后地面处理的双频 GPS 定轨数据<sup>[5]</sup>,轨道测量数据的频率为 1 Hz。资源三号测绘卫星的姿态测量系统采用星敏感器和陀螺组合测量的方式<sup>[6]</sup>,精确测定卫星平台在 J2000 坐标系下的惯性姿态,测量频率为 4 Hz,同时,资源三号测绘卫星也提供原始的星敏和陀螺观测值以及

国产星敏的星图下传数据<sup>[7-8]</sup>,可以进行事后试验分析和精度验证。根据上述成像过程获取的各类观测数据和几何标定数据,建立资源三号测绘卫星单相机的严密几何成像模型<sup>[9-11,13]</sup>如下

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{WGS84} = \begin{bmatrix} X_{GPS} \\ Y_{GPS} \\ Z_{GPS} \end{bmatrix} + mR_{J2000}^{WGS84} R_{star}^{J2000} (R_{star}^{body})^T \begin{bmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \end{bmatrix} + R_{camera}^{body} \begin{bmatrix} \text{tg}(\psi_Y) \\ \text{tg}(\psi_X) \\ -1 \end{bmatrix} * f \quad (1)$$

式中,  $[X \ Y \ Z]^T_{WGS84}$  表示地面一点  $P$  在 WGS84 下的三维笛卡儿坐标;  $[X_{GPS} \ Y_{GPS} \ Z_{GPS}]^T$  为 GPS 相位中心在 WGS84 下的坐标;  $R_{J2000}^{WGS84}$  为 J2000 和 WGS84 间旋转矩阵;  $R_{star}^{J2000}$  为星敏主光轴在 J2000 坐标系中的指向构成的旋转矩阵;  $R_{star}^{body}$  为星敏主光轴在卫星本体坐标系中的安装关系构成的旋转矩阵;  $[D_x \ D_y \ D_z]^T$  为 GPS 相位中心在卫星本体坐标系中三个偏移;  $R_{camera}^{body}$  为相机在卫星平台上安装矩阵;  $[d_x \ d_y \ d_z]^T$  为相机节点在卫星本体坐标系中三维坐标;  $(\psi_X, \psi_Y)$  为 CCD 线阵上每个像元在相机坐标系的指向角;  $f$  为相机主距;  $m$  为比例系数。

对于线阵推扫式影像,基于严密成像几何模型的像点坐标反投影计算需要进行迭代,效率较低<sup>[10]</sup>。有理多项式(RPC)模型是目前高分辨率光推扫卫星普遍采用通用几何模型<sup>[12]</sup>,能达到与严密成像几何模型同等的精度。RPC 模型将地面点的大地坐标  $(Lat, Lon, h)$  与其对应的像点坐标  $(S, L)$  用比值多项式关联起来,并将地面坐标和影像坐标正则化到  $-1$  和  $1$  之间。

经过在轨测试分析,资源三号测绘卫星严密成

像几何模型转换成 RPC 模型的拟合精度优于  $0.15\%$  像元<sup>[13]</sup>,因此,资源三号测绘卫星可以使用 RPC 模型代替严密成像几何模型进行测图和其他应用。

#### 4.2 基于地面几何定标场的几何标定

利用地面几何定标场对资源三号测绘卫星定期进行在轨几何检校是提高其影像产品几何质量的关键,也是充分挖掘卫星影像产品后续应用潜力的保证。卫星在轨运行过程中由于各种因素的影响,使得地面测量的各类成像参数不再适用,必须进行在轨检校。

对资源三号测绘卫星在轨成像过程中各类误差特性进行深入分析的基础上,并结合其各类载荷具体的系统设计指标,从严密成像几何模型出发,将待检校参数分为内外定标参数两类,并构建在轨几何检校模型,如式(2)所示

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{WGS84} = \begin{bmatrix} X_{GPS} \\ Y_{GPS} \\ Z_{GPS} \end{bmatrix} + mR_{J2000}^{WGS84} R_{star}^{J2000} R \begin{bmatrix} \tan(\Psi_Y) \\ \tan(\Psi_X) \\ -1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中,  $R$  代表外定标参数,描述卫星成像过程中,相机外部系统误差(包括:时间同步、GPS 偏心等线元素误差及相机安装角、星敏安装角等角元素误差)的综合影响; CCD 线阵上每个像元在相机坐标系的指向角  $(\Psi_X, \Psi_Y)$ ,为内定标参数。

