

回波瞄准系统中基于爬山法的光束闭环瞄准实验

周磊^{1,2,3} 任戈^{1,2} 谭毅^{1,2} 唐涛^{1,2} 于伟^{1,2,3,4}

¹ 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209
² 中国科学院光束控制重点实验室, 四川 成都 610209
³ 中国科学院大学, 北京 100049; ⁴ 徐州空军学院, 江苏 徐州 221000

摘要 瞄准偏差和光束抖动,会导致光束到达靶面能量的损失,是光束瞄准系统中两个最主要的误差。分析了以高斯光束和高斯抖动为基础的光束在照明目标时产生的光回波信号的特性;在此基础上,搭建了实验室平台,实现了基于二维爬山法的光束闭环瞄准,讨论了光束抖动对光束瞄准实时性的影响,分析了不同抖动强度下光束瞄准的精度。实验结果表明:爬山算法无需已知目标和光束分布的任何信息,即可实现光束回波闭环瞄准,且性能优良;但随着光束抖动的增加,其瞄准所需回波信号样本增大,瞄准精度降低。

关键词 大气光学;光束瞄准系统;爬山法;回波信号;瞄准偏差;光束抖动

中图分类号 TN012 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201232.1201003

Experiment of Closed-Loop Pointing Errors Compensated by Hill-Climbing Method in Laser Pointing System Using Return Photons

Zhou Lei^{1,2,3} Ren Ge^{1,2} Tan Yi^{1,2} Tang Tao^{1,2} Yu Wei^{1,2,3,4}

¹ Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China
² Key Laboratory of Beam Control, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China
³ University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
⁴ Xuzhou Air Force College, Xuzhou, Jiangsu 221000, China

Abstract Energy losses on target caused by boresight and jitter are two fundamental pointing errors for a laser pointing system. The characteristics of return photons reflected from an intended target in a laser pointing system are studied and a laboratory device is set up. With the hill-climbing method, a closed-loop laser pointing is realized. Furthermore, the accuracy of this technology is analyzed with different jitters, and effect of jitter on real-time pointing is discussed. The experimental results demonstrate that, the performance of hill-climbing method is still excellent. Moreover, with the increasing of jitter, the sample size of return photons increases, and the pointing precision decreases.

Key words atmospheric optics; laser pointing system; hill-climbing method; return photons; boresight; jitter

OCIS codes 120.0280; 120.5800; 010.0280

1 引言

主动照明、自由空间激光通信等领域需要精确瞄准目标。在光束瞄准系统中,光束瞄准目标时常出现两种瞄准误差:1)跟踪设备的局限性以及光学未对准引起的静态视轴对准误差,即视轴瞄准偏差;2)瞄准系统的机械振动、大气湍流等瞬时性的随机因素带来的误差,即光束抖动。这些瞄准误差会导

致光束瞄准离轴和到达目标靶面的能量损失^[1]。估计和校正这些误差一直是光束瞄准的难点,尤其是对非合作目标,大多都处于开环工作状态,很难保证瞄准精度。

自1993年起,Lukesh等^[2]通过分析空间目标照明实验的回波数据,提出了一种基于目标回波信号的瞄准技术:若已知光束轮廓和目标反射率,且远

收稿日期:2012-05-28;收到修改稿日期:2012-08-21

基金项目:国家863计划资助课题。

作者简介:周磊(1984—),男,博士研究生,主要从事光束控制方面的研究。E-mail:zhoulei101213@qq.com

导师简介:任戈(1964—),男,研究员,博士生导师,主要从事光电工程总体、光电跟踪方面的研究。

E-mail:renge@ioe.ac.cn

场光斑尺寸大于目标尺寸,则瞄准误差引起的光斑相对目标的空间位置信息以光回波信号的形式反射回来。利用 Chandler 等^[3~7]提出的回波信号统计算法,即可解算出光束瞄准误差的大小,并以此来补偿瞄准偏差。因此,不再需要光束扫描(如圆锥扫描等^[8~10]),且有可能实现对非合作目标的闭环瞄准。这项技术以最优估计为基础,已经应用于估计目标的激光反射截面、估计目标的形状等^[11~13]。

上述方法以最优估计理论为基础,通过快速估计偏差大小来补偿视轴瞄准偏差,但是该技术建立在已知目标轮廓与反射率、远场光束分布以及相关光束传输参数的基础上,因此对于非合作目标的光束瞄准,在工程实现上受到一定限制;2011年,张宇等^[14]提出了基于目标寻优的回波瞄准方法,并采用随机并行梯度下降算法(SPGD)实现了无光束抖动

干扰时的光束瞄准。基于此,本文引入光束抖动,以长曝光下回波信号样本平均值作为寻优探测点,采用基于坐标轮换式的二维爬山法实现了基于回波信号的光束闭环瞄准^[15],并分析了光束抖动大小对光束瞄准性能的影响;该算法只要保证光束尺寸大于目标尺寸,无需知道目标及发射光束的任何量化信息,通过分析前后接收的回波能量均值即可实现光束瞄准。

