

· 光学设计与制造 ·

回波信号积分法统计光束偏移误差

韩磊^{1,2}, 任戈¹, 周磊^{1,2}, 向春生¹

(1. 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:激光瞄准系统主要存在的瞄准误差是偏移误差和抖动误差, 解决好这两种误差可以使光束能够准确瞄准目标物体, 并且在传输过程中减少信号的损失. 介绍了一种新的光束瞄准技术, 该方法建立在光束远场光强的高斯分布和光束抖动的高斯分布基础上, 利用回波信号的统计得到视轴的偏差, 精度可以达到 $5 \mu\text{rad}$, 而且不需要目标自身返回瞄准信息, 也无须对目标进行扫描, 试验成功验证了这种方法的可行性.

关键词:偏差; 回波信号; 抖动; 快速反射镜; 瞄准系统

中图分类号: TN247; O432.2

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2010)02-0025-04

Integral Statistic Estimation of Boresight Error Using Return Optical Signal

HAN Lei^{1,2}, REN Ge¹, ZHOU Lei^{1,2}, XIANG Chun-sheng¹

(1. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: All laser pointing systems are subject to two fundamental pointing errors which are boresight and jitter errors. The beam can be accurately pointed to the target and the signal loss can be reduced during transmission if the effect of the two main pointing errors are mitigated. A new method of the laser pointing system based on a Gaussian far-field irradiance profile and a Gaussian jitter model is proposed, and which can get boresight error using the information of the return optical intensity without the return signal from sensors on the target neither scanning the target and get the error only $5 \mu\text{rad}$. The experimental results successfully validated the feasibility of this method.

Key words: error; return signal; jitter; fast steering mirror(FSM); pointing system

光束瞄准技术在自由空间光通信、照明跟踪、光学定位等领域有着广泛的应用. 光束瞄准技术主要涉及到 2 个重要参数, 一个是光束偏离目标的误差, 称为偏差, 它是一个由光学测量和控制系统所引起的静态误差; 另一个是光学抖动误差, 它是一个由光学设备抖动、大气湍流引起的随机动态误差. 美国教授 Lukesh 设计了一种利用物体反射的回光来统计这 2 种误差的方法^[1], 这种方法还可以用来检测目标物体的形状^[2,3], 它不需要用特殊的扫描方法去

检测偏差^[4,5], 因此能够应用到一些普通的光学系统中. 但是它要求光束大于目标物体, 还要用到光束横截面的光强分布和目标的反射率. Lukesh 等人设计了一个实时分析误差的应用软件(RHINO)^[6]来估计误差, 并且验证了这种方法的可行性^[7]. Lukesh 在基于反射信号求解误差的基础上提出了 2 种误差估计的方法, 分别为关键比法和卡方法^[1]. 关键比法建立在光强高斯分布和抖动高斯分布的基础上, 只能在没有偏差的情况下估计抖动误差; 卡方法引

收稿日期: 2010-02-23

基金项目: 中国科学院重点实验室预研基金资助课题(A09k002)

作者简介: 韩磊(1983-), 男, 山东临沂人, 硕士研究生, 主要研究方向为光学的测试计量与检测.

入卡方检测估计误差的分布,每对偏差与抖动都对应着一个误差分布.2种方法在试验中都得到了精度很高的偏移误差和抖动误差.积分法是建立在关键比法和卡方法基础上,利用回波信号抖动误差提供的光束位置信息,对信号的理论概率进行积分得到偏差的概率值.实际采集到的信号统计后得到的概率值可以利用积分曲线得到实际的光束偏差.积分法需要大量的采集数据,数据量关系到检测误差的精度.在实时检测中积分法可以更快的得到实际误差,便于系统做出快速的反应.

1 系统模型

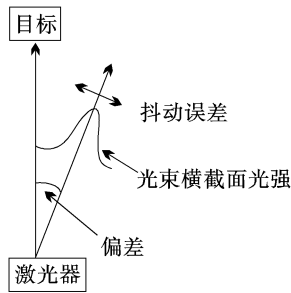


图1 光束瞄准系统

试验原理图如图1所示.激光器发出的光束与目标的夹角就是要求的偏移误差,抖动可以作为一个光束的位置信息,远场的横截面光强分布假设为一个高斯分布.第 n 次返回信号的光强分布设定为 $r[n]$,它的表达式为^[1]

$$r[n] = K \exp\left(-\frac{((x[n] + A)^2 + y^2[n])}{2\Omega^2}\right) \quad n = 1, 2, 3, \dots, N \quad (1)$$

