

## 激光参考相机视轴监视方法与验证

宗云花\*, 王伟之, 任宇宁, 王庆雷, 王妍, 高卫军

北京空间机电研究所, 北京 100094

**摘要** 利用多波束激光进行航天地形测绘是当前的研究热点之一, 激光指向确定是其中的核心环节, 一般采用激光参考相机(LRC)记录, LRC 的视轴监视功能和性能是确保激光指向确定精度的关键。首先, 提出一种基于高稳定中央棱镜的 LRC 视轴监视测量方法, 并给出了计算算法。其次, 搭建实验验证系统, 利用 Hexpod 转台和光电自准直仪对算法正确性进行了校验, 结果表明, 所提算法得到的测量结果与光电自准直仪结果一致, 误差小于  $0.2''$ 。进一步地, 测量得到 LRC 视轴绕 X 轴和 Y 轴的热漂移分别达到  $0.3''$  和  $1.4''$ 。最后, 评估了不同环境下的视轴监视精度, 结果表明, 在真空环境下, 视轴监视精度达到  $0.02''$ (1 倍标准偏差), 满足 LRC 视轴在轨监视的实际应用要求; 相比于真空条件, 大气隔振条件下的误差扩大了 2~4 倍, 大气非隔振条件下的误差扩大了 10~15 倍。

**关键词** 测量; 空间测量; 激光参考相机; 视轴监视; 激光光斑质心

中图分类号 V416.8

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1512003

## Method and Experiment for Boresight Monitoring of Laser Reference Cameras

Zong Yunhua\*, Wang Weizhi, Ren Yuning, Wang Qinglei, Wang Yan, Gao Weijun

*Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China*

**Abstract** Multi-beam laser is one of the hot topics in aerospace topographic mapping, where the core is the determination of laser pointing. Laser reference cameras (LRCs) are usually used for recording, and the boresight monitoring function and performance of LRCs are the key to ensuring the accuracy of laser pointing determination. Firstly, a method based on a high-stability central prism is proposed to monitor and measure the LRC boresight, and the calculation algorithm is given. Second, an experimental verification system is built, and the correctness of the algorithm is verified with a Hexpod turntable and a photoelectric auto-collimator. The results show that the measurement results obtained by the proposed algorithm are consistent with those obtained by the photoelectric auto-collimator, with the error of less than  $0.2''$ . Furthermore, the thermal drift of the LRC boresight is measured, and it reaches  $0.3''$  and  $1.4''$  around the X axis and Y axis, respectively. Finally, the monitoring accuracies of the boresight in different environments are evaluated. The results show that the monitoring accuracy in vacuum environment is  $0.02''$ (one times standard deviation), which meets the practical application requirements of the on-orbit monitoring of the LRC boresight. Compared with the vacuum condition, the error increases 2~4 times under the atmospheric vibration isolation condition and 10~15 times under the non-vibration isolation condition, respectively.

**Key words** measurement; space instrumentation; laser reference camera; boresight monitoring; centroid of laser spot

**OCIS codes** 120.6085; 120.0280; 140.2020

收稿日期: 2021-03-18; 修回日期: 2021-04-21; 录用日期: 2021-05-07

基金项目: 民用航天“十三五”第三批预先研究项目(D040105)

通信作者: \*zyh92700@126.com

# 1 引言

激光测距作为一种主动测量手段,具有大气穿透能力强、测距精度高、全天时可工作的优点,利用多波束激光进行航天测绘是目前的研究热点之一<sup>[1-5]</sup>。根据测距原理,激光的指向确定精度对测距精度具有较大的影响,而激光指向受激光器本身热变形、安装结构热变形等<sup>[6-7]</sup>影响,指向存在抖动现象,因此一般采用激光参考相机(LRC)记录激光指向,为激光精确指向提供修正数据。

