

基于目标照明回光的瞄准误差修正方法精度分析及实验验证

张 宇^{1,2,3} 李新阳^{1,2} 饶长辉^{1,2}

¹ 中国科学院光电技术研究所自适应光学研究室, 四川 成都 610209
² 中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209
³ 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 激光发射系统通常受到瞄准误差的影响,使得发射光束的中心偏离靶目标,造成能量传输损失和系统性能下降。激光对目标照明后的散射回光信号可以反映瞄准误差的信息,通过对散射回光信号的测量可以对瞄准误差进行修正来提高激光发射系统的瞄准性能。研究了一种基于目标照明回光的瞄准误差修正方法。利用目标回光信息与瞄准误差的关系,通过随机并行梯度下降(SPGD)算法对瞄准误差进行校正,分析了影响瞄准误差校正精度的因素。实验数据验证了理论分析结果。

关键词 激光瞄准系统;照明回光;瞄准误差;随机并行梯度下降算法

中图分类号 O439 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0402011

Analysis and Experiment on the Reduction of Laser Pointing Error Based on the Return Signals from the Illuminated Target

Zhang Yu^{1,2,3} Li Xinyang^{1,2} Rao Changhui^{1,2}

¹ Laboratory on Adaptive Optics, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China
² Key Laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China
³ Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Laser beam pointing systems are generally affected by pointing errors. The pointing errors cause energy loss and the decline of the system performance while the center of the laser beam is not on the target. The pointing errors can be estimated from the scatter return photons back from the illuminated target. The performance of pointing error can be improved with close-loop control on the measurement of the return signals. In this paper a method to reduce pointing error based on the return signals from the illuminated target is studied. The stochastic parallel gradient descent (SPGD) algorithm is applied in this method. Some effects to influence the precision of pointing errors are analyzed. The analysis is verified by experiment.

Key words laser pointing system; return signals; pointing error; stochastic parallel gradient descent algorithm

OCIS codes 140.0140; 030.6600; 120.0280

1 引 言

激光束瞄准是主动跟踪、自由空间光通信等领域的关键技术。大多数激光控制系统中都存在两种基本的瞄准误差:1)静态的系统性误差,称为对准误

差,随时间变化缓慢;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误差,其中由机械振动引起的抖动误差一般认为符合二维高斯随机分布^[1]。对于圆孔衍射光斑或高

收稿日期: 2010-08-20; 收到修改稿日期: 2010-11-17

基金项目: 国家自然科学基金(60978050)和四川省青年基金(09ZQ026-014)资助课题。

作者简介: 张 宇(1985—),男,博士研究生,主要从事自适应光学等方面的研究。E-mail: yangyuzhangyu@163.com

导师简介: 李新阳(1971—),男,博士,研究员,主要从事自适应光学等方面的研究。E-mail: xyli@ioe.ac.cn

斯型光斑,光斑的光强分布从中心向四周逐渐减少。在光斑轮廓大于目标尺寸的情况下,瞄准误差使得到达目标的信号产生损失,从而使得系统的性能下降。为了提高激光瞄准系统的性能和效率,需要对系统中的对准误差进行校正控制。

Lukesh 等^[1]在一系列卫星照明实验中发现系统的瞄准性能与目标回光强度的统计直方图的参数之间有近似线性关系,从而引出了基于目标回光的瞄准误差估计方法。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,这也是许多应用中的实际情况。文献[1]阐述了 Key 率法和卡方检验法,随后多篇文献利用回光信号来估计瞄准误差,有最大似然估计方法^[2,3]和使用高阶匹配的方法^[4]。Key 率法在没有对准误差的情况下可以对抖动做出很好的估计;卡方检验法利用仿真数据库能够对多种参数进行估计,例如目标的形状和大小等^[5~8];最大似然和高阶匹配都是基于最优估计理论提出的方法。

上述方法需要批量采集数据,然后进行误差估计,可以很好地估计出瞄准误差的幅值,但在不知道误差方向的情况下还是很难完成对瞄准误差的修正。本文着重研究一种基于目标回光的瞄准误差修正方法。在实验室条件下验证回光强度与瞄准误差的关系,以此作为修正算法的基础,选用随机并行梯度下降(SPGD)算法^[9]进行静态条件下瞄准误差的控制校正,得到收敛情况下的残余瞄准误差信息。用理论分析和实验验证两种方法分析瞄准残余误差的影响因素。

