

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2310979

# 非同轴激光雷达重叠因子的自校正系统设计<sup>\*</sup>

闫庆<sup>1,2,3</sup>, 高丰佳<sup>1</sup>, 徐鑫鑫<sup>1</sup>, 高飞<sup>1,2,3</sup>, 华灯鑫<sup>1,2,3</sup>

(1. 西安理工大学机械与精密仪器工程学院 西安 710048; 2. 陕西省机械制造装备重点实验室 西安 710048;  
3. 教育部数控机床及机械制造装备集成重点实验室 西安 710048)

**摘要:**受振动、温度、预紧力变化等外部环境因素影响,激光雷达系统的激光发射光轴和望远镜接收光轴会发生变化,导致激光雷达系统的重叠因子发生变化,进而影响激光雷达系统的远场探测精度与探测稳定性。针对非同轴激光雷达提出开展重叠因子自校正的软硬件系统设计,采用二相电机驱动,具有自锁功能的蜗轮蜗杆发射光轴校正平台设计并搭建了激光发射光轴倾角调节系统,并以激光回波信号强度为校正判据寻找非同轴激光雷达系统收发光轴的最佳匹配位置。自校正过程采用粗扫描和细扫描相结合的方式,以实现校正精度和校正效率的综合考量,其中粗扫描采用环形扫时序,可在961 s内将激光发射光轴锁定在0.4 mrad×0.4 mrad倾角范围内;细扫描采用S形时序,可在441 s内实现激光发射光轴0.02 mrad的倾角调节精度。自校正前后的大气回波距离平方修正信号表明,设计的自校正系统能够实现非同轴激光雷达系统重叠因子的有效校正,并提升系统探测性能,为全天时、无人值守的激光雷达大气探测提供支持。

**关键词:**非同轴激光雷达;重叠因子;自校正;回波信号强度法;粗细结合的扫描时序

**中图分类号:** TH756 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

## Design of self-alignment of geometric overlap function in the non-coaxial Lidar system

Yan Qing<sup>1,2,3</sup>, Gao Fengjia<sup>1</sup>, Xu Xinxin<sup>1</sup>, Gao Fei<sup>1,2,3</sup>, Hua Dengxin<sup>1,2,3</sup>

(1. School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;  
2. Key Lab of Manufacturing Equipment of Shaanxi Province, Xi'an 710048, China; 3. Key Lab of NC Machine  
Tools and Integrated Manufacturing Equipment of the Ministry of Education, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** The relationship between the optical axes of the transmitter and the receiver of the non-coaxial lidar is affected by the external environment, such as vibration, temperature, pretightening force, etc. It leads to the geometric overlap variation of the lidar system. In further, the lidar detection accuracy and stability in far range is affected. To solve this problem, a hardware and software design of the self-alignment of geometric overlap function in the non-coaxial lidar system is proposed. The self-aligning system consists of a two-phase stepper motor driver, and a two-dimensional inclination adjustment platform. The laser echo signal strength is used as the correction criterion to find the best matching position of the receiving optical axis of the non-coaxial laser radar system. The combination of coarse scanning and fine scanning of self-alignment method is selected based on the comprehensive consideration of alignment accuracy and alignment efficiency. The coarse scan adopts the circular scanning, which can lock the transmitter optical axes within the inclination range of 0.4 mrad×0.4 mrad in 961 s. The fine scan adopts S-shaped scanning, which can achieve the inclination adjustment accuracy of 0.02 mrad in 441 s. The preliminary experiment results show that the RSCS of lidar echo signal after the self-alignment is distributed with the lidar equation, which presents an improved performance of lidar detection and can be applied for the all-day lidar measurement without man-made operation.

**Keywords:** non-coaxial lidar; geometric overlap function; self-alignment; lidar echo signal; combination of coarse scanning and fine scanning

收稿日期: 2023-01-14 Received Date: 2023-01-14

<sup>\*</sup> 基金项目: 国家自然科学基金(42175149, 42175156)、中国-中东欧国家高校联合教育项目(2022232, 2021120)、陕西省教育厅重点实验室科研计划项目(17JS094)、陕西省林业科学研究院科技创新计划项目(SXLK2021-0223)资助

## 0 引 言

大气探测激光雷达是一种主动式光学遥感技术,在大气遥感、环境监测和气候变化研究领域中发挥着重要的作用<sup>[1-4]</sup>。重叠因子是激光雷达的重要参数指标,它用于表征激光雷达的激光发射场与望远镜接收视场之间的匹配情况,是影响激光雷达系统探测性能的关键参数<sup>[5-8]</sup>。

根据激光发射光轴与望远镜接收光轴之间的位置关系可以将激光雷达分为同轴系统与非同轴系统,同轴系统的激光发射光轴与望远镜接收光轴重合,而非同轴系统的激光发射光轴与望远镜接收光轴相互平行且具有一定的距离,同轴系统可以看作是非同轴系统收发光轴之间距离为零的特殊情况。用于激光雷达系统的出射光束的反射镜支架易受到温度、机械振动、预紧力变化等外部环境的影响导致激光发射光轴发生倾斜偏移,从而影响激光发射场光轴与望远镜接收视场光轴之间的平行位置关系,导致激光雷达的激光发射场与望远镜接收视场之间的匹配出现偏差,即重叠因子变小或出现波动,进而激光雷达系统的探测精度、探测能力与稳定性均会变差。

为了保证激光雷达的激光发射场与望远镜接收视场的匹配精度,研究人员提出了激光雷达重叠因子的自校正技术<sup>[9]</sup>。1998 年意大利材料物理研究所的 Luca Fiorani 等<sup>[10]</sup>和 Xuan 等<sup>[11]</sup>提出了一套快速、准确的激光束在望远镜视场中的定心方法,该方法通过专用软件控制系统中的万向反射镜进行微小移动来定位激光束的中心,其定心精度可达几微弧度,定位时间根据初始情况的不同在几秒到几分钟不等,但此方法仅适用于同轴激光雷达系统;2005 年武汉大学的 Bo 等<sup>[12]</sup>提出了通过使用激光垂准仪改变望远镜接收光轴来实现激光雷达收发视场相匹配的方法,并给出了将此方法应用于共振荧光激光雷达系统的观测结果,但其并未给出此方法的定位精度与定位时间的具体值;2008 年中科院安徽光机所的谭锐等<sup>[13]</sup>提出了以光斑成像为校正判据的重叠因子自校正方法,该方法通过改变发射装置中角锥镜的方向去校正激光发射光轴位置,从而实现发射-接收光轴的对准,其定位精度可达到 40  $\mu\text{rad}$ ,定位时间在 40 s 以内,但是以光斑成像为校正判据需要高精度的电荷耦合元件(charge coupled device, CCD)感光芯片,成本较高;2015 年西安理工大学的宋跃辉等<sup>[14]</sup>提出了一种使用二维电动镜架改变激光发射光轴方向、采用大气回波信号强度为校正判据来实现收发光轴匹配的方法,该方法的定位精度可达到 0.05 mrad,定位时间根据初始情况的不同在几秒到几分钟不等,但其未讨论出射激光能量的抖动对收发光轴准直的影响,且仅适用于同轴激光雷达系统。