ICESat-1 卫星搭载的 GLAS 激光测高仪<sup>[1]</sup>和 ICESat-2 卫星搭载的 ATLAS 激光测高仪<sup>[5]</sup>均采用 LRC 记录激光抖动。为了建立激光指向与惯性坐标系的关系,该参考相机还需对恒星成像,通过与陀螺联合定姿,确定激光的绝对指向。该过程可解决 LRC 视轴相对惯性基准的漂移问题,误差传递链路较长。

来颖等<sup>[8]</sup>提出一种基于菲涅耳双棱镜的在轨小角度测量方法,但仅限于几何仿真,未对工程可行性进行分析。激光干涉测量法<sup>[9-10]</sup>测量精度高,但存在稳定性差、测量维度单一的缺点,难以适应在轨多维角度变化测量。

本文提出基于高稳定中央棱镜的 LRC 视轴监视方法,中央棱镜作为测量基准发出参考光,LRC 仅需要对两束参考激光进行成像,便可以测量 LRC 的视轴相对于中央棱镜的转角变化情况,达到视轴监视的目的。

## 2 视轴监视原理与方法

### 2.1 视轴监视原理

LRC 视轴监视原理如图 1 所示。首先,建立基于中央棱镜的高稳定参考平行光,平行光的光源为激光二极管,两个激光二极管及其准直光路均安置在中央棱镜内,中央棱镜采用零膨胀玻璃制造,因此从中央棱镜发出的两束准直平行光之间的夹角保持不变,形成稳定的参考光源。然后,将中央棱镜发出的两束平行光引入参考相机,平行光经过参考相机镜头后被互补金属氧化物半导体(CMOS)探测器焦面接收,形成两个激光光斑,通过加权质心提取法确定两个光斑的质心,即为两个激光光斑的准确位置。LRC 采用针孔成像模型,可以构建基于两个激光光斑质心的矢量,根据双矢量定姿原理,可唯一确定参考相机相对于中央棱镜的姿态。最后,当参考相机视轴相对中央棱镜转动时,参考相机接收到的两个