2 基本原理

激光束通过望远镜发射出去,经过大气传输,到达目标处并照亮目标。假设目标尺寸小于靶平面处的光斑轮廓,目标上的漫反射光在空间自由传播,其中一部分照明散射光经过大气进入接收口径,即为激光对目标的照明回光。根据文献[4]可以将照明回光表示为

$$I_{\text{return}} = I_z(x_b + x_{jn}, y_b + y_{jn}) \chi \Omega_{\text{RX}} \tau_a^{\text{sec}\phi} \tau_{o, \text{RX}} \left(\Delta t \frac{\lambda}{hc} \right), \quad (1)$$

式中 I_z 是距离发射端为 z 的靶平面处的光斑光强分布, x_b, y_b 为瞄准误差, x_{jn}, y_{jn} 为随机抖动误差, χ 为目标的光学横截面, Ω_{RX} 是接收口径对目标的张角, $\tau_a^{\text{sec}\phi}$ 是天顶角 ϕ 所对应的大气损耗, $\tau_{o, \text{RX}}$ 是接收孔径的光学损耗, Δt 为 CCD 曝光时间, λ 为波长, h 为普

朗克常数, c 为真空中光速。

这里通过一系列假设对模型进行简化,假设光束的发射与接收望远镜系统的参数固定。根据统计光学理论,光束通过大气湍流产生畸变,机械振动等使得光斑发生随机抖动,到达目标上的长曝光图像表现为高斯形态。假设目标的反射系数为常数,(1)式可以写成

$$I_{\text{return}} = \alpha \iint_S I_{\Delta}(x, y) dx dy. \quad (2)$$

式中 α 为整个传输过程中的增益系数, S 为光斑轮廓中的目标部分, I_{Δ} 为 I_z 在 Δt 时间内的平均,近似为高斯形态。不失一般性,假设目标为正方形,边长为 L ,瞄准误差仅存在于 y 轴方向,大小为 A ,如图1所示,则目标平面处光强分布表示为

$$I_{\Delta}(x, y) = \beta \frac{1}{2\pi\Omega^2} \exp\left[-\frac{x^2 + (y+A)^2}{2\Omega^2}\right], \quad (3)$$

式中 β 为增益系数, Ω 为高斯分布标准差。代入(2)式,得到照明回光为

$$I_{\text{return}}(L, A) = \alpha\beta \frac{1}{2\pi\Omega^2} \times \int_{-L/2}^{L/2} \int_{-L/2}^{L/2} \exp\left[-\frac{x^2 + (y+A)^2}{2\Omega^2}\right] dx dy. \quad (4)$$

计算简化,得

$$I_{\text{return}}(\hat{L}, \hat{A}) = K [\Phi(\hat{L}/2) - \Phi(-\hat{L}/2)] \times [\Phi(\hat{A} + \hat{L}/2) - \Phi(\hat{A} - \hat{L}/2)]. \quad (5)$$

式中 $\hat{L} = L/\Omega, \hat{A} = A/\Omega$, 分别为被光斑参数 Ω 归一化后的目标大小和瞄准偏差; $\Phi(x)$ 表示标准正态分布函数; $K = \alpha\beta$ 。

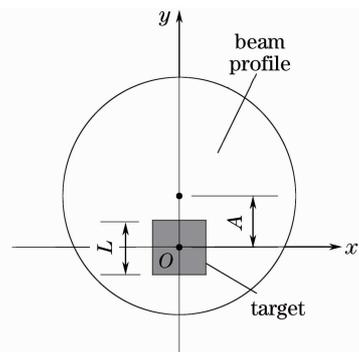


图1 瞄准误差示意图

Fig. 1 Target illuminated by laser beam with pointing error

根据(5)式计算不同的归一化目标条件下(目标归一化大小从 0.5~3.5)照明回光与瞄准偏差的变化关系如图2所示。从图2中可以看出,回光亮度与瞄准偏差呈高斯型单调下降。那么理想情况下,将回光的