综上所述,现有的激光雷达重叠因子自校正方法大多是基于同轴激光雷达系统来进行的,较少有针对非同轴激光雷达系统的应用。并且重叠因子自校正方法主要分为对激光发射光轴的准直和对望远镜接收光轴的准直两方面,对激光发射光轴进行准直的方法精度较高且系统结构简单,对望远镜光轴进行准直的方法系统结构复杂且研究较少。因此,针对西安理工大学激光雷达遥感研究中心所搭建的拉曼激光雷达系统,本文提出并设计了一种基于激光发射光轴调整、以大气回波信号与出射激光信号强度为校正判据的非同轴激光雷达重叠因子的自校正系统,通过二相电机驱动,具有自锁功能的蜗轮蜗杆发射光轴校正平台带动激光发射场光轴以环形时序和 S 形时序两种粗细扫描方式进行激光雷达收发视场光轴倾角的调整,以实现激光雷达重叠因子的自校正。

## 1 非同轴激光雷达重叠因子的理论计算

利用非同轴激光雷达系统探测大气参数时其激光发射场光轴与望远镜接收视场光轴之间需要保持平行位置关系,然而在实际实验过程中的温度、机械振动、预紧力等外部因素会导致光学反射镜架的位置发生变化,进而导致激光器发射光轴产生变化,致使激光发射光轴与望远镜接收光轴之间的平行关系被打破。

图 1 为非同轴激光雷达系统的收发光轴处于平行状态与非平行状态的示意图。图 2 为激光雷达在不同探测高度上收发视场之间的空间位置关系图。当探测距离在  $0 \sim r_1$  (图 1 的  $R_1$  范围) 之间时为激光雷达的探测盲区,激光雷达收发视场位置关系如图 2(a) 所示,此时没有大气后向散射回波信号进入接收视场;当探测距离在  $r_1 \sim r_2$  (图 1 的  $R_2$  范围) 之间时为激光雷达的探测过渡区,激光雷达收发视场位置关系如图 2(b) 所示,此时只有部分大气后向散射回波信号进入接收视场;当探测距离大于  $r_2$  时 (图 1 的  $R_3$  范围) 为激光雷达的探测充满区,激光雷达收发视场位置关系如图 2(c) 所示,此时大气后向散射回波信号理论上可以全部被望远镜接收到。探测距离  $r_1$  与  $r_2$  可表示为:

$$r_1 = \begin{cases} \frac{L - Z_r - Z_t}{\alpha_t + \alpha_r + \delta}, & \delta \neq 0 \\ \frac{L - Z_r - Z_t}{\alpha_t + \alpha_r}, & \delta = 0 \end{cases} \quad \& \quad (1)$$

$$r_2 = \begin{cases} \frac{L + Z_t - Z_r}{\alpha_r - \alpha_t + \delta}, & \delta \neq 0 \\ \frac{L + Z_t - Z_r}{2\alpha_t - 2\alpha_r}, & \delta = 0 \end{cases}$$

式中: $L$ 为激光雷达收发光轴之间的距离; $Z_t$ 为激光出光半径, $Z_r$ 为望远镜的口径半径; $\alpha_t$ 为激光发射场的发散半角, $\alpha_r$ 为望远镜接收视场半角; $\delta$ 为收发光轴之间的倾

角( $\delta=0$ 代表收发光轴平行, $\delta<0$ 代表激光发射光轴向远离望远镜接收光轴的一端倾斜, $\delta>0$ 代表激光发射光轴向靠近望远镜接收光轴的一端倾斜)。

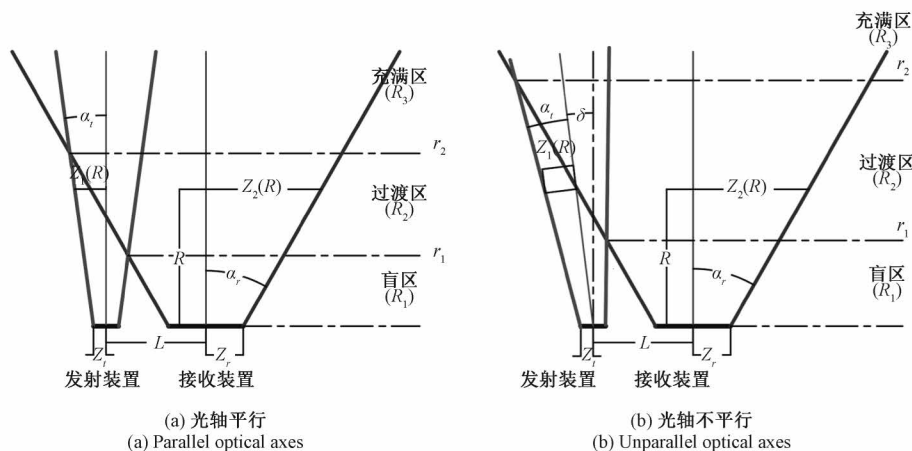


图1 非同轴激光雷达收发光轴的位置关系示意图

Fig. 1 Diagram of the relationship between the optical axes of transmitter and receiver of the non-coaxial lidar

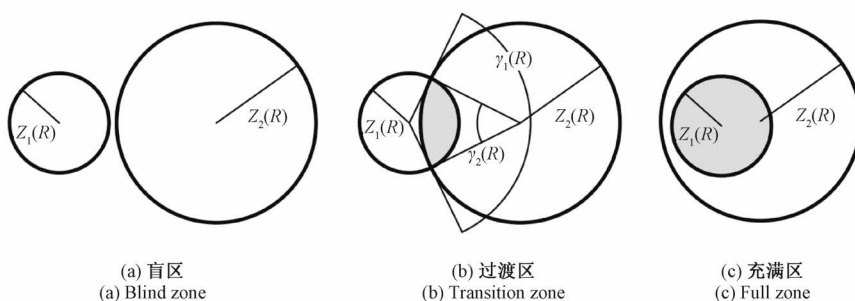


图2 激光雷达的收发视场之间的空间位置关系图

Fig. 2 Diagram of the spatial position relationship between transmitter field and receiver field of the non-coaxial lidar

