

多波束激光雷达的高精度收发配准方法的实验验证

李 铭, 候 佳, 周成林, 舒 嵘

(中国科学院上海技术物理研究所 空间主动光电技术与系统实验室, 上海 200083)

摘 要: 针对三维成像多波束激光雷达系统微弧度量级激光发散角和多元并行收发条件下极高配准精度要求, 进行了收发配准技术的研究和验证。提出了多波束激光雷达系统收发配准的方法, 实现了一套基于光纤光学的收发光学系统分离的高精度收发光学系统; 发射激光的单元发散角达到了近衍射极限的 $20 \mu\text{rad}$, 接收视场达到 $60 \mu\text{rad}$, 实现了 $1\ 064 \text{ nm}$ 近红外波段 51 元的线列并行收发, 收发配准精度达到 $10 \mu\text{rad}$ 以下。实验验证结果显示, 该收发配准的方法具有较好的可行性, 配准的精度能达到理论分析要求。经过温度等环境因素的分析, 系统在一定的温度范围内具有较好的稳定性, 该温度范围较易控制, 能够满足多波束激光雷达系统的工程应用要求。

关键词: 收发配准; 激光雷达; 多波束; 光纤光学; 光子计数

中图分类号: TP732.2 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201746.0730001

Experimental verification of transmitting–receiving registration method with high precision used in multi–beam lidar

Li Ming, Hou Jia, Zhou Chenglin, Shu Rong

(Laboratory of Space Active Electro–Optical Technology
and Systems, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: According to demand on the micro radian order angle of divergence of 3D–imaging multi–beam lidar and high registration precision of multi–element parallel condition, the receiving–transmitting registration technology was studied and verified. A receiving–transmitting registration method of multi–beam lidar was proposed, a receiving–transmitting optical system with high precision was realized by using separated receiving and transmitting optical system based on fiber optics. Element divergent angle of transmitting laser was $20 \mu\text{rad}$ which approached the diffraction limit, receiving field of view was $60 \mu\text{rad}$, 51 elements linear parallel receiving–transmitting were realized at near infrared $1\ 064 \text{ nm}$ wavelength. Meantime, the precision of receiving–transmitting registration was under $10 \mu\text{rad}$. Experimental verification result indicates that the receiving–transmitting registration method is feasible. Registration precision reaches theory demand. Through temperature analysis, the optical system has good stability during a reasonable temperature range, which can satisfy the engineering application requirements of the 3D–imaging lidar system.

Key words: transmitting and receiving registration; lidar; multi–beam; fiber optics;
photon counting

收稿日期: 2016–11–08; 修订日期: 2016–12–10

基金项目: 国家 973 计划(2009CB724004)

作者简介: 李铭(1984–), 男, 博士生, 主要从事光子计数激光雷达方面的研究。Email: lpfilter@163.com

导师简介: 舒嵘(1971–), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事空间光电遥感技术方面的研究。Email: shurong@mail.sitp.ac.cn

0 引言

激光雷达系统具有发射视场小、测距精度高、成像快速、数据处理快^[1-2]等特点,随着相关技术及应用需求的发展,激光雷达系统有如下发展趋势:单元激光发射视场越来越小,由毫弧度量级发展到亚毫弧度量级甚至接近光学系统衍射极限的微弧度量级,尤其对于星载激光雷达,如果探测距离超过 100 km,采用毫弧度激光发散角,在探测目标处的光斑尺寸将超过 100 m,过大的光斑会造成回波脉冲展宽、距离精度降低、分辨率降低^[3-4],无法发挥激光测距能量集中、测距精度高以及精确目标探测等优势,且无法进一步提升距离测量上限;接收视场随着发射视场也越来越小,相对来说,为了保证工程可实现及可靠性,接收视场一般为发射视场的 2~3 倍,接收视场过大会产生相邻像元的串扰,并且在如光子计数激光雷达等为代表的高灵敏度的探测中,接收视场过大会产生较大背景噪声,无法提取信号,当前国际上主流的机载(如 NASA 的 MABEL 机载激光雷达^[5])、星载激光雷达激光发散角的设计值都在百微弧度量级甚至以下^[6-7],以 GLAS 为代表的对地观测卫星的发散角在 110 μrad ^[6-7],而其后续星 ICESAT-2^[8]则将发散角降低至 17 μrad ;此外,激光雷达的波束增多是另一个趋势,由单一波束逐渐过渡到数十波束甚至上千波束。文中设计并实现了一种多波束激光雷达系统,与以往毫弧度量级发散角的激光测距和激光雷达系统^[1]不同,该系统波束多,同时发射视场达到微弧度量级、探测距离可满足星载对地观测应用要求^[9]。