式中, K 代表增益常数; Ω 表示的是光束远场任意一个方向上光强的标准差; $x[n]$ 为第 n 次光强 x 方向的坐标; $y[n]$ 为第 n 次光强 y 方向的坐标; A 表示光束的偏差,代表着光束最大光强值远离目标的一个角度.光束远场的光强也是一个高斯分布,远场光强 $r[n]$ 的大小与 x 方向和 y 方向的坐标有关.由于光学系统内的机械抖动、大气的湍流加上跟踪的抖动都引起了光束自身的抖动,光束抖动的概率密度函数^[1]可以写为

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

其中, σ 代表的是抖动在任何方向上的均方差,可以

把它看成光束的抖动误差.变换式(1)可以得到

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

式中,设定 $z[n] = (x[n] + A)^2 + y^2[n]$. $z[n]$ 的概率密度函数为

$$p(z[n]) = \frac{1}{2\sigma^2} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2}(z[n] + A^2)\right) \cdot I_0\left(0, \frac{A}{\sigma^2} \sqrt{z[n]}\right) u(z[n]) \quad (4)$$

式中, I_0 为第一类贝塞尔函数; $u[n]$ 为标准阶梯函数; $z[n]$ 的概率密度函数有2个变量,分别为 A (偏差)和 σ (抖动误差).对 $z[n]$ 进行积分,可以得到 $z[n]$ 的关于 A 和 σ 的概率分布函数

$$p = \int \frac{1}{2\sigma^2} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2}(z[n] + A^2)\right) I_0\left(0, \frac{A}{\sigma^2} \sqrt{z[n]}\right) dz[n] \quad (5)$$

试验中利用 σ (抖动)变量的信息来测量偏差值的大小,设定 σ 为一个已知量,因此就可以得到一个 $z[n]$ 的概率分布函数,它只与 A (偏差)有关.

$$p = \int \frac{1}{2\sigma^2} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2}(z[n] + A^2)\right) I_0\left(0, \frac{A}{\sigma^2} \sqrt{z[n]}\right) dz[n] d\sigma \quad (6)$$

设定 $z[n]$ 用 z 代表, Ω 的大小为 $\frac{1}{\sqrt{8\ln 2}} \times FWTH$. $FWTH$ 是光束的全波半宽,且 $FWTH = \lambda/D$.其中, λ 是光束的波长; D 为光束的孔径.归一化后的标准光强设定为1,给定一个光强阈值 R ,在其范围内对光强 $z[n]$ 进行积分(实际为 $r[n] \geq R$ 的积分),目的是在偏差 A 变化的情况下得到一个理论曲线,找出在概率 p 时的 A 值.积分方程为

$$p = \int_0^a \int_c^b \frac{1}{2\sigma^2} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2}(z + A^2)\right) I_0\left(0, \frac{A}{\sigma^2} \sqrt{z}\right) dz dA \quad (7)$$

$\{z, 0, a\}$ 代表 z 的积分限为 $0 \sim a$, a 的取值由所取的阈值 R 决定. $\{A, b, c\}$ 代表偏差 A 范围.例如:当 $\sigma = 1.5 \mu\text{rad}$ 时,设定 $K = 1, R = 1/1000$.光束 $FWTH = 4 \mu\text{rad}, \Omega = 1.7 \mu\text{rad}; a = 2\Omega^2 \ln 1000 = 39.9$,假定 A 在区间 $(0, 25 \mu\text{rad})$ 上.利用式(7)得到2个概率曲线如图2、图3所示.

给定一个抖动值很小的情况下,通过图2可以得出在偏差很大的一个范围内概率值都近似于1,当偏差大于 $5 \mu\text{rad}$ 时,概率值陡然变化.因此可以利用小的抖动首先确定所检测偏差的大小范围,把

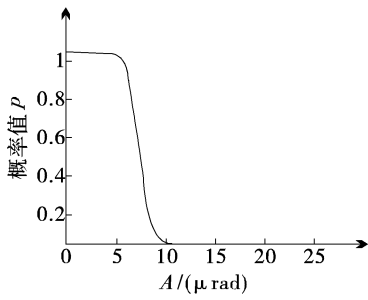


图 2 $\sigma=1$ 时, 偏差 A 所对应的概率值

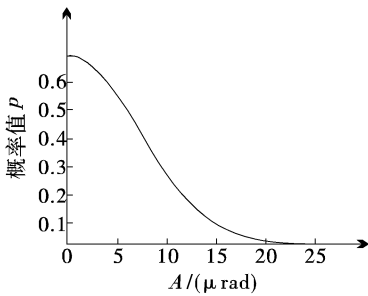


图 3 $\sigma=5$ 时, 偏差 A 所对应的概率值

偏差先分为(0~5 μrad)和(大于 5 μrad)2 个区间. 对于小于 1 的概率可以直接从图 2 中得到相应的偏差值. 给定一个大抖动值, 通过图 3 可以看到在偏差范围内概率值都没有能够达到 1. 而且整个区间内概率值比较平滑地变化着. 在确定偏差偏小的情况下, 就可以利用大抖动来得到一个理想的概率值, 从而得到相应的小偏差.

