

机载双频激光雷达结构误差与定位精度研究

吕德亮^{1,4**}, 贺岩^{2*}, 俞家勇³, 陈丽明⁴, 王永星^{5,6}, 刘辉⁵

¹杭州中科天维科技有限公司, 浙江 杭州 310016;

²中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800;

³山东科技大学测绘科学与工程学院, 山东 青岛 266590;

⁴中科光绘(上海)科技有限公司, 上海 201800;

⁵中国海监南海航空支队, 广东 广州 510310;

⁶南京大学中国南海研究协同创新中心, 江苏 南京 210023

摘要 针对机载双频激光雷达特有的卵形扫描结构,着重分析了结构中会对系统定位精度产生影响的误差源,主要包括电机转轴与编码器安装产生的偏心误差、卵形扫描镜安装误差和光学调整误差;提出了机载双频激光雷达的误差模型,并依据该模型定量分析了各种误差对机载双频雷达定位精度的影响。研究表明,上述误差均会对系统的定位精度产生较大影响,且对扫描线上的每个点产生的影响各不相同,多种误差耦合后难以通过建立系统整机矫正模型予以修正,因此在激光雷达的结构设计、器件选型、结构加工和系统装调等各个环节要控制误差的引入,并在装配过程中量化误差大小以便后期进行误差矫正,减弱和消除这些系统误差对于提高机载双频激光雷达系统的定位精度有着重要的影响。

关键词 双频激光雷达; 检校; 误差分析; 定位精度

中图分类号 P24 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.082806

Research of Error Analysis and Positioning Accuracy of Airborne Dual-Frequency LiDAR

Lü Deliang^{1,4**}, He Yan^{2*}, Yu Jiayong³, Chen Liming⁴, Wang Yongxing^{5,6}, Liu Hui⁵

¹Hangzhou CAS Skyvitech Technology Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310016, China;

²Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

³College of Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;

⁴CAS Skyvitech(Shanghai) Technology CO., Ltd., Shanghai 201800, China;

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

⁶Collaborative Innovation Center of South China Sea Studies, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210023, China

Abstract Aiming at the special oval scanning structure of airborne dual-frequency LiDAR, the error sources that affect the positioning accuracy of the system are mainly studied, including the eccentric errors caused by the installation of the motor rotor nut and the encoder, the installation error of the scanning mirror and optical adjustment error. The error model of airborne dual-frequency LiDAR is put forward. Based on this model, the effects of various errors on the positioning accuracy of airborne dual-frequency LiDAR are quantitatively analyzed. The results show that these errors will have a great impact on the system's positioning accuracy and have different effects on the position of each point on the same line. After a variety of errors are coupled, it is difficult to set up the system correction model. Therefore, the introduction of errors should be controlled in the design of the LiDAR structure, device selection, structural processing, system installation and other aspects, and the error should be quantified in the assembly process so as to be corrected easily in the later stage. Attenuating and eliminating these systematic errors has an important impact on the improvement of positioning accuracy of airborne dual-frequency LiDAR systems.

Key words dual-frequency LiDAR; calibration; error analysis; positioning accuracy

OCIS codes 280.5600; 010.3640; 150.1488

收稿日期: 2018-03-09; 修回日期: 2018-04-24; 录用日期: 2018-05-29

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ120343)

* E-mail: heyan@siom.ac.cn; ** E-mail: deliangcn@163.com

1 引言

海洋是我国赖以生存和发展的重要资源,目前东海、南海仍有大面积海域存在未知的海岛、岛礁、暗礁,海洋中的海岛、岛礁及其周边海底的地形测量是海洋测绘最基本的任务之一。传统的探测方法是使用多波束探测技术以水面扫描的方式实现浅海域的测绘^[1],但是在浅水区域探测过程中,往往会出现水太浅,船只无法进入的情况,无法和陆地测绘的成果完整拼接,且采用多波束方式进行测量作业效率太低。机载双频激光雷达技术是以激光作为主动探测工具,在水深浅于 50 m 的沿岸区域具有无可比拟的优越性^[2-4]。机载双频激光雷达系统的工作原理是通过激光器发射双频激光脉冲信号,再通过反射镜的旋转将激光信号按照一定的角度打到海面:其中 1064 nm 波段的激光经海水表面反射后被海面探测器接收,获取海面与仪器之间的距离;532 nm 波段的激光穿透海水表面到达海底,经海底反射后沿原光路返回被海底探测器接收,经过折射纠正和倾斜纠正后,即可以获取当前扫描点处海水深度及海底信息。

