



一种星载激光测高仪光斑内定位方法

岳春宇^{1,2} 孙世君^{1,3} 何红艳¹

1 北京空间机电研究所,北京,100094

2 先进光学遥感技术北京市重点实验室,北京,100094

3 清华大学精密仪器与机械学系,北京,100084

摘要:提出一种利用铅垂线轨迹法及高程结构信息约束的星载激光测高仪光斑内定位方法。在星载激光测高仪辅助立体摄影测量体制下,以激光回波中包含的高精度高程结构信息作为约束条件,在足印光斑内,配合立体图像匹配生成的数字高程模型,选取定位候选点,并通过铅垂线轨迹法优化定位候选点高程值,消除立体图像定位误差引起的高程误差,获取符合高程结构约束的一系列位置的三维坐标。试验结果表明,该方法能够实现大光斑星载激光测高仪足印内的定位,高程定位精度为0.16 m,平面定位精度与立体图像一致。

关键词:星载激光测高仪;全波形数据;铅垂线轨迹法;几何定位;高程结构

中图分类号:P236

文献标志码:A

星载激光对地观测是获取三维地理空间信息的重要主动遥感手段,通过激光测高技术,经过数据处理分析,获得地表高程数据,广泛应用于测绘、林业、海洋、国土资源与环境等领域^[1-5]。在地形及地貌测绘应用方面,美国1994年的Clementine探月计划和1996年发射的火星全球勘探者号(Mars Global Surveyor, MGS)分别对月球和火星表面进行了激光形貌测图^[6-8],2009年发射的月球轨道高度计(Lunar Orbiter Laser Altimeter, LOLA)第一次采用星载多波束激光测高体制测量月球表面形貌^[9]。日本于2007年发射了“月亮女神号”卫星(Selenological and Engineering Explorer, SELENE),通过搭载的LALT(laser altimeter)激光测高系统实现了月球全球形貌测量^[10]。中国也分别在2007年和2010年发射了“嫦娥一号”和“嫦娥二号”,使用激光高度计测量月球表面三维信息^[11-13]。美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)2003年发射的ICESat(Ice, Cloud, and land Elevation Satellite)上的GLAS(Geoscience Laser Altimeter System)是第一个对地球进行观测的星载激光测高系统^[14]。而中国2016年发射的资源三号卫星星载激光测高仪是目前中国

唯一在轨运行的对地激光观测系统^[15]。

对地观测应用中,星载激光测高仪可以获取较高的高程精度,经过校正后平面精度可以达到10 m,但是无法获取观测足印内具体某点的三维坐标,限制了其在高分辨率对地观测中的应用^[16]。星载激光观测数据一般通过配合立体图像联合空三平差,整体提高摄影测量定位精度^[17-18]。

本文在星载激光测高仪辅助立体摄影测量体制下,以星载激光测高仪回波信号中较高精度的相对高程结构信息作为约束,通过铅垂线轨迹法(vertical line locus, VLL)^[19]优化立体图像计算的高程精度,进而在激光光斑内得到一系列点的三维坐标,实现星载激光测高仪光斑内的高精度几何定位。

1 铅垂线轨迹法高程优化

铅垂线轨迹法(VLL)^[19]是解析测图仪DSR-11中影像相关器使用的方法。在传统框幅式图像中心投影的情况下,空间中的铅垂线在图像中的投影也为一条直线。如图1所示, O_1 和 O_2 为立体图像投影中心,地面点 P 平面位置不变,高程

收稿日期:2017-07-14

项目资助:国家自然科学基金(41401411, 41401410);高分对地观测专项基金(GFZX040136);国家重点研发计划地球观测与导航重点专项基金(2016YFB0500802)。

