

国产机载双频激光雷达对地定位精度评价

田茂义^{1**}, 曹岳飞^{1,3}, 俞家勇^{1*}, 贺岩², 王延存¹, 王永星^{4,5}, 赵远超⁵

¹ 山东科技大学测绘科学与工程学院, 山东 青岛 266590;

² 中国科学院上海光学精密机械研究所上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800;

³ 青岛秀山移动测量有限公司, 山东 青岛 266590;

⁴ 南京大学中国南海研究协同创新中心, 江苏 南京 210023;

⁵ 中国海监南海航空支队, 广东 广州 510310

摘要 从国产机载双频激光雷达系统对地定位模型出发, 分析对定位精度产生影响的各个因素, 应用误差传播理论, 推导该系统对地定位的综合误差模型。根据系统各传感器参数, 对系统的理论定位精度进行仿真计算。对比分析机载雷达对地定位精度评定方法, 设计了基于平面特征的对地定位精度评定方法, 利用评定场飞行数据及高精度控制数据进行精度评价, 结果表明, 系统精度达到设计要求, 评价方法简单可行。

关键词 双频激光雷达; 精度评定; 平面特征; 仿真计算

中图分类号 P229.1; G312; P229.5

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.082807

Evaluation of Ground Positioning Accuracy for Domestic Airborne Dual-Frequency LiDAR

Tian Maoyi^{1**}, Cao Yuefei^{1,3}, Yu Jiayong^{1*}, He Yan²,
Wang Yancun¹, Wang Yongxing^{4,5}, Zhao Yuanchao⁵

¹ College of Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;

² Shanghai Key Laboratory of Solid-State Laser and Application Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

³ Qingdao Xiushan Mobile Measurement Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266590, China;

⁴ Collaborative Innovation Center of South China Sea Studies, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210023, China;

⁵ South China Sea, Air-Borne Detachment of China Marine Surveillance, Guangzhou, Guangdong 510310, China

Abstract Based on the localization model of domestic airborne dual-frequency LiDAR system, various factors that affect the positioning accuracy are analyzed, and the comprehensive accuracy evaluation model of the system is deduced by the error propagation law. According to the sensor parameters of the system, a simulated calculation is made for its theoretical positioning accuracy. The method of airborne radar's location accuracy assessment is analyzed for reference, through which a method to evaluate the accuracy of ground location based on planar features is designed. By using the airfield data and high precision control data to carry out the accuracy evaluation, the thesis gets the result that the accuracy of the domestic airborne dual-frequency LiDAR system meets the design requirement and the evaluation method is simple and feasible.

Key words dual-frequency LiDAR; accuracy assessment; planar features; simulation calculation

OCIS codes 040.1240; 000.2170; 120.0280

收稿日期: 2018-03-08; 修回日期: 2018-04-04; 录用日期: 2018-04-23

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项“机载双频激光雷达产品开发和應用”(2013YQ120343)

* E-mail: yujiayongskd@163.com; ** E-mail: tianmaoyi_zhy@126.com

1 引言

机载激光测深系统是当今海洋测绘先进技术的集中体现,具有高效、快速、无缝等优势,是海陆一体化测绘的首选方式^[1],故而得到了学术领域和业务部门的重视。现阶段,美国/加拿大 OPTECH 公司、瑞典 AHAB 公司和澳大利亚 FUGRO 公司均推出了自己的机载激光测深系统^[2-3]。国内大学和科研机构也开展了相关的研究^[4-5]。其中,2013年,中国科学院上海光学精密机械研究所联合山东科技大学、国家海洋局第二海洋研究所、中国科学院遥感与数字地球研究所和北京林业大学开展了机载双频海洋激光雷达产品化的工作,该项目目前已经形成三套产品化样机,并于2017年9月开展了样机的测试和验收工作。系统的探测精度是评定系统性能的关键指标,探测精度评价是测试和验收过程的核心工作。国产机载双频激光雷达同时具备陆地和海洋测绘的双重能力,涉及到测深精度^[6]、水底定位精度和对地定位精度等性能指标的评价,本文主要针对陆地测量定位精度进行评价。机载激光雷达的数据特点是在空间上呈离散形式,而且并不规则,激光点密度受到扫描仪和地物反射率等的影响,无法保证在目标点处恰好存在点云数据,这给精度评价带来了挑战。