传统上对激光雷达的误差分析研究多集中于激光雷达系统的矫正,如距离矫正、测角矫正、安置角误差以及随机误差等^[5-8],但对于仪器内部本身各组件误差对整机影响的研究还比较少。Latypov^[9]主要从机载激光雷达整体坐标系的角度分析了激光光线方向误差对于测量精度的影响。Wang 等^[10]主要采用多元线性回归方法建立了各个误差因数与点云精度之间的映射关系,分析其影响并对误差大小进行排序,研究的焦点是机载激光雷达系统集成过程形成的误差,如机载雷达扫描头和惯性导航系统联合工作时的误差,而对于激光雷达内部结构误差的研究较少。Wu 等^[11]分析了采用摆动扫描方式的激

光雷达扫描镜与激光束的对准误差对 LiDAR 定位精度的影响,着重分析了对准误差对摆动扫描所形成的线状点云误差的影响,不具有一般性,分析较粗略,缺少其对定位精度影响的量化分析。Yang 等^[12]从光学的角度分析了四面旋转棱镜与激光束的对准误差,该方法主要针对多面旋转棱镜特性(在旋转过程中激光发射中心会发生偏移)开展了四面反射镜误差的研究,但只考虑了镜面加工误差的问题而没有考虑其他会引起激光路径发生变化的情况。

本文分析了机载双频激光雷达在装配过程中,加工精度及装配误差对雷达定位精度产生的影响。电机转轴与编码器中心不同轴导致的偏心差、电机转轴与反射镜法线的夹角误差、激光发射光轴与反射镜法线的光调误差,这些误差可统称为激光雷达结构误差,这些误差耦合在一起影响出射激光的发射方向。传统上通过建立标靶点矫正激光雷达单机误差时所采用的方法和数学模型非常复杂,且由于各个误差相互耦合最后很难获取到真值。本文从激光雷达的结构出发,分析各个误差对最终结果产生的影响,在装配的过程中实现各个误差的定量检测以便于数据的矫正。

2 机载双频激光雷达工作原理

2.1 机载双频激光雷达结构

机载双频雷达结构简图如图 1(a)所示,由于探测深度较深,接收口径较大,为保证激光能够按照一定的角度射入海水,采用了类似椭圆形扫描的方式进行扫描,激光发射方向保持水平,并与飞机飞行方向垂直,驱动电机的转轴与激光发射方向成 45° 。反射镜的法线与转轴夹角为 7.5° ,随反射镜转动光束横向偏摆 $\pm 15^\circ$ 、纵向偏摆 $\pm 7.5^\circ$,在海面上形成椭圆轨迹,椭圆长轴为扫描宽度,飞机向前飞行,光束的椭圆轨迹如图 1(b)所示。

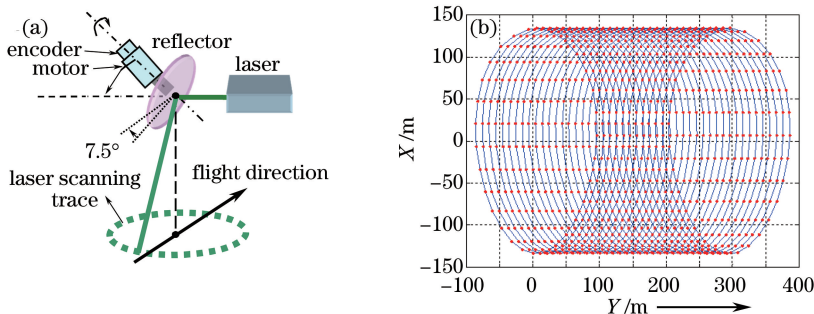


图 1 机载双频雷达结构简图(a)与海面扫描光点轨迹(b)

Fig. 1 Airborne dual-frequency LiDAR structure (a) and spot trajectory on sea surface (b)

2.2 机载双频激光雷达定位原理

以反射镜的中心点为坐标原点 O , 飞机的飞行方向为 Y 轴正方向, Z 轴垂直向上, 建立右手坐标系 $O-XYZ$ ^[13]。入射激光和驱动电机转轴在同一个平面(XZ 面)内, 激光器沿 X 轴负方向水平发射激光。为计算方便, 以 Y 轴为旋转轴, 将坐标系逆时针旋转 45° , 建立新的坐标系定义为 $O'-X'Y'Z'$, 这样驱动电机的转轴与 Z' 轴重合, 如图 2 所示, 其中角 β 为驱动电机的旋转角。

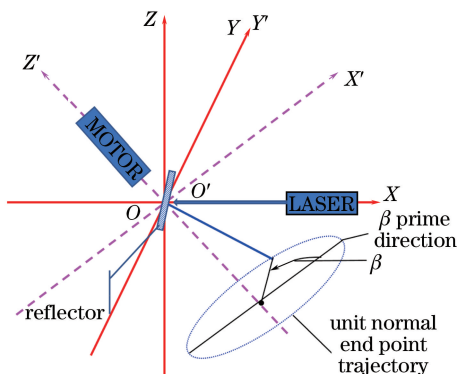


图 2 坐标系示意图

Fig. 2 Coordinate system diagram

在 $O'-X'Y'Z'$ 坐标系下可知

$$\mathbf{V}_L = \begin{bmatrix} \cos(\pi - A) \\ 0 \\ \sin(\pi - A) \end{bmatrix}, \mathbf{M} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix}, \mathbf{V}_R = \begin{pmatrix} \sin B \\ 0 \\ -\cos B \end{pmatrix}, \quad (1)$$