2 基于回波信号的光束瞄准原理

2.1 回波信号模型

设瞄准系统以高斯光束照射目标,目标反射率稳定;目标靶平面内的坐标系如图1所示,光束中心相对目标的视轴偏差大小和光束的抖动大小以视轴角位移表示^[13]。

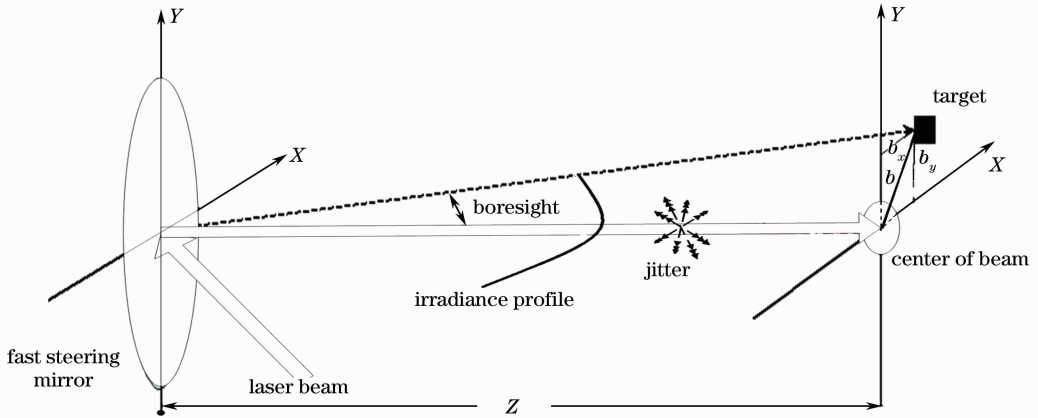


图1 光束瞄准系统坐标映射关系

Fig. 1 Coordinate mapping relation of laser pointing system

设高斯光束在照射目标时,在目标坐标面内的远场辐射的分布为

$$E(x, y) = K \exp \left[-\frac{(x + x[n])^2 + (y + y[n])^2}{2\Omega^2} \right], \quad (1)$$

式中 K 为光束远场辐射分布幅值,与光源、光束传输距离和大气透射率等有关,在特定光束瞄准系统和实验环境下 K 可为常数, Ω 为高斯光斑分布标准差, $x[n], y[n]$ 表示光束抖动,通过 Lukesh 等^[2]对空间目标回波信号的分析,发现光束抖动在目标靶平面内围绕光束统计中心符合二维正态分布,其概率密度函数表示为

$$p(x[n], y[n]) = \frac{1}{2\pi\sigma_j^2} \exp \left[-\frac{(x^2[n] + y^2[n])}{2\sigma_j^2} \right], \quad (2)$$

式中 σ_j^2 为光束在任意轴上的抖动方差,在后面的讨

论中即以 σ_j 为光束抖动大小。

不失一般性,假设目标为正方形,边长为 a ,且回波接收系统参数固定,可设回波信号的总增益系数为 ρ ,且目标相对远场光斑中心存在偏差;则连续接收 N 个回波观测值时,第 n 个观测值的回波信号强度可表示为

$$Q_e[n] = \iint K \rho \exp \left[-\frac{(x + x[n])^2 + (y + y[n])^2}{2\Omega^2} \right] \times \text{rect} \left(\frac{x - b_x}{a} \right) \text{rect} \left(\frac{y - b_y}{a} \right) dx dy, \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

式中 b_x 和 b_y 分别表示 X, Y 轴上的瞄准偏差,且有 $b = \sqrt{b_x^2 + b_y^2}$; $\rho = \rho_0 \tau_1 \tau_2 \eta$, ρ_0 为回波信号下行链路中目标反射率, τ_1 为大气吸收衰减系数, τ_2 为接收系统透射率, η 为探测器量子效率; $\text{rect} \left(\frac{x - b_x}{a} \right) \text{rect} \left(\frac{y - b_y}{a} \right)$ 为