激光光斑质心将发生变化,通过相应的算法可以解算得到参考相机视轴的变化量,进而达到视轴监视的目的。

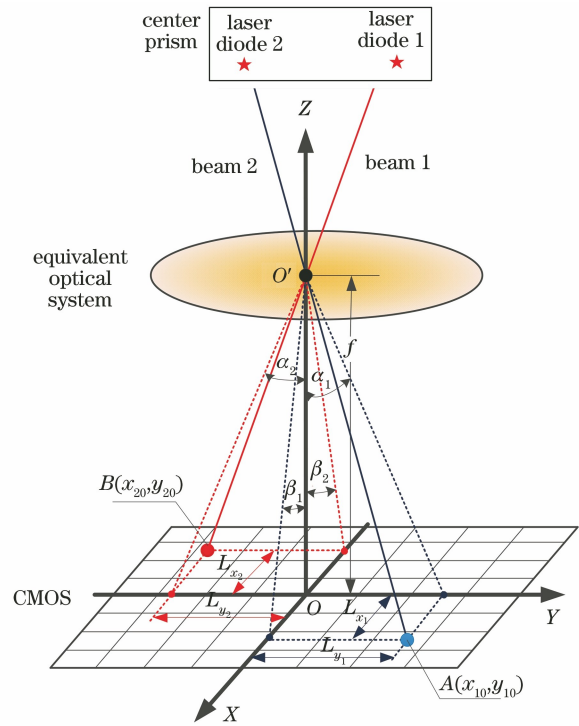


图 1 LRC 视轴监视原理图

Fig. 1 Boresight monitoring diagram of LRC

### 2.2 视轴监视算法

如图 1 所示,LRC 坐标系为  $OXYZ$ ,  $f$  为 LRC 焦距, $O$  为主点, $O'$  为光轴与等效镜头的交点。 $A(x_{10}, y_{10})$ 、 $B(x_{20}, y_{20})$  分别为初始激光光斑质心在该坐标系下的坐标,由此可以构建两个激光矢量  $\overrightarrow{AO'}$ 、 $\overrightarrow{BO'}$ ,其在  $OYZ$  平面内的投影与  $OZ$  轴的夹角分别为  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ ,在  $OZX$  平面内的投影与  $OZ$  轴的夹角分别为  $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 。图中  $L_{x_1}$ 、 $L_{y_1}$  分别为  $A$  点到  $Y$  轴和  $X$  轴的距离; $L_{x_2}$ 、 $L_{y_2}$  分别为  $B$  点到  $Y$  轴和  $X$  轴的距离。

当 LRC 视轴绕  $X$  轴转动后,新的激光光斑质心坐标分别记为  $A'(x_{11}, y_{11})$ 、 $B'(x_{21}, y_{21})$ ,如图 2 所示。

以激光光斑  $A$  为例,根据图 1 和图 2,存在如下关系

$$\tan(\alpha_1) = \frac{L_{y_1}}{f}, \quad (1)$$

对(1)式取偏导,得到

$$\sec^2(\alpha_1)\Delta\alpha_1 = \frac{\Delta y_1}{f}, \quad (2)$$

整理得

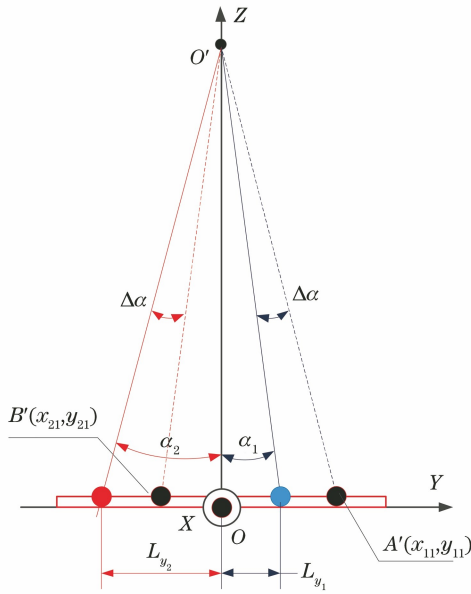


图 2 LRC 视轴绕 X 轴转动示意图

Fig. 2 Schematic of rotation of LRC boresight around X axis

$$\Delta\alpha_1 = \frac{\Delta y_1 \cos^2(\alpha_1)}{f}, \quad (3)$$

式中:  $\Delta y_1 = y_{11} - y_{10}$ ;  $\Delta\alpha_1$  为激光矢量  $\overrightarrow{A'O'}$  与  $\overrightarrow{AO'}$  在 OYZ 平面内的投影与 OZ 轴的夹角差。

对于激光光斑 B, 同理可得到

$$\Delta\alpha_2 = \frac{\Delta y_2 \cos^2(\alpha_2)}{f}, \quad (4)$$

式中:  $\Delta y_2 = y_{21} - y_{20}$ ;  $\Delta\alpha_2$  为激光矢量  $\overrightarrow{B'O'}$  与  $\overrightarrow{BO'}$  在 OYZ 平面内的投影与 OZ 轴的夹角差。

综上可得, LRC 视轴绕 X 轴的转角变化量  $\Delta\alpha$  为

$$\Delta\alpha = \frac{\Delta\alpha_1 + \Delta\alpha_2}{2}, \quad (5)$$

整理得

$$\Delta\alpha = [\Delta y_1 \cos^2(\alpha_1) + \Delta y_2 \cos^2(\alpha_2)] \frac{1}{2f}. \quad (6)$$

类似地, 如图 3 所示, 根据激光光斑质心坐标  $A'(x_{11}, y_{11})$ 、 $B'(x_{21}, y_{21})$  相应的激光矢量在 OXZ 平面内的投影关系, 可计算得到 LRC 视轴绕 Y 轴的转角变化量  $\Delta\beta$  为

$$\Delta\beta = [\Delta x_1 \cos^2(\beta_1) + \Delta x_2 \cos^2(\beta_2)] \frac{1}{2f}, \quad (7)$$