文中设计的激光雷达发散角低至 20 μrad ,接收视场 60 μrad ,根据分析需要确保收发激光的配准精度在 10 μrad 以内。此外,对于多波束激光雷达,激光像元达到 51 波束,如此高精度和多元的配准目标是需要解决的难点。

激光光源发出的激光采用空间扩束后,利用二元光学(如 DOE、微透镜阵列等^[10-11])进行分束发射^[11],这是多波束激光雷达常用的实现方法,该方法简单明了,但是存在缺点:首先该方法采用空间扩束结合分束,激光的空间传输模式以及激光器本身扰动都

会带来激光发射光束指向的漂移,会对收发配准的稳定性造成影响,因此指向精度要求较高的激光雷达系统中需要增加实时指向调整机构^[8],系统实现反而复杂;其次采用二元光学分光存在较大的激光能量不均匀性。

对于收发配准,常用的方法是采用模拟探测器,将线列探测器直接放置于接收光学系统焦平面上,这种情况下接收视场无法采用精确反打激光进行收发光斑的配准,此时需要用模拟探测器替代真实探测器,模拟探测器的形状尺寸与真实探测器一致,在每个光敏面的位置采用精密加工钻孔,从孔的位置反向发射激光,从而实现接收视场反打激光,但是由于加工模拟探测器的过程存在误差,其精度只适用于毫弧度量级的收发配准。

1 基于光纤光学的多波束激光雷达系统

如图 1 所示,文中系统采用了发射和接收望远镜分开的光学系统实现多元激光的发射与接收,每个望远镜的焦面分别安置发射光纤阵列和接收光纤阵列,每个光纤阵列中 N 个光纤对应 N 元激光,发射和接收光纤阵列在两个望远镜的视场一一对应。这种全光纤阵列实现的激光雷达光学系统存在内方位元素稳定,激光指向精度高且稳定度高的特点^[5],适合于高精度的激光雷达。

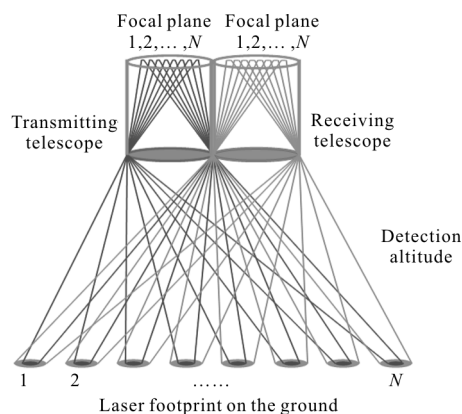


图 1 基于光纤阵列收发配准的激光雷达原理图
Fig.1 Configuration of lidar based on fiber array receiving-transmitting registration

激光从发射望远镜发射至远场后形成了 N 个激光足印,如果收发同轴良好,接收望远镜焦面的光

纤阵列会在发射视场位置出现同样的 N 个接收激光视场,且接收激光视场大于发射激光视场,出现发射视场被接收视场套合的状态,目标漫反射的激光回波进入到接收望远镜就会被以最大效率接收,这是激光雷达效率最高的收发配准状态。

2 高精度收发配准方法分析及系统实现

2.1 激光雷达收发光学理论分析

激光雷达的收发配准的目的是将发射的多波束激光与接收的多波束激光一一对应起来,将发射视场形成的激光光斑与接收视场套合,使激光雷达最大效率接收回波能量,同时这种对应关系需要在一定的环境条件下保持较高的精度和稳定性。这种对应关系不仅取决于发射、接收光学系统性能,在前文提及的基于光纤阵列实现的激光雷达系统中,更取决于收发系统配准的实现方法。以下对光纤阵列的尺寸及位置关系与光学系统之间的关系进行数学推导。

光纤阵列采用一维线列排布,如图 2 所示,假设

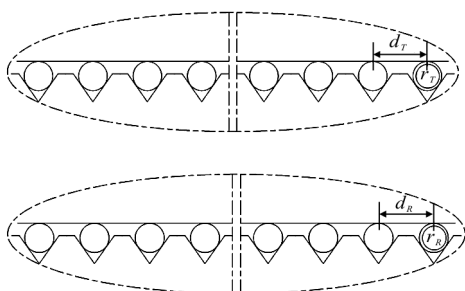


图 2 发射系统与接收系统光纤阵列排布

Fig.2 Fiber array arrangement of transmitting system and receiving system

发射光纤阵列光纤芯径为 r_T ,接收光纤芯径为 r_R ,发射光纤阵列相邻光纤中心间距为 d_T ,对应的接收光纤阵列相邻光纤间距为 d_R ,发射光学系统的焦距为 f_T ,接收光学系统的焦距为 f_R ,根据光学成像原理,则由此尺寸的发射光纤芯径得到的发射激光发散角 θ_T 为下式^[1]:

$$\theta_T = \frac{r_T}{f_T} \quad (1)$$

相邻发射光斑质心之间的夹角 θ_{01} ,即发射束间角为:

$$\theta_{01} = \frac{d_T}{f_T} \quad (2)$$

式中:如果 r_T 采用 μm 单位, f_T 采用 m 为单位,则 θ_T 的单位为 μrad 。同理,接收视场角 θ_R 为下式:

$$\theta_R = \frac{r_R}{f_R} \quad (3)$$

相应的,两个相邻接收视场之间的夹角,即接收束间角为:

$$\theta_{02} = \frac{d_R}{f_R} \quad (4)$$

如果系统设计的发散角 θ_T 与 θ_R 都已经确定,在光纤种纤芯尺寸确定的情况下,即 r_T 与 r_R 已确定,可以根据前述计算得到系统焦距为^[2]:

$$f_T = \frac{r_T}{\theta_T} \quad (5)$$

$$f_R = \frac{r_R}{\theta_R} \quad (6)$$

如果发射光纤的数值孔径 NA_1 已经确定,要保证发射不损失激光能量,则需要发射光学系统数值孔径 NA_T 要不小于发射光纤的数值孔径 NA_1 ,由此可以确定发射光学系统的数值孔径:

$$NA_1 = \frac{D_T}{2f_T} \geq NA_1 \quad (7)$$

即可确定发射光学系统的有效口径:

$$D_T \geq 2f_T NA_1 \quad (8)$$

同理,如果接收光纤的数值孔径 NA_2 已经确定,要保证发射不损失激光能量,则需要接收光学系统的数值孔径 NA_R 要不大于接收光纤的数值孔径 NA_2 ,由此可以确定接收光学系统的数值孔径:

$$NA_R = \frac{D_R}{2f_R} \geq NA_2 \quad (9)$$

即可确定接收光学系统的有效口径:

$$D_T \leq 2f_R NA_2 \quad (10)$$

同时,对于发射和接收的相邻视场形成的像元,应保证发射视场束间角和接收视场束间角相等,即:

$$\theta_{01} = \frac{d_T}{f_T} \quad \theta_{02} = \frac{d_R}{f_R} \quad (11)$$

在 d_T, f_T, f_R 确定的条件下,接收光纤阵列相邻光纤纤芯间距 d_R 应满足如下关系:

$$d_R = \frac{f_R d_T}{f_T} \quad (12)$$

2.2 收发光学系统设计及实现

文中的激光雷达系统设计输入参数如表 1 所示。

表 1 激光雷达系统设计参数

Tab.1 Lidar system design parameter

Input parameter	Parameter value
Laser wavelength	1 064 nm
Transmitting fiber core diameter	20 μm
Receiving fiber core diameter	50 μm
NA of the transmitting fiber	0.08
NA of the receiving fiber	0.22
FOV of the transmitting laser	20 μrad
FOV of the receiving system	60 μrad
Angle between adjoin laser beams	1.25 mrad
Pixel number	51
Focal length of the transmitting system	1 m
Effective diameter of the transmitting system	200 mm
Distance between adjoin transmitting fiber cores	1.25 mm
Focal length of the receiving system	833.3 mm
Effective diameter of the receiving system	300 mm
Distance between adjoin receiving fiber cores	1.042 mm

实现的接收光纤阵列在显微镜下测量结果如图3所示。

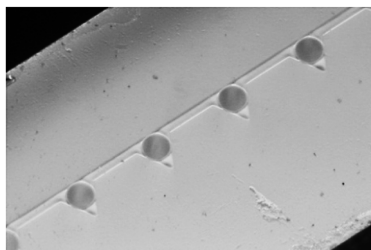
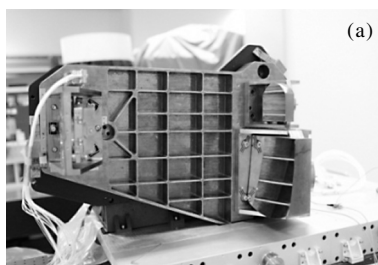


图 3 接收光纤阵列端面测试显微图片

Fig.3 Receiving fiber array end surface image under microscope

图 4 分别为文中实现的激光雷达系统的发射光学系统与接收光学系统，其中发射光学采用了离轴三反式光学系统实现 20 μrad 单元发射发散角，接收光学采用了同轴两反式光学系统实现 60 μrad 的单元接收视场。