假设激光束光斑能量与望远镜接收到的后向散射光能量均匀分布,图2(b)过渡区所接收到的部分大气后向散射回波信号所对应的望远镜接收视场的扇形角度 $\gamma_1(R, \delta)$ 与激光发射场的扇形角度 $\gamma_2(R, \delta)$ 可以由下式计算得到:

$$\begin{cases} \gamma_1(R, \delta) = 2 \cdot \arccos\left(\frac{(L - R \cdot \delta)^2 + Z_1^2(R) - Z_2^2(R)}{2 \cdot Z_1(R) \cdot (L - R \cdot \delta)}\right) \\ \gamma_2(R, \delta) = 2 \cdot \arccos\left(\frac{(L - R \cdot \delta)^2 + Z_2^2(R) - Z_1^2(R)}{2 \cdot Z_2(R) \cdot (L - R \cdot \delta)}\right) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $Z_1(R) = Z_t + R \cdot \alpha_t$ 与 $Z_2(R) = Z_r + R \cdot \alpha_r$ 分别为探测距离 $R$ 处的激光发射场半径与望远镜接收视场半径。非同轴激光雷达的重叠因子 $Y(R, \delta)$ 可表达

如下:

$$Y(R, \delta) = \frac{Z_2^2(R) \{ \gamma_2(R, \delta) - \sin[\gamma_2(R, \delta)] \}}{2\pi Z_1^2(R)} + \frac{\gamma_1(R, \delta) - \sin[\gamma_1(R, \delta)]}{2\pi} \quad (3)$$

由式(3)可以看出,重叠因子 $Y(R, \delta)$ 是关于望远镜接收视场的扇形角度 $\gamma_1(R, \delta)$ 与激光发射场的扇形角度 $\gamma_2(R, \delta)$ 的函数,而 $\gamma_1(R, \delta)$ 与 $\gamma_2(R, \delta)$ 是关于探测距离 $R$ 和收发光轴之间的倾角 $\delta$ 的函数,即重叠因子 $Y(R, \delta)$ 是与探测距离 $R$ 和收发光轴倾角 $\delta$ 相关的函数。

## 2 非同轴激光雷达重叠因子的自校正硬件系统设计

为了提升拉曼激光雷达系统的探测性能,实现无人值守功能,设计了一套非同轴激光雷达的重叠因子自校正软硬件系统,以解决激光雷达收发光轴之间的倾角 $\delta$ 对激光雷达远场探测性能带来的影响。

图 3 为基于非同轴拉曼激光雷达的重叠因子自校正硬件系统示意图。Nd:YAG 大功率脉冲激光器的基频波长为 1 064 nm、重复频率为 10 Hz,经二次谐波发生器(second harmonic generator,SHG)、2.5×扩束装置与分束器(beam splitter,BS)之后产生中心波长为 532 nm、光束直径为 25 mm、发散角为 0.2 mrad 的脉冲激光束,其中大部分光线被 45°反射镜反射后垂直射向大气。进入大气中的脉冲激光束与其中的固态、液态颗粒相互作用并产生散射光,其中后向散射光被垂直放置的焦距为 2 000 mm、直径为 203 mm 的望远镜接收并聚焦至直径 0.8 mm 的多模光纤中,最后传输至拉曼光谱分光器进行光谱分离和光电探测。光纤口径限制了望远镜接收系统的视场角为 0.4 mrad。激光雷达收发光轴之间的距离为 0.4 m。大气回波光谱信号经拉曼光谱分光器处理后,其米散射通道的信号被传输至数据采集系统进行数据处理。此外,BS 分出的少部分光线被光电探测器 PD 接收并传输至数据采集系统,作为激光能量的监测模块。为

了实现非同轴激光雷达重叠因子的自校正,搭建了激光雷达收发光轴倾角的校正系统,采用现场可编程门阵列(field programmable gate array,FPGA)控制器向步进电机驱动器发送电平信号以驱动具有自锁功能的蜗轮蜗杆发射光轴校正平台带动安装在其上的 45°反射镜在前后与左右两个维度上改变激光发射光轴的方向,从而改变收发光轴的倾角;FPGA 控制器还用于将发射光轴校正平台与数据采集系统连接起来并形成反馈调节回路。其中发射光轴校正平台(图 3 中的实拍图)由两个步进电机、蜗轮蜗杆和可转动平台构成,其可转动平台的最小调节步距角为 0.002 5 mrad。电机与可转动平台之间通过具有自锁功能的蜗轮蜗杆连接,当电机控制可转动平台发生微小转动时,蜗轮蜗杆进行力矩转换与传动。当可转动平台固定不动但电机未断电时,蜗轮蜗杆在断电的条件下可启动自锁功能以最大限度的避免外界环境变化对激光发射光轴方向的影响,进而对系统探测性能的影响。

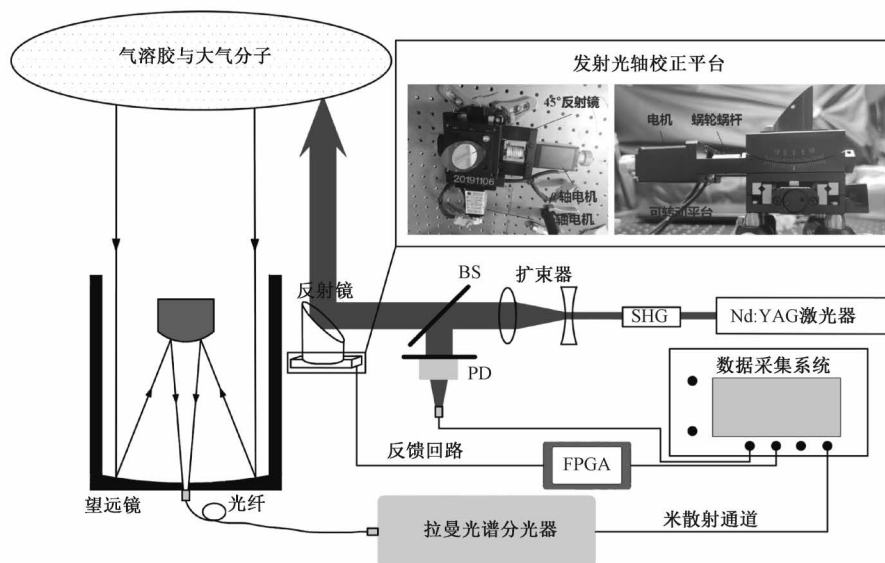


图 3 非同轴激光雷达的重叠因子自校正系统原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the self-alignment of the geometric overlap factor in the non-coaxial LiDAR system

