

多波束激光收发平行度高精度装调检测

刘威剑 杜国军 张新宇 张超 王春辉 欧宗耀

High precision alignment and measurement of parallelism for multi-beam laser transceivers

LIU Weijian, DU Guojun, ZHANG Xinyu, ZHANG Chao, WANG Chunhui, OU Zongyao

引用本文:

刘威剑, 杜国军, 张新宇, 等. 多波束激光收发平行度高精度装调检测[J]. 应用光学, 2025, 46(5): 1104–1109. DOI: 10.5768/JAO202546.0503006

LIU Weijian, DU Guojun, ZHANG Xinyu, et al. High precision alignment and measurement of parallelism for multi-beam laser transceivers[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(5): 1104–1109. DOI: 10.5768/JAO202546.0503006

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0503006>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

离轴反射式平行光管设计及次镜检验方案研究

Research on off-axis reflective collimator design and inspection scheme of secondary mirror

应用光学. 2021, 42(2): 334–338 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0205001>

光束指向稳定性高精度检测方法研究

High precision measurement method of laser beam pointing stability

应用光学. 2022, 43(2): 339–344 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0207001>

高能激光光束质量 β 因子测量方法

Measurement method of beam quality factor β for high energy laser

应用光学. 2024, 45(3): 537–542 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0310007>

适用于高精度激光测距的光学系统设计

Design of optical system for high-precision laser ranging

应用光学. 2022, 43(2): 191–197 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0201002>

激光主动探测拼接光学系统的装调设计

Alignment design of assembly optical system for laser active detection

应用光学. 2020, 41(5): 879–884 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0501001>

基于像差特征分析的变焦光学系统装调

Alignment of zoom optical system based on aberration feature analysis

应用光学. 2020, 41(2): 389–393 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0205002>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2025) 05-1104-06

引用格式: 刘威剑, 杜国军, 张新宇, 等. 多波束激光收发平行度高精度装调检测 [J]. 应用光学, 2025, 46(5): 1104-1109.

LIU Weijian, DU Guojun, ZHANG Xinyu, et al. High precision alignment and measurement of parallelism for multi-beam laser transceivers[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(5): 1104-1109.



在线阅读

多波束激光收发平行度高精度装调检测

刘威剑, 杜国军, 张新宇, 张超, 王春辉, 欧宗耀

(北京空间机电研究所, 北京 100094)

摘要: 多波束激光收发光轴平行度是保证激光雷达系统性能的重要参数。针对48波束激光收发平行度优于 $10\ \mu\text{rad}$ 的极高精度匹配难题, 提出了一种收发匹配的高精度装调检测方法。采用长焦距平行光管和光束分析仪组成激光收发平行度测量系统, 通过实测48束激光收发平行度误差, 根据实测数据对接收系统的48束接收光纤进行排布与加工, 实现收发平行度的高精度装调检测。采用20 m焦距的平行光管, 对束散角 $15\ \mu\text{rad}$ 的发射系统, 接收视场角 $80\ \mu\text{rad}$ 的接收系统进行了匹配装调, 实现了多波束激光收发平行度装调检测精度 $3.56\ \mu\text{rad}$, 实测装调完成后的48波束激光收发平行度误差最大 $8.81\ \mu\text{rad}$, 能够有效解决工程应用难题。

关键词: 多波束激光; 收发平行度; 平行光管; 装调检测

中图分类号: TN958.98

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202546.0503006

High precision alignment and measurement of parallelism for multi-beam laser transceivers

LIU Weijian, DU Guojun, ZHANG Xinyu, ZHANG Chao, WANG Chunhui, OU Zongyao

(Beijing Institute of Space Mechanics and Electricity, Beijing 100094, China)

Abstract: The parallelism of the optical axes between multi-beam laser transmitting and receiving system is a critical parameter for ensuring the performance of laser radar systems. To address the extremely high-precision registration challenge of achieving better than $10\ \mu\text{rad}$ parallelism for a 48-beam laser transceiver system, a high-precision alignment and testing method for transmitting-receiver registration was proposed. A measurement system for laser transmitting-receiving parallelism was constructed using a long-focal-length collimator and a beam analyzer. By accurately measuring the parallelism errors of the 48 laser beams, the spacing of the 48 receiving fibers of the receiving system was arranged and manufactured according to the measurement results to achieve high-precision alignment of the parallelism. A 20 m focal length collimator was applied to measuring a laser system with a divergence angle of $15\ \mu\text{rad}$ for the transmitter and a reception field of view of $80\ \mu\text{rad}$. The achieved precision for aligning and measuring the parallelism of the multi-beam laser transceivers was $3.56\ \mu\text{rad}$. After alignment, the maximum measured parallelism error for the 48 beams was $8.81\ \mu\text{rad}$, demonstrating strong feasibility for practical engineering applications.