机载激光测深脚点精度评价的指标分为高程和平面两个方向。高程位置的评价方法比较简单^[7],通常做法是:使用高精度地面测绘仪器采集一块平坦的区域,建立数字地面模型,然后在相同区域采集机载激光雷达实测数据,根据实测数据的平面坐标,在建立的数字地面模型中内插该点的高程。内插高程和实测高程进行比较就可以评价高程精度。而平面位置的精度评价就比较复杂,目前,已发表的机载激光测深激光脚点平面位置精度评价方法有以下几种:1) 文献[8]提出利用垂直墙面上激光脚点的几何分布特性来评价机载激光测深数据的平面位置精度,这种方法要求垂直墙面足够大或有足够的点密度,如 10 point/m²; 2) 文献[9]利用激光回波强度信息,在强度模式下找到同名点并作比较分析,得到平面位置精度,这种方法的可靠性基于有效的算法对强度图像进行去噪,而且点云强度图像的精度在点密度小的情况下精度较低; 3) 此外,文献[9]还提到了机载激光测深配置数据相机,通过匹配影像数据和点云数据,通过影像找到地面实测控制点的

同名点并进行比较,进行平面位置的精度评价。该方法技术成熟、成本低且易于实施,但容易累积误差,正射影像的精度会影响最终评价结果^[10]; 4) 文献[11]基于二类高程误差的产生机制,借助于水平面和斜坡面研究机载激光测深数据的平面位置精度。

目前,国产机载双频激光测深没有配置数码相机,在通常工作模式:重复频率为 3 kHz、航速为 300 km/h、航高为 400 m、测点有效率为 0.6 的情况下,平均点密度为 0.35 point/m²,文献[8]、[9]提出的方法不适用。因此,本文在采用水平面评定高程精度的基础上,采用基于二类高程误差产生机制进行平面位置精度评价的方法,相较于文献[11]所提出的方法,本文进行了改进:采用稳健特征值法^[12]对平面斜坡面进行平面拟合,提高了拟合平面的抗误差性,增加了平面模型的可靠性,从而提高了精度评定的准确性。

2 精度估算模型和设计指标

以中国科学院上海光学精密机械研究所研制的机载双频激光测深系统作为研究对象。该系统以共线卵形扫描方式向海面或陆地发射波长为 1064 nm 的红外光及倍频后波长为 532 nm 的绿光。绿光用来测深,红外光不易穿透海水,用来测定海面或陆地位置。系统测深定位和坐标转换的示意图如图 1 所示。

该系统的地面激光脚点坐标解算分为四个步骤:1) 求得激光脚点在激光扫描仪坐标下的坐标 (X_L, Y_L, Z_L) ; 2) 将 (X_L, Y_L, Z_L) 转换到惯性测量单元(IMU)坐标系下,得到 $(X_{IMU}, Y_{IMU}, Z_{IMU})$; 3) 将 $(X_{IMU}, Y_{IMU}, Z_{IMU})$ 转换到当地水平坐标系下,得到 (X_G, Y_G, Z_G) ; 4) 将 (X_G, Y_G, Z_G) 转换到 WGS84 坐标系得到 $(X_{WGS84}, Y_{WGS84}, Z_{WGS84})$ 。经过一系列计算和坐标转换,可推导得激光脚点坐标的定位模型^[8]:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{WGS84}^T = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_L^T \mathbf{R}_1 + \begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix}^T \mathbf{R}_2 \mathbf{R}_3 + \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_O^T, \quad (1)$$

式中: (X_L, Y_L, Z_L) 中的观测量为测距 ρ , 扫描角 θ ; $(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)$ 为扫描仪坐标系中心与惯导坐标系中心的偏心量; (X_O, Y_O, Z_O) 为 GNSS 天线相位中心。