图 4 为非同轴激光雷达的重叠因子自校正系统的框架图与流程图。本研究通过调节激光发射光轴的方向来校正非同轴激光雷达系统的重叠因子,因此在自校正开始之前将采用激光垂准仪校准望远镜接收光轴,使其保持在垂直接收状态。在进行激光雷达重叠因子的自校正时,首先要对 FPGA 控制器的串口进行通信程序初始化、参数设置和发射光轴校正平台校零等工作,然后 FPGA 按照粗扫描与细扫描的逻辑时序设置给电机驱动模块发送脉冲信号,控制发射光轴校正平台带动 45°反射镜进行转动,实现收发光轴

倾角  $\delta$  的微小变动,从而改变接收视场与发射场之间的盲区、过渡区与充满区的位置,最终使得相同高度处的大气回波信号强度发生变化。数据采集系统将记录发射光轴平台的位置、采集并实时处理录发射光轴平台转动过程中的大气回波信号强度、计算并保存每个转动位置处的校正判据值,在校正结束后判断出激光发射光轴的最佳位置并向 FPGA 控制器发送反馈控制信号,FPGA 控制器将发射光轴校正平台调节至校正判据最大值所在位置,至此非同轴激光雷达系统的收发光轴自校正结束。

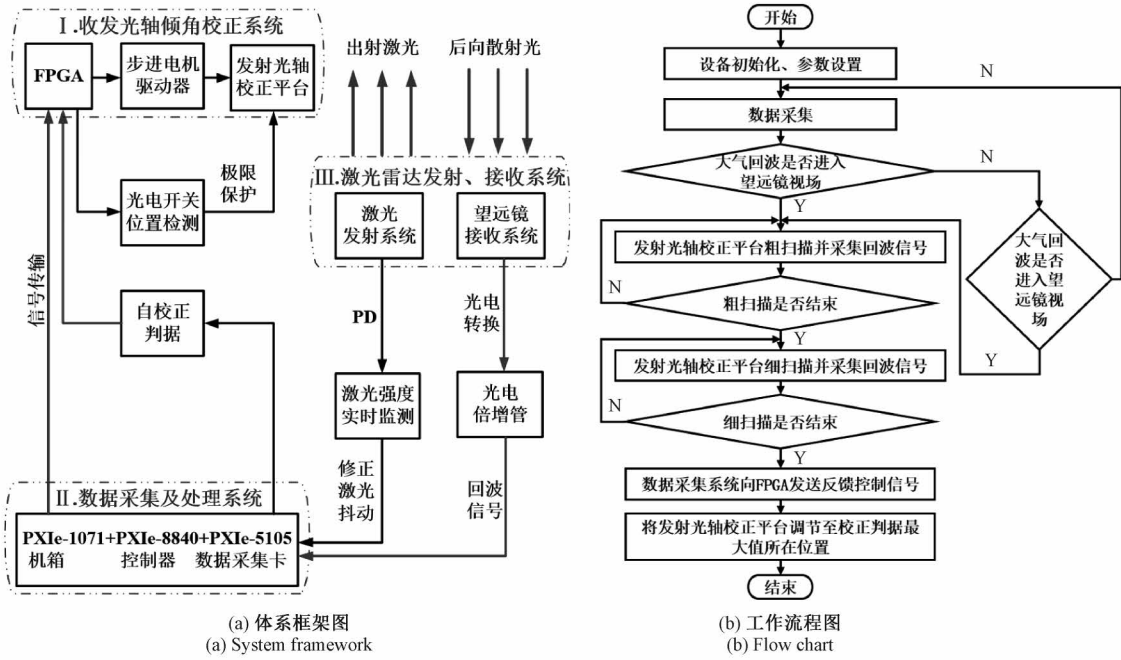


图4 非同轴激光雷达重叠因子自校正系统框架图与流程图

Fig. 4 Diagram of the framework and flow chart of the self-alignment of the geometric overlap factor in the non-coaxial lidar system

### 3 非同轴激光雷达重叠因子的自校正软件系统设计

#### 3.1 重叠因子的自校正判据

激光雷达的大气回波信号强度、极限探测距离、探测距离  $r$  处的信噪比均可以用作重叠因子自校正的校正判据,现有基于大气回波信号强度的自校正判据可以有效的反映出系统的整体探测性能,但未考虑到激光能量的抖动对系统探测性能的影响<sup>[14-15]</sup>;基于极限探测距离的自校正判据,校正精度依赖于背景噪声的探测情况,其受到大气环境波动的影响较大<sup>[16]</sup>;基于信噪比的自校正判据能够很好的反映系统局部探测性能,但其不仅与收发光轴倾角相关,还受到探测距离的影响<sup>[5]</sup>。

综合比较3种校正判据,综合考虑了激光雷达的探测盲区、探测范围、背景噪声以及激光能量的抖动等因素,提出了基于大气回波信号强度的优化校正判据,定义校正判据  $C(\delta)$  为:

$$C(\delta) = \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} \left( \frac{P(r, \delta) - P_B}{P_0(\delta)} \right) \cdot r^2 dr \quad (4)$$

式中:  $R_{\min}$  为最小可探测距离,其值可以通过理论计算得到;  $R_{\max}$  为最大可探测距离,  $P(r, \delta)$  为回波信号的强度,  $P_B$  为背景噪声,  $P_0(\delta)$  为出射激光的脉冲强度,其值均可以通过实测得到;式(4)中使用  $P(r, \delta) - P_B$  除以  $P_0(\delta)$  可以消除激光能量的抖动对系统校正判据的影响。当收

发光轴之间的倾角增大时,收收视场之间的匹配将变差,望远镜接收到的大气回波信号将减小,大气回波信号的距离平方积分值将减小,即  $C(\delta)$  变小。因此,当收发光轴之间的倾角为0时,系统的收发装置处于平行状态,  $C(\delta)$  应有最大值,此时激光发射光轴处于最佳校正位置。

#### 3.2 重叠因子自校正的扫描方式

激光发射光轴的校正扫描是在图5(a)所示三维空间坐标系  $X-Y-Z$  内进行的,  $45^\circ$  反射镜将近似水平的激光光束  $M$  转向  $90^\circ$ ,使得反射光束  $M'$  以近似垂直的方向入射至大气。通过算法控制  $\alpha$  轴电机与  $\beta$  轴电机分别带动安装在可转动平台上的  $45^\circ$  反射镜在  $X-Y$  平面内与  $Y-Z$  平面内的转动,从而实现射入大气的光束  $M'$  在  $X-Y$  平面内和  $Y-Z$  平面内的二维方向调节。激光发射光轴的扫描分为粗扫描与细扫描两部分,为提高大气回波信号的信噪比,每个扫描点处都进行10个激光脉冲回波信号的累加。由于发射激光的重复频率为10 Hz,因此每个扫描点需要停留1 s。