2 实验室模拟与试验数据的分析处理

激光的波长为 632.8 nm, 经过 10 倍的光束扩束器得到一个目标光束, 它的全波半宽 $FWHM$ 大小为 220 μrad , 光束再由一个手控反射镜反射到快速反射镜(FSM), 快速反射镜是由计算机控制的, 计算机提供一个偏差和一个抖动值加在快速反射镜上, 快速反射镜通过电涡流传感器把实际输出的信号再反馈回计算机组成一个闭环系统. 光束经过快反镜照射到目标物体上. 目标物体选择反射率高的白色反光物体, 可以最大限度地保持光束经其反射后的光强. 全黑的目标背景可以最大程度地减少噪音对反射信号的影响. 反射后的光束需要用光敏传感器来接收, 光敏传感器可以选择光敏二极管或者 CCD 相机. 如果选择了 CCD, 先要对 CCD 相机调焦, 得到目标物体清晰的图像, 便于更好地分辨相邻两点光强(灰度值)的大小. 把 CCD 相机得到的图像

信号传回计算机, 利用图像的灰度值反映光强的大小. 计算机对信号处理后得到一个偏差值, 由此可以与输入的偏差进行验证, 并求出积分法统计光束偏移的精度, 图 4 为试验的光路图.

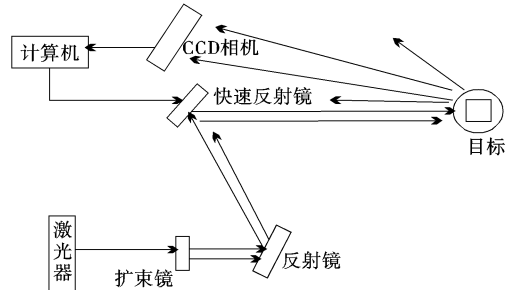


图 4 试验光路图

试验中理想光束的光强是一个高斯分布, 首先检测光斑的实际光强分布, 给计算机输入一个三角信号, 计算机将信号传给快速反射镜, 光束通过快反镜缓慢地来回照射目标, CCD 相机采集一个周期内的 200 幅光强图像.

图 5 为光束的一个光斑图像信号, 图 6 代表采集图像实际光强的分布图, 它是近似的一个高斯分布, 对信号进行滤波后可以得到一个理想的高斯分布, 如图 7 所示. 说明激光器产生的光束简单处理后可以满足试验的要求.