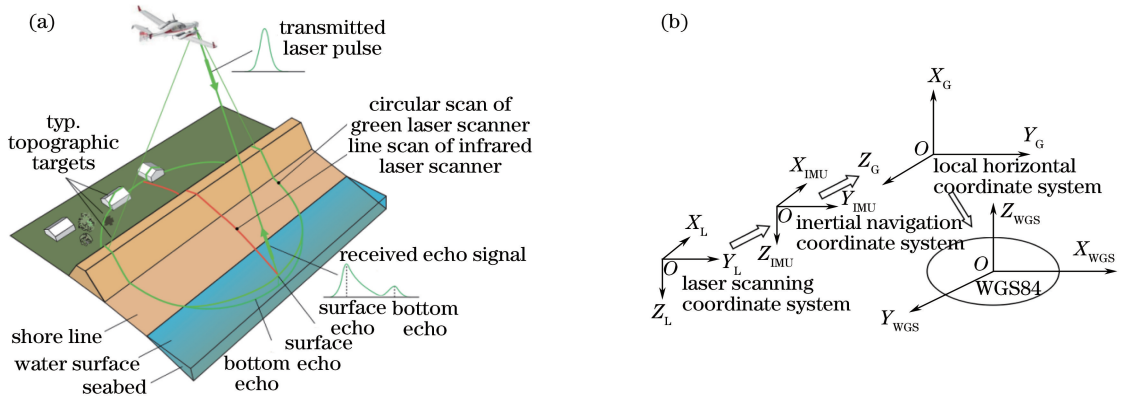


图 1 测深定位和坐标转换的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sounding positioning and coordinate transformation

$$\mathbf{R}_1 = \begin{pmatrix} \cos \alpha \cos \gamma - \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma & -\cos \alpha \sin \gamma - \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma & -\sin \alpha \cos \beta \\ \cos \beta \sin \gamma & \cos \beta \cos \gamma & -\sin \beta \\ \sin \alpha \cos \gamma + \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma & -\sin \alpha \sin \gamma + \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma & \cos \alpha \cos \beta \end{pmatrix};$$

$$\mathbf{R}_2 = \begin{pmatrix} \cos \phi \cos \kappa + \sin \phi \sin \omega \sin \kappa & -\cos \phi \sin \kappa + \sin \phi \sin \omega \cos \kappa & -\sin \phi \cos \omega \\ \cos \omega \sin \kappa & \cos \omega \cos \kappa & \sin \omega \\ \sin \phi \cos \kappa - \cos \phi \sin \omega \sin \kappa & -\sin \phi \sin \kappa - \cos \phi \sin \omega \cos \kappa & \cos \phi \cos \omega \end{pmatrix};$$

$$\mathbf{R}_3 = \begin{pmatrix} -\sin L & \cos L & 0 \\ -\sin B \cos L & -\sin B \sin L & \cos B \\ \cos B \cos L & \cos B \sin L & \sin B \end{pmatrix}.$$

其中： α, β, γ 为三个安置角； φ, ω, κ 为三个姿态角； B, L 为当地水平坐标系中心经纬度坐标。将(1)式

微分, 可得激光脚点精度表达式:

$$\left\{ \begin{aligned} m_x &= \left[\left(\frac{\partial X}{\partial \rho} \right)^2 m_\rho^2 + \left(\frac{\partial X}{\partial \theta} \right)^2 m_\theta^2 + \left(\frac{\partial X}{\partial \alpha} \right)^2 m_\alpha^2 + \left(\frac{\partial X}{\partial \beta} \right)^2 m_\beta^2 + \left(\frac{\partial X}{\partial \gamma} \right)^2 m_\gamma^2 + \left(\frac{\partial X}{\partial \Delta X} \right)^2 m_{\Delta X}^2 + \right. \\ &\left. \left(\frac{\partial X}{\partial \Delta Y} \right)^2 m_{\Delta Y}^2 + \left(\frac{\partial X}{\partial \Delta Z} \right)^2 m_{\Delta Z}^2 + \left(\frac{\partial X}{\partial \varphi} \right)^2 m_\varphi^2 + \left(\frac{\partial X}{\partial \omega} \right)^2 m_\omega^2 + \left(\frac{\partial X}{\partial \kappa} \right)^2 m_\kappa^2 + \left(\frac{\partial X}{\partial B} \right)^2 m_B^2 + \right. \\ &\left. \left(\frac{\partial X}{\partial L} \right)^2 m_L^2 + \left(\frac{\partial X}{\partial X_0} \right)^2 m_{X_0}^2 \right]^{1/2} \\ m_y &= \left[\left(\frac{\partial Y}{\partial \rho} \right)^2 m_\rho^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial \theta} \right)^2 m_\theta^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial \alpha} \right)^2 m_\alpha^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial \beta} \right)^2 m_\beta^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial \gamma} \right)^2 m_\gamma^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial \Delta X} \right)^2 m_{\Delta X}^2 + \right. \\ &\left. \left(\frac{\partial Y}{\partial \Delta Y} \right)^2 m_{\Delta Y}^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial \Delta Z} \right)^2 m_{\Delta Z}^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial \varphi} \right)^2 m_\varphi^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial \omega} \right)^2 m_\omega^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial \kappa} \right)^2 m_\kappa^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial B} \right)^2 m_B^2 + \right. \\ &\left. \left(\frac{\partial Y}{\partial L} \right)^2 m_L^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial Y_0} \right)^2 m_{Y_0}^2 \right]^{1/2} \\ m_z &= \left[\left(\frac{\partial Z}{\partial \rho} \right)^2 m_\rho^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial \theta} \right)^2 m_\theta^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial \alpha} \right)^2 m_\alpha^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial \beta} \right)^2 m_\beta^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial \gamma} \right)^2 m_\gamma^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial \Delta X} \right)^2 m_{\Delta X}^2 + \right. \\ &\left. \left(\frac{\partial Z}{\partial \Delta Y} \right)^2 m_{\Delta Y}^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial \Delta Z} \right)^2 m_{\Delta Z}^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial \varphi} \right)^2 m_\varphi^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial \omega} \right)^2 m_\omega^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial \kappa} \right)^2 m_\kappa^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial B} \right)^2 m_B^2 + \right. \\ &\left. \left(\frac{\partial Z}{\partial L} \right)^2 m_L^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial Z_0} \right)^2 m_{Z_0}^2 \right]^{1/2} \end{aligned} \right. \quad (2)$$

从机载激光扫描定位模型分析,影响激光脚点定位精度的误差因素主要有两类:传感器测量参数的误差和系统集成误差^[12]。表1列出了系统研制的

单位给出的在一定飞行条件(重复频率为3 kHz、航速为220 km/h、航高为400 m)情况下,该系统的误差源及参数。

表1 机载双频激光雷达误差源及参数指标

Table 1 Error source and parameter index of airborne dual-frequency laser lidar

Type	Error source	Error parameter	Symbol
Laser scanner	ranging error	0.005 m	m_ρ
	angle error	0.0028°	m_θ
IMU	roll angle error	0.005°	m_φ
	pitch angle error	0.005°	m_ω
	heading angle error	0.008°	m_κ
Placement angle	roll angle error	0.008°	m_α
	pitch angle error	0.008°	m_β
	heading angle error	0.01°	m_γ
Placement position	coordinate X error	2 mm	$m_{\Delta X}$
	coordinate Y error	2 mm	$m_{\Delta Y}$
	coordinate Z error	2 mm	$m_{\Delta Z}$
GNSS position	coordinate X error	0.05 m	$m_{\Delta X_0}$
	coordinate Y error	0.05 m	$m_{\Delta Y_0}$
	coordinate Z error	0.10 m	$m_{\Delta Z_0}$

经仿真计算可以得到国产机载双频激光雷达系统特定飞行条件下的理论对地定位精度。但是系统在实际作业中,受机载平台振动^[13]以及环境因素的影响,激光脚点的定位精度要比仿真计算的结果大。因此,系统研制单位综合 LIDAR、IMU、GNSS 等传感器和集成检校的精度以及其环境因素带来的误差,在仿真计算的基础上制定了不同航高和不同扫描角下的水平和垂直精度指标任务书,表2为系统在重复频率为3 kHz、航速为220 km/h、航高为400 m 情况下^[14],对地仿真定位精度和设计指标。

表2 定位精度指标

Table 2 Design index for positioning precision

Parameters	Calculation	Design
Repeat frequency /kHz	3	
Scanning angle / (°)	±15	
Flight height /m	400	
Flight speed / (km·h ⁻¹)	220	
Horizontal precision/m	0.323	0.4
Vertical precision/m	0.221	0.3