由于在初始位置处,激光发射光轴与望远镜接收光轴之间的倾角未知,粗扫描需要以激光发射光轴的初始位置为原点向4个象限进行扫描,因此选择能够实现对上下左右4个象限进行扫描的环形扫描时序作为粗扫描的时序逻辑。从图5(b)中心 Start 的位置开始,分别控制  $\alpha$  轴和  $\beta$  轴两台电机以箭头的方向依次改变  $X-Y$  平面与  $Y-Z$  平面的光轴倾角,以实现光轴倾角在  $12 \text{ mrad} \times 12 \text{ mrad}$  的范围内的调整,即在  $X-Y$  平面与  $Y-Z$

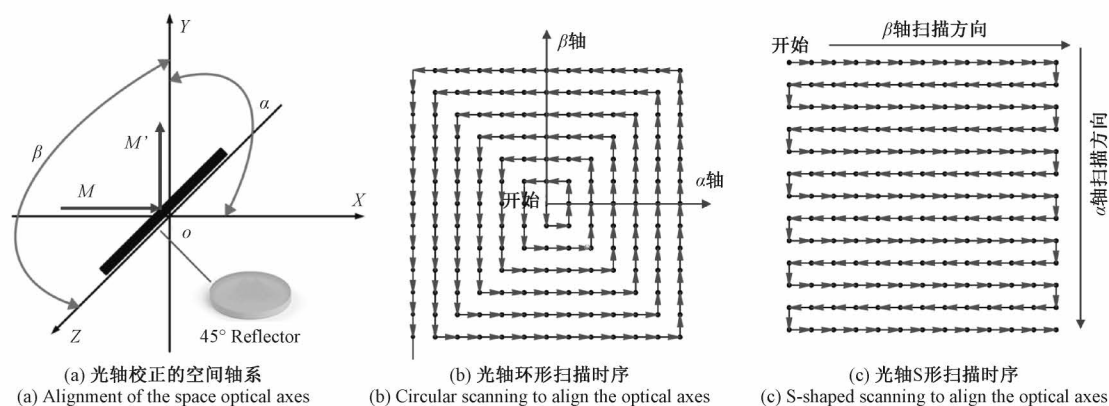


图5 非同轴激光雷达系统发射与接收光轴倾角自校正的原理图

Fig. 5 Schematic diagram of the self-alignment method to adjust the axes inclination angle between the transmitter and receiver of the non-coaxial lidar system

平面上均以初始点向两边分别扫描 6 mrad。粗扫描步角距设置为定值 0.4 mrad, 因此可以计算得到粗扫描点数为 961 个, 粗扫描将耗时 961 s。在粗扫描的过程中, 数据采集系统将记录每一扫描位置处的大气回波信号数据并进行计算处理得到每一个位置处的校正判据值。当发射光轴校正平台完成激光发射光轴的粗扫描后将得到 961 个扫描点处的校正判据值, 首先找出校正判据值最大的扫描点  $S_1$ , 然后在与  $S_1$  点相邻的 9 个点中找出校正判据值为次大值的扫描点  $S_2$ , 再在可以与扫描点  $S_1$  与  $S_2$  构成矩形的 4 个相邻点中找出校正判据值为第 3 大值的扫描点  $S_3$ , 最后将可以与扫描点  $S_1$ 、 $S_2$  与  $S_3$  构成矩形的扫描点记为  $S_4$ 。此时可确定此 0.4 mrad×0.4 mrad 倾角范围内的大气回波信号质量较高, 其也被确定为激光发射场光轴的细扫描范围。

细扫描的范围已经由粗扫描的结果确定, 可以从边缘点开始进行扫描, 其扫描逻辑采用 S 形时序。从图 5(c) 中左上角 Start 的位置开始, 分别控制  $\alpha$  轴和  $\beta$  轴两台电机以箭头的方向依次改变  $X$ - $Y$  平面与  $Y$ - $Z$  平面的光轴倾角, 以寻找粗扫描所判定的大气回波信号质量较高的 0.4 mrad×0.4 mrad 倾角范围内的最佳倾角位置。细扫描的步角距越小, 自校正的精度越高, 转动平台的最小调节步角距为 0.002 5 mrad, 即细扫描的步角距最小可以设置为 0.002 5 mrad。但是扫描的步角距越小, 扫描所需的时间就越长。因此, 综合考虑扫描精度与扫描时长之下, 最终将细扫描的步角距定位 0.02 mrad, 计算可得细扫描点数总计为 441 个, 细扫描将耗时 441 s。在细扫描的过程中, 数据采集系统将记录每一扫描位置处的大气回波信号数据并进行计算处理得到每一个位置处的校正判据值。当发射光轴校正平台完成激光发射光轴的细扫描后, 数据采集系统找出 441 个扫描点中的校正判据值最大的扫描点  $S_{\max}$ , 并将激光发射光轴调节至扫

描点  $S_{\max}$  处, 此时可以认为激光发射光轴与望远镜接收光轴处于平行状态, 即激光雷达收发光轴倾角为 0。

#### 4 非同轴激光雷达重叠因子的自校正及大气探测实验

西安理工大学激光雷达遥感研究中心搭建的拉曼激光雷达系统为非同轴系统结构, 利用其米散射通道搭建了如图 3 所示的激光雷达重叠因子自校正系统, 并于 2021 年 1 月 7 日夜晩开展了激光雷达重叠因子的自校正测试实验研究。图 6 分别为激光雷达系统自校正前后的大气回波信号的距离平方修正信号 (range square corrected signal, RSCS), 每组信号均为 10 个激光脉冲的累加结果, 对应的采样时间为 1 s。从图 6(a) 可以看出, 初始条件下激光雷达的发射场与接收场光轴处于失调状态, 其 RSCS 值中的大部分表现为背景噪声成分, 没有呈现出良好的随距离平方的衰减规律; 而当激光雷达收发光轴处于平行状态时 (图 6(b)), 其 RSCS 值呈现出良好的衰减规律, 与激光雷达方程相对应, 且 8 km 高度处有清晰的云层信息, 信号平滑度较好, 噪声占比较小, 相比于自校正之前激光雷达的探测性能得到了较大的提升, 能够更加有效地表达大气状态信息随高度的变化。

