

大气环境下基于目标照明回光的视轴误差校正实验研究

谭毅 耿超 李新阳 罗文 罗奇

Experimental research of boresight error correction using returning signals from the illuminated targets through atmosphere

Tan Yi Geng Chao Li Xin-Yang Luo Wen Luo Qi

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 64, 024216 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.024216

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.024216>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I2>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

背景辐射对被动测距精度影响分析及实验研究

Influence of background radiation on the precision of passive ranging

物理学报.2015, 64(3): 034216 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.034216>

湍流介质折射率结构常数 C_n^2 对双半高斯空心光束传输特性影响的研究

Effects of turbulent medium refractive index structure constant C_n^2 on the propagation characteristics of double-half hollow Gaussian beams

物理学报.2014, 63(16): 164208 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.164208>

自加速类贝塞尔-厄米-高斯光束的理论和实验研究

Theoretical and experimental study on self-accelerating Bessel-like Hermite-Gaussian beams

物理学报.2014, 63(4): 044204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.044204>

基于大气氧光谱吸收特性的单目单波段被动测距

Mono-station and single-band passive ranging based on oxygen spectrum

物理学报.2013, 62(14): 144210 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.144210>

多轴差分吸收光谱技术测量近地面 NO_2 体积混合比浓度方法研究

Retrieval of surface NO_2 mixing ratio from multi-axis differential optical absorption spectroscopy

物理学报.2013, 62(4): 044216 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.044216>

大气环境下基于目标照明回光的视轴误差校正实验研究*

谭毅¹⁾²⁾³⁾ 耿超¹⁾²⁾ 李新阳^{1)2)†} 罗文¹⁾²⁾³⁾ 罗奇¹⁾²⁾³⁾

1)(中国科学院自适应光学重点实验室, 成都 610209)

2)(中国科学院光电技术研究所, 成都 610209)

3)(中国科学院大学, 北京 100049)

(2014年5月21日收到; 2014年7月4日收到修改稿)

理论分析了激光瞄准系统中视轴误差与目标照明回光的关系。介绍了同时具备激光束发射与瞄准偏差校正功能的自适应光学器件——自适应光纤准直器的原理。搭建了光束经200 m水平大气传输的激光瞄准实验平台。基于二维目标和三维目标的照明回光, 利用随机并行梯度下降算法分别实现了不同初始视轴误差下的瞄准闭环校正。实验结果表明, 闭环后二维目标和三维目标的视轴校正残差评价参数分别小于6% 和10.8%, 校正精度均在理论范围内。最后, 分析了算法参数对动目标瞄准的影响。

关键词: 激光瞄准, 视轴误差, 自适应光纤准直器, 随机并行梯度下降算法

PACS: 42.68.Ay, 42.68.Wt, 42.79.Ag

DOI: 10.7498/aps.64.024216

1 引言

激光瞄准是主动照明、主动跟踪、自由空间激光通信等领域的关键技术。实际激光瞄准系统由于初始对准误差、瞄准系统的机械振动、大气湍流等因素的影响, 一般都存在两种基本的瞄准误差: 1) 静态的系统误差, 即光束瞄准目标时的静态视轴对准误差; 2) 由于受机械振动和大气湍流等影响产生的抖动误差, 是随时间快变化的动态随机抖动误差。由于这些误差的存在, 激光束很难精确对准目标, 如何补偿这些误差成为迫切需要解决的问题。

1993年到1999年, 美国空军研究实验室进行了一系列低功率激光照明低轨道卫星并探测目标回光的实验, 通过分析回光数据, 提出了一种基于目标回光的激光瞄准方法^[1,2]。该方法建立在已知光束轮廓和目标反射率、且光斑尺寸大于目标尺寸的基础上, 通过分析回光信号得到光斑相对目标的空间位置。由于只利用目标上的漫反射光, 所以这

种方法不需要在目标处设置传感器, 这也符合许多应用中的实际情况。基于此方法, 研究人员提出了多种实现方式: 2000年, Lukesh等^[2]应用Key率法和卡方检验法建立了实时数据分析模型并从仿真和实验两个方面验证了该方法的可行性; 2004年到2006年期间, Chandler和Lukesh^[3-5]也提出了回光信号统计算法, 可解算出光束视轴误差的大小, 并以此来补偿视轴偏差; 2006年, Borah等^[6,7]以严格概率理论为基础提出了极大似然估计算法, 与Key率法和卡方检验法相比, 大大降低了算法的复杂度, 具有更高的实用性; 2007年, Gudimetla和Riken^[8]提出了通过矩匹配的方法直接计算出静态视轴误差和抖动误差, 并在2011年用这种方法实现了非对称视轴误差和抖动误差的校正^[1]; 2011年, 国内的张宇等^[9]从迭代寻优的角度出发, 提出了应用随机并行梯度下降算法(SPGD算法)来校正视轴误差, 并完成了室内实验且对校正精度进行了分析; 2012年, 周磊等^[10]利用另一种寻优算法

* 国家自然科学基金(批准号: 61205069, 61138007)资助的课题。

† 通信作者。E-mail: xyl@ioe.ac.cn

——爬山法也实现了室内闭环瞄准实验并分析了校正精度。

上述实现方式大体可分为两类, 第一类以最优估计理论为基础^[1-8], 通过快速估计偏差大小来补偿视轴误差, 但该方法需要已知目标轮廓和反射率、远场光束分布及光束传输参数, 在实际应用中受到一定限制; 第二类迭代寻优的方式^[9,10], 只需保证光束尺寸大于目标尺寸, 而无须知道其他量化信息, 实现起来较为容易。但到目前为止, 迭代寻优的方法也只实现了室内演示实验, 而未见经过实际大气传输的实验报道。本文以自适应光纤准直器作为光束发射和校正装置, 利用SPGD算法, 实现了光束经200 m水平大气传输后照射到二维目标和三维目标上的视轴误差校正实验, 并对实验结果进行了分析和总结。