式中: \mathbf{V}_L 为激光器发射激光的方向向量; A 为驱动电机的转轴与激光发射方向的夹角, 设计值为 45° ; \mathbf{M} 为电机转轴的向量; \mathbf{V}_R 为反射镜平面法线的初始方向向量; B 为反射镜的法线与转轴夹角, 设计值为 7.5° 。定义反射镜平面的法线在 XZ 平面时, 驱动电机的转角为 0 , 作为反射镜的初始位置。

电机转动到任意角度 β 时, 反射镜平面的法线的旋转矩阵 \mathbf{R}_Z 为

$$\mathbf{R}_Z = \begin{pmatrix} \cos \beta & \sin \beta & 0 \\ -\sin \beta & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

由(1)式和(2)式可知当驱动电机的角度为 β 时, 反射镜平面的法线向量 \mathbf{M}_1 为

$$\mathbf{M}_1 = \mathbf{R}_Z \cdot \mathbf{V}_R. \quad (3)$$

则激光器发射的激光经镜面反射后的激光向量 \mathbf{V}_1 为

$$\mathbf{V}_1 = \mathbf{V}_L - 2(\mathbf{V}_L \cdot \mathbf{M}_1)\mathbf{M}_1. \quad (4)$$

最后将激光向量 \mathbf{V}_1 再沿 Y 轴顺时针旋转回原坐标

系 $O-XYZ$ 下, 即可获取电机转动到任意角度时激光射向地面的方向向量 \mathbf{V}_s :

$$\mathbf{V}_s = \mathbf{R}_Y \cdot \mathbf{V}_1, \quad (5)$$

$$\text{式中 } \mathbf{R}_Y = \begin{pmatrix} \cos A & 0 & -\sin A \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin A & 0 & \cos A \end{pmatrix}.$$

则由(1)~(5)式可得测量的点位坐标值 \mathbf{P} 为

$$\mathbf{P} = \mathbf{V}_s \cdot \hat{\mathbf{L}} =$$

$$\{\mathbf{R}_Y \cdot [\mathbf{V}_L - 2(\mathbf{V}_L \cdot \mathbf{R}_Z \cdot \mathbf{V}_R)\mathbf{R}_Z \cdot \mathbf{V}_R]\} \cdot \hat{\mathbf{L}}, \quad (6)$$

式中 $\hat{\mathbf{L}}$ 为经过大气改正、气象改正、加常数、乘常数矫正后的测距值。计算海底坐标时还需要进行折射改正等矫正。

3 机载双频激光雷达结构误差分析

由于加工精度和装配误差的影响, 最终装配的结果和设计值可能有所偏差, 加工和装配误差会引起轴系夹角误差和中心点偏移误差, 其中加工和装配精度引起的轴系中心点偏移误差对于定位的影响是平移性质的, 不会随距离的变化而改变, 中心点平移几十微米对定位精度产生的影响同样是几十微米, 相较于系统毫米级的定位精度要求可以忽略不计^[14], 因此不需要对中心点偏移误差引入的系统误差进行分析; 但加工和装配精度引起的轴系角度误差对定位精度会随距离的增加而被放大, 几十微米的结构倾斜产生的测角误差就可能产生 500 m 处目标产生分米级别甚至更大的定位误差, 因此主要考虑仪器的结构精度对获取测量角度产生影响的误差, 并建立相应的误差模型。

3.1 电机转轴与光栅角编码器中心轴安装偏心差

如图 3 所示, 电机转轴的中心为 O , 内部虚线代表光栅环, 光栅环的中心为 O' , 光栅编码器的几何中心位置和转轴的中心位置由于机械加工及安装精度的影响, 不能做到完全重合, 它们之间存在一定的距离 ϵ , 形成编码器安装的偏心误差。假设当编码器角度读数为 C 时, O 、 O' 和读数头在同一条直线上, 则可知此时编码器偏心差影响为 0 , 根据其几何关系可知

$$\cos(\alpha - C) = d/r, \quad (7)$$

$$\tan(\beta - C) = r \sin(\alpha - C)/(d + \epsilon), \quad (8)$$

式中: r 为光栅半径; α 为光栅编码器读取的转动角度; β 为电机实际转动的角度; θ 为偏心安装引起的误差; ϵ 是偏心距; d 如图 3 所示, 可由偏心距 ϵ 和偏

