

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

周 磊^{1,2,3} 任 戈^{1,2} 谭 毅^{1,2} 李志俊^{1,2}

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中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 瞄准偏差和光束抖动是光束瞄准系统中的两个最重要的误差。对以高斯光束和高斯抖动为基础的光束瞄准目标时产生的光回波信号进行数学建模;结合极大似然估计算法理论,建立并完善了基于回波信号的光束瞄准误差估计模型;并编写程序实现了 Monte Carlo 模型仿真,搭建了实验室平台。仿真和实验结果表明,极大似然估计算法表现出了优良的性能,能够同时准确地估计出瞄准偏差和光束抖动,信号样本越大其估计精度越高,且实验结果和仿真结果吻合得很好。在此基础上,根据实时偏差估计实现了实验室光束闭环瞄准实验。

关键词 大气光学;光束瞄准系统;瞄准偏差;光束抖动;极大似然估计;回波信号

中图分类号 TN012 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0308003

Maximum-Likelihood Estimation of Laser Pointing Errors Using Return Photons

Zhou Lei^{1,2,3} Ren Ge^{1,2} Tan Yi^{1,2} Li Zhijun^{1,2}

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

Abstract Boresight and jitter are two fundamental pointing errors for a laser pointing system. With the theory of maximum-likelihood estimation, a laser pointing system model is setup and consummated based on a Gaussian far-field irradiance profile and a Gaussian beam jitter model. The estimates are gained by use of return photon counts reflected from an intended target. Then, a Monte Carlo simulation is programmed and a laboratory experiment is performed. Both the simulations and experimental results demonstrate that the performance of the maximum-likelihood estimator is excellent and improves with the increasing number of shots. With this method, the boresight and jitter can be obtained simultaneously. What's more, the further study finds that the experimental results agree well with the simulation results. Based on these excellent performances of the estimator, a closed-loop laser pointing experiment is exhibited in laboratory.

Key words atmospheric optics; laser pointing system; boresight; jitter; maximum-likelihood estimate; return photon counts

OCIS codes 010.1320; 120.0280; 120.5800; 010.0280

1 引 言

主动照明探测、自由激光通信等领域要求光束

精确瞄准目标。但是当激光传输穿过大气层时,由于瞄准系统的机械振动、大气湍流、跟踪设备的局限

收稿日期: 2011-08-08; 收到修改稿日期: 2011-10-31

基金项目: 国家 863 计划(2008AA8200590)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、光电跟踪等方面的研究。

E-mail: rengen@ioe.ac.cn

性以及光学未对准引起的偏差和随机误差,会导致瞄准离轴和到达目标信号的能量损失^[1]。在绝大多数的光束瞄准系统中,常出现两种瞄准误差:1) 瞄准偏差,即光束瞄准目标时的静态视轴对准误差;2) 光束抖动,即瞬时性的随机瞄准元件带来的误差。长期以来,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,瞄准精度很难得到保证。近十几年来,美国新墨西哥州立大学的 Lukesh 等^[2]提出了一种新的瞄准方法:根据目标反射回来的信号强度的统计值来估计瞄准偏差和光束抖动,该方法建立在光束远场辐射光斑尺寸大于目标尺寸,且已知光束轮廓和目标反射比的情况下。在这种方法中,光束抖动所引起的光束相对目标变化的空间位置信息以目标光回波信号的形式反射回来,通过对回波信号进行统计分析,即可解算出光束瞄准误差的大小,而不再需要一些特殊的扫描估计方法^[3](比如:圆锥扫描等),目标处也不需要特殊的传感器。

该技术已经应用于多个领域,比如估计目标的激光反射截面、估计目标的形状、光束照明等^[4,5]。当然该技术也应用于光束控制领域,用于估计和校正光束瞄准系统的瞄准误差:20 世纪 90 年代, Lukesh 等^[6~9]通过对空间目标回波的分析,提出了 Key-Rate 算法和 χ^2 分布拟合检验估计算法,建立了实时数据分析模型(RHINO),并通过计算机仿真和实验验证了该模型的可行性,但整个算法较复杂,运算量很大,实时性不高;2006 年, Borah 等^[10~12]依据严格的概率统计理论提出了极大似然估计算法,大大降低了算法复杂度,具有很高的实用性,也是本文的研究重点。