3 精度评价方法

针对目前国产机载双频激光雷达无法获取影像数据以及激光重复频率低导致的点云密度小、点云强度图像精度低的问题,本文基于稳健特征值拟合平面^[15],以中误差作为精度指标,采用平面特征地物的真实地理位置与实测地理位置的几何关系进行高程精度评定;采用斜坡面特征地物真实地理位置

与实测地理位置的几何关系进行平面精度评定。

3.1 稳健特征值法拟合平面方法

假设点云拟合平面方程为

$$ax + by + cz - d = 0, \quad (3)$$

则平面点集中任意一点到平面的距离可以表示为

$$d_i = |ax_i + by_i + cz_i - d|. \quad (4)$$

要获得最佳拟合平面,应在约束条件 $a^2 + b^2 + c^2 = 1$ 下满足:

$$e = \sum_i d_i^2 = \sum_i (ax_i + by_i + cz_i - d)^2 \longrightarrow \min. \quad (5)$$

构建特征值方程,求解最小特征值对应的特征向量,即得到平面参数 a 、 b 、 c 、 d 的最优估计。

计算点到平面的中误差为

$$\sigma = \sqrt{\frac{(d_i - \bar{d})^2}{n}}, \quad (6)$$

式中 $\bar{d} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i$ 。剔除 $d_i < 2\sigma$ 的点,迭代计算平面方程参数。

3.2 高程精度评定方法

如图2所示,激光光束打在平面地物点 P_T 上,由于误差的存在,计算得到的激光脚点位置为 P_F , P_F 在平面地物上的投影点为 P'_F , P_F 与 P'_F 垂直方向的差值即为垂直方向的误差。具体计算过程如下:

平面地物的平面方程可用地面高精度测绘仪器

高密度采集数据并通过稳健特征值拟合方法得到,假定 $Ax + By + Cz + D = 0$ 。设 P_F 坐标为 (x_i, y_i, z_i) , P'_F 坐标为 (x'_i, y'_i, z'_i) , 则有:

$$z'_i = \frac{-(Ax_i + By_i + D)}{C}, \quad (7)$$

$$\epsilon_{z_i} = z'_i - z_i. \quad (8)$$

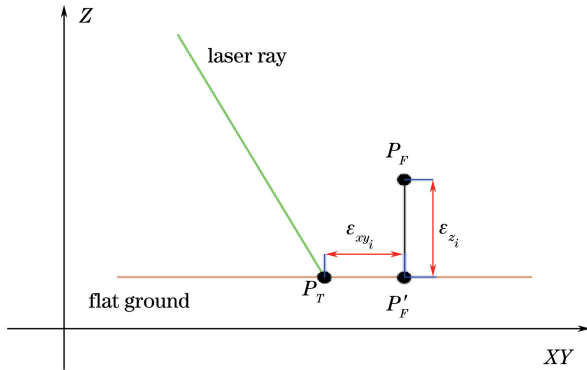


图2 垂直精度评定示意图

Fig. 2 Schematic diagram of vertical accuracy evaluation

计算中误差:

$$\epsilon_z = \sqrt{\frac{\sum (\epsilon_{z_i})^2}{n-1}}, \quad (9)$$

式中 n 为实测点云面点数。

3.3 平面精度评定方法

如图3所示,激光光束打在斜面地物点 P_s 上,由于误差的存在,计算得到的激光脚点位置为 P_q , P_q 在斜面地物上的投影点为 P'_q , P_q 与 P'_q 垂直方向的差值包含了高程误差 ϵ_z 和平面误差 ϵ_{xy_i} 引起的高差(二类高差 ϵ_e),根据几何关系即可算出平面位置误差。具体计算过程如下:

斜面地物的平面方程可用地面高精度测绘仪器高密度采集数据并通过稳健特征值拟合方法得到,假定 $Ax + By + Cz + D = 0$ 。

该斜面的倾角 α 为

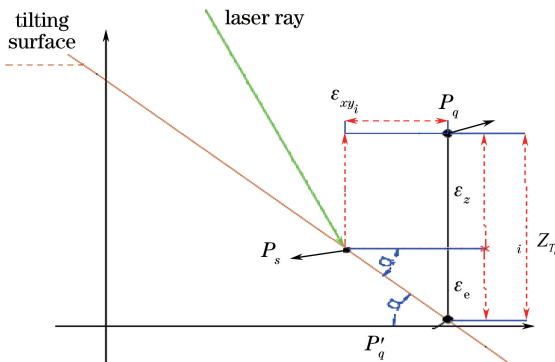


图3 平面精度评定示意图

Fig. 3 Schematic diagram of planar accuracy evaluation

$$\cos \alpha = \frac{|C|}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}. \quad (10)$$

设 P_q 坐标为 (x_i, y_i, z_i) , P'_q 坐标为 (x'_i, y'_i, z'_i) , 则有

$$z'_i = \frac{-(Ax_i + By_i + D)}{C}. \quad (11)$$

设 $z_{T_i} = z'_i - z_i$ 。根据几何关系

$$z_{T_i} = \epsilon_z + \epsilon_e, \quad (12)$$

$$\epsilon_e = \epsilon_{xy_i} \tan \alpha, \quad (13)$$

则平面误差的表达式为

$$\epsilon_{xy_i} = \epsilon_i / \tan \alpha. \quad (14)$$

计算中误差:

$$\epsilon_{xy} = \sqrt{\frac{\sum (\epsilon_{xy_i})^2}{n-1}}, \quad (15)$$

式中 n 为实测点云面点数。

4 数据与结果分析

4.1 评定场地地面数据获取

选择平面特征丰富的居民区作为精度评定场,具体区域位于三亚市海棠区,北至龙海路,南至江林路,东至海棠湾广场,西至G98海南环线高速,该地区范围内地形平坦,地貌丰富。图4给出了该区域的卫星图片。



图4 评定场分布示意图

Fig. 4 Distribution diagram of evaluation field

对评定场平面和斜面特征地物数据,采用 FARO130 地面三维激光扫描仪进行碎部扫描测量,采用4台天宝GNSS接收机静态模型进行控制测量。基于点云可视化软件提取采集数据中的平面数据并采用稳健特征值法进行平面拟合,计算拟合精度。

如图5所示,其中除42号拟合面拟合精度大于5cm外,其余拟合面拟合精度优于5cm,因此42号面不参与精度评定的情况下,有效拟合面为59个。

4.2 机载数据获取

根据评定场的布设位置和范围,飞行航线设计

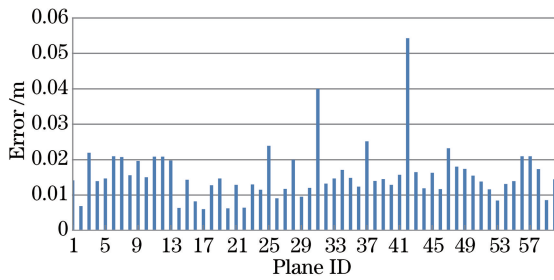


图 5 控制面拟合精度图

Fig. 5 Diagram of the control surface fitting accuracy

卫星图如图 6 所示。设计技术指标为相邻航带旁向重叠率为 60%，垂直交叉航线为 10 条，飞行高度为 400 m。机载外业数据采集解析完成后，提取机载点云面数据中与地面测量仪器采集的平面数据对应的平面数据。