式中:  $\Delta x_1 = x_{11} - x_{10}$ ;  $\Delta x_2 = x_{21} - x_{20}$ 。

### 3 实验与验证

#### 3.1 实验系统搭建

测试系统如图 4 所示。参试产品为 LRC、中央棱镜、配电系统等。其中 LRC 单个像元张角为  $5.5''$ 。

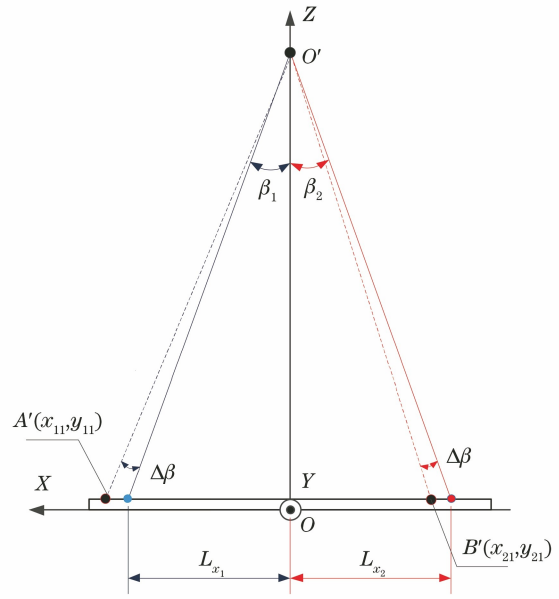


图 3 LRC 视轴绕 Y 轴转动示意图

Fig. 3 Schematic of rotation of LRC boresight around Y axis

主要测试设备: 1) PI 高精度六自由度转台; 2) 光电自准直仪(精度为  $0.2''$ )。

测试条件: 1) 温度  $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ ; 2) 10 万级洁净间; 3) 光学隔振气浮平台。

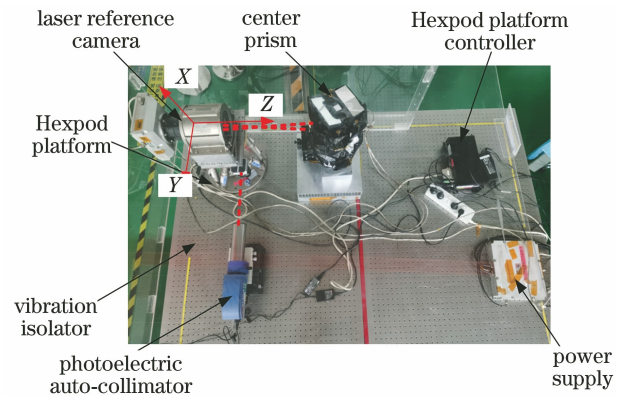


图 4 LRC 视轴监视实验系统

Fig. 4 Experimental system of LRC boresight monitoring

测试方法: 测试基准为中央棱镜(包含发光激光光源), 其被固定在隔振平台上; LRC 被固定在 Hexpod 转台上, 可以接收中央棱镜发出的两路光, 并在探测器上形成两个激光光斑。LRC 的开机成像过程由综合检测台控制, Hexpod 转台由 Hexpod 控制系统控制。在静态测试过程中, Hexpod 转台保持静止。当 LRC 相对中央棱镜有微转动时, 探测器上的激光光斑的质心位置会发生变化, 根据相对变化量, 即可计算得到 LRC 相对于中央棱镜的转角变化。

#### 3.2 中央棱镜稳定性分析

由视轴监测原理可知, 所提方法是基于高稳定

中央棱镜完成 LRC 视轴监视的,因此中央棱镜的力热稳定性至关重要。

中央棱镜由三块棱镜组成,激光光源发射组件安装在其上部,光学材料采用 Zerodur 微晶材料,线膨胀系数优于  $10^{-7}/\text{K}$ ,通常称为零膨胀玻璃。