2 视轴误差与回光光强关系的理论研究

激光束由发射装置发射, 经湍流大气传输照射到目标上, 目标的漫反射光在空间自由传播, 一部分漫反射光进入成像接收孔径, 这部分光即为目标照明回光。根据文献[8], 目标照明回光可表示为

$$I_r = I_z(x_b + x_j, y_b + y_j) \cdot OCS \times \Omega_{RX} \tau_{\alpha}^{\sec \psi} \tau_{o.RX} \left(\Delta t \frac{\lambda}{hc} \right), \quad (1)$$

其中, I_z 为光束传输距离 z 后的光斑光强分布; x_b , y_b 为视轴误差; x_j , y_j 为随机抖动误差; OCS 为目标的光学横截面, Ω_{RX} 为接收口径对目标的张角, $\tau_{\alpha}^{\sec \psi}$ 为天顶角 ψ 对应的大气损耗, $\tau_{o.RX}$ 为接收孔径的光学损耗, Δt 为成像相机的曝光时间, λ 为波长, h 为普朗克常数, c 为真空光速。

为了简化(1)式, 需要做一系列的模型简化。首先, 假设光束发射和接收系统的参数固定; 其次, 假设目标反射系数为常数; 再次, 根据统计光学理论, 大气湍流、机械振动等因素会使得到达目标平面的光强积分近似为高斯分布。在这些假设条件下, (1)式可以简化为

$$I_r = \alpha \iint_{\Sigma} \beta \frac{1}{2\pi\Omega^2} \exp \left[-\frac{1}{2\Omega^2} [(x + x_b + x_j)^2 + (y + y_b + y_j)^2] \right] dx dy, \quad (2)$$

其中 α 为整个传输过程中的增益系数, Σ 为光斑轮廓中的目标部分, β 为高斯光斑的幅值增益系数, Ω

为高斯分布标准差。不失一般性, 假设目标为边长 L 的正方形, 且只在 y 方向存在一个大小为 B 的视轴误差, 如图 1(a) 所示。则(2)式中各参数的取值为: $x_b = 0$, $x_j = 0$, $y_b = B$, $y_j = 0$, Σ 为正方形区域。因此, (2) 式可具体表示为

$$I_r = \alpha \beta \frac{1}{2\pi\Omega^2} \iint_{\Sigma} \exp \left[-\frac{x^2 + (y + B)^2}{2\Omega^2} \right] dx dy, \quad (3)$$

(3) 式经化简得

$$I_r = \alpha \beta \left[\phi \left(\frac{\bar{L}}{2} \right) - \phi \left(-\frac{\bar{L}}{2} \right) \right] \times \left[\phi \left(\bar{B} + \frac{\bar{L}}{2} \right) - \phi \left(\bar{B} - \frac{\bar{L}}{2} \right) \right], \quad (4)$$

其中, $\bar{L} = L/\Omega$, $\bar{B} = B/\Omega$ 分别为被光斑参数 Ω 归一化后的目标大小和视轴误差; $\phi(x)$ 为标准正态分布函数。

假设归一化目标大小 $\bar{L} = 1$, 根据(4)式计算得到目标照明回光光强随视轴误差变化的曲线如图 1(b) 所示。从图 1(b) 可以看出, 若视轴误差为 0, 则接收到的目标回光光强最强; 在关于视轴误差 0 点对称的两个视轴误差下, 接收到的回光光强值是

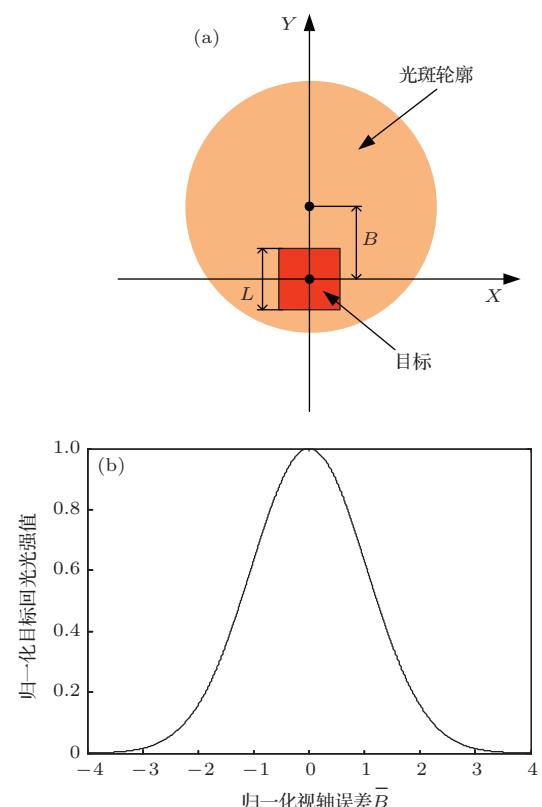


图 1 (a) 目标与光斑相对位置示意图; (b) 视轴误差与归一化回光光强关系

相同的。因此,如果只估计出视轴误差的大小,而不知道其方向,校正是无法完成的,这也是用概率统计方法校正视轴误差不可避免的一个问题。迭代寻优方法则不存在这个问题,因为它的原理是只要将回光光强值校正到最大,就认为视轴误差为0,这正好符合前面的理论分析结果,即视轴误差为0时,回光光强最大。在实际应用中,由于存在大气湍流、机械振动等,图1(b)的曲线会出现局部小幅波动,会对迭代寻优算法造成一定的影响,可以通过适当调节算法的参数来避免算法陷入局部最优。