非同轴激光雷达重叠因子自校正之前, 首先使用激光垂准仪对望远镜接收光轴进行了校准, 使其保持在垂直接收状态, 同时激光发射光轴也进行初步的手动调节测试, 使得系统基本可以接收到大气回波信号, 即发射光轴在粗扫描的范围内即可。自校正时首先开展的是激光发射光轴的粗扫描, 将激光发射场光轴由 12 mrad×12 mrad 的范围缩小到 0.4 mrad×0.4 mrad 的细扫描范围。激光发射光轴的粗扫描采用环形扫描时序, 扫描步角距为

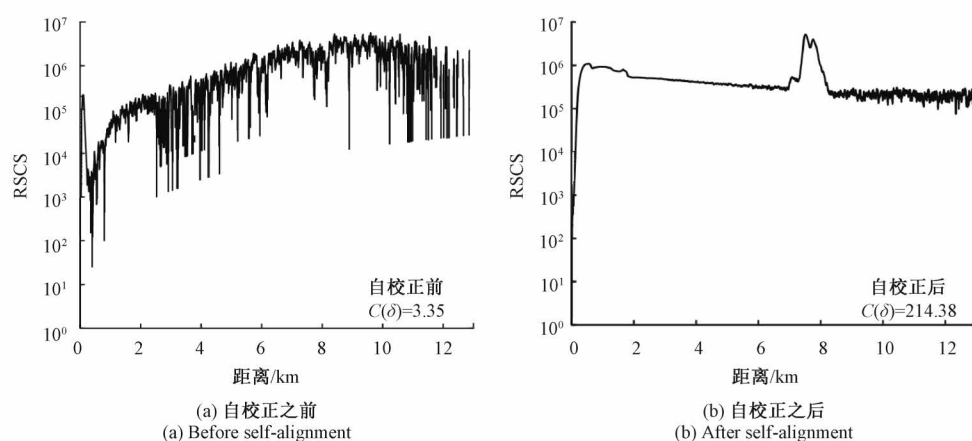


图6 大气回波距离平方修正信号

Fig. 6 Range square corrected signal

0.4 mrad, 总计 961 个扫描点。粗扫描结束后可以分别确定出 4 个扫描点  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$  与  $S_4$ , 其校正判据值分别为 91.74、21.12、18.69、14.30。图 7 分别为扫描点  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$  与  $S_4$  的 RSCS 值, 从图中可以看出, 粗扫描中校正判据值

最大的点  $S_1$  处的 RSCS 值大致呈现出一个衰减趋势, 且在 8 km 高度处存在有一云层, 而在校正判据非最大值的点  $S_2$ 、 $S_3$  与  $S_4$  处的 RSCS 值存在信号异常上升区域, 且在  $S_3$  与  $S_4$  处未探测到云层。

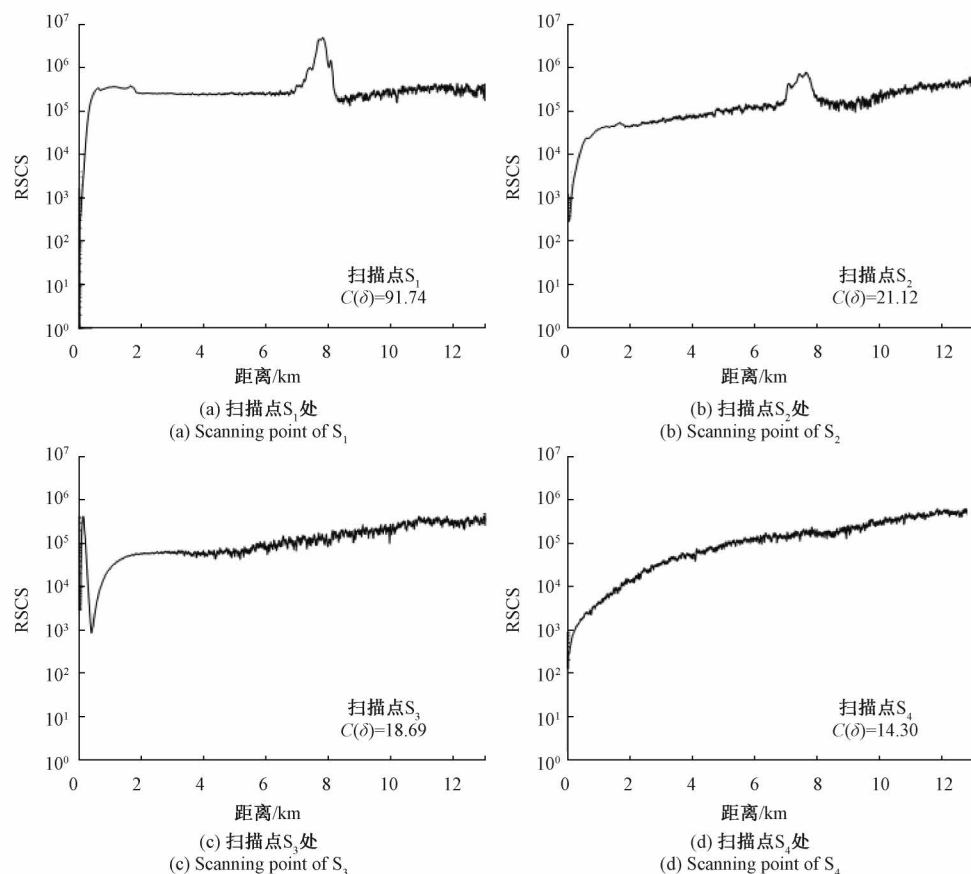


图7 粗扫描结束后定位的4个扫描点的RSCS

Fig. 7 RSCS from the scanning points of  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  and  $S_4$  after the coarse scan

粗扫描完成后,在扫描点  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$  与  $S_4$  确定的  $0.4 \text{ mrad} \times 0.4 \text{ mrad}$  倾角范围内进行激光发射光轴的细扫描,以寻找激光发射场光轴与望远镜接收视场光轴的最佳位置匹配。细扫描采用 S 形扫描时序,扫描步距角为  $0.02 \text{ mrad}$ ,总计 441 个扫描点,耗时 7 min 又 21 s。图 8 中黑色实线分别为细扫描过程中的 4 个扫描点的 RSCS 值,其中扫描点  $P_1$  处的校正判据值小于其他 3 个扫描点的,其 RSCS 值存在异常上升区域,且没有云层信息;扫描点  $P_2$  处的校正判据值大于扫描点  $P_1$  的但小于其他 2 个扫描点的,其 RSCS 值仍然未呈现良好的衰减规律但具有云层信息;扫描点  $P_3$  的校正判