本文介绍了根据极大似然算法理论建立的基于回波信号光束瞄准系统的计算机仿真模型,解决了任意方向上偏差的求解问题,完善了理论模型;给出了计算机仿真实验结果并搭建了光束瞄准实验室平台;分析了极大似然估计算法用于瞄准误差估计的特性和精度;最后展示了基于回波信号的闭环光束瞄准实验室模拟实验。

2 基于回波信号的光束瞄准系统模型

2.1 回波信号模型

根据图 1 所示的光束瞄准系统,设瞄准系统以高斯光束出射照射目标,以点目标作为目标模型,且目标反射率稳定;其光束的出射方向是由快速反射镜(FSM)控制光束偏转实现;目标平面内的坐标系是快反镜所形成的坐标系沿光束垂直映射到目标处的视轴坐标系;光束相对目标的视轴偏差大小以及光束的抖动大小以视轴角位移表示,如图 2 所示。

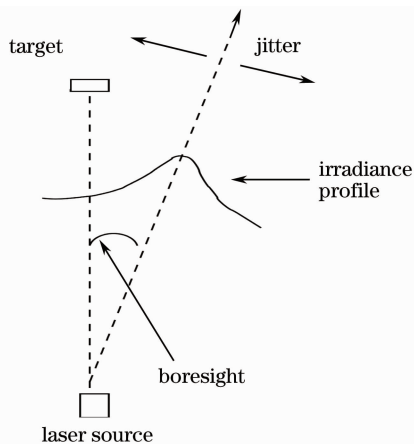


图 1 光束瞄准系统误差模型

Fig. 1 Pointing errors model of laser pointing system

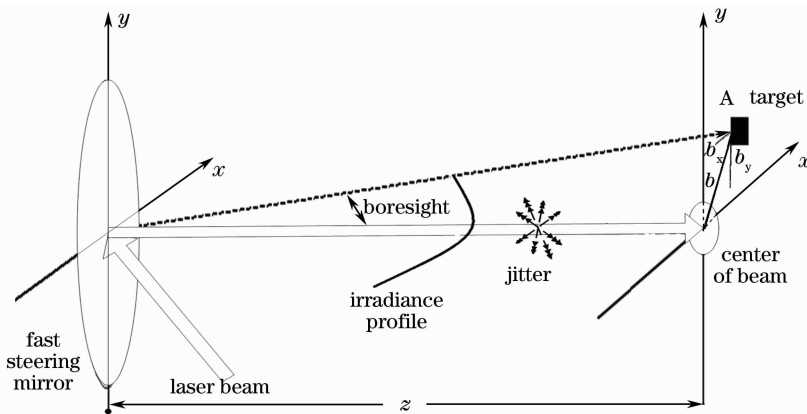


图 2 光束瞄准系统坐标映射关系

Fig. 2 Laser pointing system

设高斯光束在照射目标时,目标相对远场光斑中心存在偏差(如图2所示),则连续接收 N 个回波脉冲观测值时,第 n 个观测值的信号强度可表示为

$$Q_c[n] = K \exp\left[-\frac{(x[n] + b_x)^2 + (y[n] + b_y)^2}{2\Omega^2}\right],$$

$$n = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

式中 K 表示目标反射辐射强度的幅值, Ω 为光束远场辐射分布的标准差; $x[n], y[n]$ 表示对第 n 个回波信号相对光束视轴方向的二维角坐标; b_x, b_y 是目标相对光束中心在 x 和 y 方向的视轴瞄准偏差(未知),即目标偏离光束能量中心的角位移大小; N 表示单次估计时的信号样本容量。当然,由于大气湍流、瞄准系统的机械振动以及目标跟踪的局限性等影响,实际中的回波信号是随机信号,这种随机性误差即光束抖动;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