二维矩形函数。根据(3)式,并假设其光束抖动 $\sigma_j = 0$ 时,其回波信号强度相对瞄准偏差变化关系的仿真结果如图2所示。

图2中,目标的相对尺寸为 $a/\Omega = 1$ 。从图2中

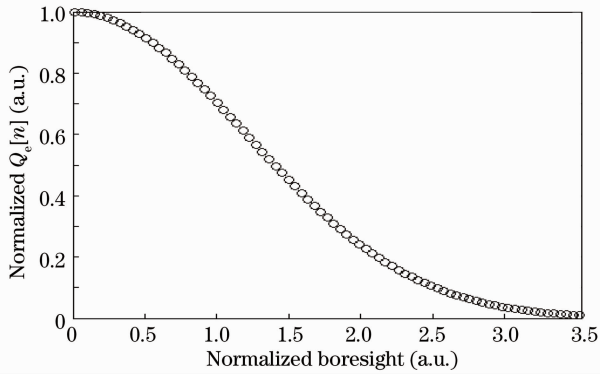


图2 回波信号强度与偏差的关系

Fig. 2 Relation between intensity of return photons and boresight

可以看出,回波信号强度相对于瞄准偏差单调下降,即目标的回波信号强度携带了光斑相对于目标的位置信息。因此,可以通过某种方法调节回波信号强度,使其达到最大值1,从而校准瞄准偏差,使目标更接近光斑中心。但在实际应用中,由于光束抖动、大气湍流等因素导致目标靶平面的短曝光光斑不断变化,从而导致回波信号波动,如图3所示。

图3中,偏差和抖动为 $b/\Omega = 1.35$, $\sigma_j/\Omega = 0.45$,从图中可以看出目标靶平面内的短曝光光斑分布凌乱,回波信号在不断上下波动。因此,当引入光束抖动时,必须采用光束长曝光远场辐射分布;反映到回波脉冲信号,即积累一定容量的信号样本,以该样本的平均值作为其回波强度大小^[16]。

图4中,信号样本容量 $N=50$,其他参数保持不变;可以看出,此时目标靶平面内的长曝光光斑接近二维高斯分布,相对于图3,图4中的回波信号强度与瞄准偏差也存在单调下降的关系。

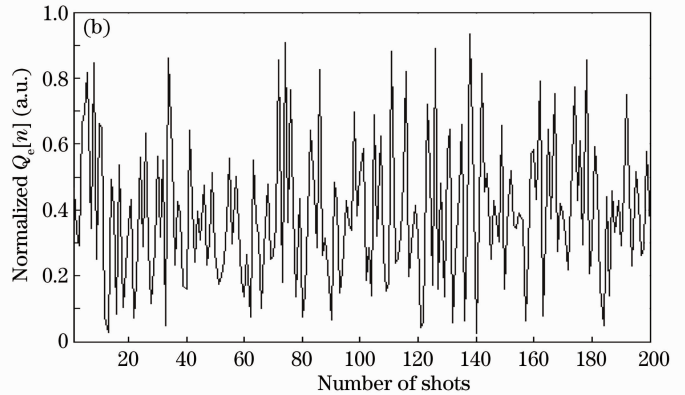
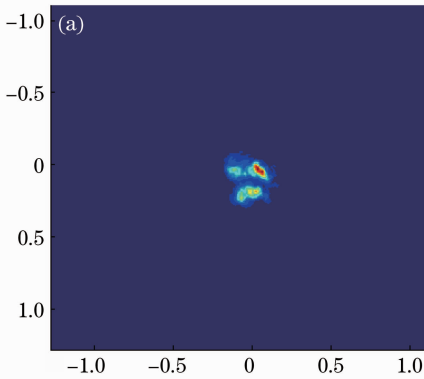


图3 存在光束抖动时回波信号的变化情况

Fig. 3 Changing of return photons with jitter

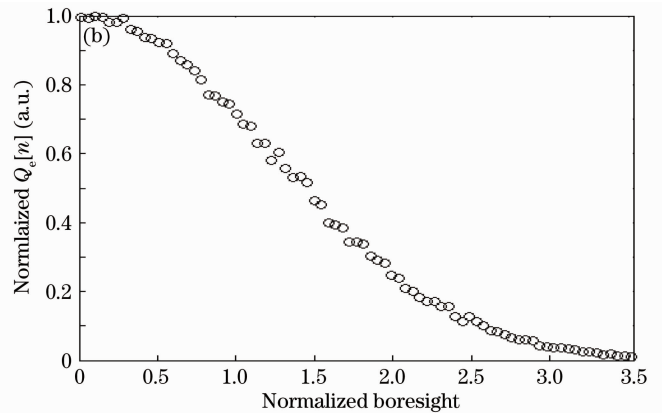
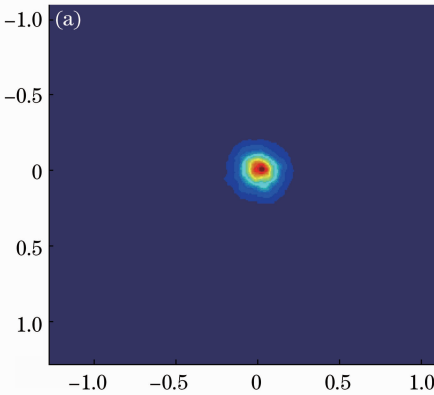


