

激光扫描仪四棱塔镜误差分析及定位精度研究

杨蒙蒙^{1,2} 万幼川¹ 徐景中¹

¹武汉大学遥感信息工程学院, 湖北 武汉 430079

²北京四维远见信息技术有限公司, 北京 100070

摘要 以国产机载激光扫描仪内较独特的扫描四棱塔镜为基础,提出了四棱镜的误差模型,并分别建立了垂直与水平方向的定位误差模型,依据该模型定性定量分析了对定位精度的影响,研究表明,四棱塔镜误差在垂直与水平方向对定位精度的影响趋势不同,均与扫描角有关,并随测距值的增大而增大。其中,垂直误差在 X 方向对定位精度的影响远远大于 Y 、 Z 方向。水平误差在 Y 方向影响呈抛物线趋势, Z 方向与横滚角的影响相似。由分析可知,四棱塔镜误差对定位精度的影响较大,必须在转镜设计及加工、主机系统装调及部件集成优化、主机系统检校三个环节严格控制以消除或削弱此误差,研究该误差对机载激光雷达系统定位精度的提高有着重要影响。

关键词 遥感; 激光器; 激光扫描; 塔镜; 误差分析; 定位精度

中图分类号 TN958.98

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0914001

Research of Error Analysis and Positioning Accuracy with Four-Prism of Laser Scanning

Yang Mengmeng^{1,2} Wan Youchuan¹ Xu Jingzhong¹

¹School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430079, China

²Beijing Geo-Vision Tech, CO., LTD, Beijing, 100070, China

Abstract The error model of four-prism based on the unique scan four-prism tower mirror of domestic airborne laser scanner is put forward. And the position error models in horizontal and vertical direction are established respectively. The effect of positioning accuracy in qualitative and quantitative aspects are analyzed. The analysis demonstrates that the influence of error in the vertical and horizontal direction is different, which is related to the scanning angle and increases with the increasing of scanning distance. The vertical error in X direction is bigger than Y , Z directions. The influence of horizontal error is parabolic trend in Y direction, and seems like the influence of roll in Z direction. The analysis shows that the four-prism tower mirror error has the significant influence on the positioning accuracy, the three links of the design and processing of the mirror, the integrated of components and the host system calibration must be strict controlled in order to eliminate or weaken this error, the study of error has the important influence on improve the airborne laser radar system positioning accuracy.

Key words remote sensing; lasers; laser scanning; tower mirror; error analysis; positioning accuracy

OCIS codes 280.3420; 280.3640; 280.5600

1 引 言

随着社会突飞猛进的快速发展、科学技术的不断创新与进步,人们在数据质量、数据精度等方面对空间信息的快速获取提出了越来越高的要求。机载激光雷达系统^[1]作为一种新型主动式多传感器集成的复杂系统,具有快速、高效、全天时、穿透性强、多回波、数据精度高等优势,便于快速获取高分辨率的数字地形模

收稿日期: 2015-02-12; 收到修改稿日期: 2015-04-17

基金项目: 国家科技支撑计划(2014BAL05B07)、测绘地理信息公益性行业科研专项(201412020)、高等学校博士学科点专项科研基金(20130141130003)

作者简介: 杨蒙蒙(1987—),女,博士研究生,主要从事国产机载激光雷达方面的研究。E-mail: wudars_ymm@whu.edu.cn

导师简介: 万幼川(1960—),男,教授,博士生导师,主要从事摄影测量与LIDAR数据处理、遥感数据处理与应用等方面的研究。E-mail: ychwan@whu.edu.cn

型,使其在地形测绘、数字城市建模、森林调查、灾害监测、环境监测等领域具有独特的优势所在。其中,激光扫描仪作为该系统的重要组成部分之一,其内部的扫描方式误差对激光点云的获取及定位精度有着重要的影响。机载激光雷达中的扫描系统主要负责改变激光、光束指向,是实现宽视场、高精度扫描的基本保障,目前主要有五种扫描方式^[2-3],分别为振镜扫描方式、多面棱镜式扫描、光纤扫描、椭圆扫描方式与四棱塔镜扫描方式。