(a)



(b)

图 4 离轴三反发射光学系统和 300 mm 接收系统 (焦面放置光纤阵列)

Fig.4 Off-axis three mirror transmitting optical system and 300 mm receiving optical system (fiber array placed on the focal plane)

3 高精度收发配准方法分析及试验验证

激光雷达系统的配准精度要求较高，对于多波束激光雷达系统，假设发射视场为 θ_t ，接收视场为 θ_r ，设 $\theta_r > \theta_t$ ，在收发视场和发射视场中心重合的条件下，则系统的收发配准余量为 $(\theta_r - \theta_t)/2$ ，即接收视场能够容忍发射视场向两个方向 $\pm(\theta_r - \theta_t)/2$ 的偏移量，在此偏移量下，接收光学系统仍然能够完全接收激光回波能量，超过该范围会造成接收激光回波能量损失，实际在配准过程中接收视场和发射视场的中心不可能完美重合，存在收发视场中心配准误差 θ_e ，由此造成接收视场一个方向的容差范围减少，即由 $\pm(\theta_r - \theta_t)/2$ 的偏移量区间变为 $[-(\theta_r - \theta_t)/2 - \theta_e, (\theta_r - \theta_t)/2 - \theta_e]$ 。根据激光雷达应用工程经验，至少需要将 θ_e 控制在 $(\theta_r - \theta_t)/4$ 范围内工程方能可行。文中实现的系统参数如下：

$$\theta_t = 20 \mu\text{rad}$$

$$\theta_r = 60 \mu\text{rad}$$

需要满足如下关系：

$$\theta_e < (\theta_r - \theta_t)/4 = 10 \mu\text{rad}$$

毫弧度量级的收发配准仅仅需要亚毫米级配准精度即能满足系统精度要求，此激光三维成像系统中 10 μrad 的配准精度需要借助新的配准方法以及微米级精度的精调配准。

3.1 收发配准方法

文中所采用的收发配准方法原理如图 5 所示。

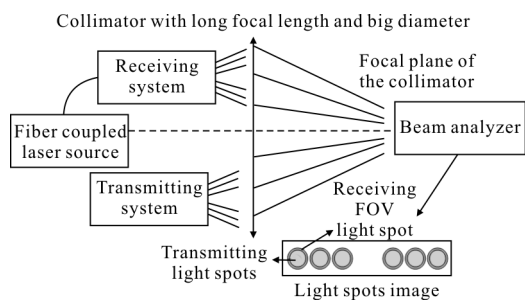


图 5 基于光纤阵列的收发配准原理示意图

Fig.5 Principle diagram of receiving-transmitting registration based on fiber array

为了实现发射光学系统与接收光学系统的视场套合,即同轴配准,文中系统的发射和接收光学系统都在焦平面放置光纤阵列,可以实现发射光学系统和光学系统同时向平行光管发光,即在接收光纤阵列的末端引入一台激光光源,由接收光学系统入瞳处发出激光光斑,射入平行光管,由光路可逆原理可知,该光斑对应的视场就是接收视场,通过发射和接收光斑的配准,即可配准收发视场,并能测得收发配准误差。

该方法有以下优势:首先不需要调整光学系统,可实时在线调整,因此配准后(经过力学等条件)的精度即为系统最终精度。其次文中采用的光纤阵列采用高精度微加工,光纤排布精度在 $\pm 1 \mu\text{m}$,对应于发射光学的偏差约为 $\pm 1 \mu\text{rad}$,高于 DOE 分光的精度,能够最大程度减小系统误差,实现 51 个波束的高精度并行配准。第三,采用微光学部件,能够保证收发配准振动适应性,满足未来激光雷达对稳定性的需求。

设平行光管的焦距为 f_0 , 在平行光管焦面放置光束分析仪, 发射视场在平行光管焦面形成光斑直径:

$$A_T = \theta_T \times f_0 \quad (13)$$

同理,接收视场在平行光管焦面形成光斑直径:

$$A_R = \theta_R \times f_0 \quad (14)$$

相邻发射及接收光斑的中心间距相同,由束间角和平行光管焦距决定:

$$L = \theta_{01} \times f_0 \quad (15)$$

该配准方法需要发射光学系统和接收光学系统同时发射激光,在平行光管的焦面光束分析仪形成对应的两个光斑,通过调整发射光学系统与接收系

统的光轴使得两个光斑中心达到重合,在满足单一收发视场配准的条件下,需要对阵列中的每一束激光逐个进行调整,达到线阵激光完全收发配准。

由于系统的配准精度要求较高,因此对于多波束激光雷达系统,其收发配准分为粗调配准和精调配准。以往毫弧度量级的配准仅仅需要粗配准即能将收发配准达到比较高的精度水平,此激光雷达系统中 $10 \mu\text{rad}$ 的配准精度还需要借助更加精密、能够将光斑位置精确到微米级的精调配准。