3 自适应光纤准直器的工作原理

自适应光纤准直器是一种同时具备光束发射和光束倾斜校正功能的自适应光学器件,可以在亚毫弧度范围内实现出射准直激光束方向的快速、高精度调节。该器件由美国陆军研究实验室的Beresnev等^[11]于2005年首次提出。中国科学院自适应光学重点实验室的耿超等^[12-17]研制了该器件,并

将其应用于光纤激光光束合成中,校正阵列光束间的倾斜像差。

自适应光纤准直器由基座、两对双压电驱动器、柔性十字梁及准直镜头组成,结构如图2(a)所示。光纤端面固定于十字梁的中心,由在X, Y方向布置的两对双压电驱动器驱动,在准直镜头的焦平面内平移。出射光束经透镜准直后产生方向上的变化。准直镜头的焦距为f,光纤端面在准直镜头的焦平面内沿X轴(或/和Y轴)偏移 Δx ,则出射激光相对于光轴的偏转角度 φ 可表示为^[10-17]

$$\varphi = \arctan(\Delta x/f) \approx \Delta x/f. \quad (5)$$

实验中所用的自适应光纤准直器为自行研制,出射光束口径为28 mm。对该器件的驱动电压-光束偏转角特性进行了测试,如图2(b)所示,在±400 V电压下,实现了±0.5 mrad的光束偏转量,单位电压偏移量为1.25 $\mu\text{rad}\cdot\text{V}^{-1}$;自适应光纤准直器的频率响应特性曲线如图2(c)所示,器件的第一阶谐振频率约为1.85 kHz。

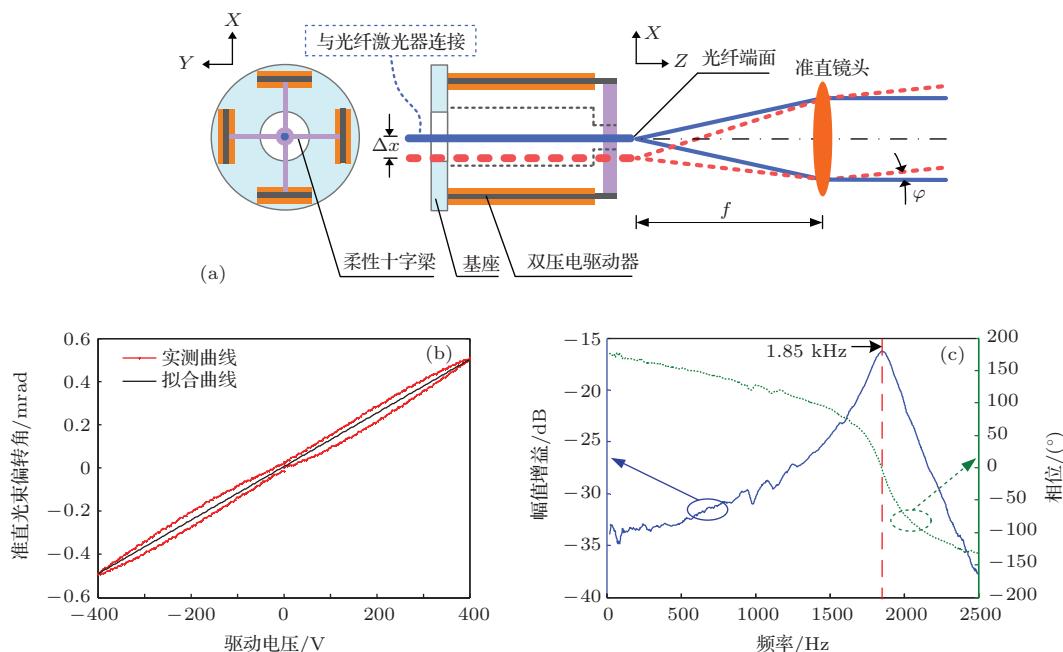


图2 (网刊彩色) 自适应光纤准直器的工作原理与性能测试曲线 (a) 结构示意图; (b) 驱动电压-光束偏转角特性曲线; (c) 频率响应特性曲线

4 视轴误差与回光光强关系的实验验证

激光瞄准实验中,基于目标照明回光的视轴误差校正系统如图3所示。种子光源的波长为1064 nm,激光束依次通过光纤放大器和自适应光

纤准直器,形成平行光束发射。光束经200 m水平大气传输后,照射并瞄准目标。目标的一部分漫反射光经过相同的大气通道后向传输,到达激光发射端的成像接收系统(由卡塞格林望远系统和高速CMOS相机组成)。计算机处理CMOS相机采集的目标端图像并产生控制信号,控制自适应光纤准直器实现发射激光束的偏转。在目标附近,利用带镜

头的CCD相机实时观测发射激光束与目标的相对位置。激光束的发射口径为28 mm, 根据光束传输理论^[18], 目标处的理论光斑直径为36.8 mm, 而实测光斑直径约为40 mm, 大于理论值, 这主要是激光束不完全准直导致的。实验中将CMOS相机采集图像的灰度值积分作为目标照明回光光强值。