针对激光扫描仪而言,影响激光点云定位精度的误差因子^[4-6]包括测距误差、测角误差、安置误差、随机误差等,对这些常见的误差研究着较多^[7-14],但对扫描系统中扫描镜误差的影响分析者较少。文献[15]针对多面旋转棱镜与激光束的对准误差从光学的角度分析该误差,但模型建立过程复杂且不够精炼。文献[16]以摆动扫描方式为基准简单分析了扫描镜与激光束的对准误差的影响趋势,该误差的影响程度分析较粗略,缺少其对定位精度影响的详细量化程度分析,文献[17]针对激光成像雷达光学扫描性能测试系统从光学角度分析了所存在的各种对准误差,仅分析了对准误差的影响范围,缺少该误差的具体定量分析及实验数据的支撑。本文采用简单、直观的方法针对目前还没有详细研究的国产激光扫描仪内独特四棱塔镜的误差进行详细、透彻地定性定量分析。该误差产生在激光扫描仪内部组件安装过程中,由于四棱塔镜旋转轴与激光束发射线不可能实现绝对的平行,导致激光束与扫描棱镜轴心偏角误差的存在,这种扫描镜误差又称为对准误差。同时,在四棱塔镜加工制造过程中,各种不定因素的影响会导致四个镜面非完全一致,存在微小差异,这种误差称为四镜面数据误差,该误差对定位精度的影响可附加到对准误差中,但需要对每个镜面均获取该误差的检校参数。主要针对国产机载激光扫描仪内四棱塔镜误差进行了研究,依据四棱塔镜独特的结构及工作原理对这种误差因子建立对地定位误差模型,并进行定性定量的分析这种系统误差对定位精度造成的影响。

2 四棱塔镜的结构及定位方程

2.1 四棱塔镜的结构分析

国产机载激光雷达工作过程中,扫描系统设计采用四棱塔镜旋转扫描方案。四棱塔镜扫描模块既是激光发射光路的一部分,也是激光信号接收光路的一部分,对激光回波能量收集起着关键的作用。相对于摆镜扫描,转镜设计可以使轻小型机载激光雷达系统具备高扫描频率、宽视场的指标要求,同时这也提高了扫描系统研制的难度。其结构如图1所示:每个镜面与旋转轴之间的夹角均为 44.5° ,该塔镜每个镜面所对应的扫描视场角为 $0\sim 90^\circ$ 的区间。

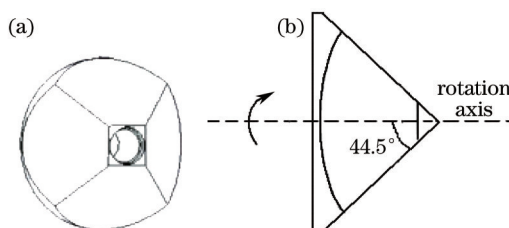


图1 四棱塔镜结构图。(a) 前视图; (b) 侧视图

Fig.1 Structure of four-prism tower mirror. (a) Front view; (b) side view

每个镜面的定位方程相似,利用该四棱转镜扫描到地面上的点形成相互平行的弧形扫描线阵列^[2]。

2.2 四棱塔镜定位方程

四棱塔镜定位方程与其结构有着直接的关系,四棱塔镜的工作原理如图2所示。

直线 l 为与 Z_L 轴平行且穿过点 P 的一条直线,下标 L 表示所在坐标系, L 系定义为激光传感器参考坐标系(L 系),原点 O_L 为四棱塔镜镜面顶端切平面与旋转轴的交点位置, X_L 与飞行方向保持一致, Y_L 为左翼方向, Z_L 方向向上构成右手坐标系。 O_L 与 a 的距离为 m , b 与 c 的距离为 n , α 为激光束入射角,在理想情况下,如图2实线所示,入射光线与 X_L 轴平行,则入射角 $\alpha=45.5^\circ$,则反射光线与直线 l 的夹角为 1° ,导致激光点在 X 前进方向存在偏移,而其他棱镜一般在 X 前进方向为 0 ,此处即为该塔镜的独特之处,从而导致后续误差分析存在差异。由四棱塔镜的工作原理图可知:

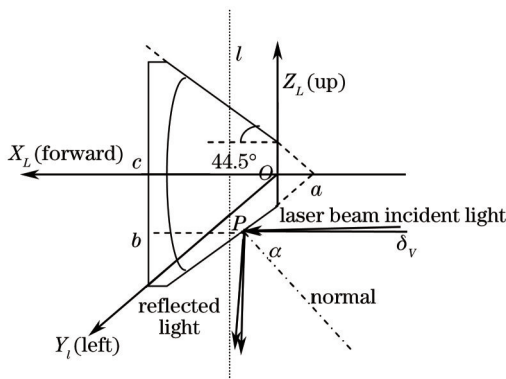


图2 四棱塔镜工作原理图(侧视)

Fig.2 Working principle of four-prism tower mirror (side view)

$$S_L = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, N_L = \begin{pmatrix} -\frac{1}{m} \\ \frac{\sin \theta}{m \tan 44.5^\circ} \\ -\frac{\cos \theta}{m \tan 44.5^\circ} \end{pmatrix}, \text{ if } R_s^L = \begin{pmatrix} \sqrt{1 - \omega^2 - \kappa^2} \\ \omega \\ \kappa \end{pmatrix}, \quad (1)$$

式中 S_L 为瞬时激光束入射光线在 L 系的向量, N_L 为法线方向向量, R_s^L 为反射光线的单位向量。利用解析几何的方式可以得出:

$$R_s^L = [\sin 1^\circ \quad \cos 1^\circ \sin \theta \quad -\cos 1^\circ \cos \theta]^T, \quad (2)$$

$$I_{p_L} = \begin{bmatrix} \frac{n \cos \theta}{\tan 44.5^\circ} - m & 0 & -n \end{bmatrix}^T, \quad (3)$$

即

$$I_L = R_s^L \cdot \rho + I_{p_L}, \quad (4)$$

式中 $I_L = [X_L \quad Y_L \quad Z_L]^T$ 表示激光点在 L 系的坐标值, I_{p_L} 表示激光束与四棱塔镜交点 P 在 L 系的坐标值, ρ 为激光测距值。以上(4)式即为理想情况下激光点在 L 系的坐标值。

3 定位误差模型构建

假设激光束与扫描四棱塔镜的旋转轴之间存在偏角 δ , 则 L 系下的激光点将发生位置偏移。将偏角 δ 分为垂直方向与水平方的偏角, 分别为 δ_v 与 δ_n , 为了研究两个方向误差对定位精度的影响, 分别对其建立定位误差模型。

3.1 垂直方向偏角 δ_v 的定位误差模型

由图2可知, 垂直方向偏角 δ_v 影响下, 反射光线与直线 l 的夹角为 $(1^\circ + \delta_v)$, 则在偏角 δ_v 影响下的激光点在 L 系的坐标值为

$$\begin{bmatrix} X'_L \\ Y'_L \\ Z'_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{n \cos(\theta + \Delta\theta)}{\tan 44.5^\circ} - m + (\rho + \Delta\rho) \cdot \sin(1^\circ + \delta_v) \\ (\rho + \Delta\rho) \cdot \cos(1^\circ + \delta_v) \cdot \sin(\theta + \Delta\theta) \\ -n - (\rho + \Delta\rho) \cdot \cos(1^\circ + \delta_v) \cdot \cos(\theta + \Delta\theta) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中 $\Delta\theta$, $\Delta\rho$ 分别表示角度距离的误差参数, 定义 $I'_L = [X'_L \quad Y'_L \quad Z'_L]^T$ 表示偏角 δ_v 影响之后的激光点在 L 系的坐标值。

故

$$I'_L = R_s^L(\delta_v, \theta, \Delta\theta) \cdot (\rho + \Delta\rho) + I_{p_L}(\theta, \Delta\theta), \quad (6)$$

则垂直方向偏角导致的 L 系下的位置偏移为

$$\Delta I'_L = (\rho + \Delta\rho) \cdot [R_s^L(\delta_v, \theta, \Delta\theta) - R_s^L(\theta, \Delta\theta)], \quad (7)$$