粗调方法如下。

(1) 在长焦平行光管焦面置像屏,像屏上贴 1mm 的方格纸,像屏后面用 CMOS 相机接收;

(2) 将接收模块和发射模块同时放置于平行光管前的转台上,正对平行光管放置;文中的激光雷达系统采用的平行光管焦距为 $f_0=17\text{m}$,可以计算如下:

发射单元发散角为 $20 \mu\text{rad}$,像屏上发射光斑像大小, $a_1=17\ 000 \times 0.000\ 02=0.34\text{mm}$

接收瞬时视场为 $60 \mu\text{rad}$,像屏上接收光斑像大小, $a_2=17\ 000 \times 0.000\ 06=1.02\text{mm}$

相邻的光纤彼此之间的角度为 1.25mrad ,像屏上相邻组中心之间的间距, $l=17\ 000 \times 0.001\ 25=21.25\text{mm}$

(3) 开启发射模块的激光器,使激光束射向平行光管主镜;

(4) 调整转台两维角度,使被平行光管会聚的激光点落于平行光管焦面的像屏较中间的位置上。在平行光管焦面像屏上可同时看到 5 根光纤发出的激光光点像。通过 CMOS 相机,大约可看到 5 组激光点。继续调整转台的水平位置,使发射激光的起始激光像元落于像屏;

(5) 用光纤激光器照亮接收模块的光纤起始激光像元,使其通过接收光学系统发出平行光束并通过平行光管主镜会聚至平行光管焦面像屏;

(6) 调整接收光纤座的角度位置,改变其发出的光束指向,使被平行光管会聚的光点在像屏上与发射激光点行与列对准;

(7) 转动转台水平角度,使像屏上的光点从头到尾移动。通过 CMOS 相机观察收发光点的重合情况,要求头尾均能配准,否则继续调整接收光纤座,直至各点重合;

(8) 关闭激光器,粗调结束。

精调方法如下。

(1) 平行光管焦面的像屏用光束分析仪代替, 光束分析仪探测器光敏面置于平行光管焦面 (光束分析仪像元大小 $5.2 \mu\text{m}$, 相当于 $0.3 \mu\text{rad}$);

(2) 开启发射激光器;

(3) 转动转台的水平角度, 使发射激光的起始第一元落于光束分析仪光敏面上, 并且调整光束分析仪位置, 使光斑落于其中心位置, 通过图像采集系统看到激光点;

(4) 第一次采图, 并通过系统读出光斑的中心位置 (s, t) , s, t 分别为发射光斑中心在探测器上的行与列坐标。关闭发射激光器;

(5) 开启接收光纤激光器, 照亮与上述发射激光点相对应的起始元接收光纤, 此时接收光斑应在光束分析仪上出现, 并且可通过图像采集系统看到;

(6) 第二次采图, 并通过光束分析仪读出光斑中心位置 (u, v) , u, v 分别为接收光斑中心在光束分析仪上的行与列坐标。与发射点比较中心位置相差的像元数 $\Delta l = \sqrt{(s-u)^2 + (t-v)^2}$, 要求重合度优于 $10 \mu\text{rad}$, 即相差的像素数小于 33 像元。达不到则微调接收光纤座, 使其中心偏差小于 33 像元;

(7) 转动转台的水平角度, 使发射光点和与之对应的接收光点逐个在光束分析仪上扫过。该过程中每次仅能看到一个激光光点, 即需要采图 102 次, 比较 51 次, 要求收发的中心重合度均优于 $10 \mu\text{rad}$ 。

(8) 若发射和接收从第一元到最后一元的光纤均能满足均匀度优于 $10 \mu\text{rad}$ 的要求, 则结束精调, 关闭激光器。

(9) 对上述流程进行循环, 直至满足精度。

3.2 固定来源配准误差分析

发射和接收光纤阵列的均匀性、发射以及接收光学系统本身的加工和装调精度以及光纤座的微调精度、转台的精度等都将对系统的配准精度产生影响。有必要对这些因素进行分析, 并对它们进行配准精度的误差的定量分配。