亮度调整到最大,则瞄准偏差就等于零。这就是利用照明回光进行瞄准修正的基本原理。

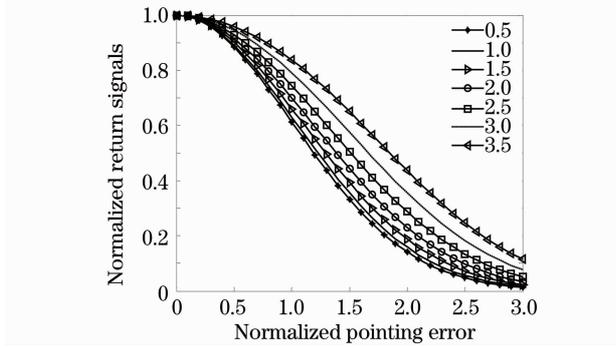


图2 照明回光随瞄准偏差的变化

Fig. 2 Return signals with different target sizes and pointing errors

实际情况下,由于目标形态变化和大气闪烁作用,照明回光会在一定范围内变化,在某一时刻瞄准偏差非零的位置得到的回光可能比零点位置还要高。在瞄准偏差零值附近,如果照明回光亮度在一定范围内闪烁变化,将无法确定出准确的瞄准偏差值。这种情况下如果依然根据照明回光的最大值位置修正瞄准偏差,则得到的瞄准位置会在一定范围内波动,范围大小与回光起伏程度有关。假设零偏差情况下回光起伏量 I_f 与最大回光值 I_{max} 比值为 r ,则闭环稳定后的回光值收敛于 $I_{max}(1-r)$ 到 I_{max} 的范围内,此范围对应的最大瞄准误差即为闭环校正的残差范围。回光起伏强度比例与瞄准偏差修正残差范围对应关系如图3所示,目标归一化大小变化与图2相同,图中横坐标为回光起伏与最大回光的比值,纵坐标为对应的回光起伏条件下的瞄准修正残差范围。由图3可见回光起伏比例越大,瞄准误差范围也越大。从图2中同时可以看出归一化目标越小,照明回光曲线的波峰越尖锐。在同样的回光起伏条件下,目标相对光斑的尺寸越小,瞄准精度越高。

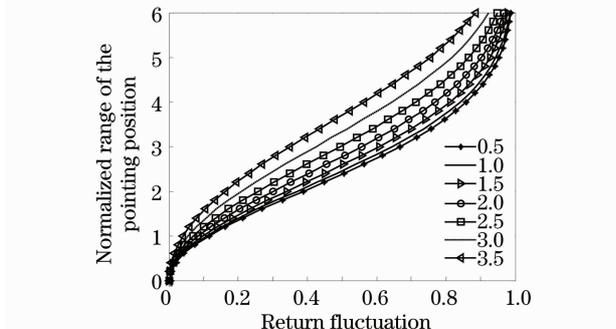


图3 零偏差回光起伏对应的瞄准位置范围

Fig. 3 Range of the pointing position with zero pointing error but return fluctuation

3 回光强度与光斑偏移位置关系的实验验证

回光强度与光斑偏移位置关系的验证实验装置如图4所示。激光器发射光束通过小孔衍射产生圆形光斑,经过倾斜镜(TM)和平面反射镜后照射到目标上。目标上的漫反射光被CCD收集后传入计算机进行处理,然后输出电压来控制倾斜镜。激光波长为650 nm,圆孔直径2.5 mm,整个传输长度约为15.0 m。自倾斜镜算起传输距离约为12.8 m,测量屏上的光斑直径约为10.1 mm,对应的张角约为781 μrad 。目标是一个固定在细线上的不规则表面球体,直径4 mm,对应张角约312 μrad 。CCD配合一个成像镜头对目标和屏上光斑轮廓进行成像,实验中提取目标像进行灰度值积分作为照明回光,光斑轮廓可以作为闭环效果的直观评价标准。经标定,实验条件下每单位DA输出电压驱动倾斜镜使光束产生约134 μrad 的倾角。CCD上一个像素对应于屏上的实际尺寸约为0.265 mm,在12.8 m的距离上对应角度约20.6 μrad 。