图4 存在光束抖动时回波信号强度与偏差的关系

Fig. 4 Relation between intensity of return photons and boresight with jitter

2.2 爬山法模型

根据上述分析,基于回波信号的光束瞄准过程可

转换为在二维平面上求极大值的问题,采用普通的目标寻优算法即可实现。由于光束在目标靶平面内的

光斑分布为圆对称的高斯分布,因此,采用坐标轮换式的二维爬山算法^[15]。其算法流程如图 5 所示。

图 5 中,根据图 1 的坐标系,以光束偏转步长小于给定收敛精度作为收敛条件:设初始光束偏转步长为 h ,其收敛精度为 $0.01h$;记录光束初始发射坐标,接收一定容量的回波信号,记录下初始回波信号均值;保持 Y 轴不变,控制光束沿 X 正轴偏转 h ,做一步探测,比较探测点与初始点的回波能量均值大

小;如果探测点能量大于初始点,则探测点方向即为 X 轴上能量递增方向,反之则相反;找到能量递增方向以后,如果下一探测点能量大于当前点,即可加倍步长,偏转光束;当出现探测点能量小于当前点且不是第一个探测点时,说明探测点越过极值点,则反向并减半步长,以此直至探测步长小于 $0.01h$,满足收敛条件,即完成 X 轴寻优,然后跳转到 Y 轴,同上进行新一轮寻优;通过一轮,或者两轮即可完成光束瞄准。