首先, 对于配准精度进行分析(如图 6 所示), 用光束分析仪感光面在平行光管的焦面上接收光斑, CCD 感光面大小为 $0.005 2 \times 1 024 = 5.3 \text{ mm}$, 经计算, 一次在 CCD 的光敏面上仅仅能观测到单根光纤发出的光。首先打开发射端激光器, 在 CCD 上采图, 记

录下其光斑中心行与列的坐标 (s, t) , 关闭发射激光器, 然后打开接收端激光器, 在 CCD 上采图, 记录下其光斑中心行与列的坐标 (u, v) 。在实际应用中图像处理软件对光斑位置坐标的测量精度为 1 个像素 ($0.3 \mu\text{rad}$), 利用图像处理软件和光束分析仪测试的方式引入的调整误差为 $0.3 \mu\text{rad}$ 。

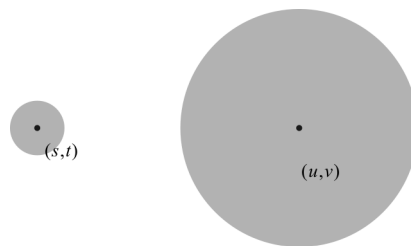


图 6 配准精度分析

Fig.6 Precision analysis of registration adjusting

其次, 考虑系统的固定误差对配准精度的影响, 发射和接收光纤阵列的位置误差为 $2 \mu\text{m}$ (对于发射系统相当于 $2 \mu\text{rad}$ 的误差, 对于接收系统相当于 $2.4 \mu\text{rad}$); 加工和装调公差以后的发射系统的光轴变化范围为 $\pm 5 \mu\text{rad}$, 接收系统的光轴变化误差为 $4 \mu\text{rad}$; 转台误差为 $2.4 \mu\text{rad}$; 对于发射光学系统, 光纤阵列调整精度对出射激光的指向影响为 $0.18 \mu\text{rad}$, 对于接收光纤系统光纤阵列调整精度对出射激光的指向影响为 $0.2 \mu\text{rad}$ 。

综上所述, 考虑各个固定误差来源后的均方根误差为:

$$\theta_r = \sqrt{0.3^2 + 2^2 + 2.4^2 + 5^2 + 4^2 + 0.18^2 + 0.2^2} \approx 7.14 \mu\text{rad}$$

3.3 温度适应性分析

发射和接收光学系统的设计温度为 20°C , 当系统所处的环境偏离设计值时, 发射与接收光学系统的光轴指向和各视场的出射光方向都将偏离理论设计值。在光学系统设计时对发射和接收各自的光轴稳定度进行设计, 分别为 $5 \mu\text{rad}$ 和 $10 \mu\text{rad}$, 经过单系统的温度适应性分析, 考虑各组部件的材料以及热膨胀系数, 当环境温度 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 时, 发射系统的光轴变化为 $3.48 \mu\text{rad}$, 接收系统的光轴变化为 $4.43 \mu\text{rad}$ (光轴变化量 $3.48 \mu\text{rad}$ 和 $4.43 \mu\text{rad}$ 为温度变化上下限时的较大者)。

因此在温度变化 $\pm 1^\circ\text{C}$ 时, 温度变化对系统配准引入误差为:

$$\sqrt{3.48^2 + 4.43^2} \approx 5.63 \mu\text{rad}$$

所以为了保证收发配准的精度，应使系统的温度控制在 $20 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ 内。

考虑温度影响，并综合计算前述的固定误差来源，当系统温度控制在 $20 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ ，系统的收发配准误差为温度引入误差与固定来源误差之均方根：

$$\sqrt{5.63^2 + 7.14^2} \approx 9.09 \text{ } \mu\text{rad} < 10 \text{ } \mu\text{rad}$$

能够满足前述误差要求：

$$\theta_e < (\theta_r - \theta_T) / 4 = 10 \text{ } \mu\text{rad}$$

为了能保证较好的收发配准稳定性，对发射和接收光学系统提出了较高的控温要求。

4 收发光学系统配准测试结果分析

文中实现的收发光学系统在平行光管前的测试如图 7 所示，通过平行光管可以测试收发配准的误差。

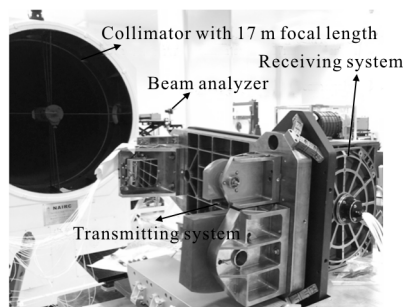


图 7 收发光学系统及配准调整的测试装置

Fig.7 Test device of receiving-transmitting optical system and registration adjusting