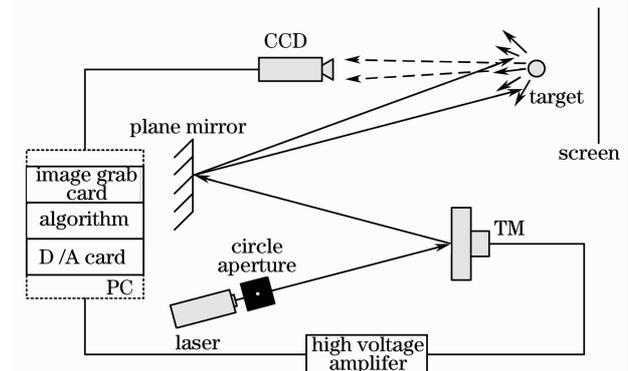


图4 实验装置示意图

Fig. 4 Experimental setup

通过在倾斜镜上加二维等间隔扫描电压来控制光束改变方向,使得光斑不同位置照射到目标上,同时采集目标照明回光。图5为扫描情况下采集到的回光时间序列,扫描方式采用正交扫描。首先 x 方向添加-4 V电压, y 方向电压从-4 V开始等步长0.2 V逐步增加至4 V;然后 x 方向电压增加0.2 V, y 方向按照相同的方式从-4 V扫描到4 V,最终完成整个平面的扫描。在图6中将回光序列以对应的偏差为坐标进行二维排列,回光值进行了归一化处理。图7为图6图像的中心横截面,由于初始采用手动调节光斑中心与目标中心重合,所以 x , y 方向上回光最大值处并不精确位于零点位置。从图中可以明显地看出光斑位置与回光强度的对应关