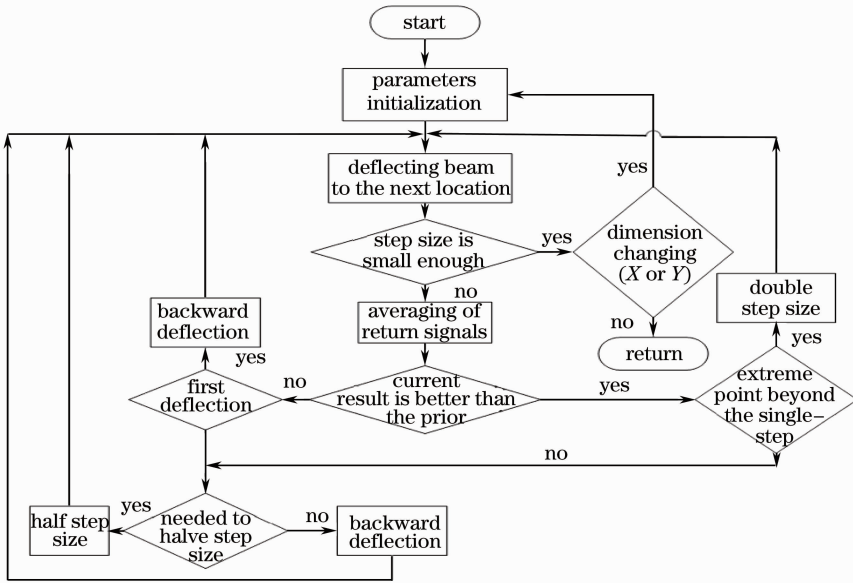


图 5 爬山法实现光束瞄准的流程图

Fig. 5 Flow chart of laser pointing by hill-climbing method

3 实验室模拟

根据光束瞄准系统模型,在实验室内搭建了基

于回波信号的光束瞄准系统,如图 6 所示。

光束经分光镜分为两束,少量的反射光由光电

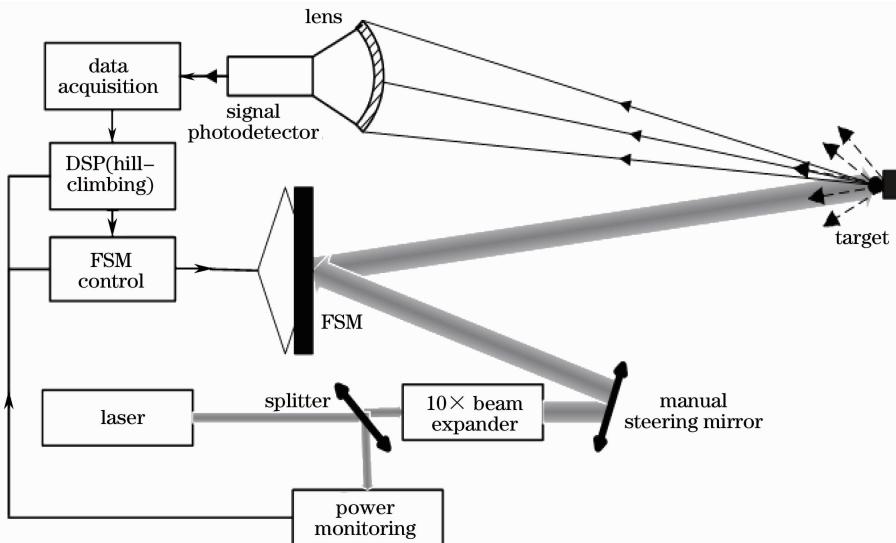


图 6 实验室光束瞄准系统

Fig. 6 Laser beam pointing system in laboratory

探测器测量,由数字信号处理器(DSP)控制板采集信号,以监测光源状态。透射光经扩束镜、可调式反射镜、快速反射镜(FSM)指向目标;目标反射的光信号由接收口径为60 mm的镜头收集^[17],由光电探测器转换为电信号,并由数据采集模块数字化,以供实时运算或后期处理。其中激光波长为532 nm,输出功率为10 mW;扩束镜放大倍数为10倍,扩束后光束直径 $D=7.8$ mm;DSP控制器产生一组参数可调的二维高斯随机数,并将其转换为电压信号分别驱动快反镜的X、Y轴(见图1),控制光束做二维随机抖动;同时在随机信号上叠加一个直流信号,以模拟光束视轴瞄准偏差;贴在透明玻璃上的漫反射目标大小为 $2.2\text{ mm}\times 2.2\text{ mm}$ 且反射率稳定,从FSM到目标的距离 L 为4.8 m,则目标相对张角为 $458\text{ }\mu\text{rad}$,对应的高斯光束分布标准差 $\Omega = D/(\sqrt{8}L) = 575\text{ }\mu\text{rad}$ 。考虑到快反镜的带宽(约为300 Hz),DSP每隔100 ms输出一组二维高斯随机信号;并在快反镜偏转光束到位以后,完成回波信号的测量和存储。因此,采集一组容量为 $N=100$ 的信号样本所需时间大于10 s。

上述实验装置中,瞄准偏差为静态变量,光束抖动为二维的高斯随机信号,因此从控制带宽上分析,光束抖动对应的电压信号带宽较高,偏差输出为直流信号,而误差校正只作用于偏差,各分量间互不干扰,因此瞄准误差的引入和校正可以通过同一快反镜实现。

4 结果及分析

4.1 结果演示

图6中,FSM两轴的驱动电压范围为 $-10\sim$

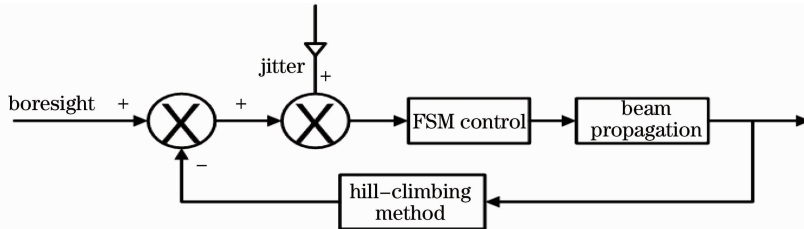


图8 基于回波信号闭环光束瞄准控制模型

Fig. 8 Closed-loop control model of beam pointing based on return photons

图10是基于回波信号的光束瞄准过程中,归一化回波信号强度的变化情况。初始输入偏差为 $b/\Omega = 1.90$, $\sigma_1/\Omega = 0$,目标处坐标为 $(q_x = 0.297\Omega, q_y = 1.877\Omega)$ 。从图中可以看出:当信号点 $n < 40$ 时,目标偏离远场光斑中心[如图9(a)所示],为X轴上的瞄

10 V,对应行程为 $-1\sim 1\text{ mrad}$ 。DSP控制器输出快反镜X、Y轴驱动电压均为0,调节可调式反射镜,使光束对准目标;然后,设置输出快反射镜X、Y轴驱动电压分别为 $-8\text{ V}, 0$ 。控制光束以 0.25 V 步长沿X轴扫描目标,同时接收扫描回波信号;同理,可得Y轴扫描回波信号分布,结果如图7所示。

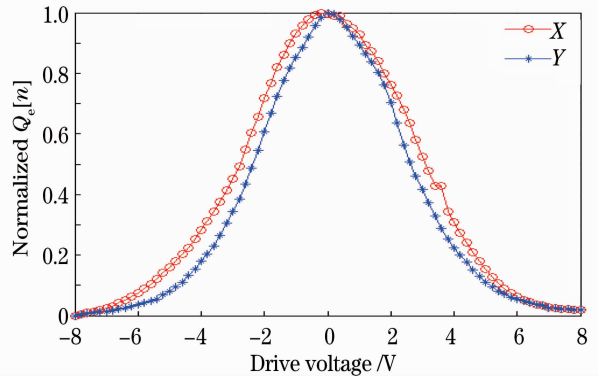


图7 控制光束沿X、Y轴扫描目标时回波信号分布

Fig. 7 Distribution of return photons when the steering beam scans target along X and Y coordinates