控制自适应光纤准直器的驱动电压, 改变光斑相对于目标的位置, 实验测得了目标照明回光与视轴误差的对应关系。光斑在目标处的扫描规则如

图4(a)所示。实验中所用目标为一直径14 mm的圆形纸片。扫描过程中CMOS相机采集到的回光光强序列(图像的灰度值积分)如图4(b)所示。

将回光光强序列按照对应的光束偏转角度进行二维排布, 如图5(a)所示。其中, X, Y方向中心横截线的一维光强分布如图5(b)所示。回光光强的最大值不在光束偏转角度为零的位置, 这是由于纸片的初始位置不在光斑中心导致光束偏转角度零点与视轴误差零点不重合。从回光强度的二维排

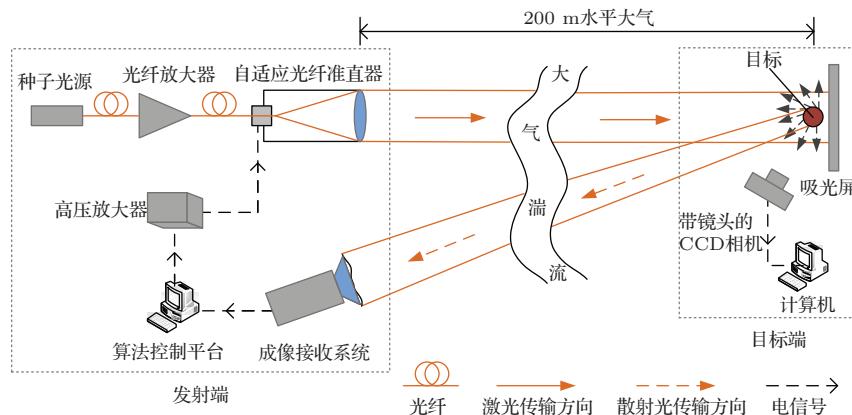


图3 实验装置示意图

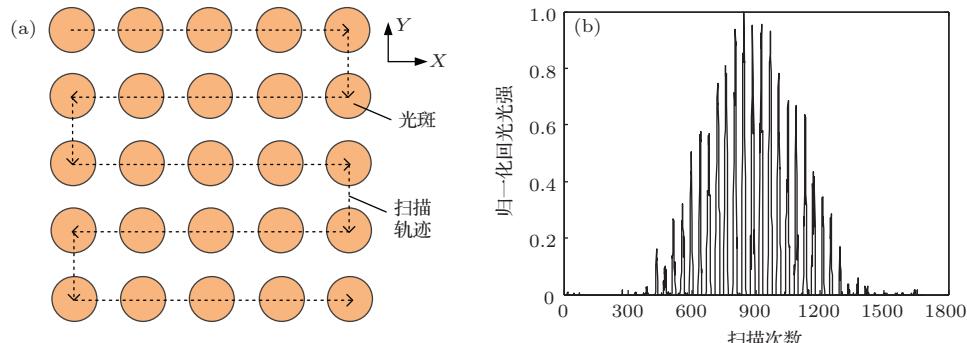


图4 扫描规则及回光光强序列 (a) 扫描规则示意图; (b) 回光光强序列图

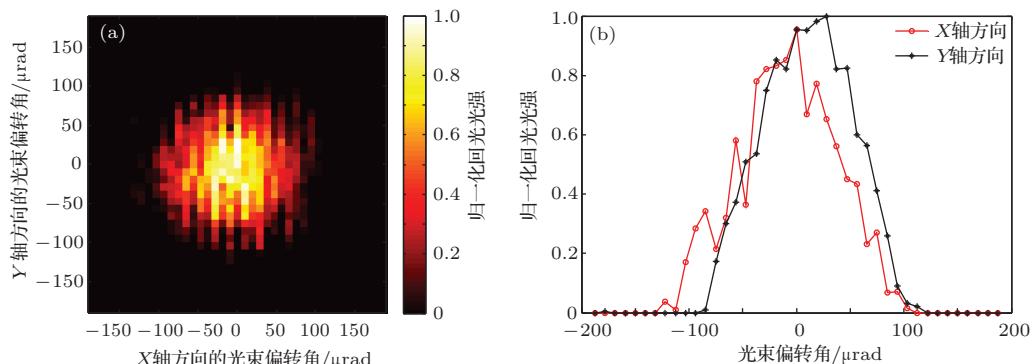


图5 (网刊彩色) 回光光强二维排布及中心横截线 (a) 按光束扫描角排布的目标回光光强二维分布图; (b) 沿X轴和Y轴方向的中心横截线

列可以看出,回光光强随视轴误差变换的规律基本呈高斯型分布,即视轴误差越大,回光光强越小,无视轴误差时回光光强最强,与第二节的理论分析结果一致。图5(b)中出现了一些凹陷点,即视轴误差减小,回光光强反而变弱了,这是由于大气湍流导致的光斑闪烁等因素引起的。

5 视轴误差校正实验

选择SPGD优化算法^[19,20]作为激光瞄准闭环控制算法,分别对二维目标和三维目标进行了视轴误差校正实验。SPGD控制算法的迭代过程可表述为:

- 1) 随机生成一组均值为零、服从伯努利分布的微小电压扰动 ΔU ;
- 2) 将电压控制信号 $U + \Delta U$ 作用于自适应光纤准直器,成像接收系统采集一帧远场光斑图像,计算灰度值积分并赋予 J_+ ; 再将电压控制信号 $U - \Delta U$ 作用于自适应光纤准直器,采集图像计算灰度值积分并赋予 J_- ;
- 3) 将控制电压信号更新为 $U = U + \gamma \Delta U (J_+ - J_-)/2$, 其中 γ 为 SPGD 算法的增益系数;
- 4) 回到步骤1并进入下一次算法迭代。

本实验中,SPGD算法的迭代速率约为25 Hz。二维目标实验中SPGD算法的增益系数 $\gamma = 0.014$,随机扰动幅值 $\Delta U = \{0.0016, 0.0016\}$; 三维目标实验中SPGD算法的增益系数 $\gamma = 0.012$,随机扰动幅值 $\Delta U = \{0.0013, 0.0013\}$ 。

5.1 二维目标

二维目标选择为一直径14 mm的圆形纸片(如图6(a)中小插图所示),其视轴误差校正实验分为两个阶段。第一阶段是给自适应光纤准直器施加初始偏置电压并采集300帧的开环回光值;第二阶段是SPGD闭环过程,系统开环时,粗调节纸片的位置,使其基本位于光斑的中心,通过预置自适应光纤准直器的驱动电压值,对激光束设置了四组不同的初始视轴误差,对每组视轴误差进行两次校正。

图6显示了自适应光纤准直器的初始偏置电压为-70 V, 70 V时二维目标开环和闭环的回光光强变化曲线(以CMOS相机接收到的图像灰度值积分表示),以及开环和闭环时目标与光斑的相对位置。另外三种初始偏置电压的校正结果与图6类似,这里不再列出。

从图6中开环和闭环光斑与目标的相对位置可以直观地看出,视轴误差得到了较好的校正,光斑已完全照射到目标上。开环时,光斑没有照射到目标上也能隐约看到光斑的位置,这是由于背景屏吸光不够彻底。

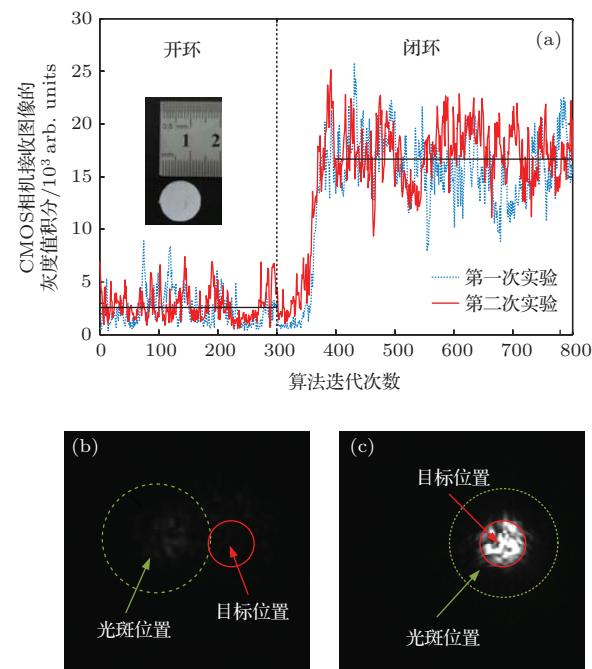


图6 (网刊彩色) 自适应光纤准直器的初始偏置电压为-70 V, 70 V时回光光强迭代曲线及校正结果(二维目标) (a) 校正前后回光光强值变化曲线; (b) 校正前光斑与目标的相对位置; (c) 校正后目标与光斑的相对位置

根据开闭环目标回光值曲线,定量计算了开环回光光强均值 $aveo$ 和闭环稳定后的回光光强均值 $avec$, 闭环稳定后回光光强抖动的 PV 值和 RMS 值, 以及回光光强抖动的 RMS 值与闭环稳定后回光光强均值的比值(这里用 τ 表示)。对每种初始偏置电压,将两次实验的数据合并在一起进行计算。定量计算结果列于表1。

从表1列出的计算结果可以看出,闭环后目标回光光强均值较开环基本提高了一个数量级。闭环稳定后的 PV 值基本与闭环稳定后的回光光强均值相当,说明闭环稳定后回光光强抖动较剧烈, RMS 值及 τ 也体现出了这点。对二维目标,闭环稳定后的光强抖动主要来自两个方面:一是SPGD算法本身是一种抖动算法,闭环过程中自适应光纤准直器一直在被施加扰动电压,造成光束方向抖动,从而导致探测到的回光光强值抖动;另一个是大气湍流造成的光斑闪烁,也会导致回光光强值的抖动。

表1 二维目标视轴误差校正的评价参数计算结果

初始偏置电压/V		<i>aveo</i>	<i>avec</i>	<i>PV</i>	<i>RMS</i>	$\tau/\%$
-70	-70	1.729×10^3	1.692×10^4	1.944×10^4	2.957×10^3	17.5
-70	70	2.593×10^3	1.667×10^4	1.785×10^4	2.807×10^3	16.8
50	-50	5.157×10^3	1.581×10^4	1.574×10^4	2.4×10^3	15.2
70	70	0.973×10^3	1.626×10^4	1.639×10^4	2.456×10^3	15.1