Key words: multi-beam laser; parallelism of transceivers; collimator; alignment and measurement

引言

随着星载激光雷达效率与精度越来越高, 成像

速率越来越快的探测需求, 以多波束激光并行收发, 单光子探测的新一代激光雷达技术正逐渐成

收稿日期: 2025-01-02; 修回日期: 2025-02-24

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2016YFB0500503)

第一作者: 刘威剑, E-mail: liuweijian954@163.com

为新的发展趋势^[1-4]。目前为了获得更高能量集中度,更高测距精度,提高回波信噪比,减少背景噪声的影响,激光发射的发散角已达到微弧度量级,对应的接收视场角也仅为几十微弧度^[5-8]。ICESat-2 卫星主载荷 ATLAS 光子计数雷达采用 6 波束激光并行收发,激光发散角 20 μrad ,接收视场角仅为 83 μrad ^[9-10]。因此,多波束激光发射光轴与接收光轴的一一匹配是保证多波束激光雷达接收被测目标回波信号效率与精度的重要因素。

传统的多波束激光雷达采用多台激光器按照不同空间角度安装,通过精调激光器安装角度可以实现多波束激光雷达的收发匹配^[11-12]。新一代的激光雷达发射系统往往采用衍射光学元件(diffraction optical element, DOE)实现几十甚至上百发射波束^[13]。DOE 元件为具有特殊函数的二值相位光栅,又称为达曼光栅,通过对输入光场进行相位调制,使入射光经傅里叶变换后,远场处产生的夫琅和费衍射图样是光强均匀分布的光斑点阵,且具有较高的衍射效率。上海技术物理研究所的李铭等人针对激光发射角 20 μrad ,接收视场 60 μrad 的 51 波束线列收发系统进行了配准技术的研究,实现了收发配准精度 10 μrad ^[14]。北京遥测技术研究所的潘超等人对 16×4 阵列分布的 64 波束激光收发匹配进行了实验验证,实现了收发匹配精度 20 μrad ^[15]。

本文针对多波束激光收发平行度装调检测的工程化应用难题,对激光束散角 15 μrad ,接收视场 80 μrad ,收发平行度要求优于 10 μrad 的 48 波束激光收发系统进行了装调检测。通过长焦距平行光管和光束分析仪构建高精度收发平行度检测系统。在激光发射口安装能够 360°旋转的衰减片,实现光束分析仪上收发光斑的能量匹配,提高了检测效率,降低了环境扰动的影响。通过实测每个波束的收发平行度误差,加工接收系统焦面的光纤间隔,实现 48 波束的收发匹配。本文对多波束激光收发匹配原理进行了分析,并开展了收发平行度装调检测实验验证,对收发装调检测精度进行了误差分析与总结。

1 多波束激光收发装调检测原理

1.1 多波束激光收发平行度测量原理

多波束激光收发系统由非共光路的接收系统和发射系统组成,如图 1 所示。发射系统中激光器

输出激光经准直器形成一束发散角 15 μrad 的准直光,再经 DOE 元件衍射后形成 48 束夹角为 500 μrad 的发射激光。接收系统焦面处装有 48 根接收光纤,每根光纤对应的接收视场角为 80 μrad ,当 48 束接收光轴与发射光轴一一匹配时,接收系统能够高效率、低背景噪声地接收到发射激光的回波信号。激光雷达的发射系统和接收系统核心参数如表 1 所示。

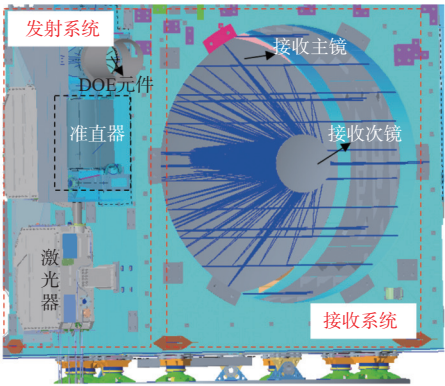


图 1 多波束激光发射系统和接收系统结构图
Fig. 1 Structure diagram of multi-beam laser transmitting system and receiving system