第一作者:岳春宇,博士,主要从事卫星摄影测量、遥感图像处理与应用研究。yey1893@163.com

通讯作者:孙世君,博士,研究员。sunsj26@sina.com

变化时形成的铅垂线 l 在立体图像中是两条同名直线 l_1 和 l_2 。为了确定地面点 P 的高程,平面位置不动,高程值在铅垂线上移动为 P_1 、 P_2 ,则该点在立体图像中的投影在 l_1 和 l_2 上移动,与 P_1 、 P 、 P_2 对应,分别为 a_1 、 a_2 、 b_1 、 b_2 和 c_1 、 c_2 。分别对这 3 点进行图像相关匹配,相关性最大的点即为真实地面点。

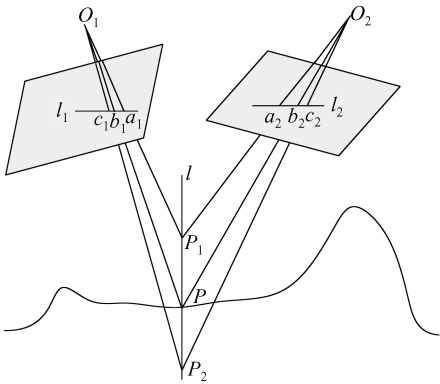


图 1 铅垂线轨迹法
Fig. 1 VLL Algorithm

在线阵推扫多中心投影摄影测量中,对于通用几何模型,如主流的遥感图像产品几何模型有理函数模型(rational funtion model,RFM)等,VLL 法思想同样可以应用。对于某一地面点,改变其高程值,并投影到立体图像中,得到一系列同名点对,分别对这些同名点进行图像相关计算,最终得到地面点真实高程值^[20-21]。该方法可以消除由于姿态误差引起的前方交会定位误差。

2 大光斑回波信号的高程结构信息

星载大光斑激光数据是以横轴为时间、纵轴为回波强度的波形数据。如图 2 所示,回波信号是距离的观测值。

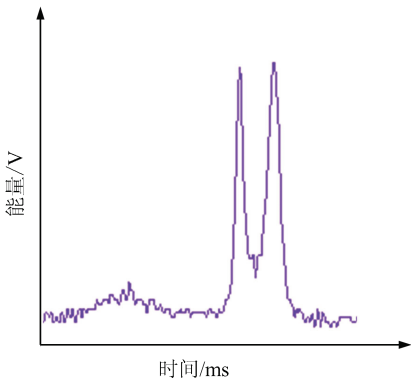


图 2 大光斑激光测高回波信号示意图
Fig. 2 Sketch Map of Large Footprint Laser Ranging Echo Waveform

激光测高回波信号按时间顺序,高程值高的信号先被接收到。波形的峰代表光斑内主要的高程值,全波形表示光斑范围内的高程结构信息。波峰的数量及位置即光斑内的高程结构。波峰之间代表光斑内主要高程之间的高程差,精度较高,常被用来进行树高提取^[1,3,5]。

3 本文方法匹配流程

本文利用铅垂线轨迹法及高程结构信息约束的星载激光测高仪光斑内定位方法如图 3 所示。

利用铅垂线轨迹法及高程结构信息约束的星载激光测高仪光斑内定位方法流程如下。

- 1) 在光斑波形数据中选取主要波峰,一般为 2~3 个,作为高程结构约束条件;
- 2) 在光斑内由立体遥感图像匹配生成数字表面模型(digital surface model,DSM);
- 3) 比较高程结构与 DSM 直方图,在 DSM 直方图中选择符合激光波形高程结构的峰值,作为高程参考值;
- 4) 在 DSM 中选择高程值等于高程参考值的一系列纹理特征明显的点,作为定位候选点,在立体遥感图像中由 VLL 法优化定位候选点的高程值;
- 5) 高程优化后,定位候选点的高程值相对差异符合高程结构约束条件的,则该候选点即为定位点,输出其三维坐标。