在中央棱镜的两侧安装金属支架以与钛合金支座连接,钛合金支座为中央棱镜组件提供系统主框架上的安装面,确保了结构的稳定性。

中央棱镜和 LRC 都安装在一个整机框架中,在轨控温范围能够达到  $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ 。

### 3.3 实验验证

#### 3.3.1 算法正确性验证

考虑对称性,通过验证 LRC 视轴绕 X 轴的转角来验证算法的正确性。Hexpod 转台初始位置为 0,设置转台绕 X 轴分别转动  $-21.6''$ 、 $-252''$ 、 $252''$ ,在每个位置开启 LRC 以采集激光光斑图像,计算质心坐标,按照 2.2 节算法解算每个状态下相机视轴的变化值,并与给定的 Hexpod 转台数据以及光电自准直仪进行比对判读。多次获得的平均值统计结果如表 1 所示,其中,  $R_{X_0}$  为 Hexpod 转台绕 X 轴的转角读数;  $R_{X_1}$  为所提算法计算得到的 LRC 视轴绕 X 轴转角的结果;  $R_{X_2}$  为光电自准直仪测得的绕 X 轴的转角读数;  $\Delta R_X$  为所提算法计算得到的 LRC 视轴绕 X 轴转角与光电自准直仪测得的结果之差。

表 1 算法验证结果

Table 1 Validation results for algorithm

$R_{X_0}/( '')$	$R_{X_1}/( '')$	$R_{X_2}/( '')$	$\Delta R_X/( '')$
-21.6	-20.74	-20.91	0.17
-252	-249.67	-249.52	0.15
252	232.30	232.35	0.05

由表 1 可知,在 Hexpod 转台绕 X 轴转动  $\pm 252''$  范围内,所提算法获取的 LRC 视轴绕 X 轴的转动结果与光电自准直仪一致,二者最大误差为  $0.17''$ ,在光电自准直仪测量精度范围内,验证了算法的正确性。

此外,从表 1 可知,Hexpod 转台输入转角与实际转角(光电自准直仪结果)存在较大的差异,这主要是转台回程误差导致的,因此引入高精度的光电自准直仪作为比较准则是有必要的。

需要指出的是,一般而言,天地不一致性引起的 LRC 视轴变化范围在  $\pm 1'$  内,因此 Hexpod 转台绕 X 轴转动  $\pm 252''$  测量范围对于在轨监视是足够的。

#### 3.3.2 视轴漂移监视

LRC 采用 CMOS 器件作为探测器,CMOS 器

件工作时自身发热将引起探测器膨胀,各像元相对于相机坐标系出现位移,进而引起相机视轴发生漂移。漂移量同样可以用这种视轴监测方法测量得到,在图 4 所示的测试系统中进行静态测试,Hexpod 转台保持静止,开启 LRC,连续开机 120 s,采集光斑图像,计算质心坐标,按照 2.2 节算法解算相机视轴的变化值。常温常压下 LRC 视轴漂移测试结果如图 5、6 所示。