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

$$(2)$$

式中 σ_j^2 表示光束在任意轴上的抖动方差,在后面的讨论中即以 σ_j 表示光束抖动大小。

2.2 极大似然估计算法

由第二节的瞄准系统数学模型,令:

$$z[n] = 2\Omega^2 \ln\left(\frac{K}{Q_c[n]}\right). \quad (3)$$

然后设 $\varepsilon[n] = \frac{z[n]}{\sigma_j^2}$,观察发现 $\varepsilon[n] = [(x[n] + b_x)^2 + (y[n] + b_y)^2]/\sigma_j^2$ 满足二维非中心 χ^2 分布^[13],且其非中心参量可表示为 $\lambda = (b_x^2 + b_y^2)/\sigma_j^2$ 。并注意在目标平面内坐标系上,可定义瞄准偏差大小为

$$b = \sqrt{b_x^2 + b_y^2}. \quad (4)$$

在后续讨论中,以 b 表示瞄准系统的瞄准偏差。相对于以前对瞄准偏差 b 的定义^[10]:

$$Q_c[n] = K \exp\left[-\frac{(x[n] + b)^2 + (y[n])^2}{2\Omega^2}\right]$$

$$n = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

即认为瞄准偏差只出现在 x 轴上。但实际上,偏差方向是任意的,(1),(4)式的定义更加完善。

同时 λ 可表示为 $\lambda = b^2/\sigma_j^2$,则 $\varepsilon[n]$ 的联合概率密度函数可表示为

$$p(\varepsilon[n]) = \frac{1}{2} \exp\left[-\frac{1}{2}(\varepsilon[n] + \lambda)\right] \times$$

$$I_0(\sqrt{\lambda\varepsilon[n]})u(\varepsilon[n]), \quad (6)$$

式中 $I_0(\cdot)$ 表示第一类修正的零阶贝塞尔函数, $u(\cdot)$ 表示离散阶跃函数^[13];联立(4),(6)式推导得 $z[n]$ 的联合概率密度函数为

$$p(z[n]) = \frac{1}{2\sigma_j^2} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma_j^2}(z[n] + b^2)\right] \times$$

$$I_0\left(\frac{b}{\sigma_j} \sqrt{z[n]}\right)u(z[n]). \quad (7)$$

定义数据采集样本 $Z = z[1], z[2], \dots, z[N]$,则对 N 个回波信号,得似然函数为

$$p(Z) = \frac{1}{(2\sigma_j^2)^N} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma_j^2}\left(\sum_{n=1}^N z[n] + Nb^2\right)\right] \times$$

$$\prod_{n=1}^N I_0\left(\frac{b}{\sigma_j} \sqrt{z[n]}\right)u(z[n]). \quad (8)$$

并设 $\mathbf{Q} = (Q_c[1], Q_c[2], \dots, Q_c[N])$,联立(3),(8)式,得 \mathbf{Q} 的自然对数似然函数为

$$\ln p(b, \sigma_j, \mathbf{Q}) = 2N \ln \Omega - \sum_{n=1}^N \ln Q_c[n] -$$

$$2N \ln \sigma_j - \frac{1}{2\sigma_j^2} \left[b^2 N + 2\Omega^2 \sum_{n=1}^N \ln(K/Q_c[n]) \right] +$$

$$\sum_{n=1}^N \ln I_0\left[\frac{b}{\sigma_j} \sqrt{2\Omega^2 \ln(K/Q_c[n])}\right], \quad (9)$$

式中 K 为高斯光束的远场辐射幅值(为已知常数,在工程实际中可以测出,且在后面的讨论中都归一化为 $K=1$), Ω 高斯光束的远场辐射分布标准方差,与远场光束的半峰全宽(FWHM)的关系为 $v_{\text{FWHM}} = 2\sqrt{2\ln 2}\Omega$, $\mathbf{Q} = (Q_c[1], Q_c[2], \dots, Q_c[N]) \leq K$ 为回波信号样本,(8)式是以 b 和 σ_j 为变量的二维似然函数。根据极大似然估计理论,分别对 b 和 σ_j 求导,得

$$b - \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{I_1\left[\frac{b}{\sigma_j} \sqrt{2\Omega^2 \ln(K/Q_c[n])}\right]}{I_0\left[\frac{b}{\sigma_j} \sqrt{2\Omega^2 \ln(K/Q_c[n])}\right]} \times$$