图7反映了回波信号强度与扫描驱动电压的对应关系,由于驱动电压大小与光束偏差成正比,因此实验表明光束偏差与回波信号强度存在一一对应的关系,实验和仿真结果吻合。从图中可以看出,Y轴对应的扫描回波信号分布更窄一些,这是由于在手动调节环节,Y轴方向存在微小偏差,光束没有完全对准目标所致。

根据图6所示实验装置,将爬山算法模块嵌入到DSP中,实时接收数据并根据算法估计出下一步动作,驱动快反镜偏转光束,校准瞄准偏差。实验室模拟控制模型如图8所示,其闭环瞄准实验结果如图9所示。

准寻优阶段,此时最大信号强度仅为0.2,说明沿X轴的瞄准偏差较小;当 $n > 40$ 时,进入Y轴的寻优阶段,此时回波信号强度波动较大,特别是当 $n = 60$ 时,此时归一化信号强度已经接近1,但是由于此时步长较大,计算下一步需要步长减半和反向判断,并

通过后几步的步长减半,使之满足收敛条件,完成瞄准;当 $n > 80$,即瞄准偏差校准以后,目标回到光斑

中心[如图 9(b)所示],归一化回波信号强度接近于 1。

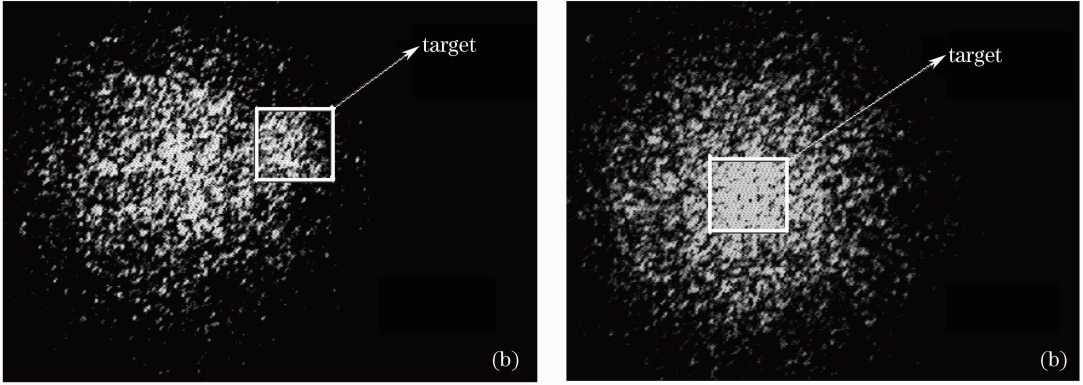


图 9 光束瞄准前后瞬时刻照片。(a)瞄准前;(b)瞄准后

Fig. 9 Photographs of the beam pointing (a) before and (b) after the closed-loop beam pointing

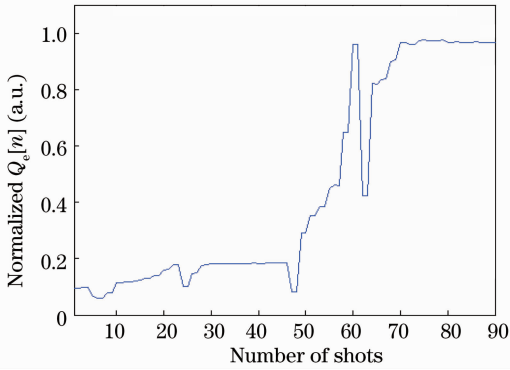


图 10 抖动为零时光束瞄准时回波信号的变化过程

Fig. 10 Changing of return photons with closed-loop beam pointing when jitter is 0

4.2 瞄准精度分析

图 10 中的瞄准过程是基于光束抖动为零的情况,此时回波信号平稳准确。但当引入光束抖动时,随着抖动的增强,其回波信号波动也不断增大。根据 2.1 节的分析,此时必须积累一定容量的信号样本,并以该样本的平均值作为对应探测点的回波信号强度。定义各个轴上的回波瞄准残差的均方差为

$$R_{MSE} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M |q - \hat{q}_i|^2, \quad (4)$$

式中 M 为独立的闭环光束瞄准闪数, q 为实际的目标坐标值, \hat{q}_i 表示第 i 次独立瞄准坐标值。实验中,取 $M = 20$,其他参数保持不变,其瞄准实验结果如图 11 所示。

图 11 中,左图为相同目标位置处 ($q_x = 0.297\Omega, q_y = 1.877\Omega$)、光束抖动依次增强时 [(a) $\sigma_j/\Omega = 0.05$, (b) $\sigma_j/\Omega = 0.1$, (c) $\sigma_j/\Omega = 0.3$] 二维爬山法单步探测所需信号样本容量也不断增加 [(a)