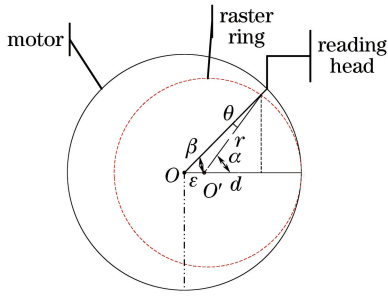


图3 偏心角误差示意图

Fig. 3 Eccentric angle error diagram

心角度 α 计算出。

由(8)式得 $\sin(\alpha - C) = (d + \epsilon) \tan(\beta - C) / r$,

则

$$\sin \theta = \sin(\alpha - \beta) = \sin(\alpha - C) \cos(\beta - C) - \cos(\alpha - C) \sin(\beta - C). \quad (9)$$

将(7)式、(8)式代入(9)式得

$$\sin \theta = \frac{\epsilon}{r} \sin(\beta - C). \quad (10)$$

由于 θ 值很小, 则 $\sin \theta \approx \theta$, 则可将(10)式化简为

$$\theta \approx \frac{\epsilon}{r} \sin(\beta - C). \quad (11)$$

则可知在编码器选型确定的情况下, 偏心值 ϵ 大小对与偏心角的影响如图4所示。

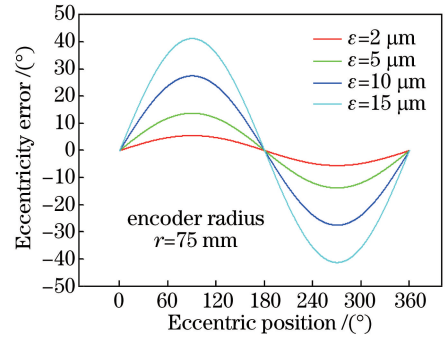


图4 不同偏心值引起的偏心角

Fig. 4 Eccentricity caused by different eccentric angles

通常采用偏心误差校正的方式测量出偏心距常数 $d = \epsilon / r$, 偏心角的起始方向设为 C , 则电机转动到任意角度 β 时, 其真实转动的角度为 $\beta + \theta = \beta + d \sin(\beta - C)$, 则(2)式中反射镜平面法线的旋转矩阵为

$$\mathbf{R}_z = \begin{Bmatrix} \cos[\beta + d \sin(\beta - C)] & \sin[\beta + d \sin(\beta - C)] & 0 \\ -\sin[\beta + d \sin(\beta - C)] & \cos[\beta + d \sin(\beta - C)] & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{Bmatrix}. \quad (12)$$

3.2 激光发射光轴与电机转轴装调误差

理想情况下, 激光器发射的激光在 $O-XYZ$ 坐标系 X 轴方向, 电机转轴与激光器发射光轴的夹角为 45° , 由于装配误差的影响, 电机转轴与激光器发射光轴的夹角与设计值存在一个夹角偏差 δ_L , 则(1)式中激光器发射激光的方向向量经过矫正后为

$$\hat{\mathbf{V}}_L = \begin{bmatrix} \sin(\pi - A + \delta_L) \\ 0 \\ \cos(\pi - A + \delta_L) \end{bmatrix}. \quad (13)$$

3.3 反射镜与电机转轴装调误差

理想情况下, 反射镜的法线与电机转轴夹角为 7.5° , 由于继续加工精度和装配误差影响, 电机转轴与反射镜法线的夹角与设计值会存在一个系统偏差 δ_R , 则当电机处于初始位置时, (1)式中反射镜平面法线的初始方向向量经过矫正后为

$$\hat{\mathbf{V}}_R = \begin{bmatrix} \sin(B + \delta_R) \\ 0 \\ -\cos(B + \delta_R) \end{bmatrix}. \quad (14)$$

4 机载双频雷达系统结构误差对测量点精度的影响分析

根据项目任务书确定的系统参数设计指标^[15]进行单体设备指标分解, 确定激光雷达的测角精度指标应优于 $10''$, 即 500 m 处的定位精度优于 2.4 cm, 才不会对集成定位定向系统 (POS) 整体的定位精度产生明显影响。机载双频激光雷达系统结构误差对测量点精度的影响可以直观地表示为对点位精度的影响。为便于分析, 假设飞机静止在高空中的某点, 扫描出一条等距离的扫描线, 即不考虑测距误差、惯导系统、地形地貌等带来的误差因数, 单独分析仪器结构带来的精度误差。本文采用机载双频激光雷达系统设计工作高度 500 m 作为扫描距离, 如图5所示, 图5(a)即为设备在 500 m 的高度处电机转动一周扫描出来的理想点云示意图, 图5(b)为将图5(a)中的点云投影到 XY 平面上, 可以看出扫描的轮廓线在 XY 平面上的投影近似于一个卵形椭圆, 如图5(b)所示, 长轴的两端对应电机编