设定激光传感器参考坐标系与惯性测量单位(IMU)坐标系(B 系)之间的真偏心角与真偏心距分别为 Δh , Δp , Δr , ΔX_{lb} , ΔY_{lb} , ΔZ_{lb} , 则 L 系到 B 系的旋转矩阵^[8]为

$$\mathbf{R}_L^B = \begin{bmatrix} -\cos \Delta p \sin \Delta h & -\cos \Delta r \cos \Delta h - \sin \Delta p \sin \Delta r \sin \Delta h & \cos \Delta h \sin \Delta r - \cos \Delta r \sin \Delta p \sin \Delta h \\ \cos \Delta p \cos \Delta h & \cos \Delta h \sin \Delta p \sin \Delta r - \cos \Delta r \sin \Delta h & \sin \Delta r \sin \Delta h + \cos \Delta r \cos \Delta h \sin \Delta p \\ -\sin \Delta p & \cos \Delta p \sin \Delta r & \cos \Delta p \cos \Delta r \end{bmatrix}, \quad (8)$$

偏移量为 $\Delta t_L^B = [\Delta X_{lb} \quad \Delta Y_{lb} \quad \Delta Z_{lb}]^T$ 。

B 系到导航坐标系(N 系)又称为当地切平面坐标系的旋转矩阵为

$$\mathbf{R}_B^N = \begin{bmatrix} \cos H_{pos} \cos R_{pos} - \sin H_{pos} \sin P_{pos} \sin R_{pos} & -\sin H_{pos} \cos P_{pos} & \cos H_{pos} \sin R_{pos} + \sin H_{pos} \sin P_{pos} \cos R_{pos} \\ \sin H_{pos} \cos R_{pos} + \cos H_{pos} \sin P_{pos} \sin R_{pos} & \cos H_{pos} \cos P_{pos} & \sin H_{pos} \sin R_{pos} - \cos H_{pos} \sin P_{pos} \cos R_{pos} \\ -\cos P_{pos} \sin R_{pos} & \sin P_{pos} & \cos P_{pos} \cos R_{pos} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

式中 H_{pos} , P_{pos} , R_{pos} 分别表示位置姿态系统(POS)系统所获取的航向角、俯仰角及横滚角。

最终在垂直偏角 δ_v 影响下 WGS84 系(e 系)下的激光定位坐标值为

$$I'(\delta_v) = \mathbf{R}_N^e \mathbf{R}_B^N \{ \mathbf{R}_L^B \cdot [\mathbf{R}_S^L(\delta_v, \theta, \Delta\theta) \cdot (\rho + \Delta\rho) + \mathbf{I}_{p_L}(\theta, \Delta\theta)] + \Delta t_L^B \} + I_e, \quad (10)$$

式中 \mathbf{R}_N^e 表示 N 系到 e 系的旋转矩阵, $I'(\delta_v)$ 即为在偏角 δ 的影响下激光点在 e 系下的坐标值, I_e 表示 N 系原点在 e 系的坐标值。

3.2 水平方向偏角 δ_H 的定位误差模型

水平方向偏角 δ_H 对定位精度的影响与垂直方向不同,四棱塔镜(前视)工作原理图如图 3 所示。

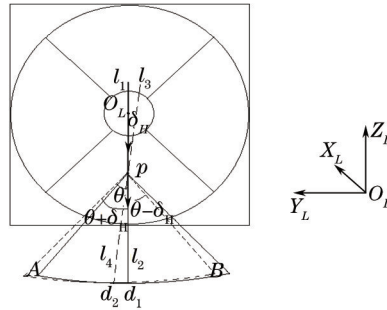


图 3 扫描四棱塔镜工作原理图(前视)

Fig.3 Working principle of scan four-prism tower mirror (front view)

由图 3 可知,当不存在水平偏角 δ_H 时,扫描角 θ 为零,激光束的入射光线为 l_1 , 反射光线 l_2 沿着 $X_L O_L Z_L$ 平面向下,故所对应的地面点 d_1 在 Y_L 方向坐标值为零,不发生偏移,假定水平偏角向右偏离时值为正,反之为负,当存在水平偏角时 δ_H , 激光扫描仪所获取的扫描角 θ 在角度偏差的影响下其值为 $(\theta \pm \delta_H)$ 。依据垂直方向偏角的定位模型可知, S 系到 L 系的平移矩阵 \mathbf{I}_{p_L} 保持不变,旋转矩阵为

$$\mathbf{R}_S^L(\delta_H, \theta, \Delta\theta) = [\sin 1^\circ \quad \cos 1^\circ \sin(\theta + \Delta\theta \pm \delta_H) \quad -\cos 1^\circ \cos(\theta + \Delta\theta \pm \delta_H)]^T, \quad (11)$$