表 1 激光雷达系统核心参数
Table 1 Core parameter of lidar system

参数	数值
激光波长/nm	532
发射激光束散角/ μrad	15
发射激光有效口径/mm	80
相邻发射波束光轴夹角/ μrad	500
接收系统口径/mm	800
接收系统焦距/m	3.8

发射光轴和接收光轴平行度测量的原理如图 2 所示。收发平行度测量系统由衰减片、长焦距平行光管和大尺寸面阵光束分析仪组成。测量接收系统光轴时,通过照明光源与 48 根接收光纤相连,实现接收系统反向输出 48 束平行光,该 48 束平行光光轴则为接收系统光轴。发射系统输出激光和接收系统的输出光同时进入收发平行度测量系统中,经平行光管汇聚在焦面上形成接收光斑和发射光斑。光束分析仪靶面严格与平行光管焦面重合,用于探测接收光斑和发射光斑位置和大小。当 48 束接收光轴和发射光轴一一匹配且平行时,光束分析仪探测到的发射光斑质心会与接收光斑

质心严格重合,如图2所示。否则,通过计算接收光斑质心与发射光斑质心的位置偏差,可以计算出接收光轴与发射光轴的平行度误差。由于激光发射功率大,发散角小,需要在发射系统出光口安装衰减片。衰减片既能够保护平行光管中的次镜

和探测器,避免高功率激光损伤,又能够将发射系统激光功率衰减至与接收系统反向输出激光功率基本一致,使得光束分析仪上同时采集接收光斑和发射光斑,避免分时采集接收光斑和发射光斑过程中,环境扰动对收发光轴的影响。

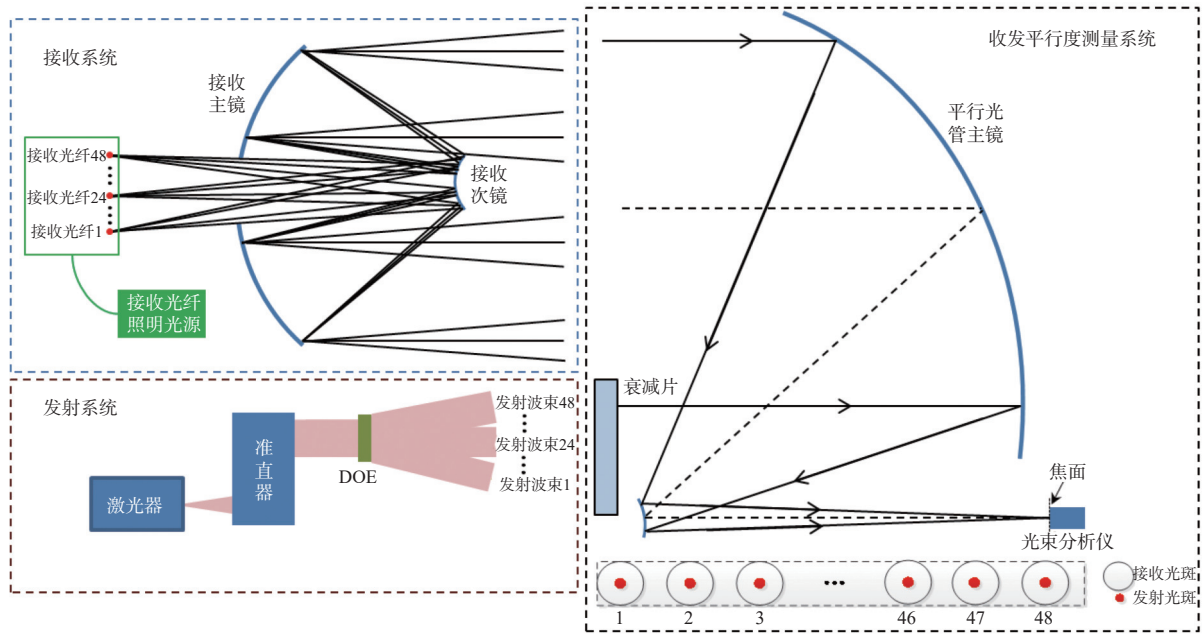


图2 多波束激光收发平行度测量原理

Fig. 2 Principle of parallelism measurement for multi-beam laser transceivers

第 i 束激光的发射光轴与接收光轴平行度误差为 $\Delta\theta_i(\mu\text{rad})$, 第 i 束激光和第 $i+1$ 束激光之间的夹角为 $\theta_i(\mu\text{rad})$ 。收发平行度测量系统的参数为平行光管焦距 $f(\text{m})$, 衰减片引入的发射光轴偏移角度为 $\Delta\alpha_i$, 通过光束分析仪测量第 i 束激光接收光斑和发射光斑的质心偏差为 $d_{0i}(\mu\text{m})$, 如式(1)所示:

$$d_{0i} = \Delta\theta_i \cdot f + \Delta\alpha_i \cdot f \quad (1)$$

衰减片旋转 180° 后, 此时由衰减片引入的发射光轴偏移角度为 $-\Delta\alpha_i$, 通过光束分析仪测量, 此时第 i 束激光接收光斑和发射光斑的质心偏差为 $d_{1i}(\mu\text{m})$, 如式(2)所示:

$$d_{1i} = \Delta\theta_i \cdot f - \Delta\alpha_i \cdot f \quad (2)$$

通过式(1)和式(2)相加后再取平均可以求得第 i 束激光发射光轴和接收光轴之间的平行度误差, 如式(3)所示:

$$\Delta\theta_i = \frac{d_{0i} + d_{1i}}{2f} \quad (3)$$

1.2 多波束收发平行度装调流程

由于本文发射系统采用 DOE 元件进行分束, 该元件的加工误差会在发射系统的 48 波束中引入

固定的夹角误差即系统固定误差, 无法通过装调发射系统进行调整。因此, 需要通过装调接收系统光纤间隔, 从而匹配发射系统的 48 波束夹角间隔, 实现收发波束的一一匹配。多波束激光收发平行度测量与匹配装调的流程如图3所示。先将激光发射系统和接收系统安装在具备俯仰和旋转功能的二维转台上, 并将收发系统对准收发平行度测量系统。为了避免边缘波束的收发平行度偏差过大, 并实现 48 束激光整体收发光轴偏差校正, 先以中间波束即第 24 波束激光收发光轴为基准。通过调整发射系统中的指向调整镜, 将第 24 波束发射光轴调整与接收光轴平行, 即 $\Delta\theta_{24}$ 尽量为 $0 \mu\text{rad}$ 。调整完成后, 对 48 束激光收发平行度进行检测, 每束激光测量时, 需要分别在衰减片 0° 和旋转 180° 两个状态下分别测量收发平行度, 以消除衰减片对发射光轴角度的影响。单个波束测量完成后, 将二维转台在水平方向上旋转 $500 \mu\text{rad}$, 进行下个波束的收发平行度测量。实测出 48 束激光收发光轴平行度误差后, 再通过实测值加工激光接收焦面每束光纤的间隔, 完成 48 束激光收发光轴匹配装调。

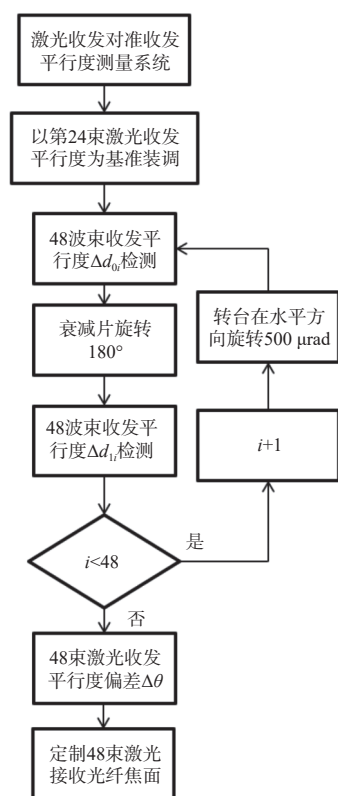


图3 多波束激光收发平行度装调流程图

Fig. 3 Flow chart of parallelism alignment for multi-beam laser transceivers

2 实验验证

多波束激光收发平行度检测实验如图4所示。收发平行度测量系统中平行光管口径1 m, 焦距20 m, 商用光束分析仪型号为SP504S, 单个像元大小为4.5 μm, 像素数为5120×5120。