系,与2节的理论分析一致,目标越接近光斑中心,所得到的回光能量也就越高。

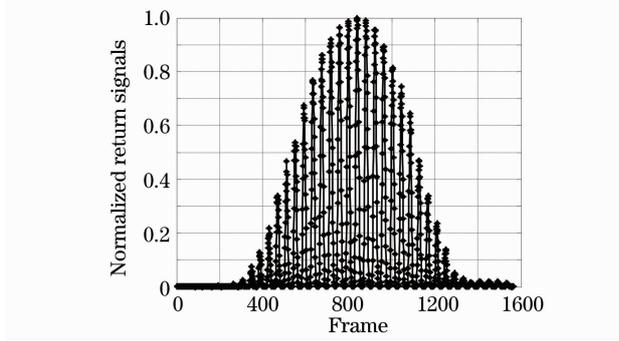


图5 归一化照明回光时间序列

Fig. 5 Time series of the normalized return signals

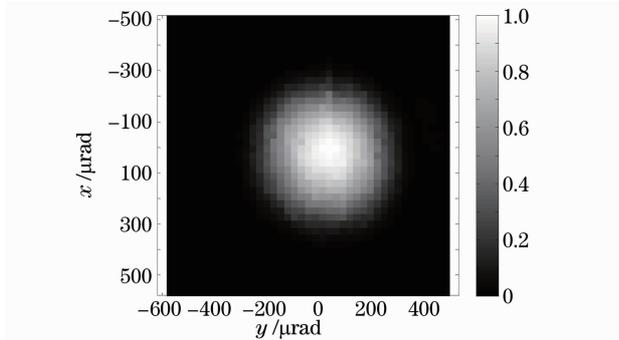


图6 不同瞄准偏差条件下的照明回光

Fig. 6 2D arrangement of the normalize return signals

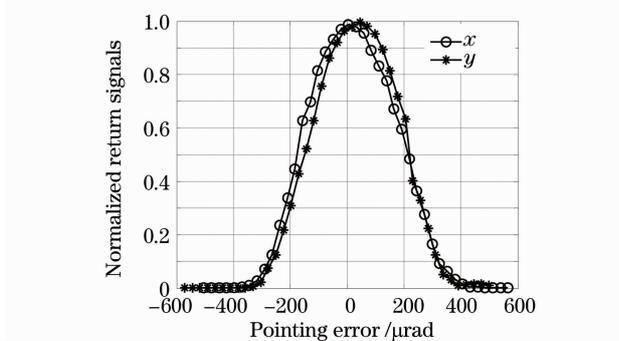


图7 图6中图像的两个方向的中心横截面

Fig. 7 Cross sections of the picture shown in fig. 6

4 基于SPGD算法的瞄准误差修正方法

3节得出的照明回光与偏移量间存在一致性关系,本节使用SPGD算法^[9~12]进行基于目标照明回光测量的瞄准偏差校正控制。SPGD算法是应用于自适应光学校正的一种梯度下降算法,SPGD算法利用性能指标的变化量和控制参数的变化量对控制参数的梯度进行估计,通过迭代在该梯度上进行搜索,最终找到性能指标的极值,达到校正目的。

对倾斜镜设置两个方向上的偏置电压,模拟光斑偏离目标中心的状态。然后利用照明回光来进行SPGD闭环校正。初始分别在倾斜镜 x 方向上添加 -1.232 V , y 方向上添加 1.265 V 的偏置电压。根据文献^[9,10]和实验中的实际情况选取SPGD算法的参数为 $\gamma=0.005$,随机抖动 $\delta u=0.02\text{ V}$ 。为了防止出现过大的校正量,设置校正量最大阈值为 0.1 V 。实验中选取目标照明回光作为性能指标,这个指标简单、直观,而且可以很好地反映减小瞄准误差的目的,即传输更多能量到目标上。

图8为闭环控制过程中电压和照明回光的变化。前100帧开环,然后开始进行闭环校正。照明回光值提高并稳定在一定范围内,两个方向的电压偏差也逐步趋于零附近。

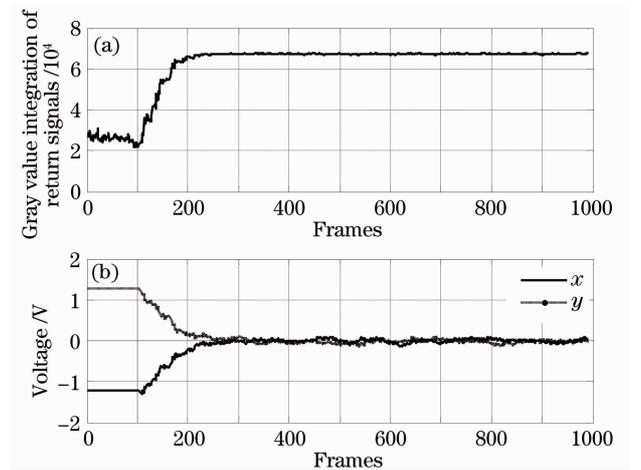


图8 利用目标照明回光对瞄准偏差进行闭环控制

Fig. 8 Close-loop control for the reduction of the pointing error based on the return signals from the illuminated target

图9为闭环控制的直观效果。图中目标投影位置固定,光斑位置随倾斜镜电压发生变化。图9(a)为校正之前光斑与目标的位置关系,图9(b)为校正之后的位置关系。从图中可以看出校正后光斑的中心部分照射到目标体上。

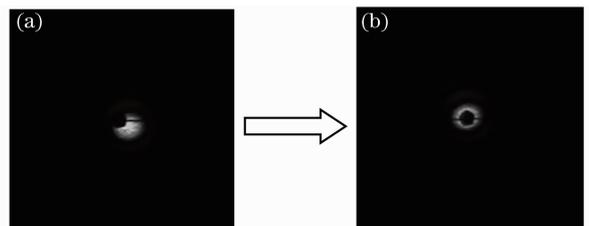


图9 瞄准误差闭环修正。(a)校正前,(b)校正后

Fig. 9 Reduction of the pointing error. (a) before close-loop, (b) after close-loop