据值小于扫描点  $P_4$  的但大于其他 2 个扫描点的,其 RSCS 值在  $0.5 \sim 8 \text{ km}$  之间呈现出了较好的衰减规律且具有云层信息,但探测距离  $8 \text{ km}$  以上的信号不够好;扫描点  $P_4$  的校正判据值大于其他 3 个扫描点的,其 RSCS 值相对于其他 3 个扫描点而言呈现出了较好的衰减规律,且云层信息更加详细。此外,4 幅子图中的红色虚线均为自校正完成后测得的 RSCS 值,相比于细扫描过程中的实例,最终结果的 RSCS 呈现出良好的衰减规律,且  $8 \text{ km}$  高度处有清晰的云层信息,信号平滑度较好,噪声占比小,因此证明所设计的非同轴激光雷达重叠因子自校正系统是可行的。

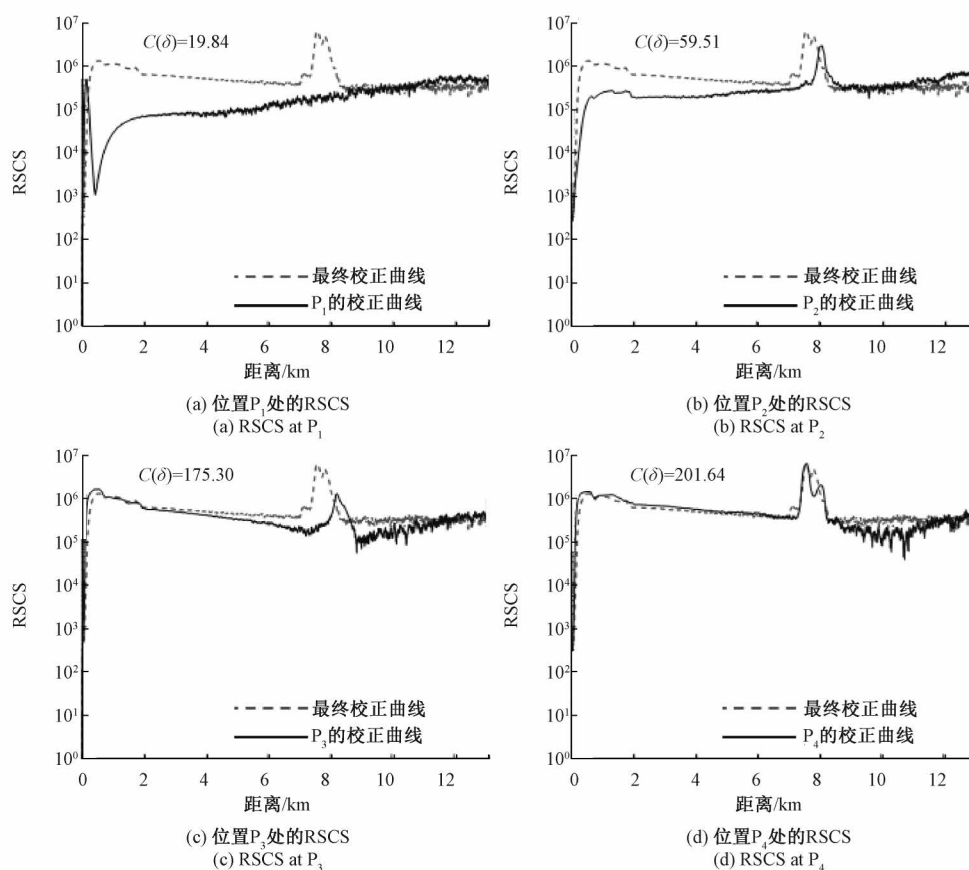


图 8 细扫描过程中的 RSCS 与最终结果的对比

Fig. 8 Four examples of RSCS at the scanning points during fine scanning and its comparison with the final result

图 9 为细扫描过程中 441 个扫描点的校正判据值的变化曲线,其中在第 85 个点处校正判据值最大为 214.38(即最终结果所对应的 RSCS),因此认为该点处激光发射光轴与望远镜接收光轴处于最佳匹配位置,最终将激光发射光轴调节至此点对应的位置。此外,图 9 中小圆圈标注的 4 个位置为图 8 中的 4 个扫描点实例所对应的位置。

激光雷达重叠因子的自校正系统需要在一个比较稳定的大气环境状态下进行。自校正过程分为粗扫描和细扫描 2 个环节,粗扫描环节需要花费较长的时间(约

16 min),而后续的细扫描仅需要 7 min 左右,基本在大气的时间尺度内。自校正结束之后,激光发射光轴将被调节至与望远镜接收光轴最佳匹配的位置处,在系统不断电的状态下,蜗轮蜗杆的自锁定功能能够保证收发光轴长时间的保持在最佳匹配的位置,由其他环境因素影响而导致的激光发射光轴的微小变动,仅需要再次启动细扫描环节进行校正即可。当系统断电后重启时,仍需要选择一个比较稳定的大气环境状态再次进行完整的粗扫描与细扫描相结合的自校正过程。

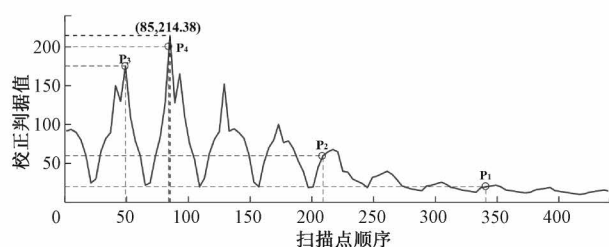


图9 细扫描过程中校正判据值的变化曲线

Fig. 9 Curve of criterion value during fine scanning

## 5 结 论

本文针对影响非同轴激光雷达探测性能的重叠因子参数,开展了重叠因子自校正系统的设计,并将其应用于激光雷达遥感研究中心的拉曼激光雷达。初步实验结果表明,自校正后的大气回波距离平方修正信号呈现出良好的衰减规律,与激光雷达方程相对应,激光雷达的探测性能相比于自校正前得到了极大的提升,可为全天时、无人值守的激光雷达大气探测提供技术支持。