$$\sqrt{2\Omega^2 \ln(K/Q_c[n])} = 0, \quad (10)$$

$$b^2 - 2\sigma_j^2 + \frac{2\Omega^2}{N} \sum_{n=1}^N \ln(K/Q_c[n]) -$$

$$\frac{2b}{N} \sum_{n=1}^N \frac{I_1\left[\frac{b}{\sigma_j} \sqrt{2\Omega^2 \ln(K/Q_c[n])}\right]}{I_0\left[\frac{b}{\sigma_j} \sqrt{2\Omega^2 \ln(K/Q_c[n])}\right]} \times$$

$$\sqrt{2\Omega^2 \ln(K/Q_c[n])} = 0. \quad (11)$$

联立(10),(11)式解得:

$$b^2 + 2\sigma_j^2 = \frac{2\Omega^2}{N} \sum_{n=1}^N \ln(K/Q_c[n]). \quad (12)$$

当 b 和 σ_j 中有一个能从(12)式得出,另一个即可通过联立(9)式进行一维搜索求其极大值点得到。

特殊的,当 b 和 σ_j 分别等于零时, σ_j 和 b 的估计值分别为

$$\hat{\sigma}_j = \sqrt{\frac{\Omega^2}{N} \sum_{n=1}^N \ln(K/Q_e[n])}, \quad (13)$$

$$\hat{b} = \sqrt{\frac{2\Omega^2}{N} \sum_{n=1}^N \ln(K/Q_e[n])}. \quad (14)$$

为了更好地分析极大似然估计算法的估计性能,本文对瞄准误差 b 和 σ_j 相对于光束分布参数 Ω 进行归一化,并分别表示为: $B = b/\Omega$ 、 $J = \sigma_j/\Omega$, 其对应的估计值可表示为 \hat{B} 、 \hat{J} ; 同时定义极大似然算法的估计精度为

$$R_{\text{MSE}} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (q - \hat{q})^2, \quad (15)$$

式中 q 表示实际的瞄准误差值(B, J), \hat{q} 表示其对应的估计值(\hat{B}, \hat{J}), R_{MSE} 即表示在同一瞄准误差(B, J) 组合情况下,独立采集 M 组回波信号,其瞄准误

差估计值相对实际瞄准误差的方差^[10]。观察(9), (12), (15) 式可知,在接收的回波信号质量较好时,影响极大似然算法估计精度的因素主要有回波信号样本容量 N ,实际光束抖动大小 J 和实际偏差大小 B 。

3 计算机仿真和实验室模拟

本文建立了 Monte Carlo 计算机仿真模型,其仿真结果如下:

图 3 中, (a) 为 $B = 1.35, J = 0.45$ 时的仿真回波信号, (b) 为 $M = 45, N = 50$ 的瞄准误差估计结果。从图中可以看出:实际输入 $B = 1.35, J = 0.45$ 时,其平均估计结果为($\hat{B} = 1.357, \hat{J} = 0.443$), 极大似然仿真估计非常准确。