$N = 10$, (b) $N = 30$, (c) $N = 50$]; 否则,整个寻优过程会陷入局部极值,不能完成光束瞄准。比较图 11(a)~(c)的左图可知,虽然爬山法的探测步数变化不大,但是随着抖动增强,每步的信号积累容量增大,导致其瞄准过程变慢,降低了闭环瞄准的实时性。根据图 11(a)~(c)右图,计算得其残差均方值依次为: $R_{MSE} = (0.0013\Omega^2, 0.0003\Omega^2)$, $R_{MSE} = (0.0019\Omega^2, 0.0004\Omega^2)$, $R_{MSE} = (0.007\Omega^2, 0.002\Omega^2)$;从数据可知,归一化瞄准残差整体小于 0.007,表明爬山法瞄准精度较高;对比图 11 和残差均方值数据发现,随着光束抖动的增强,瞄准残差分布越来越分散。另外,比较其 X、Y 轴上残差发现, X 轴上残差均方值较大,这是由于实验中快反镜 X 轴的控制精度较低导致。

实验中,DSP 上爬山算法单步耗时小于 4ms,快速反射镜响应时间小于 4 ms,而模拟的回波接收频率仅 10 Hz,因此整个瞄准控制闭环带宽取决于回波样本的积累时间,但对校正静态或缓变的视轴瞄准偏差已经足够。

5 结 论

本文分析了回波瞄准系统中光回波信号的性质,搭建实验室平台,利用基于坐标轮换式爬山算法,实现了基于回波信号的光束闭环瞄准。实验结果表明:二维爬山法表现优良,能够克服光束抖动的影响,实现光束闭环瞄准;同时发现,随着光束抖动的增强,爬山法单步探测所需回波信号样本容量和瞄准残差也不断增大,降低了光束闭环瞄准的性能。