故

$$\mathbf{I}_L^s = \mathbf{R}_S^L(\delta_H, \theta, \Delta\theta) \cdot (\rho + \Delta\rho) + \mathbf{I}_{p_L}(\theta, \Delta\theta). \quad (12)$$

由垂直分析的误差定位模型建立过程同理可得:水平偏角误差下,附带 δ_H 的激光点坐标值为

$$I''(\delta_H) = \mathbf{R}_N^e \mathbf{R}_B^N \{ \mathbf{R}_L^B \cdot [\mathbf{R}_S^L(\delta_H) \cdot \rho + \mathbf{I}_{p_L}] + \Delta t_L^B \} + I_e. \quad (13)$$

4 四棱塔镜偏角 δ 对地定位精度的影响分析

由以上分析可知,四棱塔镜偏角 δ 对地定位精度的影响即可直观的表示为 $I' = I + \Delta I$, 其中 ΔI 表示该误差对定位精度造成的影响,为便于分析四棱塔镜偏角对地定位精度的影响,设定激光扫描仪参考坐标系与载体坐标系的三个坐标轴平行,即 \mathbf{R}_L^B 为单位矩阵, \mathbf{I}_{p_L} 为零矩阵,并且假设飞行区域为平坦地区,飞行航行沿直线方向飞行,故不存在横滚角、俯仰角、航向角的影响。则垂直偏角 δ_v 与水平偏角 δ_H 的误差定位方程分别简化为: $I'(\delta_v) = \mathbf{R}_N^e \cdot [\mathbf{R}_S^L(\delta_v) \cdot \rho + \mathbf{I}_{p_L}] + I_e$ 与 $I''(\delta_H) = \mathbf{R}_N^e \cdot [\mathbf{R}_S^L(\delta_H) \cdot \rho + \mathbf{I}_{p_L}] + I_e$, 为了便于分析,只考虑在当地切平面

坐标系下进行对地定位精度的影响分析。以下所分析模拟数据设定激光测距值 ρ 分别为 50、100、200、300 及 500 m, 扫描角范围为 $[-35^\circ, 35^\circ]$, 垂直及水平方向偏角均假定为 0.01° 来定量分析该角度值对定位精度的影响。

4.1 垂直方向偏角 δ_v 对定位精度影响

由定位误差模型可知垂直方向偏角 δ_v 对定位精度的影响为

$$\Delta l_r = \begin{cases} \rho \cdot [\sin(1^\circ + \delta) - \sin 1^\circ] \\ \rho \cdot \sin \theta [\cos(1^\circ + \delta) - \cos 1^\circ] \\ \rho \cdot \cos \theta [\cos 1^\circ - \cos(1^\circ + \delta)] \end{cases} \quad (14)$$

激光束与四棱塔镜偏角对定位精度的影响与激光测距值和扫描角度有直接的关系, 与激光测距值成正比, 随着扫描角度的变化误差会在一定范围内浮动, 且对飞行方向 X 、水平方向 Y 及垂直方向 Z 均有影响, 通过模拟数据分析对 X 、 Y 、 Z 方向的影响如图 4 所示。