5 分析与讨论

在不同初始偏置电压条件下进行 10 次闭环实验,稳定情况下两个方向的电压残余误差转化为弧度,如图 10 所示。从图中可以看出瞄准误差的修正残差分布在大约 $20 \mu\text{rad}$ 范围内。图 11 为静态无偏置情况下采集的照明回光序列,由图可见由于激光器功率不稳定以及目标随机转动,引起的回光值并不是恒定的,而是在一定范围内起伏。实验中的闭环控制算法以照明回光为性能指标,则闭环过程中势必会受到回光起伏的影响。从第 2 节的分析中可知照明回光的起伏会导致瞄准修正残差不为零。图 11 中所示的回光起伏的均方根(RMS)值约为峰值的 0.32%,利用图 7 中的回光排列中心横截面的各个数据点进行插值处理,计算出下降峰值的 0.32% 处对应 $25 \mu\text{rad}$ 的范围,表明目标回光闪烁引起的瞄准修正残差在 $25 \mu\text{rad}$ 的量级,与图 10 得到的结果一致。

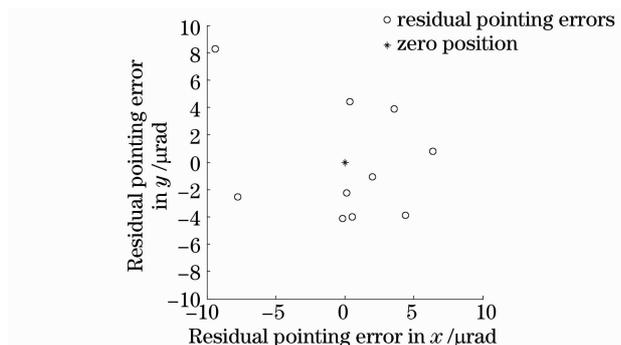


图 10 理论误差范围为 $25 \mu\text{rad}$ 时的瞄准残余误差
Fig. 10 Residual pointing errors of ten experiments while the error range in theory is $25 \mu\text{rad}$

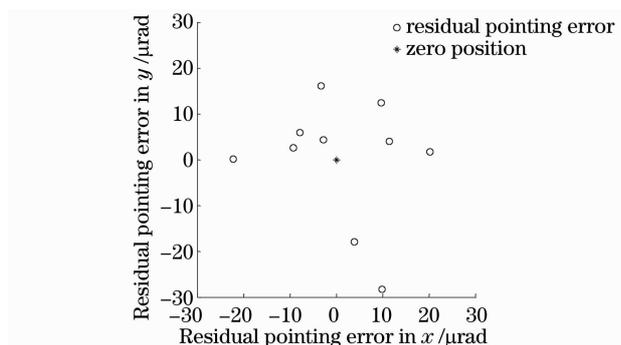


图 11 理论误差范围为 $69 \mu\text{rad}$ 时的瞄准残余误差
Fig. 11 Residual pointing errors of ten experiments while the error range in theory is $69 \mu\text{rad}$

实验中圆形光斑近似为高斯光强分布,光斑半径 r_0 与高斯参数 Ω 的关系为

$$\Omega \approx 0.355r_0. \quad (6)$$

实验中亮斑半径 $r_0 \approx 5.1 \text{ mm}$, 对应的高斯参数 $\Omega \approx$

1.81 mm , 转化为角度 $140.6 \mu\text{rad}$, 目标大小 $L = 4 \text{ mm}$, 则归一化大小为 $\hat{L} \approx 2.21$ 。利用(5)式计算下降峰值 0.32% 处对应的归一化残差范围为 0.198, 转化为角度为约 $27.8 \mu\text{rad}$, 与实验结果一致。

改变实验参数,激光通过直径 1 mm 的小孔传输 7.71 m 到达靶平面,目标直径 5 mm , 其余实验条件不变。测得静态回光起伏 RMS 约为峰值的 0.42%, 对应的残差范围为 $76 \mu\text{rad}$ 。靶平面处光斑半径 $r_0 \approx 6.4 \text{ mm}$, 对应高斯参数 $\Omega \approx 2.27 \text{ mm}$, 归一化目标大小 2.20。下降峰值 0.42% 处对应的归一化残差范围约为 $69 \mu\text{rad}$ 。

图 11 为 10 次闭环实验结果,瞄准残差分布范围大约为 $60 \mu\text{rad}$, 与理论计算结果相符。误差值在零点周围分布不均匀是由于初始零点位置存在偏差。