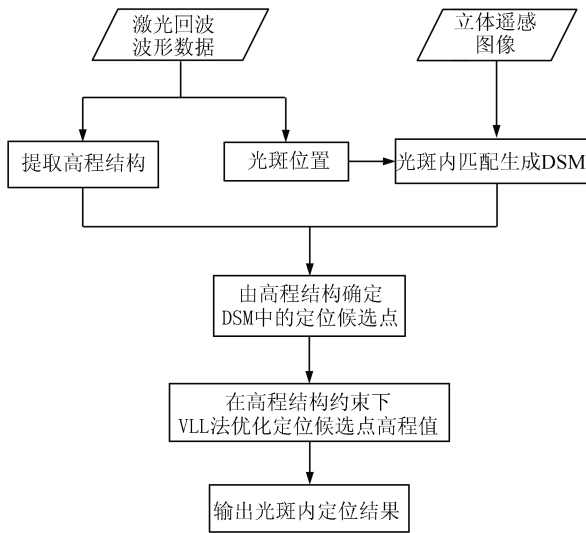


图 3 利用铅垂线轨迹法及高程结构信息约束的星载激光测高仪光斑内定位流程图
Fig. 3 Flowchart of Positioning Method in Footprint of Space-Borne Laser Altimeter Based on VLL Algorithm and Elevation Structure Constraint

4 试验与分析

本文采用 GLAS 对地观测回波波形数据 GLAS01 产品和 Worldview-2 立体遥感图像作为试验数据,对提出方法进行试验分析。GLAS01 数据产品从美国国家冰雪数据中心(The National Snow and Ice Data Center, NSIDC)网站 (<http://nsidc.org/data/icesat>)下载获取。GLAS01 数据每个波形表示的光斑直径约为 70 m,相邻光斑距离约为 170 m。Worldview-2 立体遥感图像为全色 0.5 m 分辨率,平面和高程定位精度均优于 1 m。

本文激光回波波形试验数据集包括 3 个光斑,具体信息如图 4 所示,圆圈代表光斑范围。由于光斑内有阶跃性地物时,容易出现明显的高程结构,所以本文试验所选的 3 个光斑均在包含规则建筑物的城市地区。试验数据 1 和 3 为楼房,试验数据 2 为带建筑物的院落,主要高程结构均为建筑物的高程差异。

GLAS 数据与 Worldview-2 立体图像产品高程参考椭球不同,两个坐标系下高程差异在一个光斑内是系统性的,在波形数据上是纵轴上平移的一个常数^[22]。由于本文仅利用 GLAS 数据波形峰值的相对位置,所以不涉及空间参考转换。