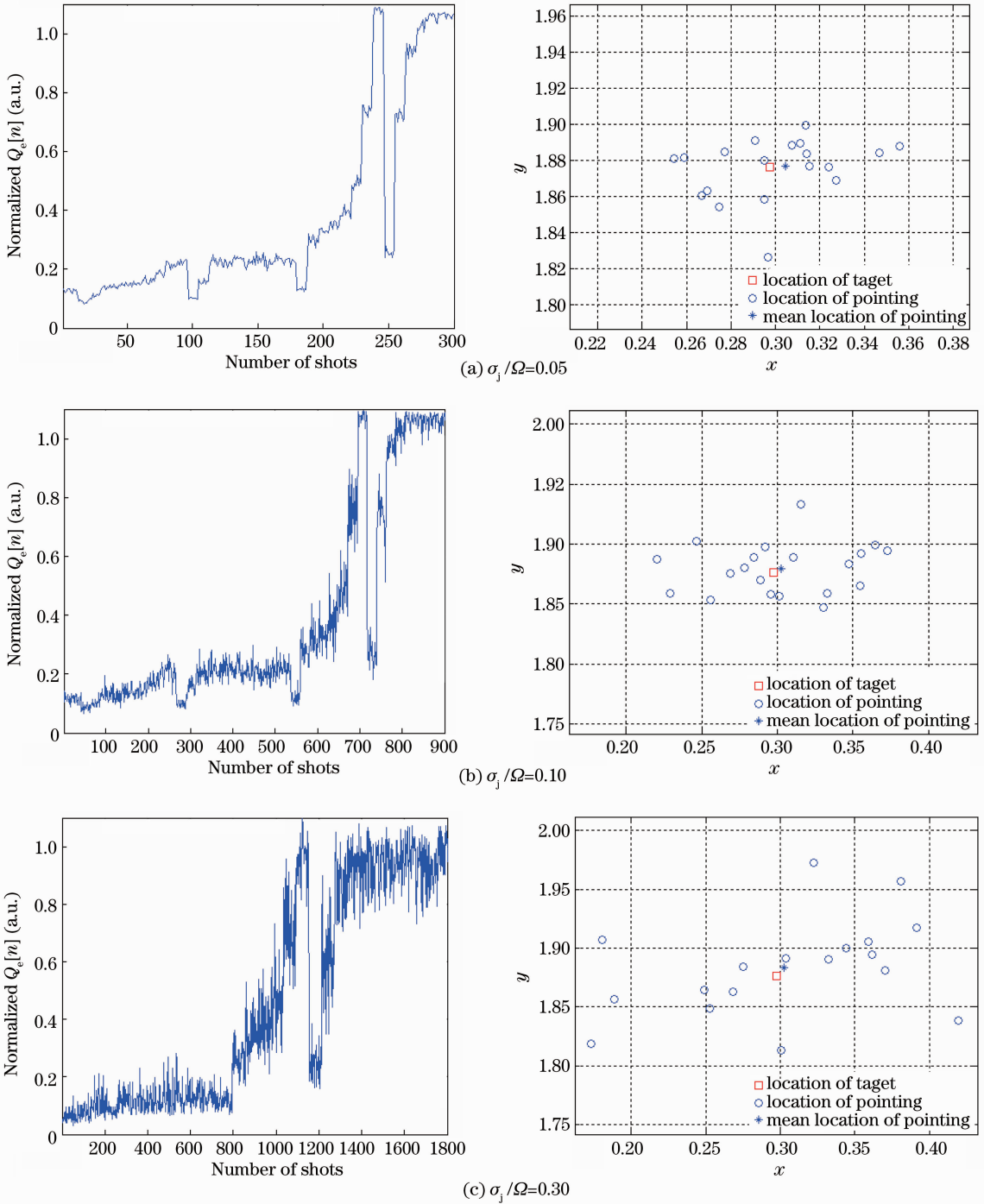


图 11 光束瞄准时回波信号的变化过程(左)及瞄准残差分布(右)

Fig. 11 Changing diagrams of return photons with closed-loop beam pointing (left) and distributions of the pointing residual errors (right)

参 考 文 献

- 1 Yang Shiji, He Ziping, Jia Jianjun *et al.*. Research of the transmittance of atmospheric turbulence channels[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(11): 2860~2863
- 杨世骥, 何志平, 贾建军 等. 湍流大气信道激光透射率的研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(11): 2860~2863
- 2 G. Lukesh, S. Chandler, D. G. Voelz. Estimation of laser

- system pointing performance by use of statistics of return photons [J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(9): 1359~1371
- 3 S. M. Chandler, G. W. Lukesh, D. Voelz *et al.*. Model-based beam control for illumination of remote objects, part I: theory and near real-time feasibility [C]. *SPIE*, 2004, **5552**: 105~113
- 4 S. Basu, D. Voelz, S. M. Chandler *et al.*. Model-based beam control for illumination of remote objects, part II: laboratory testbed [C]. *SPIE*, 2004, **5552**: 114~122

- 5 Suan Chandler, Gordon Lukesh. An introduction to RHINO-real-time histogram interpretation of numerical observations [C]. *SPIE*, 2006, **6160**: 61600M1
- 6 D. Borah, D. Voelz, S. Basu. Maximum likelihood estimation of laser system pointing parameters using return photon counts [J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(11): 2504~2509
- 7 Lei Zhou, Yi Tan, Ge Ren. One new quality of the maximum-likelihood estimation of laser pointing system by use of return photon counts [C]. *SPIE*, 2010, **7843**: 78430K1
- 8 A. Erteza. Boresighting a Gaussian beam on a specular target point: a method using conical scan [J]. *Appl. Opt.*, 1976, **15**(3): 656~660
- 9 Santasri Basu, Dvid Voelz, Susan Chandler *et al.*. Adaptive beam control based on return statistic: laboratory real-time simulation [C]. *SPIE*, 2005, **5895**: 58950M1
- 10 P. S. Neelakantaswamy, A. Rajaratram. Boresight error in the conical scan method of auto-boresighting a laser beam on a specular point-target [J]. *Appl. Opt.*, 1982, **21** (19): 3607~3612
- 11 G. W. Lukesh, S. M. Chandler, D. G. Voelz. Analysis of satellite laser optical cross sections from the active imaging testbed [C]. *SPIE*, 2002, **4538**: 24~33
- 12 G. W. Lukesh, S. M. Chandler. Non-imaging active system determination of target shape through a turbulent medium [C]. *SPIE*, 2000, **4167**: 111~119
- 13 Zhou Lei, Ren Ge, Tan Yi *et al.*. The maximum-likelihood estimation of laser pointing errors using return photons [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(3): 0308003
周磊, 任戈, 谭毅等. 利用极大似然法统计回波信号实现光束闭环瞄准实验研究 [J]. *中国激光*, 2012, **39**(3): 0308003
- 14 Zhang Yu, Li Xinyang, Rao Changhui. Analysis and experiment on the reduction of laser pointing error based on the return signals from the illuminated target [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(4): 0402011
张宇, 李新阳, 饶长辉. 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 [J]. *中国激光*, 2011, **38**(4): 0402011
- 15 Li Chunming. Optimization Method [M]. Nanjing: Southeast University Press, 2009. 40~86
李春明. 优化方法 [M]. 南京: 东南大学出版社, 2009. 40~86
- 16 Ma Wenping, Li Bingbing, Tian Hongxin *et al.*. Analysis and Application of Random Signals [M]. Beijing: Science Press, 2006. 139~142
马文平, 李兵兵, 田红心等. 随机信号分析与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2006. 139~142
- 17 Chen Chunyi, Yang Huamin, Jiang Huilin *et al.*. Performance analysis of large-aperture receiving and selection of aperture size in atmospheric optical communications [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2957~2961
陈纯毅, 杨华民, 姜会林等. 大气光通信中大口径接收性能分析与孔径尺寸选择 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 2957~2961

栏目编辑: 王晓球