收发配准误差的测试方法为，从发射阵列和接收阵列的相应像元依次发射激光，两束激光经平行光管在光束分析仪上聚焦成两个光斑，两光斑质心的偏差即为激光收发配准的误差^[12]。

采用光束分析仪分别提取发射光斑和接收光斑的质心，如图 8 所示，利用光束分析仪测量两个质心的绝对距离，

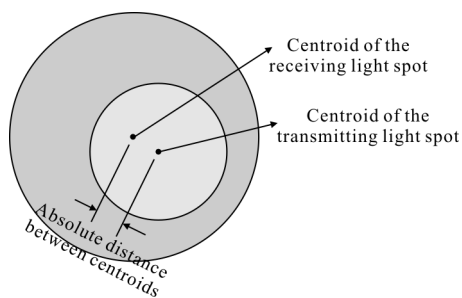


图 8 收发配准误差测量方法

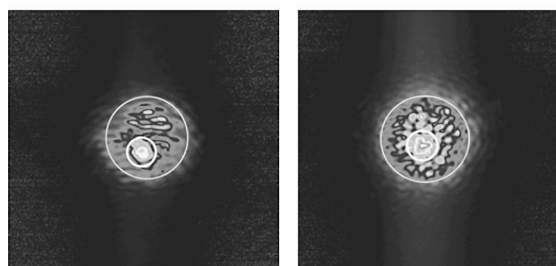
Fig.8 Test method of the receiving-transmitting registration error

对距离 Δl ，已知平行光管的焦距 $f_0 = 17 \text{ m}$ ，可利用下式：

$$\theta_e = \frac{\Delta l}{f_0}$$

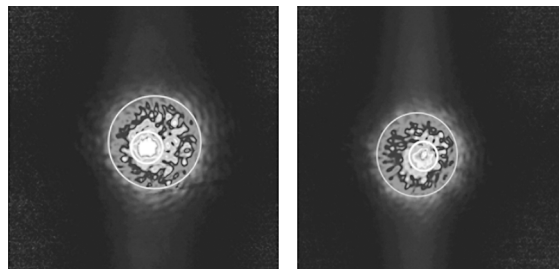
计算得到收发配准误差角度(单位弧度)。

该系统的激光阵列为 51 波束，但并未将全部结果列在该文，选取了有代表性的 1、8、17、26、34、43、51 元激光的测量结果，图 9 所示为其收发配准光斑图，白色实线圆圈为软件提供，用于提取光斑质心，内部圆圈为发射光斑的范围，外部圆圈为接收光斑的范围，圆圈的圆心代表两个光斑的质心，误差结果见表 2。



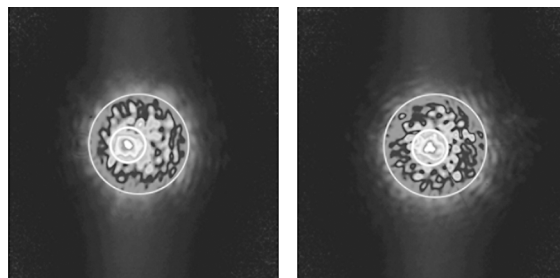
(a) 第 1、8 元收发配准测试结果(收发光斑中心偏差 $9.8 \text{ } \mu\text{rad}$ 与 $4.0 \text{ } \mu\text{rad}$)

(a) 1st and 8th laser point (the receiving-transmitting spot center deviation is $9.8 \text{ } \mu\text{rad}$ and $4.0 \text{ } \mu\text{rad}$)



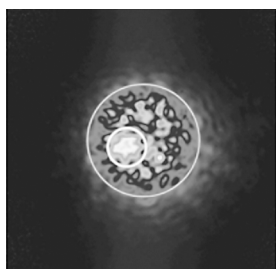
(b) 第 17、26 元收发配准测试结果(收发光斑中心偏差都是 $5 \text{ } \mu\text{rad}$)

(b) 17th and 26th laser point (both receiving-transmitting spot center deviation is $5 \text{ } \mu\text{rad}$)



(c) 第 34、43 元收发配准测试结果(收发光斑中心偏差 $4 \text{ } \mu\text{rad}$ 与 $1.2 \text{ } \mu\text{rad}$)

(c) 34th and 43th laser point (the receiving-transmitting spot center deviation is $4 \text{ } \mu\text{rad}$ and $1.2 \text{ } \mu\text{rad}$)



(d) 第 51 元收发配准测试结果(收发光斑中心偏差 7.0 μrad)

(d) 51st laser point(receiving-transmitting spot center deviation is 7.0 μrad)