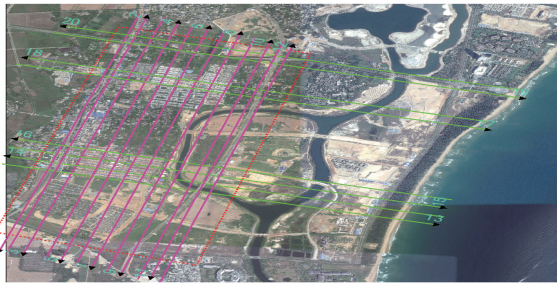


图 6 航线分布示意图

Fig. 6 Air route distribution diagram

4.3 精度评定结果和分析

4.3.1 高程精度评价

经数据提取、整理，参与高程位置精度评价的点个数为 2673，按照高程精度评定方法，求得绝对高程精度为 0.233 m。

计算拟合点的残差：

$$\xi_i = z_i - \epsilon_z, \quad (16)$$

得到残差的折线图如图 7 所示。

由图 7 可以看出所有残差在 0 附近均匀波动，

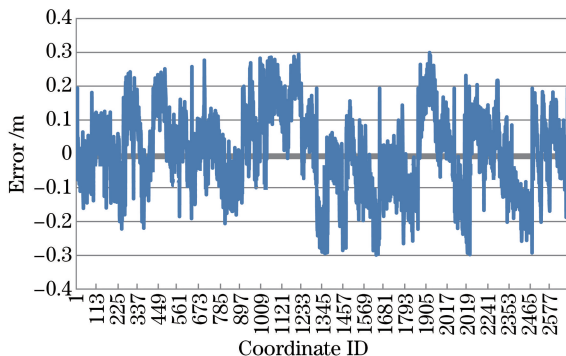


图 7 高程精度残差图

Fig. 7 Elevation accuracy residual diagram

波动幅度在 0.3 m 内，说明数据可靠，高程评定方法可行。

4.3.2 水平定位精度评价

经数据提取、整理，参与平面位置精度评价的点个数为 1561，按照高程精度评定方法，求得绝对水平定位精度为 0.362 m。

计算拟合点的残差：

$$\xi_{xy_i} = \epsilon_{xy_i} - \epsilon_{xy}, \quad (17)$$

得到残差的柱状图如图 8 所示。

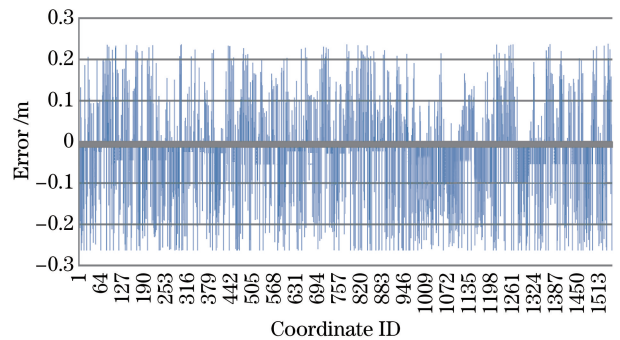


图 8 平面精度残差图

Fig. 8 Planar accuracy residual diagram

由图 8 可以看出所有残差在 0 附近均匀波动，波动幅度在 0.4 m 内，说明数据可靠，水平精度评价方法可行。

4.3.3 分析

仿真计算精度、精度设计指标以及评定结果对比如表 3 所示。

表 3 精度对比

Table 3 Precision comparison

Parameters	Calculation	Design	Evaluation
Repeat frequency /kHz		3	
Scanning angle /($^{\circ}$)		± 15	
Flight height /m		350-400	
Flight speed /($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)		220-250	
Horizontal precision /m	0.323	0.400	0.362
Vertical precision /m	0.221	0.300	0.233

从表 3 中可以看出，精度评定结果大于仿真计算精度而小于精度设计指标，表明该系统精度能够达到研制单位的精度指标要求。

5 结论

利用地物的平面特征对国产机载双频激光雷达系统进行精度评价，从激光点云本身入手，不依赖其他数据源，能够直观评价数据精度，避免了其他数据源引入的误差。精度评价结果表明，在重复频率为 3 kHz、航速为 220 km/h、航高为 400 m 情况下国

产机载双频激光雷达垂直方向定位精度能够达到 0.233 m, 平面定位精度能够达到 0.362 m, 满足系统的设计指标。根据大比例尺数字测图成果精度执行《GB/T 14912—2005 1:500 1:1000 1:2000 外业数字测图技术规程》^[16], 满足 1:2000 数字测图精度的要求。