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 4 所示。

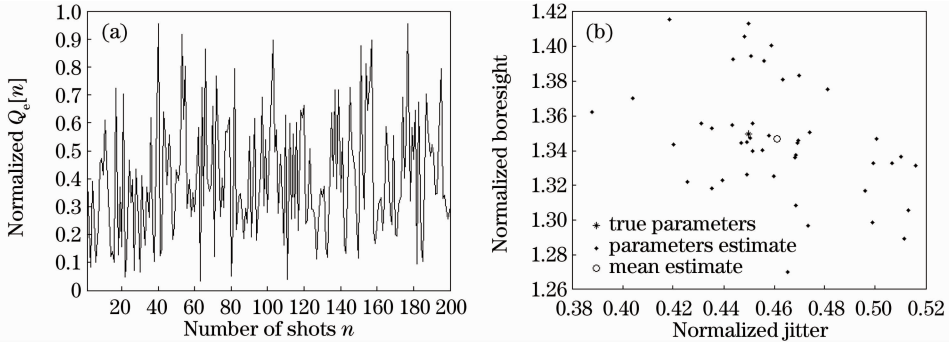


图 3 仿真实验结果

Fig. 3 Results of simulation

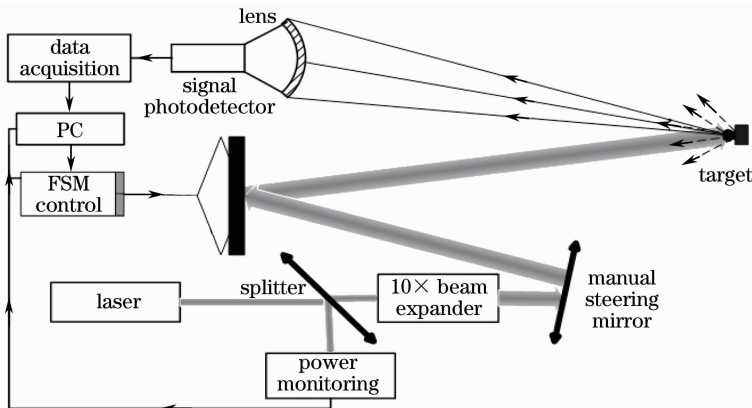


图 4 实验室光束瞄准系统

Fig. 4 Experimental setup of laser pointing system

激光器输出 532 nm, 10 mW 的激光束经分光镜,透射光经过 10 倍扩束(扩束后 FWHM 约为 1.91 mrad); 光束经可调式反射镜(用于调节光束指向目标)反射指向快速反射镜。控制 FSM 的数

字信号处理器(DSP)产生一组参数可控的二维高斯随机数,并将其转换为电压信号分别驱动 FSM 的 x, y 轴(如图 2),控制光束做二维随机抖动,以模拟光束抖动;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；漫反射目标大小为 $2.2\text{ mm} \times 2.2\text{ mm}$ 且反射率稳定，目标贴在透明的玻璃板上，以模拟空间目标的反射形式；经目标反射的光回波信号由接收口径为 60 mm 的光电探测器收集并转换为电信号^[14~16]，经数据采集系统输入到计算机内。经分光镜的少量反射光由光电探测器测量，并将实时测量结果输入到计算机内，以监测光源状态。

考虑到快反镜的响应频率（约为 300 Hz ），DSP 每隔 100 ms 为快反镜产生一组二维高斯随机电压信号；系统在快反镜动作到位以后，完成信号的测量和存储。因此，采集一组容量为 1000 的信号样本需要大于 100 s 的时间。

4 结果及分析

对计算机仿真与实验室模拟的极大似然估计性能进行比较分析，并保证计算机仿真参数与上述实验条件一致。

4.1 回波信号样本容量 N 对极大似然算法估计性能的影响

对比图 5、6 可知：相对于样本容量 $N=20$ ，当样本容量 $N=100$ 时，其仿真和实验估计结果都更紧凑地分布于实际设定值 ($B=0.72, J=0.45$) 周围，即信号样本容量 N 越大，估计结果波动越小。对比仿真和实验结果可以看出，仿真和实验结果吻合得很好。