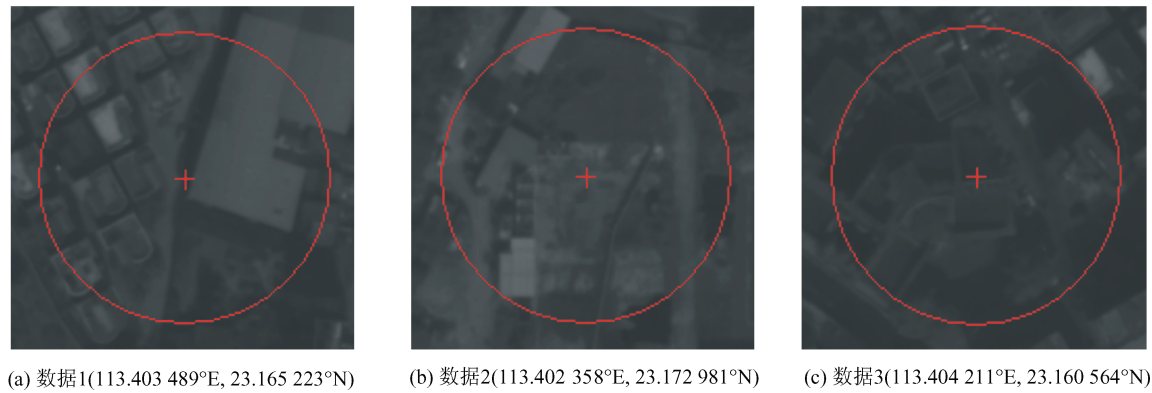


图 4 激光回波波形数据集
Fig. 4 The Laser Echo Waveform Dataset

4.1 高程结构提取

GLAS01 数据中包含噪声信息,首先滤波处理去除噪声,提取真实信号峰值^[23]。经试验,本文采用 1×21 ,均值为 0、方差为 3 的高斯滤波对试验数据集进行处理,获取的波形峰值比较稳定,

结果如图 5 所示,图中横坐标表示采样数,纵坐标为回波信号强度,单位为伏特(V)。

通过分析波峰位置,根据 GLAS01 波形数据采样间隔为 0.15 m,可以提取各组试验数据的高程结构,见表 1。

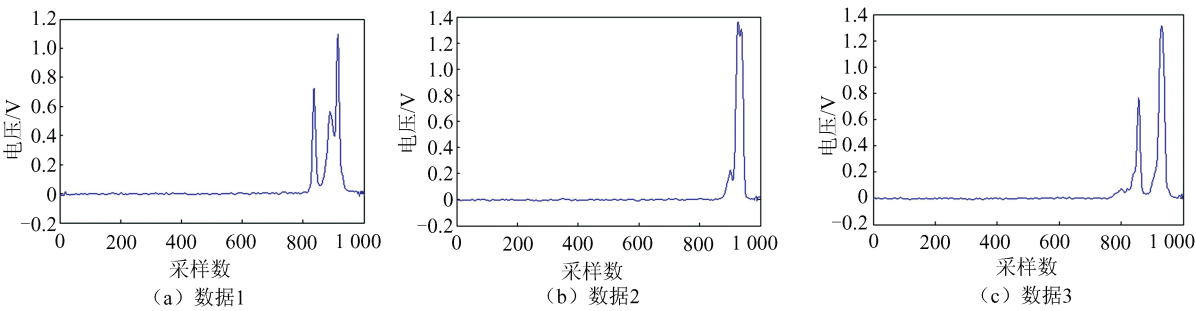


图 5 波峰提取结果
Fig. 5 Waveform Peaks

波形中峰值数量和其表示的高程差共同构成了光斑内的高程结构。由于波形数据表示高程高低的顺序是按横轴坐标时间倒序排列,因此在约束 DSM 高程直方图时,要注意两者的坐标方向和顺序统一^[24]。

表 1 高程结构

Tab. 1 Elevation Structure

序号	波峰数	高程峰值	高程差/m
1	3	836 890 915	8.10, 3.75
2	3	902 927 938	3.75, 1.65
3	2	857 931	11.1

4.2 定位候选点确定及优化

在试验数据点集中每个光斑范围内,由 Worldview-2 立体遥感图采用密集匹配的方法,前方交会计算 DSM,并生成 DSM 图像的高程直方图,如图 6 所示。从图 6 中可以得到,数据 1 的高

程直方图中 11.2 m、15.5 m、22.5 m 3 个峰值符合激光波形提取的高程结构;数据 2 的高程直方图中 21.6 m、24.2 m、26.9 m 3 个峰值符合激光波形提取的高程结构;数据 3 的高程直方图中 9.4 m、19.9 m 两个峰值符合激光波形提取的高程结构。