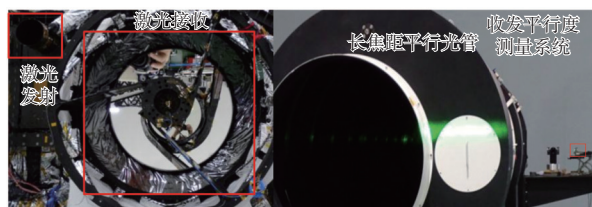


图4 多波束激光收发平行度检测实验图

Fig. 4 Experiment diagram of parallelism measurement for multi-beam laser transceivers

48束激光收发测试结果数据量较大, 本文以典型的收发光斑测试结果为例, 第1、12、36、48束激光发射和接收光斑如图5所示。图5中大圈为激光接收光斑, 小圈为激光发射光斑。分别测量衰减片0°和180°两个状态下的收发光斑质心位置, 再根据式(3)计算出每束激光的收发平行度误差。可以看出, 以第24束光斑为装调基准匹配对准收

发光轴后, 大部分发射光斑都位于接收光斑以内, 但第48束发射光斑已经位于接收光斑以外, 接收系统难以收到发射系统回波信号, 需要按照收发平行度误差重新加工接收焦面的接收光纤间隔。

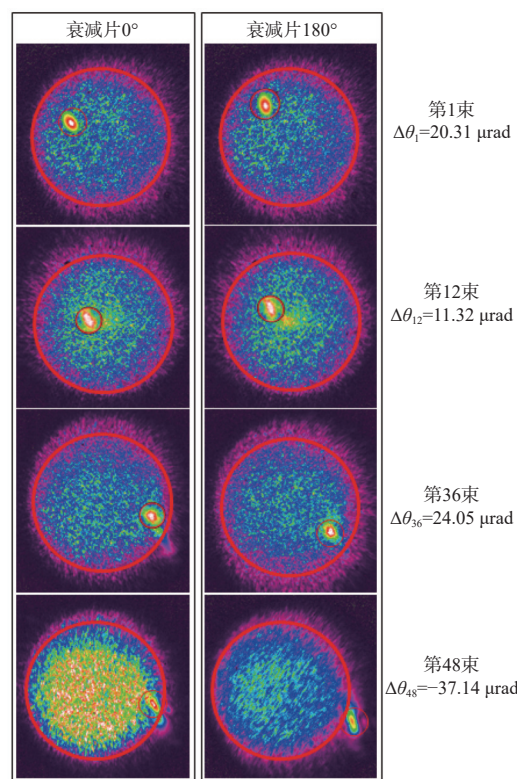


图5 典型波束收发光斑测量结果

Fig. 5 Measurement results of typical transmitting and receiving beam spots

完整的48束激光收发发光轴平行度测试结果如图6所示。由于发射系统采用DOE元件进行48波束分束, DOE元件自身的刻线宽度与均匀性会造成波束间夹角与设计值500 μrad存在偏差。由图6可以看出, 以第24波束为基准后, 两侧波束的平行度误差由于DOE分束误差累积后逐渐增大。

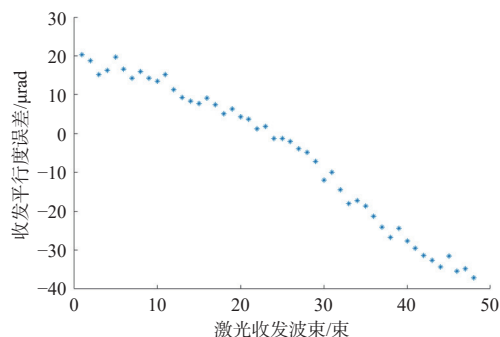


图6 激光收发平行度测量结果

Fig. 6 Measurement results of parallelism for multi-beam laser transceivers

根据图 6 实测的收发平行度误差数据,重新加工接收光纤间隔,校正收发平行度误差。仍以第 24 束激光收发为基准装调后,对 48 束激光收发平行度进行复测,测试结果如图 7 所示。48 束激光收发平行度最大误差为 8.81 μrad 。

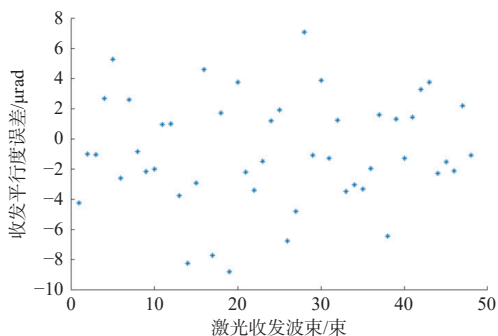


图 7 定制接收光纤后收发平行度测量结果

Fig. 7 Measurement results of parallelism after customizing receiving fibers

3 误差分析

多波束收发光轴平行度装调检测的误差来源主要包括:平行光管焦距误差引入的测量误差,光斑位置探测误差引入的测量误差,环境扰动误差引入的测量误差,接收光纤间隔加工误差引入的装调误差以及温度适应性引入的装调误差。