在在轨测试期间,利用武汉大学在河南嵩山建设的高分辨率几何定标场,对资源三号测绘卫星进行了在轨几何定标分析试验<sup>[14]</sup>,利用两次标定结果,在 CCD 上每 50 个探元选取一个作为样本,统计这些样本探元两次检校的指向角差异,定标结果的精度评价如表 3。

表 3 几何定标结果及评价

Tab. 3 The result and evaluation of geometric calibration

载荷	前视相机		下视相机		后视相机		
样本探元数目	328		492		328		
检校结果 差异 /像素	0.0-0.1	257	78%	106	22%	134	41%
	0.1-0.2	53	16%	296	60%	108	33%
	0.2-0.3	14	4%	83	17%	32	10%
	0.3-0.4	4	1%	7	1%	24	7%
	0.4-0.5	0	0%	0	0%	13	4%
中误差/像素	0.5-0.6	0	0%	0	0%	12	4%
	沿轨方向	0.06		0.06		0.12	
	垂轨方向	0.08		0.14		0.17	

#### 4.3 资源三号测绘卫星无地面控制精度分析

经过几何定标后,利用高精度地面控制点(控制点精度优于 1 m)检验了不同轨道获取的影像

数据,得到的初步分析结果如下表 4 所示,卫星系统在稳定工作的情况下,标定后的无地面控制精度优于 15 m。

表 4 几何定标后无地面控制精度检验

Tab. 4 Results of precision testing without GCPs after calibration

景号	区域	检查点	成像时间	X 中误差/m	Y 中误差/m	中误差/m
1	郑州	24	2012-02-03	5.332	5.193	7.443
2	南阳	8	2012-02-03	2.322	7.749	8.090
3	洛阳	24	2012-01-24	10.009	10.337	14.389
4	法国	9	2012-02-29	7.866	4.309	8.969
5	安平	508	2012-02-28	6.844	8.187	10.671
6	合肥	4	2012-03-24	7.492	3.838	8.672

#### 4.4 资源三号测绘卫星立体模型平差精度分析

对于几何标定前后选取了河南南阳试验区(如图 2 所示)进行了区域网平差<sup>[15]</sup>精度分析,在该地区分别获取了外业 9 个 GPS 控制点,分别采用定标前后的结果,用不同的控制点和检查点测量的结果如表 5 和表 6 所示,从表中可以看出,定标后用 1 到 2 个控制点会明显提高影像的几何定位精度和高程精度,当采用 5 个控制点时,由于系

统误差可以通过多余的控制点进行补偿,模型的定向精度基本相当。

利用大连试验区,进行平差精度分析,在该地区分别获取了外业 18 个 GPS 控制点,用不同的控制点和检查点测量的结果如表 7 所示,从表中可以看出,4 个控制点,14 个检查点会明显提高影像的几何定位精度和高程精度,高程精度 1.787 m,平面精度达到 2.975 m<sup>[13]</sup>。

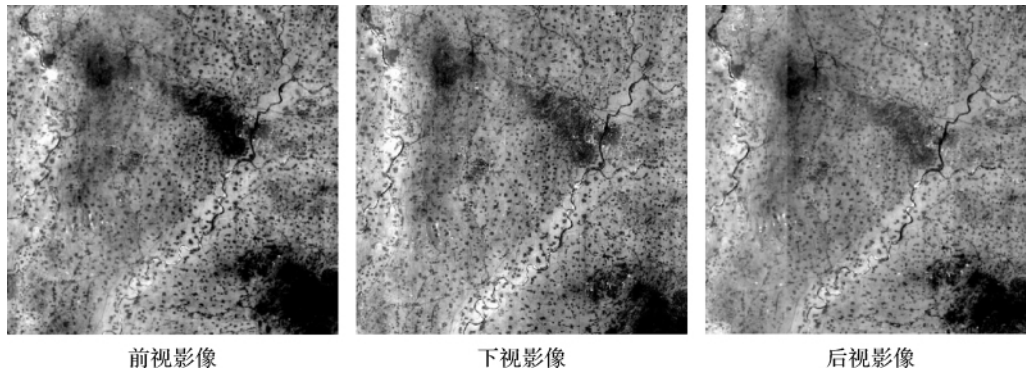


图 2 河南南阳试验区影像

Fig. 2 Images of Nanyang, Henan experimental plot

表 5 定标前定向结果

Tab. 5 Orientation result before calibration

控制点个数	控制点				检查点			
	X	Y	平面	Z	X	Y	平面	Z
0					1 165.928	936.648	1 495.559	272.989
1	0.000 1	0.000 5	0.000 51	0.015 5	8.033 4	61.303	61.827	33.202 7
2	3.894 4	2.001 4	4.378 579	1.007 8	10.014 9	64.735 1	65.505	33.744 9
3	0.013	0.001 8	0.013 124	0.003 5	6.183 1	3.695 7	7.203	4.245 4
4	2.11	0.401 2	2.147 804	0.994 7	3.484 6	5.536 4	6.212	3.222 3
5	3.086 6	0.830 1	3.196 274	1.924 3	2.156 6	4.274 1	4.787	2.220 6