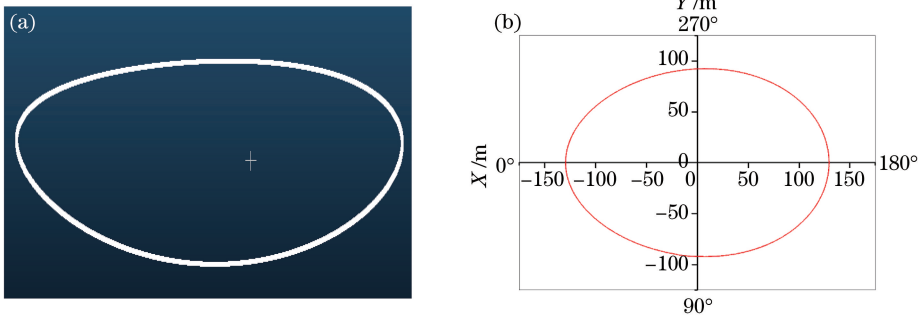


图 5 静止扫描轮廓线示意图。(a)理想点云扫描示意图;(b)理想点云投影示意图

Fig. 5 Scanning line schematic when the LiDAR is stationary. (a) Ideal point cloud scanning diagram; (b) ideal point cloud projection diagram

码的 0° 和 180° , 长度约为 258.8 m, 短轴的两端对应电机编码值的 90° 和 270° , 长度约为 184.6 m。

4.1 电机转轴与光栅角编码器中心轴安装偏心差对定位精度的影响

根据(6)式和(12)式可知, 偏心角误差对定位精度的影响为

$$\Delta P = \{ \{ \mathbf{R}_Y \cdot [\mathbf{V}_L - 2(\mathbf{V}_L \cdot \hat{\mathbf{R}}_Z \cdot \mathbf{V}_R) \hat{\mathbf{R}}_Z \cdot \mathbf{V}_R] \} - \{ \mathbf{R}_Y \cdot [\mathbf{V}_L - 2(\mathbf{V}_L \cdot \mathbf{R}_Z \cdot \mathbf{V}_R) \mathbf{R}_Z \cdot \mathbf{V}_R] \} \} \cdot \hat{\mathbf{L}}. \quad (15)$$

由(15)式可知, 偏心角误差对精度的影响和距

离成正比, 但由于偏心角对转轴角度的影响呈正弦曲线状, 电机单圈扫描形成的轨迹近似于卵形椭圆, 因此偏心角误差对于扫描的轨迹在 X、Y、Z 三个方向上的影响各不相同, 选取图 4 所示的偏心差进行分析, 如图 6 所示。

1) 偏心角误差对 X 方向定位精度的影响

如图 6(a)所示, 偏心角误差与 X 方向定位精度影响成正比, 但对于扫描轨迹每一点的影响又各不相同, 呈现双峰曲线状影响, 卵形椭圆轨迹的长轴处基本无影响, 轨迹短轴端点同向变形最大。

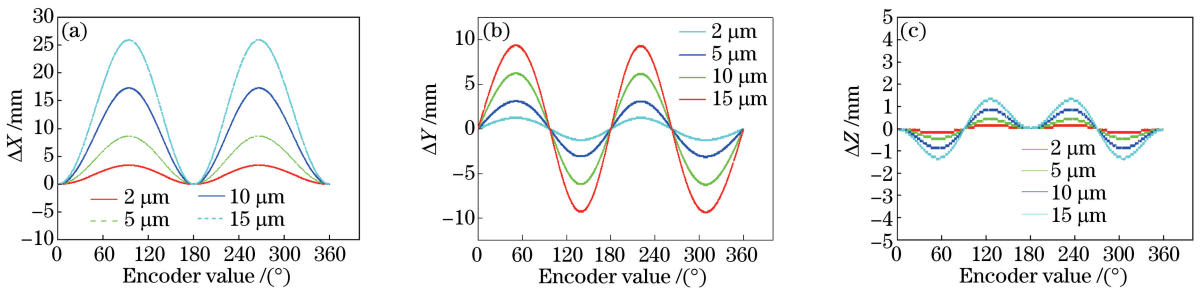


图 6 偏心角误差对与定位精度的影响。(a) X 方向;(b) Y 方向;(c) Z 方向

Fig. 6 Influence of eccentricity error on positioning accuracy. (a) X direction; (b) Y direction; (c) Z direction

2) 偏心角误差对 Y 方向定位精度的影响

如图 6(b)所示, 偏心角误差与 Y 方向定位精度影响成正比, 和对 X 方向的影响不同, 圆周期内误差近似于两个周期内的正弦函数曲线, 在卵形椭圆的长端轴处的四个端点影响为 0, 在长短轴端点中间的影响最大。

3) 偏心角误差对于 Z 方向的定位精度的影响

如图 6(c)所示, 偏心角误差对 Z 方向定位精度影响是最小的, 和对 X、Y 方向的影响不同, 圆周期内误差在 180° 形成轴对称, 在卵形椭圆的长端轴处的四个端点影响为 0, 在长短轴端点中间的影响最大。