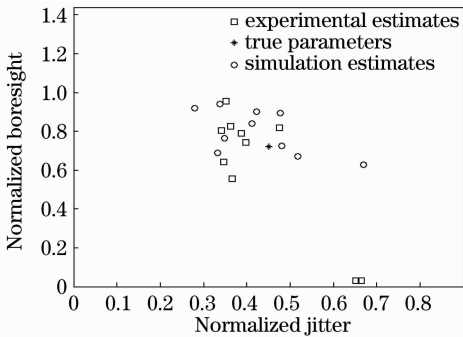


图 5 样本容量 $N=20$ 时，输入误差 $B=0.72$ ， $J=0.45$ 时，10 次仿真和实验估计结果

Fig. 5 Estimates for ten random cases each with $N=20$ and $B=0.72, J=0.45$

为了进一步分析信号样本容量 N 对估计性能的影响，本文研究了不同信号样本容量 N 与估计精度 R_{MSE} 的关系，如图 7 所示。

图 7 中随着估计样本容量的增加，极大似然估计算法的估计性能不断增强。当 $N > 50$ 时， $R_{\text{MSE}} <$

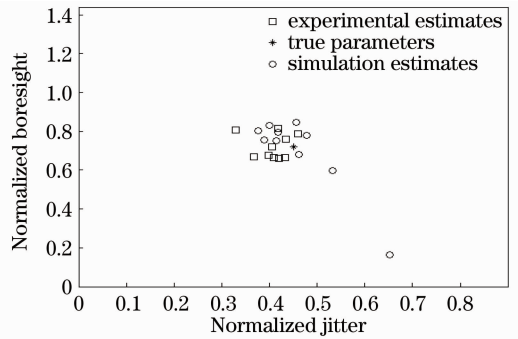


图 6 样本容量 $N=100$ 时，输入误差 $B=0.72$ ， $J=0.45$ 时，10 次仿真和实验估计结果

Fig. 6 Estimates for ten random cases each with $N=100$ and $B=0.72, J=0.45$

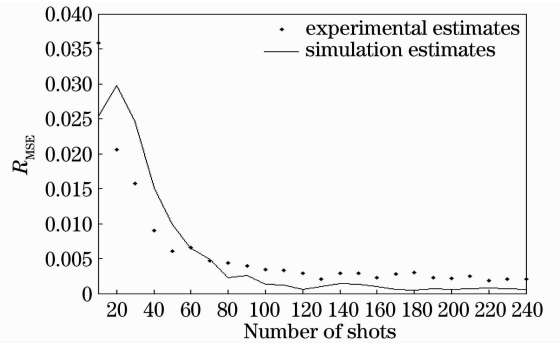


图 7 $B=0.9, J=0.45$ 时，样本容量 N 对估计性能的影响

Fig. 7 Boresight estimation for increasing number of observations N with $B=0.9, J=0.45$

0.005 ，估计误差已经非常小。因此在实验室模拟实时估计中，当 $J=0.45$ 时，在保证估计精度的情况下，取 N 的大小尽量接近 50 可以有效提高瞄准误差估计的实时性。

4.2 抖动和偏差变化对极大似然算法估计性能的影响

图 8 中，随着光束抖动的不断增强，极大似然估

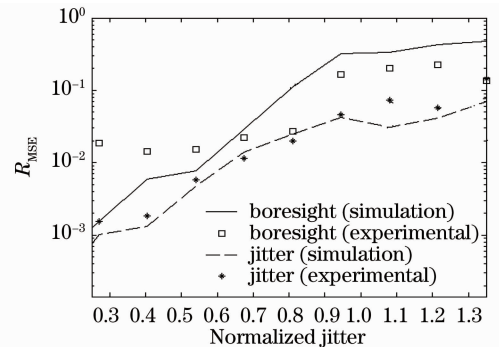


图 8 光束抖动变化对估计性能的影响

Fig. 8 Estimation performance for increasing jitter with $N=50$ and $B=1.125$

计算法的性能明显降低,估计误差 R_{MSE} 增大了 2 个数量级。实际应用中,光束抖动变大主要是由于大气湍流增强、目标跟踪效果变差等引起的,因此,外界环境的变化对瞄准误差估计的性能有直接的影响。图 9 中当光束抖动维持在一定水平时 ($J = 0.3$),极大似然估计算法的性能随输入瞄准偏差的增大有所增强,说明当目标处于光斑边缘时,其估计精度更高^[12]。比较图 8,9 可以看出,仿真和实验估计结果吻合得较好,且偏差估计结果都较差于抖动估计,说明偏差估计更困难更有挑战性。

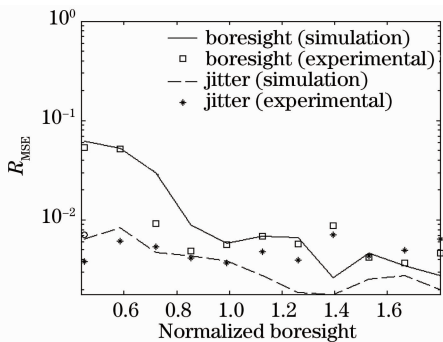


图 9 不同输入偏差对估计性能的影响
Fig. 9 Estimation performance for increasing boresight with $N=50$ and $J=0.3$