3.1 平行光管焦距误差引入的测量误差

本文用于测量激光收发平行度的平行光管焦距 f 为 20 m,焦距标定精度 Δf 优于 10 mm,通过对式(3)中的焦距 f 求偏导可以得到平行光管焦距误差引入的平行度测量误差,如式(4)所示:

$$\mu_1 = \frac{\Delta f}{f} \Delta \theta_i \quad (4)$$

根据图 5 所示的 $\Delta \theta_i$ 测量结果可知, $\Delta \theta_i < 40 \mu\text{rad}$, 因此由平行光管焦距误差引入的测量误差 $\mu_1 < 0.02 \mu\text{rad}$ 。

3.2 光斑质心探测误差引入的测量误差

本文用于测量激光收发平行度的光束分析仪,探测光斑质心位置的精度 Δd 为单个像素大小 4.5 μm 。根据式(3)可以计算出由光斑质心探测误差引入的平行度测量误差,如式(5)所示:

$$\mu_2 = \frac{\Delta d_0 + \Delta d_1}{2f} = 0.23 \mu\text{rad} \quad (5)$$

3.3 环境扰动引入的测量误差

本文在测量激光收发平行度时,激光收发系统和收发平行度测量系统均位于同一气浮隔振地基

上。因此,测试过程中环境扰动较小,但平行光管焦距较长,光斑质心测量重复性 Δd 为 20 μm 。根据式(3)可以计算出由环境扰动引入的测量误差,如式(6)所示:

$$\mu_3 = \frac{\Delta d_0 + \Delta d_1}{2f} = 1.00 \mu\text{rad} \quad (6)$$

3.4 接收光纤间隔加工误差引入的装调误差

接收光纤间隔的加工误差优于 10 μm ,接收系统的焦距为 3.8 m。因此,由接收光纤间隔加工误差引入的接收光轴平行度误差为 $\mu_4 = 2.63 \mu\text{rad}$ 。

3.5 温度适应性引入的装调误差

该多波束激光收发系统工作温度为 $20^\circ \pm 1^\circ\text{C}$,发射系统和接收系统的结构采用 C/SiC 材料,低密度的同时,热膨胀系数为 $1 \times 10^{-6}/\text{K}$,光学元件中反射镜材料为微晶玻璃,热膨胀系数为 $0.1 \times 10^{-6}/\text{K}$,DOE 等透射元件材料为熔石英,热膨胀系数为 $0.55 \times 10^{-6}/\text{K}$,经温度适应性仿真分析后,发射系统光轴的变化为 1.26 μrad ,接收系统光轴的变化为 1.78 μrad 。因此,由温度适应性引入的装调误差如式(7)所示:

$$\mu_5 = \sqrt{1.26^2 + 1.78^2} = 2.18 \mu\text{rad} \quad (7)$$

3.6 合成误差

多波束收发光轴平行度装调检测的误差为上述测量误差和装调误差合成得到,如式(8)所示。多波束收发光轴平行度装调检测误差为 3.56 μrad ,具有极高的装调检测精度。

$$\mu = \sqrt{\mu_1^2 + \mu_2^2 + \mu_3^2 + \mu_4^2 + \mu_5^2} = 3.56 \mu\text{rad} \quad (8)$$

4 结论

本文采用长焦距平行光管和光束分析仪组成收发平行度测量系统,并对 48 波束的激光收发系统光轴进行了匹配装调。通过实测 48 波束的收发平行度误差,定制激光接收系统焦面接收光纤的间隔,校正收发平行度误差。经实验验证,48 个波束的收发平行度误差均匹配装调至 10 μrad 以内,并对收发平行度装调检测过程的误差进行了分析,表明了该装调检测方法具有较高的精度,在工程化中具有较好的应用可行性。

参考文献:

- [1] 韩斌,曹杰,史牟丹,等.激光雷达三维成像研究进展[J].激光与光电子学进展,2024,61(2):26-43.