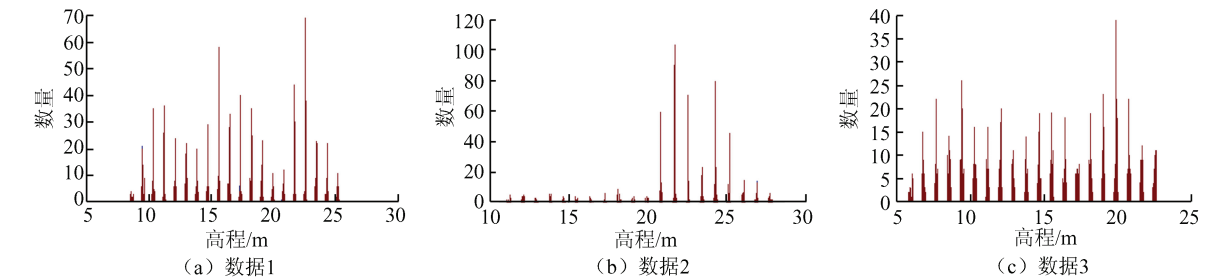


图 6 试验数据的高程直方图
Fig. 6 Elevation Histograms of Experimental Data

对每组数据,选取高程等于上述高程直方图峰值且纹理特征较明显的点,作为定位候选点。以高程峰值为基准,以 0.1 m 为间隔,由 VLL 法重新计算其高程值。

为地面和若干建筑物,在地面和建筑物上分别选点;数据 3 主要高程结构为建筑的顶和地面,在地面和建筑顶分别选点。对选取的点在标准 DSM 数据中读取其真实高程值,作为精度评价标准。VLL 法高程计算结果见表 2。

结合图 4,数据 1 和数据 2 主要高程结构均

表 2 VLL 法高程优化结果
Tab. 2 The Elevation Results After VLL

试验数据	坐标	实际高程/m	原始计算高程/m	VLL 计算高程/m	高程差/m
数据 1	113.403 463 1°E, 23.165 345 7°N	11.5	11.2	11.4	
	113.403 588 2°E, 23.165 483 5°N	15.2	15.5	15.1	3.7
	113.403 498 2°E, 23.165 884 1°N	23.3	22.5	23.1	8.0
数据 2	113.402 302 6°E, 23.172 927 5°N	21.0	21.6	21.2	
	113.402 175 9°E, 23.172 845 6°N	24.7	24.2	24.9	3.7
	113.402 187 8°E, 23.173 238 1°N	26.5	26.9	26.4	1.5
数据 3	113.404 250 7°E, 23.160 405 0°N	8.4	9.4	8.6	
	113.404 059 4°E, 23.160 418 7°N	19.5	19.9	19.6	11.0

4.3 定位结果分析

表 2 试验结果中高程差项是定位候选点经过 VLL 法优化后高程值的差,结果与表 1 中高程结构提取结果基本一致,最大相差为 0.15 m,最小相差 0.05 m,精度为 0.1 m。说明所选定位候选点高程优化后结果符合 § 4.1 中的高程结构信息,满足高程结构约束条件。各定位候选点 VLL 法计算得到的高程值与在标准 DSM 中读取的高程值之间最大相差 0.2 m,最小相差 0.1 m,全部 8 个定位候选点的高程定位精度为 0.16 m,与 GLAS 数据的高程定位精度十分接近^[1]。上述试验结果表明,本文方法可以实现高精度的星载激光测高仪定位,高程定位精度为 0.16 m,平面定位精度与立体图像定位精度一致,优于 1 m。

而在图 6 中由立体匹配生成的 DSM 图像直方图分布则峰值相对不清晰。这是由于密集匹配时,纹理不丰富区域如均匀平地与阴影地区会出现误匹配。这也是本文高程结构约束的意义,用激光回波波形中明显的高程结构来去除 DSM 直方图中弱高程信息及错误高程。数据 1 高程的 3 个峰值无论在激光回波波形还是 DSM 直方图中都比较明显,可以直接由峰值高程值确定定位候选点;数据 2 激光回波波形峰值明显,而 DSM 直方图中高程最高的峰则需要由高程结构信息来辅助确定;数据 3 激光回波波形峰值明显,而 DSM 直方图整体分布较均匀,地面点需要根据高程结构信息来判断。试验结果说明,在激光回波波形高程结构清楚的情况下,可以由高程结构约束对光斑中的点进行精确高程定位,再结合立体图像的平面位置进行平面定位,最终确定该