6 结论

使用激光照明目标,可以利用收集的目标回光进行瞄准误差的修正。验证了一种采用 SPGD 控制算法的基于照明回光的瞄准误差修正方法的有效性。理论研究和实验结果表明,照明回光起伏、目标尺寸和光斑尺寸都会影响瞄准误差的校正精度,其中照明起伏的影响最大。回光起伏比例越大,瞄准误差范围也越大。对于同样强度的回光起伏,目标相对光斑的尺寸越小,瞄准精度越高。根据衍射光学原理,光斑的绝对尺寸与发射口径成正比,与传输距离成反比。如果目标尺寸与光斑尺寸相当,那么在长距离传输、大口径发射的条件下,利用本文的方法有可能得到较高的瞄准误差修正精度。

根据以上分析,下一步计划在大口径长距离实际大气传输条件下,验证瞄准误差修正方法的有效性,并有望获得高精度的瞄准误差修正结果。但长距离实际大气传输条件下的光强闪烁效应将比较严重,对该方法提出了很大的挑战。如何采取有效措施抑制和克服闪烁效应对本文方法的影响,这将是下一步研究的重点。

参 考 文 献

- Gordon Lukesh, Susan Chandler, David Voelz. Estimation of laser system pointing performance by use of statistics of return photons[J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(9): 1359~1371
- Deva K. Borah, David Voelz, Santasri Basu. Maximum-likelihood estimation of a laser system pointing parameters by use of return photon counts [J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45** (11): 2504~2509
- Deva K. Borah, David Voelz. Estimation of laser beam pointing

- parameters in the presence of atmospheric turbulence[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(23): 6010~6018
- 4 Venkata S. Rao Gudimetla, Jim F. Riker. Moment-matching method for extracting beam jitter and boresight in experiments with satellites of small physical cross section[J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(23): 5608~5616
- 5 Gordon Lukesh, Susan Chandler, David Voelz. Analysis of satellite laser optical cross sections from the active imaging testbed[C]. *SPIE*, 2002, **4538**: 24~33
- 6 Susan Chandler, Gordon Lukesh, Santasri Basu *et al.*. Model-based beam control for illumination of remote objects-part I: theory and real-time feasibility [C]. *SPIE*, 2004, **5552**: 105~113
- 7 Susan Chandler, Gordon Lukesh, Santasri Basu *et al.*. Model-based beam control for illumination of remote objects-part II: laboratory experiment[C]. *SPIE*, 2004, **5552**: 114~122
- 8 Susan Chandler, Gordon Lukesh. Non-imaging detection of target shape and size[C]. *SPIE*, 2006, **6234**: 85~94
- 9 Chen Bo, Yang Huizhen, Zhang Jinbao *et al.*. Performance index and convergence speed of parallel gradient descent algorithm in adaptive optics of point source[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5): 1143~1148
- 陈 波, 杨慧珍, 张金宝 等. 点目标成像自适应光学随机并行梯度下降算法性能指标与收敛速度[J]. *光学学报*, 2009, **29**(5): 1143~1148
- 10 Wang Sanhong, Liang Yonghui, Long Xuejun *et al.*. Multilevel wavefront correction technique based on stochastic parallel gradient descent algorithm[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(5): 1091~1096
- 王三宏, 梁永辉, 龙学军 等. 基于随机并行梯度下降算法的多级波前校正技术[J]. *中国激光*, 2009, **36**(5): 1091~1096
- 11 Zhang Jinbao, Chen Bo, Wang Caixia *et al.*. Dynamical wavefront distortion correction experiment based on stochastic parallel gradient descent algorithm for 61-element adaptive optics system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 668~674
- 张金宝, 陈 波, 王彩霞 等. 61 单元自适应光学系统随机并行梯度下降算法动态实验研究 [J]. *中国激光*, 2010, **37**(3): 668~674
- 12 Yang Huizhen, Li Xinyang, Jiang Wenhan. Simulation and analysis of stochastic parallel gradient descent control algorithm for adaptive optics system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(8): 1355~1360
- 杨慧珍, 李新阳, 姜文汉. 自适应光学系统随机并行梯度下降控制算法仿真与分析[J]. *光学学报*, 2007, **27**(8): 1355~1360