- HAN Bin, CAO Jie, SHI Moudan, et al. Progress of three-dimensional imaging LiDAR[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2024, 61(2): 26-43.
- [2] 张颖, 李松, 张文豪, 等. 基于星载激光测高数据的植被冠层高度反演[J]. *应用光学*, 2020, 41(4): 697-703.
- ZHANG Ying, LI Song, ZHANG Wenhao, et al. Vegetation canopy height inversion method based on spaceborne laser altimetry system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2020, 41(4): 697-703.
- [3] 郭静菁, 费晓燕, 葛鹏, 等. 基于全光纤光子计数激光雷达的高分辨率三维成像[J]. *红外与激光工程*, 2021, 50(7): 134-143.
- GUO Jingjing, FEI Xiaoyan, GE Peng, et al. High-resolution three-dimensional imaging based on all-fiber photon-counting Lidar system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(7): 134-143.
- [4] 刘宇承, 王春泽, 宋有建, 等. 适用于高精度激光测距的光学系统设计[J]. *应用光学*, 2022, 43(2): 191-197.
- LIU Yucheng, WANG Chunze, SONG Youjian, et al. Design of optical system for high-precision laser ranging[J]. *Journal of Applied Optics*, 2022, 43(2): 191-197.
- [5] 张欣婷, 安志勇, 亢磊. 三维激光雷达发射/接收共光路光学系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(6): 0618004.
- ZHANG Xinting, AN Zhiyong, KANG Lei. Design of 3D laser radar transmitting/receiving common path optical system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(6): 0618004.
- [6] MCGILL M, MARKUS T, SCOTT V S, et al. The multiple altimeter beam experimental lidar (MABEL): an airborne simulator for the ICESat-2 mission[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2013, 30(2): 345-352.
- [7] CHAKRABORTY S, AFFOLTER M, GUNDERSON K, et al. High accuracy alignment facility for the receiver and transmitter of the BepiColombo laser altimeter[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(20): 4907-4915.
- [8] 高龙, 安超, 陶宇亮. 星载测风激光雷达 355 nm 光学鉴频器及闭环控制系统[J]. *应用光学*, 2023, 44(4): 904-913.
- GAO Long, AN Chao, TAO Yuliang. 355 nm optical frequency discriminator and closed-loop control system for spaceborne wind lidar[J]. *Journal of Applied Optics*, 2023, 44(4): 904-913.
- [9] ABDALATI W, ZWALLY H J, BINDSCHADLER R, et al. The ICESat-2 laser altimetry mission[J]. *IEEE*, 2010, 98(5): 735-751.
- [10] HAGOPIAN J, BOLCAR M, CHAMBERS J, et al. Advanced topographic laser altimeter system (ATLAS) receiver telescope assembly (RTA) and transmitter alignment and test[J]. *Earth Observing Systems XXI*, 2016, 9972: 997207.
- [11] 穆生博, 李洋, 刘鹤飞, 等. 多波束激光发射系统的装调[J]. *光学精密工程*, 2021, 29(9): 2058-2064.
- MU Shengbo, LI Yang, LIU Hefei, et al. Alignment of multi-beam laser emission system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(9): 2058-2064.
- [12] 孙立, 杨居奎, 王玉诏, 等. 主被动一体化多波束激光雷达设计与实现[J]. *航天返回与遥感*, 2022, 43(6): 27-35.
- SUN Li, YANG Jukui, WANG Yuzhao, et al. Design and implementation of the active-passive multi-channel LiDAR[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2022, 43(6): 27-35.
- [13] HOU J, ZHAO Z H, HUANG G H, et al. Nonuniformity of diffractive splitting and receiver-transmitter alignment for large-field-of-view hundred-beam-scale LiDAR[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2024, 56(8).
- [14] 李铭, 候佳, 周成林, 等. 多波束激光雷达的高精度收发配准方法的实验验证[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(7): 0730001.
- LI Ming, HOU Jia, ZHOU Chenglin, et al. Experimental verification of transmitting-receiving registration method with high precision used in multi-beam lidar[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(7): 0730001.
- [15] 潘超, 李凉海, 曹海翊, 等. 多波束三维成像激光雷达高精度收发匹配方法研究[J]. *遥测遥控*, 2022, 43(3): 62-70.
- PAN Chao, LI Lianghai, CAO Haiyi, et al. High accuracy alignment method for the transceiver of a multi-beam 3D imaging LiDAR[J]. *Journal of Telemetry*, 2022, 43(3): 62-70.