4.3 确定估计精度时光束抖动变化对样本容量的要求

本文研究了当估计精度一定时,光束抖动变化对样本容量的影响。仿真和实验结果表明:如图 10,当 $R_{MSE} = 0.01$ 时,随着光束抖动的增强,估计系统所需的样本容量 N 不断增加;且为保证瞄准误差估计精度 $R_{MSE} = 0.01$,当光束抖动 J 在 $0 \sim 0.65$ 以内波动时,所需最小的样本容量为 $N=300$ 。

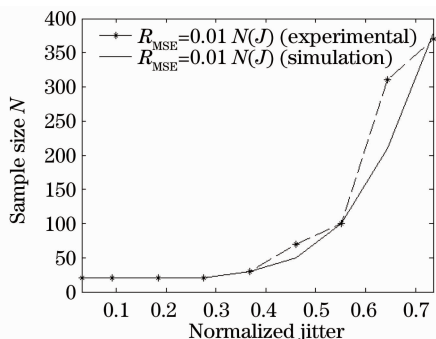


图 10 确定估计精度时光束抖动变化对样本容量的要求
Fig. 10 Sample size changing for increasing jitter with $R_{MSE} = 0.01$ and $B=0.96$

5 闭环瞄准实验演示

上一节的实验结果分析表明,极大似然估计算

法性能优良,且理论仿真和实验结果吻合得很好。根据图 4 的实验装置,将极大似然估计算法模块嵌入到系统中,实时估计瞄准偏差,并将估计结果发送给 DSP,由 DSP 驱动快速反射镜控制光束偏转,实时校准偏差。实验室模拟控制模型如图 11 所示。

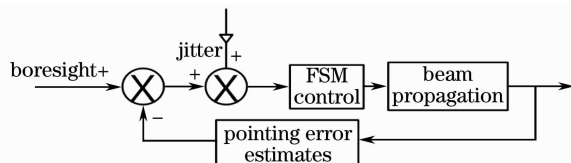


图 11 基于回波信号的闭环光束瞄准控制模型
Fig. 11 Closed-loop control model of beam pointing 其闭环瞄准实验结果如图 12 所示。

图 12 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。从图中可以看出:当信号点 $n < 300$ 时,即信号样本的积累阶段,此时由于存在偏差 ($B=2$),目标偏离远场光斑中心[如图 13(a)所示],归一化回波信号强度在 0.6 处上下波动;当回波信号积累达到样本容量 $N=300$ 的要求时,极大似然估计模块根据存储的信号样本实时估计出瞄准偏差大小,并由快速反射镜控制光束偏转校准偏差;如图 12 中,当信号点 $n > 300$ 时,即瞄准偏差校准以后,目标回到光斑中心[如图 13(b)],归一化回波信号强度接近于 1。实验中,误差估计算法效率较高,在普通的个人计算机上,对样本容量 $N=300$ 的回波信号单次估计耗时小于 5 ms,快速反射镜响应时间小于 3 ms。则在不考虑信号积累时间时,瞄准闭环响应耗时小于 8 ms,这对补偿处于静态或缓变的瞄准偏差已经足够。而本实验模拟的回波接收频率只有 10 Hz,样本容量为 300,因此整个闭环瞄准控制的时间周期取决于回波信号样本的积累时间(即取决于回波脉冲频率和样本容量大小)。

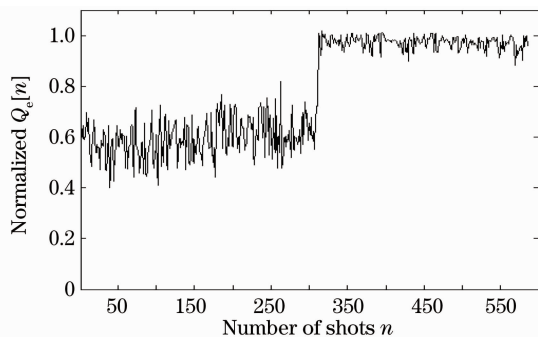


图 12 光束瞄准时回波信号的变化过程
Fig. 12 Changing of return photons with closed-loop beam pointing