5.2 三维目标

三维目标为一正投影边长18 mm的铝块(如图7(a)中小插图所示),其实验过程与二维目标相同,开环时采集了200帧回光光强值,闭环时进行了500次迭代,采集了500帧回光光强值。系统开环时,粗调节铝块的位置,使其基本位于光斑的中心,通过预置自适应光纤准直器的驱动电压值,对激光束设置了四组不同的初始视轴误差,对每组视轴误差进行两次校正。

图7显示了自适应光纤准直器的初始偏置电压为-40 V,40 V时三维目标开环和闭环的回光光强曲线(以CMOS相机接收到的图像灰度值积分表示),以及开环和闭环时目标与光斑的相对位置。另外三种初始偏置电压的校正结果与图7类似,这里不再列出。

从图7及表2可以看出,三维目标的视轴误差也得到了较好的校正,回光光强值从开环到闭环提高了一个数量级。从*PV*值、*RMS*值及 τ 值可以看出回光光强抖动依然剧烈,除了在二维目标校正中提到的两个因素外,另一个原因是三维目标不同面的正对方向不同,且不同面的表面粗糙度也存在

差异,倾斜抖动会使光束照射到三维目标的不同面上,导致回光光强发生较大的变化。

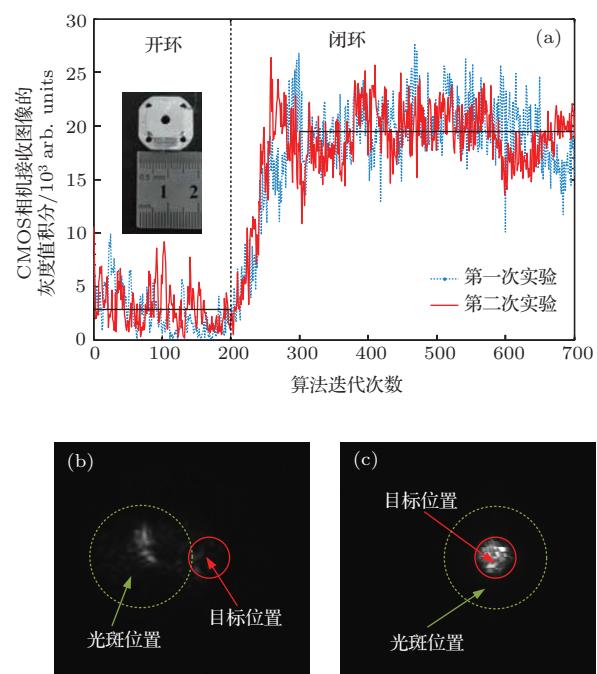


图7 (网刊彩色) 自适应光纤准直器的初始偏置电压为-40 V, 40 V时回光光强迭代曲线及校正结果(三维目标) (a) 校正前后回光光强值变化曲线; (b) 校正前光斑与目标的相对位置; (c) 校正后目标与光斑的相对位置

表2 三维目标视轴误差校正的评价参数计算结果

初始偏置电压/V		<i>aveo</i>	<i>avec</i>	<i>PV</i>	<i>RMS</i>	$\tau/\%$
-50	-50	3.385×10^3	2.304×10^4	1.728×10^4	2.471×10^3	10.7
-40	40	2.816×10^3	1.944×10^4	1.766×10^4	2.631×10^3	13.5
90	-90	2.517×10^3	1.898×10^4	1.401×10^4	2.362×10^3	12.4
80	80	2.776×10^3	2.11×10^4	1.643×10^4	2.778×10^3	13.2

6 校正精度与动目标瞄准

由于光束抖动误差的存在,用探测器直接测量视轴残差比较困难,这里通过分析自适应光纤准直

器的驱动电压值来计算校正后的视轴残差^[9]。具体方法为:首先求出每次实验闭环稳定后的电压均值,然后对所得8次电压均值再求平均,以此值作为与视轴误差零点对应的自适应光纤准直器的驱动电压;然后求得各次实验的残余电压,并将其转

化为角度误差, 该角度误差就是视轴残差。为了更直观地描述光斑与物体的相对位置, 将角度表示的视轴残差换算成光斑中心偏离目标的距离, 并计算出该距离与光斑直径的比值, 将这一比值作为视轴残差的评价参数, 用公式表示为

$$pr = \frac{err \cdot dis}{D} \times 100\%, \quad (6)$$

其中, pr 为视轴残差评价参数, err 为角度表示的视轴残差, dis 为光束的传输距离, D 为目标平面处的光斑直径。实验中, 光束传输距离为 200 m, 目标平面处的实测光斑直径为 40 mm。二维目标和三维目标八次实验的视轴残差评价参数计算结果如表 3 和表 4 所示。

根据文献 [21] 的分析, 在知道圆孔衍射光斑的情况下, 可通过如下公式来计算高斯分布的标准

差:

$$\Omega \approx 0.179D, \quad (7)$$

其中, Ω 为高斯分布标准差, D 为衍射光斑直径。实验中, $D = 40$ mm, 计算得 Ω 为 7.16 mm, 则归一化二维目标大小为 1.96, 归一化三维目标大小为 2.52。根据第 5 节的计算结果, 对于二维目标, 8 次实验的平均 τ 值为 16.2%; 对于三维目标, 8 次实验的平均 τ 值为 12.5%。由第 2 节中的(4)式可计算出当归一化目标大小为 1.96 时, 回光光强下降到 16.2% 对应的归一化视轴误差范围为 ± 0.709 , 换算成视轴残差评价参数为 $\pm 12.7\%$ 。同理, 三维目标的视轴残差评价参数的理论值为 $\pm 11.5\%$ 。图 8 为视轴残差评价参数的实际分布图, 虚线圆圈为视轴残差评价参数的理论值。其中图 8(a) 对应二维目标, 图 8(b) 对应三维目标。