表 6 定标后定向结果

Tab. 6 Orientation result after calibration

控制点个数	控制点				检查点			
	X	Y	平面	Z	X	Y	平面	Z
0					2.588 1	2.122 9	3.347 4	10.200 6
1	0.000 4	0.003 9	0.003 9	0.012 3	2.817 2	3.159 8	4.233 3	2.900 8
2	1.663 2	1.788 8	2.442 5	4.437 0	2.696 5	2.282 8	3.533 0	2.806 0
3	2.382 0	1.460 5	2.794 1	3.684 8	3.043 5	2.527 3	3.956 0	2.573 6
4	2.113 3	1.598 3	2.649 6	3.531 9	3.571 9	2.408 3	4.307 9	1.630 6
5	2.707 1	0.827 7	2.830 8	2.075 8	2.477 8	2.549 6	3.555 2	2.006 1

表 7 大连数据试验结果

Tab. 7 Experimental results of Dalian data

控制点个数	控制点				检查点			
	X	Y	平面	Z	X	Y	平面	Z
	3	0.000	0.000	0.000	0.000	2.341	2.154	3.181
4	2.151	1.113	2.422	0.570	2.037	2.169	2.975	1.787
18	2.011	1.944	2.797	1.299				

#### 4.5 基于资源三号测绘卫星的 3D 产品生产与检验

利用河南洛阳试验区进行了 DSM 自动生产和数字正射影像产品生产检验,用 18 个检查点检查的结果如图 3 和图 4。

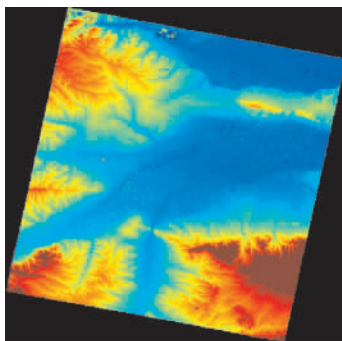


图 3 DSM 产品(检查点高程误差为 2.56 m)

Fig. 3 DSM product (check points' altitude error is 2.56 m)

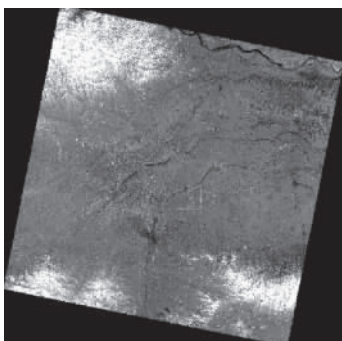


图 4 数字正射影像(检查点平面中误差为 3.73 m)

Fig. 4 DOM product (check points' plane error is 3.73 m)

利用大连试验区进行了 DSM 自动生产和数字正射影像产品生产检验,用 14 个检查点检查的结果如图 5 和图 6<sup>[13]</sup>。

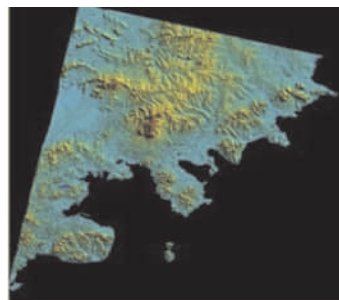


图 5 DSM 产品(高程中误差 2.07 m)

Fig. 5 DSM product (check points' altitude error is 2.07 m)

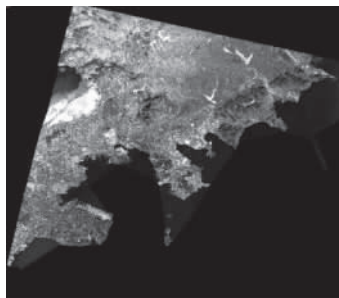


图 6 数字正射影像(平面中误差 2.92 m)

Fig. 6 DOM product (check points' plane error is 2.92 m)