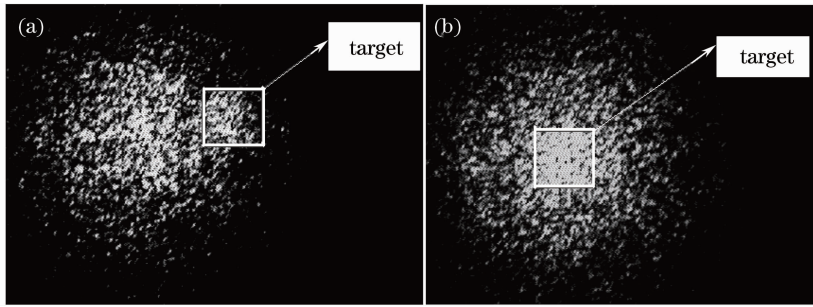


图 13 当 $J=0.5$, $B=2$ 时, 光束瞄准前后的瞬时照片。(a) 瞄准前; (b) 瞄准后

Fig. 13 Photographs of the beam pointing at two different instants with $J=0.5$, $B=2$. (a) Before the closed-loop beam control; (b) after the closed-loop beam control

6 结 论

根据极大似然算法理论建立并完善了计算机仿真模型, 搭建了实验室平台, 分析了极大似然估计算法用于瞄准误差估计的特性和精度。仿真和实验结果表明, 极大似然估计算法表现出优良的性能, 进一步的研究发现瞄准偏差的估计相对光束抖动更具有挑战性。在此基础上, 利用极大似然估计算法实现了基于回波信号的光束闭环瞄准实验室模拟实验。下一步将开展外场实验, 引入光束在大气传输时的后向散射、闪烁、光束分裂、散斑等噪声带来的影响, 提高瞄准系统的抗干扰能力。

参 考 文 献

- 1 Yang Shiji, He Zhiping, 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**: 1359~1371
- 3 A. Erteza. Boresighting a Gaussian beam on a specular target point: a method using conical scan [J]. *Appl. Opt.*, 1976, **15**: 656~660
- 4 P. S. Neelakantaswamy, A. Rajaratnam. Boresight error in the conical scan method of auto-boresighting a laser beam on a specular point-target [J]. *Appl. Opt.*, 1982, **21**: 3607~3612
- 5 G. W. Lukesh, S. M. Chandler, D. G. Voelz. Analysis of satellite laser optical crosssections from the active imaging a) testbed[C]. *SPIE*, 2002, **4538**: 24~33
- 6 G. W. Lukesh, S. M. Chandler. Non-imaging active system determination of target shape through a turbulent medium[C]. *SPIE*, 2000, **4167**: 111~119

- 7 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
- 8 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
- 9 S. Chandler, G. Lukesh. An introduction to RHINO-real-time histogram interpretation of numerical observations [C]. *SPIE*, 2006, **6160**: 61600M
- 10 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
- 11 S. Basu, D. Voelz, S. Chandler *et al.*. Adaptive beam control based on return statistic: laboratory real-time simulation [C]. *SPIE*, 2005, **5895**: 58950M
- 12 Zhou Lei, Tan Yi, Ren Ge. One new quality of the maximum-likelihood estimation of laser pointing system by use of return photon counts[C]. *SPIE*, 2010, **7843**: 78430K
- 13 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
- 14 Chen Chunyi, Yang Huanmin, 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. 大气光通信中大孔径接收性能分析与孔径尺寸选择[J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 2957~2961
- 15 Han Cheng, Bai Baoxing, Yang Huamin *et al.*. Study and simulation of air influences on laser pulse transmission delay time [J]. *Acta Optica Sinica* 2009, **29**(8): 2046~2050
韩成, 白宝兴, 杨华民等. 大气信道对激光脉冲延迟时间影响的仿真研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(8): 2046~2050
- 16 Han Cheng, Bai Baoxing, Yang Huamin *et al.*. Study four-quadrant detector in the free space laser communication [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(8): 2030~2034
韩成, 白宝兴, 杨华民等. 自由空间激光通信四象限探测器性能研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(8): 2030~2034

栏目编辑: 谢 婧