表 3 视轴残差评价参数计算结果(二维目标)

初始偏置电压/V	-70, -70		-70, 70		50, -50		70, 70	
校正次数	1	2	3	4	5	6	7	8
X 轴方向的视轴残差评价参数/%	0.63	3.88	-3.88	0	-2.38	2.5	-2.44	2.94
Y 轴方向的视轴残差评价参数/%	2.44	-0.94	-0.16	-1.38	5.5	4.19	-4.56	-4.56

表 4 视轴残差评价参数计算结果(三维目标)

初始偏置电压/V	-50, -50		-40, 40		90, -90		80, 80	
校正次数	1	2	3	4	5	6	7	8
X 轴方向的视轴残差评价参数/%	2.5	3	1.63	-4.25	-2.25	-2.31	1.44	0.06
Y 轴方向的视轴残差评价参数/%	7.19	-1.81	-0.44	-9.75	2.31	2.75	3.88	-4

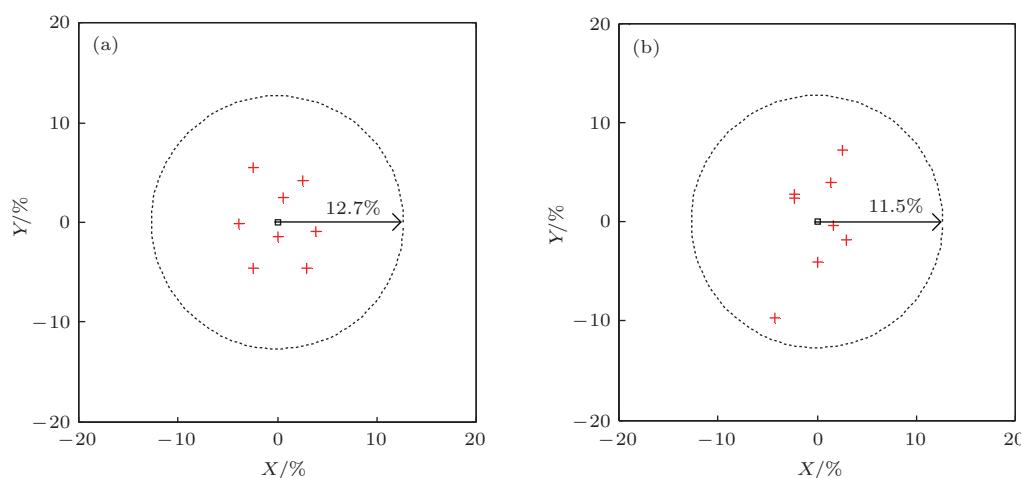


图 8 二维目标 (a) 和三维目标 (b) 的视轴残差评价参数分布图

从图8可以看出,二维目标和三维目标的校正精度均在理论范围内。二维目标校正后的视轴残差评价参数小于6%,三维目标校正后的视轴残差评价参数小于10.8%。影响视轴误差校正精度的因素主要有以下三个:1)大气湍流引起光斑闪烁,造成回光光强波动;2)激光发射功率不稳定,使接收到的回光光强发生变化;3)算法的有效带宽较低。三维目标的校正精度低于二维目标,这是不同材料的表面粗糙度和反射率不一样,以及三维目标的结构特点等因素造成的。

在视轴误差校正的基础上,进行了针对动目标的瞄准实验,动目标选择为14 mm直径的圆形纸片。首先手动粗略调节目标位于光斑中心,然后让目标以一定的角速度运动,利用SPGD算法进行光束瞄准。三种控制参数下回光光强与目标运动角速度的关系曲线如图9所示。图9显示,第一种参数(扰动幅值为0.013,增益系数为0.0013)下能瞄准角速度小于 $10 \mu\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ 的目标,第二种参数(扰动幅值为0.013,增益系数为0.0025)下能瞄准角速度小于 $20 \mu\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ 的目标,第三种参数(扰动幅值为0.025,增益系数为0.0025)下能瞄准角速度应小于 $30 \mu\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ 的目标。在能瞄准目标的角速度范围内,第一种参数的回光光强均值大于第二和第三种参数,说明较低的增益系数可以实现较高的瞄准精度;三种参数能瞄准目标的角速度范围越来越大,说明增大扰动幅值或增益系数能瞄准以更快角速度运动的目标。

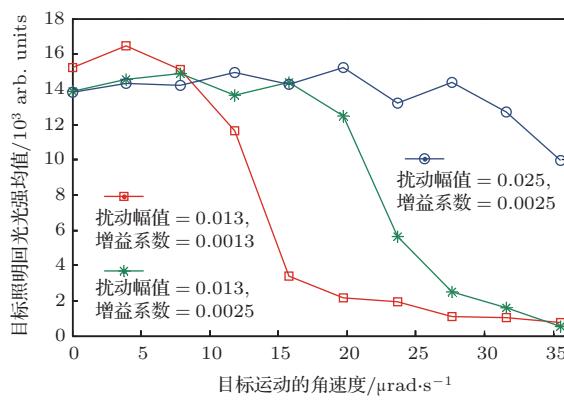


图9 目标运动角速度与回光光强的关系

7 结 论

搭建了激光束经200 m水平大气传输的激光瞄准实验平台,研究了自适应光纤准直器同时作为激光发射和视轴误差校正器件的可行性。理论推导并实验验证了激光视轴误差与目标回光光强的关