激光雷达重叠因子自校正系统在硬件设计方面,采取望远镜接收光轴固定、激光发射光轴调整的方案设计。在保证望远镜接收光轴垂直接收的前提下,通过转动发射光轴校正平台及固定在其上的 $45^\circ$ 反射镜调节激光发射光轴的倾角以实现激光雷达收发光轴的最佳匹配。采用二相步进电机驱动控制蜗轮蜗杆的传动以带动 $45^\circ$ 反射镜在二维平面内的调整。数据采集系统不仅实时进行大气回波信号的数据采集,还利用校正判据向FPGA控制器发送控制命令以实现发射光轴校正平台与数据采集系统的反馈连接。在软件设计方面,综合考虑大气回波信号的信噪比、激光能量的抖动等影响因素,提出了基于大气回波信号强度的优化校正判据去探寻激光雷达系统收发光轴的最佳匹配位置。此外,综合考量校正精度和校正效率,采用了基于环形时序的粗扫描与基于S形时序的细扫描相结合的自校正方式。基于环形时序的粗扫描需要花费961 s将激光发射光轴锁定在 $0.4 \text{ mrad} \times 0.4 \text{ mrad}$ 倾角范围内,而基于S形时序的细扫描,可在441 s内实现激光发射光轴 $0.02 \text{ mrad}$ 的倾角调节精度。考虑到蜗轮蜗杆具有自锁功能,因此在发射光轴校正平台通电的情况下,基本可以较长时间保持激光发射场光轴与望远镜接收视场光轴的位置匹配。除断电后首次激光雷达系统的重叠因子调整需要粗扫描花费长时间以外,其他情况仅采用细扫描方式在7 min左右就可以实现非同轴激光雷重叠因子的优化匹配。

## 参考文献

- [1] KONG Z, MA T, CHENG Y, et al. A polarization-sensitive imaging lidar for atmospheric remote sensing[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2021, 271(107747): 1-7.
- [2] 刘东,陈斯婕,刘群,等. 星载环境探测激光雷达及其关键技术[J]. *光学学报*, 2022, 42(17): 1701001.  
LIU D, CHEN S J, LIU Q, et al. Spaceborne environmental detection lidar and its key techniques[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(17): 1701001.
- [3] 于思琪,刘东,徐继伟,等. 基于激光雷达探测的金华、合肥和兰州大气边界层高度及其统计分析[J]. *光学学报*, 2021, 41(24): 2401002.  
YU S Q, LIU D, XU J W, et al. Statistics and analysis of planetary boundary layer height retrieved by lidar over jinhua, hefei and lanzhou [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(24): 2401002.
- [4] 赵忆睿,曹念文,贾鹏程,等. 紫外多波长激光雷达的臭氧和气溶胶同步观测研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(16): 1601001.  
ZHAO Y R, CAO N W, JIA P CH, et al. Simultaneous observation of ozone and aerosol via ultraviolet multi-wavelength lidar[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(16): 1601001.
- [5] 李仕春,任腾,张鹏辉,等. Mie 散射垂直扫描激光雷达近场信号校正及反演技术[J]. *光学学报*, 2023, 43(18): 1828001.  
LI SH CH, REN T, ZHANG P H, et al. Near-field signal correction and retrieval technique for mie scattering vertical scanning lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(18): 1828001.
- [6] 徐鑫鑫. 激光雷达几何重叠因子自校正技术研究[D]. 西安:西安理工大学,2021.  
XU X X. Research on automatic correction technique of geometric overlap factor of lidar system [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2021.
- [7] SASANO Y, SHIMIZU H, TAKEUCHI N, et al. Geometrical form factor in the laser radar equation: An experimental determination[J]. *Applied Optics*, 1979, 18(23): 3908-3910.
- [8] HERBERT WALTHER. Lidar range-resolved optical remote sensing of the atmosphere[M]. Berlin: Springer Science & Business Media Inc, 2005.

- [9] 肖铃,刘东,王英俭,等. 大气探测激光雷达自动准直方法综述[J]. 大气与环境光学学报, 2016, 11(3): 161-171.
- XIAO L, LIU D, WANG Y J, et al. Survey on self-aligning method for atmospheric monitoring lidar system[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2016, 11(3): 161-171.
- [10] FIORANI L, ARMENANTE M, CAPOBIANCO R, et al. Self-aligning lidar for the continuous monitoring of the atmosphere[J]. Applied Optics, 1998, 37(21): 4758-4764.
- [11] XUAN W, ARMENANTE M, CAPOBIANCO R, et al. Self-aligning lidar system and its application [J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 1998, 3504: 31-40.
- [12] BO L, FAN Y, CHANG M Y. Methods for optical adjustment in lidar systems[J]. Applied Optics, 2005, 44(8): 1480-1484.
- [13] 谭锟,邵石生. 一种车载激光雷达自动准直系统[J]. 大气与环境光学学报, 2008, 3(5): 344-348.
- TAN K, SHAO SH SH. A self-alignment system of a mobile lidar[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2008, 3(5): 344-348.
- [14] 宋跃辉,鲁雷雷,华灯鑫,等. 同轴米散射激光雷达自动准直系统设计[J]. 中国激光, 2016, 43(7): 239-247.
- SONG Y H, LU L L, HUA D X, et al. Design of auto collimation system for coaxial mie lidar [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(7): 239-247.
- [15] PAOLANTONIO M, DIONISI D, LIBERTI G L. A semi-automated procedure for the emitter-receiver geometry

characterization of motor-controlled lidars [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2022(5): 1217-1231.

- [16] 丁红波,王珍珠,刘东. 激光雷达信号去噪方法的对比研究[J]. 光学学报, 2021, 41(24): 9-18.

DING H B, WANG ZH ZH, LIU D. Comparison of de-noising methods of lidar signal[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(24): 9-18.

## 作者简介



闫庆, 2008 年于西安理工大学获得学士学位, 2011 年于西安理工大学获得硕士学位, 2016 年于西安理工大学获得博士学位, 现为西安理工大学讲师, 主要研究方向为激光雷达技术及光电检测技术。

E-mail: yanqing@xaut.edu.cn

**Yan Qing** received his B. Sc. degree from Xi'an University of Technology in 2008, M. Sc. degree from Xi'an University of Technology in 2011, and Ph. D. degree from Xi'an University of Technology in 2016. He is currently a lecturer at Xi'an University of Technology. His main research interests include lidar technology and photoelectric detection technology.



高飞(通信作者), 斯洛文尼亚新戈里察大学博士, 西安理工大学机械与精密仪器工程学院副院长, 教授、博士生导师, 主要从事激光雷达遥感方面的研究。

E-mail: gaofei@xaut.edu.cn

**Gao Fei** (Corresponding author) received his Ph. D. degree from the University of Novo Gorica, Slovenia. He is currently the vice dean of the School of Mechanical and Precision Instrument Engineering at Xi'an University of Technology. He is a professor and a Ph. D. advisor. He is mainly engaged in the research of LiDAR remote sensing.