在实际测试中发现, 即使采用紧密配合的方式, 电机转轴与圆光栅编码器的中心偏心距也会在 $20 \mu\text{m}$ 左右, 很难通过结构调整进一步减小, 结合图 4 和图 6 可知, 该系统内圆光栅半径达 75 mm, $15 \mu\text{m}$ 的安装误差, 会给 X 方向定位精度带来最大 27 mm 的误差, 给 Y 方向的定位精度带来 10 mm 的误差。所以编码器偏心角误差对于系统的定位精度影响是不可忽视的。

4.2 激光器发射光轴与电机转轴装调误差对测量点精度的影响分析

根据(6)式和(13)式可知, 激光器发射光轴与电机转轴装调夹角误差对定位精度的影响为

$$\Delta P = \{ \{ \mathbf{R}_Y \cdot [\hat{\mathbf{V}}_L - 2(\hat{\mathbf{V}}_L \cdot \mathbf{R}_Z \cdot \mathbf{V}_R) \mathbf{R}_Z \cdot \mathbf{V}_R] \} - \{ \mathbf{R}_Y \cdot [\mathbf{V}_L - 2(\mathbf{V}_L \cdot \mathbf{R}_Z \cdot \mathbf{V}_R) \mathbf{R}_Z \cdot \mathbf{V}_R] \} \} \cdot \hat{\mathbf{L}}. \quad (16)$$

由(16)式可知,激光器发射光轴与电机转轴夹角误差 δ_L 对精度的影响和距离成正比,误差 δ_L 会导致卵形椭圆轨迹沿 Y 轴旋转,则对扫

描后地面点的影响主要是沿 X 方向发生平移,进而也会对 Y、Z 两个方向的坐标值产生影响。根据实测情况,在实际装配过程中,两个轴的装配精度通常为 $0.01^\circ \sim 0.02^\circ$,因此选取误差 δ_L 分别为 0.001° 、 0.005° 、 0.01° 和 0.02° 进行分析,如图 7 所示。

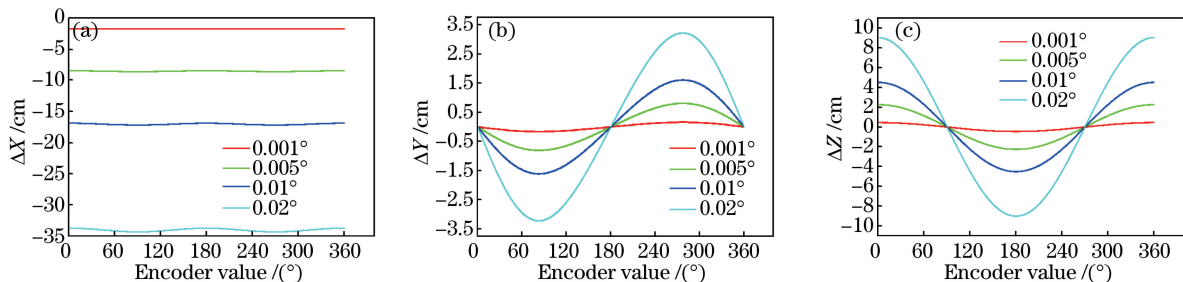


图 7 激光器发射光轴与电机转轴装配误差对定位精度的影响。(a) X 方向;(b) Y 方向;(c) Z 方向

Fig. 7 Effect of laser emission axis and motor shaft error on positioning accuracy.

(a) X direction; (b) Y direction; (c) Z direction

1) 误差 δ_L 对 X 方向定位精度的影响

如图 7(a) 所示,误差 δ_L 对于卵形轨迹上逐点在 X 方向定位精度产生的影响基本上是线性的,可以认为在不同点对 X 方向的影响趋势相同,但是对 X 方向的精度影响不同,在误差为 0.02° 的情况下,定位精度最大误差达 35 cm。

2) 误差 δ_L 对 Y 方向定位精度的影响

如图 7(b) 所示,误差 δ_L 对于卵形轨迹上逐点在 Y 方向定位精度在长轴基本无影响,在短轴的两端影响最大,即从 Y 方向看,长轴在 Y 方向保持不变的情况下,短轴会在 Y 方向上发生缩放。

3) 误差 δ_L 对 Z 方向定位精度的影响

如图 7(c) 所示,误差 δ_L 对于卵形轨迹上逐点在 Z 方向定位精度的影响与 Y 轴的影响相反,在短轴基本无影响,在长轴的两端影响最大,即从 Z 方

向看,轨迹点短轴在 Z 方向保持不变的情况下,长轴会在 Z 方向上发生缩放。

4.3 反射镜与电机转轴装配误差对定位精度的影响

根据(6)式和(14)式可知,由反射镜与电机转轴装配调角误差对定位精度的影响为

$$\Delta P = \{ \{ \mathbf{R}_Y \cdot [\mathbf{V}_L - 2(\mathbf{V}_L \cdot \mathbf{R}_Z \cdot \hat{\mathbf{V}}_R) \mathbf{R}_Z \cdot \hat{\mathbf{V}}_R] \} - \{ \mathbf{R}_Y \cdot [\mathbf{V}_L - 2(\mathbf{V}_L \cdot \mathbf{R}_Z \cdot \mathbf{V}_R) \mathbf{R}_Z \cdot \mathbf{V}_R] \} \} \cdot \hat{\mathbf{L}}. \quad (17)$$