## 5 总 结

“资源三号测绘卫星”的成功发射实现了我国民用高分辨率测绘卫星领域零的突破,对我国测绘事业的发展具有革命性意义,是我国卫星测绘发展史上一座新的里程碑。

从 2012 年 1 月 11 日接收第一轨图像开始,经过 2 个月的在轨运行测试和分析表明,无控制点系统定位精度优于 15 m,少量控制点条件下,高程精度优于 3 m,平面精度优于 4 m,资源三号

测绘卫星达到了既定的设计目标,影像的几何定位精度明显优于设计指标,完全满足 1:50 000 测图精度需要,达到甚至超过国际同类分辨率卫星 SPOT5、P5 和 ALOS 的几何质量,并可开拓研究其在 1:25 000 甚至 1:10 000 困难区测图应用可行性。

致谢:感谢武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室、国家测绘地理信息局卫星测绘应用中心和自然资源卫星应用中心相关工程和科技工作人

员提供的相关研究结果。

## 参考文献：

- [1] WANG Zhizhuo. The Modern Development of Aerial Photogrammetry[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 1965(5):3-7. (王之卓. 航空摄影测量科学技术的现代发展[J]. 测绘通报, 1965(5):3-7.)
- [2] LI Deren. Unstoppable Thinking: The Anthology of Academician Li Deren[M]. Wuhan University Press, 2008. (李德仁. 不停歇的思索:李德仁院士文集[M]. 武汉:武汉大学出版社, 2008.)
- [3] Digital Globe. Digitalglobe Core Imagery Products Guide [EB/OL]. 2010[2012-01-01]. [http://www.digitalglobe.com/digitalglobe2/file.php/811/digitalglobe\\_core\\_imagery\\_products\\_guide.pdf](http://www.digitalglobe.com/digitalglobe2/file.php/811/digitalglobe_core_imagery_products_guide.pdf).
- [4] LUSSY F DE, 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.rzn.uni-hannover.de/fileadmin/institut/pdf/075-delussy.pdf>.
- [5] ZHAO Qile, LIU Jingnan, GE Maorong. High Precision Orbit Determination of CHAMP Satellite[J]. Geo-Spatial Information Science, 2006, 9(3):180-186.
- [6] LI Deren, YAN Jun. Correction Technology for Underwater Object Navigation Using GNSS Buoy[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2008, 33(11):1101-1105. (李德仁, 闫军. 水下目标卫星导航定位修正技术研究[J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2008, 33(11):1101-1105.)
- [7] XIE Junfeng, JIANG Wanshou, GONG Jianya. On-orbit Calibration of Stellar Camera Considering Distribution of Star Image Points [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2011, 37(10):1271-1276. (谢俊峰, 江万寿, 龚健雅. 顾及星像点分布的恒星相机在轨检校[J]. 北京航空航天大学学报, 2011, 37(10):1272-1276.)
- [8] JIANG Wanshou, XIE Junfeng, GONG Jianya, et al. New Star Identification Algorithm Based on Starlike Mappings Pattern[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2008, 33(1):12-15. (江万寿, 谢俊峰, 龚健雅, 等. 一种基于星形的星图识别算法[J]. 武汉大学学报:信息版, 2008, 33(1):12-15.)
- [9] SPOT Image. SPOT Satellite Geometry Handbook; 1st ed. Revision[DB/OL][2012-01-01]. <http://www.igm.univ-mlv.fr/~riazano/publications/GAEL-P135-DOC-001-01-04.pdf>.
- [10] 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.)
- [11] 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.)
- [12] 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.
- [13] TANG Xinming, ZHANG Guo, ZHU Xiaoyong, et al. Triple Linear-array Imaging Geometry Model of Ziyuan-3 Surveying Satellite and Its Validation, 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.)
- [14] GACHET R. SPOT5 In-flight Commissioning: Inner Orientation of HRG and HRS Instruments [C] // Proceedings of XXth ISPRS Congr. Commission I; 35 Istanbul; [s. n.], 2004.
- [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] 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.)
- [17] 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.)
- [18] 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, 陈坦, 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:张燕燕)

收稿日期: 2012-04-09

修回日期: 2012-04-22

第一作者简介: 李德仁(1939—), 男, 中国科学院院士、中国工程院院士, 主要从事以遥感、全球定位系统和地理信息系统为代表的空间信息科学与技术的科研和教学工作。First author: LI Deren (1939—), male, academician of the Chinese Academy of Sciences, academician of the Chinese Academy of Engineering, majors in the research and education in spatial information science and technology represented by RS, GPS and GIS.