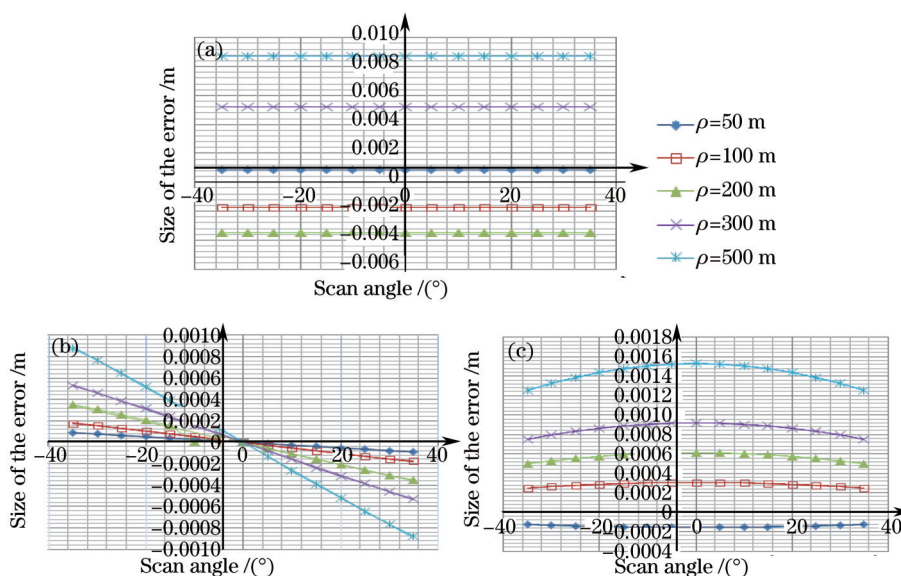


图 4 垂直偏角对定位精度的影响。(a) X 方向; (b) Y 方向; (c) Z 方向

Fig.4 Influence of vertical angle to positioning accuracy. (a) X direction; (b) Y direction; (c) Z direction

1) 偏角 δ_v 对水平 X 方向定位精度影响。

由(14)式及图 4(a)可知, δ_v 在 X 方向的误差随测距值的增加逐渐增大。测距为 300 m 时会造成 0.05235 m 的影响, 误差达到了厘米级。而其他类型的扫描镜一般在前进方向不存在定位误差, 此处也体现了四棱塔镜与其他扫描镜对地定位精度的区别。若偏角为 0.1° 时, 则造成的影响扩大十倍。

2) 偏角 δ_v 对水平 Y 方向定位精度影响。

偏角 δ_v 误差对 Y 方向(即飞行方向的垂直的机翼方向)定位误差的影响由图 4(b)可知, 该误差与扫描角及测距值均成正比关系, 当角度值为零时, 对定位精度没有影响, 但总体来看, 误差量级在 10^{-3} 上, 相比 X 方向所造成的定位误差较小。

3) 偏角 δ_v 对垂直 Z 方向定位精度影响。

对于垂直方向定位精度的影响, 由图 4(c)明显看出, 整体呈抛物线趋势, 扫描条带数据在角度为 0 时误差较大且误差量级为 10^{-3} 。

由以上垂直方向偏角 δ_v 对定位精度影响分析可知, 该偏角对定位精度的影响在 X 前进方向影响最大, 对 Y 与 Z 方向的影响相比之下就略小, 但仍不能忽视激光束与四棱塔镜偏角误差对地定位的影响。

4.2 水平方向偏角 δ_H 对定位精度影响

水平方向偏角 δ_H 对定位精度影响会使激光点云数据整体左偏或者右偏, 同理可得误差模型, 水平 Y 方向与垂直 Z 方向造成影响, 与激光测距值 ρ 成正比, ρ 越大造成的偏差越大, 对前进 X 方向无影响。

$$\Delta I_L = \begin{cases} 0 \\ \rho \cdot \cos 1^\circ \cdot [\sin(\theta + \delta_H) - \sin \theta] \\ \rho \cdot \cos 1^\circ \cdot [\cos \theta - \cos(\theta + \delta_H)] \end{cases} \quad (15)$$