由(17)式可知,激光器发射光轴与电机转轴夹角误差 δ_R 对精度的影响和距离成正比。由机载双频激光雷达的结构可知,误差 δ_R 会导致扫描的张角发生变化,则卵形椭圆轨迹大小会发生变化,选取误差 δ_R 分别为 0.001° 、 0.005° 、 0.01° 和 0.02° 进行分析,如图 8 所示。

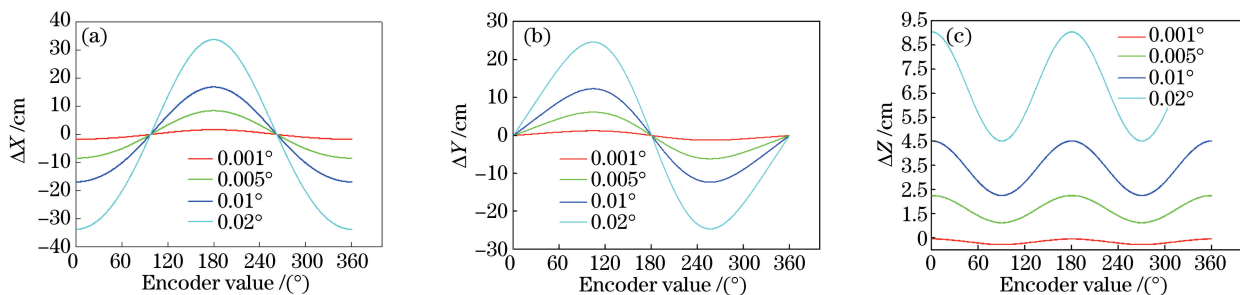


图 8 反射镜与电机转轴误差对定位精度的影响。(a) X 方向;(b) Y 方向;(c) Z 方向

Fig. 8 Influence of error of mirror and motor shaft on positioning accuracy. (a) X direction;

(b) Y direction; (c) Z direction

1) 误差 δ_R 对 X 方向定位精度的影响

如图 8(a) 所示,误差 δ_R 与 X 方向上定位精度

成正比,且对卵形椭圆短轴位置基本无影响,在长轴的两端影响最大,在误差为 0.02° 的情况下,对于 X

方向的最大影响为 35 cm。

2) 误差 δ_R 对 Y 方向定位精度的影响

如图 8(b)所示,误差 δ_R 与 Y 方向上定位精度成正比,且在卵形椭圆长轴位置基本无影响,在短轴的两端影响最大,在误差为 0.02° 的情况下,对于 Y 方向的最大影响为 25 cm。

3) 误差 δ_R 对 Z 方向定位精度的影响

如图 8(c)所示,误差 δ_R 与 Z 方向上定位精度成正比,且在卵形椭圆长轴位置影响最大,在短轴的两端影响小,即从 Z 方向看,卵形轨迹会随误差 δ_R 的大小产生同方向的误差,误差的大小与该点距离轨迹中心点的位置相关。

由图 8 可知,误差 δ_R 对定位精度的影响相比于误差 δ_L 更大,尤其是在 X 和 Y 方向上,因此在装调的过程中有必要通过精密的方法确定该误差的大小,供后期数据矫正使用。

5 结 论

本文主要对机载双频激光雷达结构部件中可能对扫描测量精度产生影响的关键点进行了定量分析。从分析结果可知,激光雷达结构部件产生的各个误差对定位精度的影响既有差异又有类似,这些误差因素叠加到一起影响测量数据的点位精度时,难以通过点位信息建立完善的数学模型消除扫描头内部装配误差对测量成果定位精度的影响。所以在激光雷达设计时需要设定误差区间,在加工工艺和装调技术无法保证设计精度指标的情况下,可以通过精确测定出误差值的大小以进行数据的修正。在设备的研制过程中,主要采用以下的方法实现精度控制:1) 采用结构设计加工一体化,在关键器件的加工中尽量采用一刀加工到位,避免多个部件独立加工装配带来装配累积误差。2) 采用精密的装调检测工艺,减弱误差影响,如编码器的偏心误差可以通过平行光管和 23 面棱体进行偏心误差矫正^[16],修正后的偏心误差对编码器测角精度影响基本在 $10''$ 以内;通过平行光管进行轴线装调,可以精确测出各个轴线夹角值,修正设计参数,修正后的轴系夹角误差在角秒级别,对定位精度的影响基本在毫米量级,满足系统设计需求。3) 采用科学的技术措施固化系统误差,并对设备进行充分的冲击振动老化试验,确认系统误差在一个较长的时间内保持不变。4) 在系统误差确认基本保持不变后,再次利用科学的技术手段进行误差测定。