参 考 文 献

- [1] Peng L, Liu Y X, Deng C L, *et al.* Experiment of Airborne Laser Bathymetry [J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2014, 34(4): 35-37.
彭琳, 刘焱雄, 邓才龙, 等. 机载激光测深系统试点应用研究[J]. 海洋测绘, 2014, 34(4): 35-37.
- [2] Wang Y. Current status and development of airborne laser bathymetry technology [J]. Journal of Geomatics, 2014, 39(3): 38-42.
王越. 机载激光浅海测深技术的现状和发展[J]. 测绘地理信息, 2014, 39(3): 38-42.
- [3] Zhai G J, Wu T Q, Ouyang Y Z, *et al.* The development of airborne laser bathymetry [J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2012, 32(2): 67-71.
翟国君, 吴太旗, 欧阳永忠, 等. 机载激光测深技术研究进展[J]. 海洋测绘, 2012, 32(2): 67-71.
- [4] Bian G, Wang Q, Xiao F M, *et al.* Progressing and prospect in the international hydrographic techniques [J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2012, 32(4): 3-6.
边刚, 王琪, 肖付民, 等. 当前国际海道测量技术进展[J]. 海洋测绘, 2012, 32(4): 3-6.
- [5] Wang Q D, Chen W B, Lu Y T, *et al.* Analysis of relationship between parameter choice of airborne laser bathymetry and maximum penetrability [J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(10): 1255-1260.
汪权东, 陈卫标, 陆雨田, 等. 机载海洋激光测深系统参量设计与最大探测深度能力分析[J]. 光学学报, 2003, 23(10): 1255-1260.
- [6] Yao C H, Chen W B, Zang H G, *et al.* Study of the capability of minimum depth using an airborne laser bathymetry[J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(10): 1406-1410.
姚春华, 陈卫标, 臧华国, 等. 机载激光测深系统的最小可探测深度研究[J]. 光学学报, 2004, 24(10): 1406-1410.
- [7] Qu J. Accuracy analysis and evaluation of airborne Lidar data[D]. Xi'an: Chang'an University, 2010: 28-29.
- 曲佳. 机载激光雷达点云数据精度分析与评价研究[D]. 西安: 长安大学, 2010: 28-29.
- [8] Zhang X H. Airborne lidar measurement technology theory and methods[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2007: 89-90.
张小红. 机载激光雷达测量技术理论与方法[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2007: 89-90.
- [9] Wang S Y. The horizontal accuracy assessment of airborne LiDAR data [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2013, 36(7): 54-56.
王圣尧. 机载激光雷达平面精度评价方法研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2013, 36(7): 54-56.
- [10] Li D R, Hu Q W. Digital measurable image based geo-spatial information service [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2007, 32(5): 377-380.
李德仁, 胡庆武. 基于可测实景影像的空间信息服务[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2007, 32(5): 377-380.
- [11] Casella V, Spalla A. Estimation of planimetric accuracy of laser scanning data: proposal of a method exploiting ramps [J]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 2000, 33(B3): 157-163.
- [12] Wang J J, Liu J D. Analysis and sorting of impacts of measurement errors on positioning accuracy of laser point cloud obtained from airborne laser scanning[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(4): 0414001.
王建军, 刘吉东. 影响机载激光扫描点云精度的测量误差因素分析及其影响大小排序[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0414001.
- [13] Wu H B, Lan T, Zhang X, *et al.* Effect of airborne LiDAR platform's vibration on laser pointing accuracy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(s1): s108001.
吴洪波, 蓝天, 张新, 等. 机载平台振动对激光雷达激光束指向精度的影响[J]. 中国激光, 2015, 42(s1): s108001.
- [14] He Y, Tian M Y, Lü D L, *et al.* Parameter Design and Performance Analysis of Airborne Dual-frequency Laser Radar System[C] // Infrared, Remote Sensing Technology and Application Seminar and Interdisciplinary Forum, Nanjing, Jiangsu, 2015: 183-192.
贺岩, 田茂义, 吕德亮, 等. 机载双频激光雷达系统参数设计和性能分析[C] // 红外、遥感技术与应用研讨会暨交叉学科论, 江苏, 南京, 2015: 183-192.
- [15] Guan Y L, Cheng X J, Shi G G. A robust method for

fitting a plane to point clouds[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2008, 36(7): 981-984.

官云兰, 程效军, 施贵刚. 一种稳健的点云数据平面拟合方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2008, 36(7): 981-984.

[16] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of

China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 14912—2005 1:500 1:1000 1:2000 Field Digital Mapping Technical Specifications [S]. Beijing: China Zhijian Publishing House, 2005. 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 14912—2005 1:500 1:1000 1:2000 外业数字测图技术规程[S]. 北京: 中国质检出版社, 2005.