图 9 收发配准测试结果(内部的白色圆圈表示发射视场大小,外部的白色圆圈表示接收视场大小)

Fig.9 Receiving-transmitting registration test result of laser point(inner circle represents the transmitting FOV, outer circle represents the receiving FOV)

表 2 多元光学系统收发配准误差

Tab.2 Receiving-transmitting registration errors of multi-beam optical system

Number of the laser beams	Off-axis error/ μrad
1	9.8
8	4.0
17	5.0
26	5.0
34	4.0
43	1.2
51	7.0

从表中测试数据可知,在边缘视场第 1 波束的配准误差较大,约为 9.8 μrad ,第 51 波束处误差为 7.0 μrad ,最小误差为 43 元的 1.2 μrad ,其余激光波束的误差都在 5.0 μrad 以内,满足了文中前述的 10 μrad 的配准误差要求。此外,发射与接收光学系统焦距与设计值也存在一定偏差,也会引入误差,但是误差较小,在文中忽略不计。

5 结论

提出了一种基于光纤光学的多波束激光雷达实现方法,实现了一套基于焦平面光纤阵列的激光雷达的收发光学系统,采用这种方法实现了近衍射极限 20 μrad 发射发散角,60 μrad 的接收视场角,同时

51 波束收发视场的同轴配准,经过对系统参数和误差来源的分析,定量计算系统的理论误差,经过系统测试 51 个激光波束的配准误差都小于 10 μrad ,与 NASA 的 ICESAT-2 卫星上激光雷达实现的 10 μrad 的收发配准精度一致,达到了国际最先进水平(ICESAT-2 只有 6 个波束)。此外文中对温度适应性进行了分析,在 $20\pm 1^\circ\text{C}$ 温度范围时,发射系统的光轴变化为 3.48 μrad ,接收系统的光轴变化为 4.43 μrad ,总影响为 5.63 μrad ,具有良好的工程可行性。

参考文献:

- [1] Dai Yongjiang. Laser Radar Technology (1) [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010. (in Chinese) 戴永江. 激光雷达技术(上册)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010.
- [2] Zhang Xiaohong. Theory and Method of LIDAR Measuring Technology [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2007. (in Chinese) 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.
- [3] Sun Jianfeng, Yan Aimin, Liu Dean, et al. Progress on long-range laser imaging lidar [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, 46(8): 49-54. (in Chinese) 孙建锋, 阎爱民, 刘德安, 等. 远距离激光成像雷达进展[J]. 激光与光电子学进展, 2009, 46(8): 49-54.
- [4] Hu Chunsheng. Investigation into the high-speed pulsed laser diode 3D-imaging lidar [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005. (in Chinese) 胡春生. 脉冲半导体激光器高速三维成像激光雷达研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2005.
- [5] 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 & Oceanic Tecnolgy*, 2013, 30(2): 345-352.
- [6] 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. (in Chinese) 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.
- [7] Zheng Yongchao, Zhao Mingjun, Zhang Wenping, et al. Trend

- of laser radar technology development [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(S): 240–246. (in Chinese)
- 郑永超, 赵铭军, 张文平, 等. 激光雷达技术及其发展动向[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(S): 240–246.
- [8] 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.
- [9] Li Ran, Wang Cheng, Su Guozhong, et al. Development and Applications of Spaceborne LiDAR [J]. *Science & Technology Review*, 2007, 25(14): 58–63. (in Chinese)
- 李然, 王成, 苏国中, 等. 星载激光雷达的发展与应用[J]. 科学导报, 2007, 25(14): 58–63.
- [10] Shu R, Huang G, Hou L, et al. Multi-channel photon counting three-dimensional imaging laser radar system using fiber array coupled Geiger-mode avalanche photodiode[C]// SPIE, 2012, 8542 (85420C): 1–10.
- [11] Shu Rong, Li Ming, Huang Genghua, et al. Design and performance of a fiber array coupled multi-channel photon counting, 3D imaging, airborne simulator for lidar system [C]//China High Resolution Earth Observation Conference, 2014. (in Chinese)
- 舒嵘, 李铭, 黄庚华, 等. 基于光纤阵列耦合的多波束光子计数激光三维成像雷达航空模拟器的设计与验证[C]// 高分辨率对地观测学术会议, 2014.
- [12] Dong Zhiwei, Zhang Weibin, Fan Rongwei, et al. Streak tube principle LiDAR imaging simulation and experiment [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45 (7): 0730001. (in Chinese)
- 董志伟, 张伟斌, 樊荣伟, 等. 条纹原理激光雷达成像仿真及实验[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(7): 0730001.