在图 5 中,3 组试验数据的高程结构明显,结合图 4 中试验区域的图像可以看出,符合地形实

点的三维坐标。且根据试验结果,上述3种情况定位精度一致。

本文方法需要选取的光斑内有清晰的高程结构信息,且要与立体图像空间配准,否则在一维的激光回波波形与DSM直方图中无法确定是否为同一地区,出现计算错误。本文方法初始立体图像匹配前方交会计算得到的高程值与真实高程值相差最大为1 m,最小为0.3 m,精度为0.59 m。VLL法优化后高程精度为0.16 m,与直接立体匹配计算得到的高程精度提高了0.43 m。

5 结 语

本文将星载大光斑激光测高数据回波信号中高精度的相对高程信息作为高程结构约束条件,在立体图像生成的DSM直方图中确定定位候选点的高程值,并由VLL法优化定位候选点的高程值,与高程结构信息比较,避免误匹配及立体图像定位误差引起的高程误差,结合立体图像的平面位置获得定位候选点的三维坐标。采用GLAS01激光测高回波波形数据与Worldview-2立体图像数据进行试验,证实本方法能够实现大光斑星载激光测高仪的高精度定位。

经过试验分析,本文方法大光斑星载激光测高仪高程定位精度为0.16 m,平面定位精度与立体图像一致,优于1 m。但是本文方法需要激光数据与立体图像高精度空间配准,且只能根据波形峰值来选取定位候选点,无法根据波形数据直接获取光斑内任一位置的坐标。如何利用激光回波波形结构信息,在星载激光测高仪辅助立体摄影测量体制下,在光斑内任一位置高精度定位,提高摄影测量精度,还需要进一步研究。

参 考 文 献

- [1] Wang X, Cheng X, Gong P, et al. Earth Science Applications of ICESat/GLAS: A Review[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2011, 32(23): 8 837-8 864
- [2] Atwood D K, Guritz R M, Muskett R R, et al. DEM Control in Arctic Alaska with ICESat Laser Altimetry[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(11): 3 710-3 720
- [3] Nie Sheng, Wang Cheng, Zeng Hongcheng, et al. A Revised Terrain Correction Method for Forest Canopy Height Estimation Using ICESat/GLAS Data[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2015, 108: 183-190
- [4] Kurtz N T, Markus T, Cavalieri D J, et al. Comparison of ICESat Data with Airborne Laser Altimeter Measurements over Arctic Sea Ice[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(7): 1 913-1 924
- [5] Luo S, Wang C, Li G, et al. Retrieving Leaf Area Index Using ICESat/GLAS Full-waveform Data[J]. *Remote Sensing Letters*, 2013, 4(8): 745-753
- [6] Li Song. Recent Progress of Spaceborne Laser Altimeter System[J]. *Optics and Optoelectronic Technology*, 2004, 2(6): 4-6 (李松. 星载激光测高仪发展现状综述[J]. 光学与光电技术, 2004, 2(6): 4-6)
- [7] Li Ran, Wang Cheng, Su Guozhong, et al. Development and Applications of Spaceborne LiDAR[J]. *Science and Technology Review*, 2007, 25(14): 58-63 (李然, 王成, 苏国中, 等. 星载激光雷达的发展和应[J]. 科技导报, 2007, 25(14): 58-63)
- [8] Afzal R S. Mars Observer Laser Altimeter: Laser Transmitter[J]. *Applied Optics*, 1994, 33(15): 3 184-3 188
- [9] Smith D E, Zuber M T, Jackson G B, et al. The Lunar Orbiter Laser Altimeter Investigation on the Lunar Reconnaissance Orbiter Mission[J]. *Space Science Reviews*, 2010, 150(1): 209-241
- [10] Goossens S, Matsumoto K, Rowlands D D, et al. Orbit Determination of the SWLENE Satellites Using Multi-satellite Data Types and Evaluation of SELENE Gravity Field Models[J]. *Journal of Geodesy*, 2011, 85(8): 487-504
- [11] Hu Wenmin, Di Kaichang, Yue Zongyu, et al. Crossover Analysis and Adjustment for Chang'E-1 Laser Altimeter Data[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2013, 42(2): 218-224 (胡文敏, 邸凯昌, 岳宗玉, 等. 嫦娥一号激光高度计数据交叉点分析与平差处理[J]. 测绘学报, 2013, 42(2): 218-224)
- [12] Zhao Shuangming, Ran Xiaoya, Fu Jianhong, et al. Combined Adjustment of CE-1 Stereo Camera Image and Laser Altimeter Data[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2014, 43(12): 1 224-1 229 (赵双明, 冉晓雅, 付建红, 等. CE-1 立体相机与激光高度计数据联合平差[J]. 测绘学报, 2014, 43(12): 1 224-1 229)
- [13] Wu B, Hu H, Guo J. Integration of Chang'E-2 Imagery and LRO Laser Altimeter Data with a Combined Block Adjustment for Precision Lunar