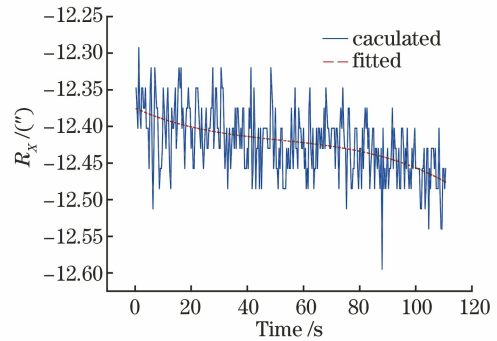


图 5 LRC 视轴绕 X 轴的漂移结果

Fig. 5 Drift result of LRC boresight around X axis

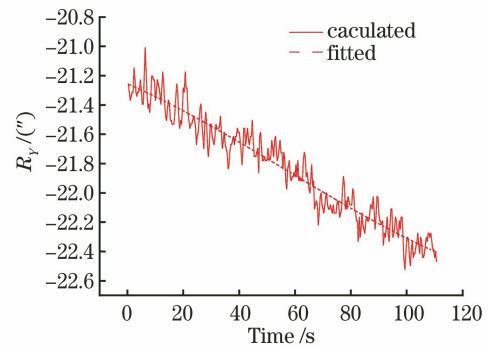


图 6 LRC 视轴绕 Y 轴的漂移结果

Fig. 6 Drift result of LRC boresight around Y axis

由图 5、6 可知,LRC 视轴在 120 s 时间内绕 X 轴和 Y 轴的漂移量分别为  $0.3''$  和  $1.4''$ 。采用这种视轴监测方法可以在轨实时监测相机视轴的热漂移。

#### 3.3.3 测量精度

进一步对上述 LRC 视轴监测方法的测量精度进行实测,测试在以下三种状态下分别进行:1)在大气条件下不开启气浮平台(condition 1);2)在大气条件下开启气浮平台(condition 2);3)在真空状态下开启气浮平台(condition 3)。

首先获得连续采集 120 s 的激光光斑图像数据,解算后得到相机视轴绕 X、Y 轴的变化结果,然后采用三次多项式进行拟合,拟合后的残差如图 7、8 所示。

对图 7、8 数据进行统计分析,得到 LRC 视轴绕 X 轴和 Y 轴的测量精度:1)在大气非隔振条件下,LRC 视轴绕 X 轴和 Y 轴的测量精度分别为  $0.17''$  ( $1\sigma$ )、 $0.31''$  ( $1\sigma$ );2)在大气隔振条件下,LRC 视轴绕 X 轴和 Y 轴的测量精度分别为  $0.04''$  ( $1\sigma$ )、 $0.09''$  ( $1\sigma$ );3)在真空条件下,LRC 视轴绕 X 轴和 Y 轴的测量精度分别为  $0.02''$  ( $1\sigma$ )、 $0.02''$  ( $1\sigma$ )。

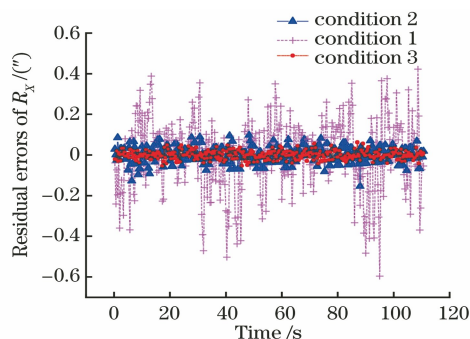


图 7 LRC 视轴绕 X 轴的漂移残差

Fig. 7 Drift residual errors of LRC boresight around X axis

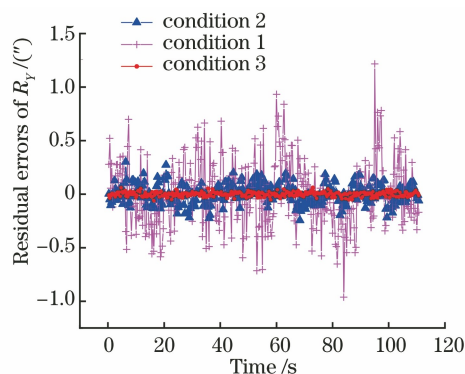


图 8 LRC 视轴绕 Y 轴的漂移残差

Fig. 8 Drift residual errors of LRC boresight around Y axis

真空条件下的视轴测量精度最高,达到  $0.02''$  ( $1\sigma$ ),这表明 LRC 视轴在轨监视系统具有良好的工作性能。大气隔振条件下的视轴测量精度次之,误差相比于真空条件扩大了  $2\sim 4$  倍。非隔振条件下的视轴测量精度最差,误差相比于真空条件扩大了  $10\sim 15$  倍。