由(15)式可知,水平方向偏角对飞行前进方向没有影响,只对水平Y方向与垂直Z方向造成影响,使得激光点云数据整体左偏或者右偏,数量级的变化趋势具体如图5所示。

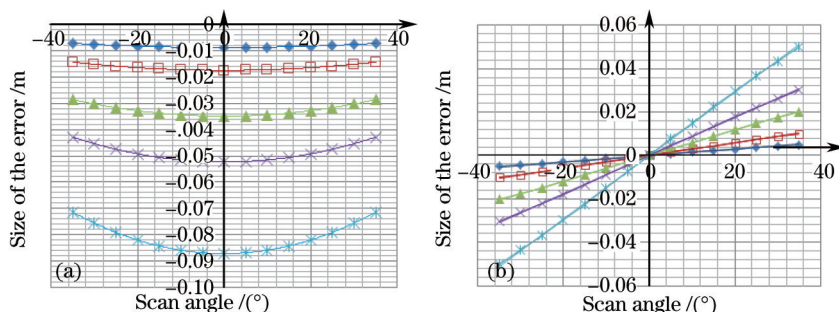


图5 水平偏角对定位精度的影响。(a) Y方向; (b) Z方向

Fig.5 Influence of horizontal angle to positioning accuracy. (a) Y direction; (b) Z direction

1) 偏角 δ_H 对水平Y方向定位精度的影响

由图5(a)可知,该误差与角度成反比,与测距值成正比关系。 δ_H 水平Y方向定位精度的影响会造成整体数据偏移,如图6所示,实线为无误差情况下的扫描线走势,虚线为偏角 δ_H 影响后的扫描线,中间部位变形较大,两侧较小。

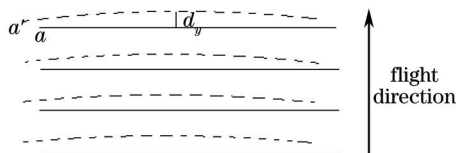


图6 水平偏角影响下Y方向扫描线的变化

Fig.6 Change of scan lines in Y direction under the influence of horizontal angle

2) 偏角 δ_H 对Z方向定位精度的影响

偏角 δ_H 对水平Z方向误差影响,与激光测距值成正比,由图5(b)可知对Z方向定位造成的误差达到厘米级,且对整体点云数据的影响与横滚角相似,如图7所示,故在实际检校过程中,难以区分横滚角与该角对定位造成的影响。

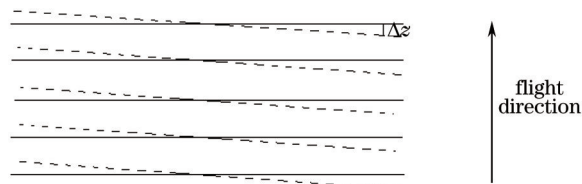


图7 水平偏角影响下Z方向扫描线的变化

Fig.7 Change of scan lines in Z direction under the influence of horizontal angle

由以上分析可知偏角 δ_H 对X方向无影响,对Y方向与Z方向均有影响,对Y方向的影响要偏大于X方向,但误差均达到厘米级。假如该偏角扩大十倍,那么造成的误差也会相应扩大十倍,可见扫描棱镜与激光束之间的偏角误差对定位精度的影响非常大,必须采用严格的检校方法进行消除该误差,以提高机载激光系统系统的对地定位精度。

5 结 论

以国产机载激光扫描仪内独特的扫描四棱塔镜为依托提出了四棱塔镜与激光束对准误差在垂直与水平方向的定位误差模型,并分别定性定量分析了该误差在X、Y、Z方向对定位精度的影响,结果表明该误差对定位精度的影响与激光测距值和扫描角度密切关联,且该误差对定位精度的影响不容忽视。故必须采用严

密方法来减少或削弱该误差,建议通过以下三个环节来实现:1)在转镜设计及加工环节,可采用轻量化设计且使转镜表面镀一层高效反射膜,对镜体本身再做高精度的动平衡校正以保证扫描过程的平稳精确,动平衡调整后确保达到0.1%的速度稳定性,激光发散角度压缩至0.3 mrad以下,扫描频率100 Hz以上,扫描角度90°,尽可能从转镜角度减小该误差存在的几率。2)在主机系统装调及部件集成优化过程中,严格遵循设计方案与测试方案同步、单元与分系统测试环境在系统设计和研制中明确、软硬件设计中融入仿真设置完善测试三大原则,特别注意光学元件与其支撑结构材料之间的线膨胀系数的匹配,综合考虑温度和大气空间环境,集光、机、电、热于一体化。从设备性能、环境、震动、温度及数据一致性及完整性等多角度测试。例如设备平台在震动中的最大变形角度应控制在0.1 mrad以下。每个过程均需要严格测试把关以达到减小误差的目的。3)对主机系统的严格检校,对四个镜面均进行严格处理以消除四镜面数据误差,在硬件设备出厂之前需要通过严格检校,提供检校参数消除或削弱该误差。这三个减小误差的环节密切相关,并且会有误差的传播与积累,而具体这三个环节所造成误差的量化程度可作为下一步的工作计划,以进一步提高机载激光雷达系统的对地定位精度。