- Topographic Modeling[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2014, 391:1-15
- [14] Liu Huanling. The Study of Ice Sheet Height Change in Antarctic by Using ICESat Laser Altimeter Data[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2011 (刘焕玲. 利用 ICESat 激光测高数据探测南极冰盖的高程变化[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2011)
- [15] Guangming Web. ZY-3(02) Laser Elevation Calibration[OL]. http://news.gmw.cn/2016-08/17/content_21499523.htm, 2016 (光明网. 资源三号 02 星通过激光高程检校[OL]. http://news.gmw.cn/2016-08/17/content_21499523.htm, 2016)
- [16] Magruder L A, Webb C E, Urban T, et al. ICESat Altimetry Data Product Verification at White Sands Space Harbor[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(1):147-155
- [17] Yue Chunyu, Zheng Yongchao, Tao Yuliang. Study on Space-Borne Laser Altimeter Supported Satellite Photogrammetry[J]. *Spacecraft Recovery and Remote Sensing*, 2013, 34(4): 71-76 (岳春宇, 郑永超, 陶宇亮. 星载激光测高仪辅助卫星摄影测量浅析[J]. 航天返回与遥感, 2013, 34(4): 71-76)
- [18] Li G Y, Tang X M, Gao X M, et al. ZY-3 Block Adjustment Supported by GLAS Laser Altimetry Data[J]. *The Photogrammetric Record*, 2016, 31(153): 88-107
- [19] Zhang Jianqing, Pan Li, Wang Shugen. Photogrammetry[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2003 (张剑清, 潘励, 王树根. 摄影测量学[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2003)
- [20] Ji Song, Fan Dazhao, Zhang Yongsheng, et al. MVLL Multi-Image Matching Model and Its Application in ADS40 Linear Array Images[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(1): 28-31 (纪松, 范大昭, 张永生, 等. 多视匹配 MVLL 算法及其在 ADS40 线阵影像中的运用[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2009, 34(1): 28-31)
- [21] Hu Fen, Wang Mi, Li Deren, et al. Approximate Epipolar Rearrangement Algorithm of Satellite Stereo-Imagery by Projection Trajectory[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(12): 1 431-1 435 (胡芬, 王密, 李德仁, 等. 利用投影轨迹的卫星影像近似核线重排快速算法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2009, 34(12): 1 431-1 435)
- [22] E Dongchen, Xu Ying, Zhang Xiaohong. ICESat's Performance and Its Application in Dome a Area in Antarctica[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2007, 32(12): 1 139-1 142 (鄂栋臣, 徐莹, 张小红. ICESat 卫星及其在南极 Dome A 地区的应用[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2007, 32(12): 1 139-1 142)
- [23] Song Zhiying. The Study of Height Change in Antarctic Ice Sheet by Using ICESAT Laser Altimeter Data[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2010 (宋志英. 利用 ICESAT 激光测高数据监测南极冰盖高程变化的研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2010)
- [24] Yue Chunyu, Xing Kun, Bao Yunfei, et al. A Matching Method of Space-Borne Laser Altimeter Big Footprint Waveform and Terrain Based on Cross Cumulative Residual Entropy[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(3): 346-352 (岳春宇, 邢坤, 鲍云飞, 等. 以交叉累积剩余熵为准则的星载激光测高仪大光斑波形数据与地形匹配法[J]. 测绘学报, 2017, 46(3): 346-352)