## 4 结 论

提出了一种基于高稳定中央棱镜的 LRC 视轴监视方法。在该方法中,中央棱镜作为测量基准发出参考光,LRC 仅需要对两束参考激光进行成像,提取激光光斑质心坐标并将其作为激光光点准确位置,便可测量得到 LRC 的视轴相对于中央棱镜的转角变化情况,达到视轴监视的目的。

给出了相机视轴监视的原理并推导了视轴监视测量算法;设计了测试实验系统,对中央棱镜的稳定性进行了分析,所提算法获取的 LRC 视轴转动结果与光电自准直仪的数据一致,二者最大误差为  $0.17''$ ,验证了算法的正确性。对视轴漂移进行了测量,大气条件下 LRC 视轴绕 X 轴和 Y 轴的漂移量分别达到  $0.3''$  和  $1.4''$ 。对大气非隔振条件、大气隔振条件和真空条件下的视轴监视精度进行了分析,结果表明,在真空条件下视轴监视精度达到  $0.02''$  ( $1\sigma$ );相较于真空条件,大气隔振条件下的误差扩大了  $2\sim 4$  倍,大气非隔振条件下的误差扩大了  $10\sim 15$  倍。因此,实际测试过程中需要考虑测试环境的影响,真空下  $0.02''$  ( $1\sigma$ ) 的精度能够满足 LRC 视轴在轨监视的实际应用要求。

## 参 考 文 献

- [1] Bae S, Webb C, Schutz B. GLAS PAD calibration using laser reference sensor data [C] // AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference and Exhibit, August 16-19, 2004, Providence, Rhode Island, Virginia: AIAA, 2004, 4857: 1-10.
- [2] Abdalati W, Zwally H J, Bindschadler R, et al. The ICESat-2 laser altimetry mission [J]. Proceedings of the IEEE, 2010, 98(5): 735-751.
- [3] McLennan D, Leon J, Markus T, et al. ICESat-2: the next generation satellite for altimetric measurements of the Earth's surface [J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9241: 924108.
- [4] Evans T. Optical development system lab alignment solutions for the ICESat-2 ATLAS instrument [C] // 2013 IEEE Aerospace Conference, March 2-9, 2013, Big Sky, MT, USA. New York: IEEE Press, 2013: 1-11.
- [5] Evans T. Optical development system life cycle for the ICESat-2 ATLAS instrument [C] // 2014 IEEE Aerospace Conference, March 1-8, 2014, Big Sky, MT, USA. New York: IEEE Press, 2014: 1-12.
- [6] Wang Y Y. Research on beam jitter suppression in laser precision measurement [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019. 王亚勇. 激光精密测量中光束抖动抑制技术研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- [7] Yan F J, Sang S H, Li M L, et al. Design and experimental study of high efficiency fundamental-mode matching side pump structure [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2017, 38(2): 55-63. 颜凡江, 桑思哈, 李梦龙, 等. 高效率基模模式匹配侧面泵浦结构设计与试验研究 [J]. 航天返回与遥

感, 2017, 38(2): 55-63.

- [8] Lai Y, Shen Z X, Wang Z S, et al. Measurement method of in-orbit small angle based on Fresnel biprism[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(3): 0317002.  
来颖, 沈正祥, 王占山, 等. 基于菲涅尔双棱镜的在轨小角度测量方法[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(3): 0317002.
- [9] Masajada J. Small-angle rotations measurement using optical vortex interferometer [J]. Optics Communications, 2004, 239(4/5/6): 373-381.
- [10] Fan K C, Liao B H, Cheng F. Ultra-precision angle measurement based on michelson interferometry[J]. Journal of the Chinese Society of Mechanical Engineers, 2013, 34(1): 39-44.