参 考 文 献

- 1 Zhang Xiaohong. The Theory and Method of Airborne Laser Radar Technology[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2007: 40-90.
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: 40-90.
- 2 Ma Hao. Research of Error Calibration Methods of Airborne Lidar System[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2011: 5-24.
马 浩. 机载激光雷达测量系统误差检校方法研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2011: 5-24.
- 3 Gao Jianshuang. The Research of Scanning Technology Based on Imaging laser Radar [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2012: 4-21.
高建双. 激光成像雷达扫描技术的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2012: 4-21.
- 4 Liu Jingnan, Zhang Xiaohong, Li Zhenghang. Analysis of systematic error influencing the accuracy of airborne laser scanning altimetry[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2002, 27(2): 111-117.
刘经南, 张小红, 李征航. 影响机载激光扫描测高精度的系统误差分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2002, 27(2): 111-117.
- 5 Jiang Yuesong. 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 Cheng, 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 You Hongjian, Jiang Yuesong, Li Shukai. Error analysis and accuracy estimation of airborne remote sensing with air to ground positioning system[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 1998, 3: 1-9.
尤红建, 江月松, 李树楷. 机载遥感直接对地定位的误差分析和精度估计[J]. 测绘学报, 1998, 3: 1-9.
- 8 Yang Mengmeng, Li Junjie, Wang Jiahai, *et al.*. Model building and accuracy analysis of domestic SW-LiDAR airborne integration system[J]. Science of Surveying and Mapping, 2014, 39(7): 33-39.
杨蒙蒙, 李军杰, 王家海, 等. 国产机载SW-LiDAR系统定位模型的建立与精度分析[J]. 测绘科学, 2014, 39(7): 33-39.
- 9 Yang Mengmeng, Li Junjie, Zuo Jianzhang. Research on calculating placing element with domestic airborne LiDAR system[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2014, (8): 25-29.
杨蒙蒙, 李军杰, 左建章. 国产机载LiDAR系统安置元素解算方法的研究[J]. 测绘通报, 2014, (8): 25-29.
- 10 Wang Zhihua, Zhang Aiwu, Wang Shumin, *et al.*. Airborne radar calibration system based on the overlap strip[J]. Chinese J 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.
- 11 Wang Jianjun, Liu Jidong. Analysis and sorting of impacts of measurement errors on positioning accuracy of laser point cloud obtained from airborne laser scanning[J]. Chinese J 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.

- 12 Zhao Dawei, Pei Hailong, Ding Jie, *et al.*. Research of the unmanned plane airborne lidar system strip stitching method[J]. Chinese J 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.
- 13 He Peipei, Wan Youchuan, Yang Wei, *et al.*. Automatic registration of urban laser point cloud with aerial image data based on straight-lines[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(5): 0528001.
何培培, 万幼川, 杨威, 等. 基于线特征的城区激光点云与影像自动配准[J]. 光学学报, 2015, 35(5): 0528001.
- 14 Wang Jianjun. Optimized design of parameters affecting the accuracy of airborne LIDAR by using orthogonalizationbased experiments [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0214003.
王建军. 基于正交化实验对影响机载激光雷达测量精度的工作参数进行最优化设计[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0214003.
- 15 Damir Latypov. Effects of laser beam alignment tolerance on lidar accuracy[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2005, 59(6): 361-368.
- 16 Wu Jianwei, Ma Hongchao. 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.
- 17 Zhang Yu, Zhao Yuan, Tang Meng, *et al.*. Analysis of the alignment errors on performance measurement of optical scanner of laser radar[J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(2): 139-142.
张宇, 赵远, 唐勳, 等. 激光雷达光学扫描性能测试的对准误差分析[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(2): 139-142.

栏目编辑: 苏 岑