A Positioning Method in Footprint of Space-Borne Laser Altimeter

YUE Chunyu^{1,2} SUN Shijun^{1,3} HE Hongyan¹

¹ Beijing Institute of Space Mechanics and Electricity, Beijing 100094, China

² Beijing Key Laboratory of Advanced Optical Remote Sensing Technology, Beijing 100094, China

³ Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract: A positioning method in footprint of space-borne laser altimeter based on vertical line locus (VLL) algorithm and elevation structure constraint is proposed. In the space-borne laser altimeter supported satellite photogrammetry frame, positioning point candidates are acquired in the footprint with digital surface model(DSM) generated by stereo images, according to the relative elevation struc-

ture information of the waveform. Then, elevations of positioning point candidates are also improved using VLL algorithm compared with the elevation structure information, which can eliminate the position errors of stereo images. Experiments show that the method proposed is effective in big footprint space-borne laser altimeter positioning, and the elevation positioning accuracy is 0.16 m, plane positioning accuracy is the same with stereo images.

Key words: space-borne laser altimeter; full waveform; vertical line locus (VLL); geometric positioning; elevation structure

First author: YUE Chunyu, PhD, specializes in the theories and methods of satellite photogrammetry, remote sensing image processing and application. E-mail: ycy1893@163.com

Corresponding author: SUN Shijun, PhD, professor. E-mail: sunsj26@sina.com

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41401411, 41401410; the High Resolution Earth Observation Special Fund, No. GFZX040136; the National Key Technology Research and Development Program of the Earth Observation and Navigation Special Fund of China, No. 2016YFB0500802.

(上接第 500 页)

GPS/BDS Precise Point Positioning Model with Receiver DCB Parameters for Raw Observations

ZHANG Hui^{1,2} HAO Jinming^{1,2} LIU Weiping^{1,2} ZHOU Rui^{1,2} TIAN Yingguo^{1,2}

¹ Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China

² BeiDou Navigation Technology Collaborative Innovation Center of Henan, Zhengzhou 450001, China

Abstract: Due to ionospheric delays caused by the receiver code biases in the traditional multi-GNSS precise point positioning (PPP) using raw observations, the estimates can be negative values. An improved model of Global Positioning System/BeiDou Navigation Satellite System (GPS/BDS) PPP with receiver differential code bias (DCB) parameters for raw observations is proposed in which receiver code biases on the first frequency of each system are constrained to zero and receiver DCB parameters are estimated. Ionospheric delays and receiver code biases are separated by the presented model. Additionally, the singularity between receiver clock offsets and ionospheric delays is reduced. GPS/BDS data from 4 stations of the Multi-GNSS experiment (MGEX) network are processed in static and kinematic modes. The results show that with the proposed PPP model, the average positioning accuracy and convergence time in static/kinematic mode are improved by 29.3% and 15.7%, 29.8% and 21.6%, respectively, in comparison with the traditional PPP model.

Key words: multi-constellation; precise point positioning; raw observation; receiver differential code bias; convergence time

First author: ZHANG Hui, PhD candidate, majors in multi-constellation GNSS precise positioning. E-mail: zh_ljpd@163.com