系。实验结果表明,基于SPGD算法的闭环控制系统有效地校正了二维目标和三维目标的视轴误差,闭环后的目标回光光强较开环时提高了约一个数量级,二维目标和三维目标的视轴校正残差评价参数分别小于6%和10.8%,校正精度均在理论范围内。对动目标的瞄准实验发现,较小的增益系数能实现较高的瞄准精度,而较大的扰动幅值或增益系数能实现较快运动目标的瞄准。今后,将分析目标尺寸、表面形态等对视轴误差校正精度的影响,并对动目标的瞄准闭环控制带宽展开研究。

参考文献

- [1] Gudimetla V S R, Riker J F 2011 *Appl. Opt.* **50** 1124
- [2] Lukesh G, Chandler S, Voelz D 2000 *Appl. Opt.* **39** 1359
- [3] Chandler S, Lukesh G, Voelz D, Basu S, Sjogren J 2004 *Proc. SPIE* **5552** 105
- [4] Basu S, Voelz D, Chandler S, Lukesh G, Sjogren J 2004 *Proc. SPIE* **5552** 114
- [5] Chandler S, Lukesh G 2006 *Proc. SPIE* **6160** 61600M
- [6] Borah D K, Voelz D, Basu S 2006 *Appl. Opt.* **45** 2504
- [7] Borah D K, Voelz D 2007 *Appl. Opt.* **46** 6010
- [8] Gudimetla V S R, Riker J F 2007 *Appl. Opt.* **46** 5608
- [9] Zhang Y, Li X Y, Rao C H 2011 *Chinese Journal of Lasers* **38** 0402011 (in Chinese) [张宇, 李新阳, 饶长辉 2011 中国激光 **38** 0402011]
- [10] Zhou L, Ren G, Tan Y, Tang T, Yu W 2012 *Acta Optica Sin.* **32** 1201003 (in Chinese) [周磊, 任戈, 谭毅, 唐涛, 于伟 2012 光学学报 **32** 1201003]
- [11] Beresnev L A, Vorontsov M A 2005 *Proc. SPIE* **5895** 58950R
- [12] Geng C, Li X Y, Zhang X J, Rao C H 2011 *Opt. Commun.* **284** 5531
- [13] Geng C, Tan Y, Mou J B, Li X Y 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 024206 (in Chinese) [耿超, 谭毅, 牟进博, 李新阳 2013 物理学报 **62** 024206]
- [14] Geng C, Zhao B Y, Zhang E T, Luo W, Tan Y, Zhu Y G, Yang H N, Mou J B, Li X Y, Duan K L, Zhao W 2013 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **25** 1286
- [15] Geng C, Luo W, Tan Y, Liu H M, Mou J B, Li X Y 2013 *Opt. Express* **21** 25045
- [16] Geng C, Luo W, Tan Y, Liu H M, Mou J B, Li X Y 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 224202 (in Chinese) [耿超, 罗文, 谭毅, 刘红梅, 牟进博, 李新阳 2013 物理学报 **62** 224202]
- [17] Luo W, Geng C, Wu Y Y, Tan Y, Luo Q, Liu H M, Li X Y 2014 *Chin. Phys. B* **23** 014207
- [18] Lü B D 2003 *Laser Optics* (Beijing: Higher Education Press) p11 (in Chinese) [吕百达 2003 激光光学 (北京: 高等教育出版社) 第11页]
- [19] Vorontsov M A, Sivokon V P 1998 *J. Opt. Soc. Am. A* **15** 2745
- [20] Vorontsov M A, Carhart G W 2006 *J. Opt. Soc. Am. A* **23** 2613
- [21] Zhang Y 2012 *Ph. D. Dissertation* (Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [张宇 2012 博士学位论文 (成都: 中国科学院光电技术研究所)]

Experimental research of boresight error correction using returning signals from the illuminated targets through atmosphere*

Tan Yi¹⁾²⁾³⁾ Geng Chao¹⁾²⁾ Li Xin-Yang^{1)2)[†]} Luo Wen¹⁾²⁾³⁾ Luo Qi¹⁾²⁾³⁾

1) (Key Laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China)

2) (Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China)

3) (University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(Received 21 May 2014; revised manuscript received 4 July 2014)

Abstract

The relationship between boresight error and returning signal from the illuminated target is studied theoretically. The operating principle of a new-style adaptive-optics device, which is named adaptive fiber-optics collimator with the abilities to correct both laser beam transmission error and pointing error, is introduced. The laser beam pointing experimental setup with a laser propagation distance of 200 m through horizontal atmosphere is established. Based on returning signals from the illuminated two-dimensional and three-dimensional targets, the beam pointing closed loop using stochastic parallel gradient descent algorithm (SPGD) algorithm is achieved under different initial boresight errors. The experimental results indicate that the evaluation parameters of the residual boresight errors are less than 6% and 10.8% for the two-dimensional target and three-dimensional target, respectively, which are within the tolerance of theoretical analysis. Finally, the influence of SPGD parameter on moving-target pointing is analyzed.

Keywords: laser beam pointing, boresight error, adaptive fiber-optics collimator, stochastic parallel gradient descent algorithm

PACS: 42.68.Ay, 42.68.Wt, 42.79.Ag

DOI: [10.7498/aps.64.024216](https://doi.org/10.7498/aps.64.024216)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61205069, 61138007).

† Corresponding author. E-mail: xyl@ioe.ac.cn