参 考 文 献

- [1] Yang Y C, Hu N, Guo L. Research on 3D digital map surveying and mapping technology [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2011, 406(1): 75-77.
杨永崇, 胡楠, 郭岚. 三维数字地形图测绘技术研究 [J]. 测绘通报, 2011, 406(1): 75-77.
- [2] Li X L, Chen Y H, Yu F, *et al.* Comparison and analysis of inversion models for water optical property parameters by ocean Lidar [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(10): 1001005.
李晓龙, 陈永华, 于非, 等. 海洋激光雷达水体光学特性参数反演模型对比及分析 [J]. 光学学报, 2017, 37(10): 1001005.
- [3] Huang T C, Tao B Y, Mao Z H, *et al.* Classification of sea and land waveform based on multi-channel ocean lidar [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(6): 0610002.
黄田程, 陶邦一, 毛志华, 等. 基于多通道海洋激光雷达的海陆波形分类 [J]. 中国激光, 2017, 44(6): 0610002.
- [4] 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.
- [5] Jiang Y S. A rigorous positioning equation and it's error analysis and precision evaluation for integrated positioning system of airborne GPS, INS and laser scanning ranging [J]. Journal of Remote Sensing, 2001, 5(4): 241-247.
江月松. 机载 GPS、姿态和激光扫描测距集成定位系统的精确定位方程、误差分析与精度评估 [J]. 遥感学报, 2001, 5(4): 241-247.
- [6] Wang C, Menenti M, Stoll M P, *et al.* Error analysis correction of airborne LiDAR data [J]. Journal of Remote Sensing, 2007, 11(3): 390-396.
王成, Menenti M, Stoll M P, 等. 机载激光雷达数据的误差分析及校正 [J]. 遥感学报, 2007, 11(3): 390-396.
- [7] Wang Z H, Zhang A W, Wang S M, *et al.* Airborne radar calibration system based on the overlap strip [J]. Chinese Journal Lasers, 2014, 41(2): 0214003.
王致华, 张爱武, 王书民, 等. 基于重叠航带的机载激光雷达系统检校 [J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0214003.
- [8] Zhao D W, Pei H L, Ding J, *et al.* Research of the

- unmanned plane airborne lidar system strip stitching method[J]. Chinese Journal Lasers, 2015, 42(1): 0114002.
- 赵大伟, 裴海龙, 丁洁, 等. 无人机机载激光雷达系统航带拼接方法研究[J]. 中国激光, 2015, 42(1): 0114002.
- [9] Latypov D. Effects of laser beam alignment tolerance on LiDAR accuracy [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2005, 59(6): 361-368.
- [10] 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.
- [11] Wu J W, Ma H C. Error analysis on laser beam misalignment with scanner mirror of airborne LIDAR [J]. Infrared and Laser Engineering. 2008, 37(2): 243-246.
- 邬建伟, 马洪超. 机载 LIDAR 激光束与扫描镜对准误差影响分析[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(2): 243-246.
- [12] Yang M M, Wan Y C, Xu J Z. Research of error analysis and positioning accuracy with four-prism of laser scanning[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(9): 0914001.
- 杨蒙蒙, 万幼川, 徐景中. 激光扫描仪四棱塔镜误差分析及定位精度研究[J]. 中国激光, 2015, 42(9): 0914001.
- [13] Ren L P, Zhao J S, Zhai G J, *et al.* Scanning track computation and analysis for airborne laser depth sounding[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2002, 27(2): 138-142.
- 任来平, 赵俊生, 翟国君, 等. 机载激光测深海面扫描轨迹计算与分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2002, 27(2): 138-142.
- [14] Wang L Z, Han Y M, Zhong R F. The taper scanning angle calibration of 360° laser scanner[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2010(9): 5-8.
- 王留召, 韩友美, 钟若飞. 360°激光扫描仪锥扫描角标定[J]. 测绘通报, 2010(9): 5-8.
- [15] He Y, Tian M Y, Lü D L, *et al.* Parameter design and performance analysis of airborne dual frequency laser radar system[C]//Infrared and Remote Sensing Technology and Applications and Interdisciplinary Forum, Nanjing, 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坛, 南京, 2015: 183-192.
- [16] Zhang Q Z, Wang P. Study on eccentricity error correction method for optical angular encoder [J]. Electronics Optics & Control, 2011, 18(7): 64-67.
- 张求知, 王鹏. 光栅角编码器偏心误差修正方法研究[J]. 光电与控制, 2011, 18(7): 64-67.