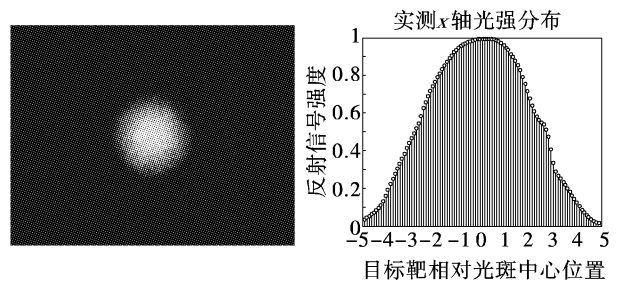


图 5 实际光斑图像 图 6 实际信号的强度分布

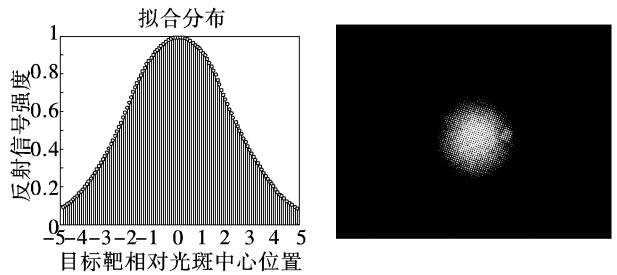


图 7 中值滤波拟合后的光强分布 图 8 偏差为 25 μrad 的实际图像

计算机控制快速反射镜产生一个 25 μrad 的抖

动 σ_0 和一个大小为 $25 \mu\text{rad}$ 的偏差 A_0 , 激光光束稳定后, CCD 相机在一个周期内采集了 1 000 幅图像, 得到 1 000 个光强信号的原始数据. 图 8 为一幅采集图像, 目标物体明显偏出光斑中心位置. 提取图像的光强信号, 每幅图像代表了一个光强值, 光强的强弱反映为图像的灰度值的大小, 每个图像信号都有一个平均的灰度值, 表示为 $I(\text{greyscale value})$, 滤去背景滤波后产生一个包含 1 000 个信号的光强图, 如图 9 所示. 对每个光强信号再进行一次分类, 无任何偏差情况下得到的返回信号光强 I_0 为 9.54(灰度值), 把它作为标准信号, 采集的信号与标准信号进行比值, 得到了归一化后的光强分类图, 如图 10 所示.

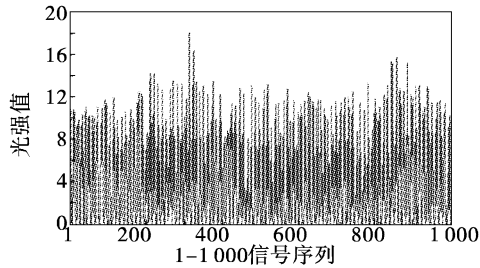


图 9 1000 个信号的光强值

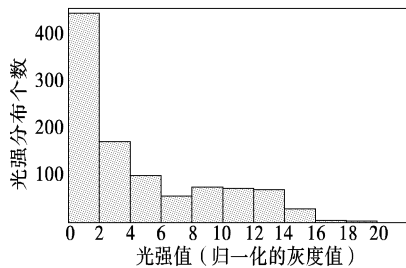


图 10 光强分类图

输入的抖动信号 $\sigma_0 = 25 \mu\text{rad}$ 是一个已知量, 将抖动值 σ_0 带入式(7)得到一个关于偏差 A 的积分概率曲线. 在图 11 中, 利用光强分类的个数统计在标准光强信号半宽范围内信号的个数, 理论返回信号光强值 $I_0 = 9.54$ (灰度值), 取阈值 $R = \sqrt{2}/2 = 0.707$, 阈值的灰度大小 $I_1 = 7.35$, 返回信号达到阈值合格信号 ($I \geq I_1$) 的个数为 $n = 48$, 概率值 p 等于

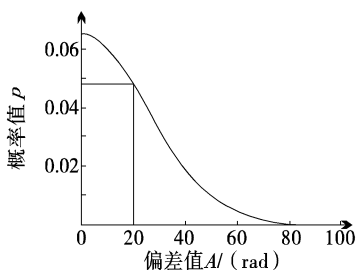


图 11 理论偏差概率曲线

$n/1000 = 0.048$, 在理论曲线上得到, 概率值 p 对应着一个偏差值大小为 $A_1 = 20 \mu\text{rad}$, 如图 11 所示. 开始加入的偏差值 A_0 大小为 $25 \mu\text{rad}$, 实际的偏差与检测的偏差存在大小 ∇A 为 $5 \mu\text{rad}$.

3 试验结论

该方法建立在光强为高斯分布, 并且抖动误差的概率分布也为高斯分布的情况下, 通过设定阈值接收信号, 求解接收信号的概率, 来定量地统计偏移误差的大小. 试验结果表明, 积分法统计光束的偏移误差是可行的, 误差可以达到 $5 \mu\text{rad}$. 这种方法对光束、传感器和快反镜的要求很高, 光束的光强要求保持稳定的状态, 系统的控制端快反镜的精度影响试验的精度水平, 系统的采集器决定了整个试验的精度, 试验中用到的采集传感器是 CCD 相机, 理想的光强接收器是光电二极管传感器, 它的灵敏度可以达到 10 个光子的精度. 利用回波信号控制瞄准误差的方法主要应用于远距离高精度的瞄准中, 外界条件的复杂程度远远高于试验室, 所以试验中必须要考虑到室外的一些复杂条件, 加入一些光束远距离传输过程中的大气湍流、激光散射等影响因素.

参考文献

- [1] G W Lukesh, S M Chandler, D G Voelz. Estimation of laser system pointing performance by use of statistics of return photons[J]. Appl. Opt., 2000, 39:1359 - 1371.
- [2] G W Lukesh, S M Chandler, D G Voelz. Analysis of satellite laser optical crosssections from the active imaging testbed[J]. Proc. SPIE, 2002, 4538:24 - 33.
- [3] G W Lukesh, S M Chandler. Non-imaging active system determination of target shape through a turbulent medium [J]. Proc. SPIE, 2000, 4167:111 - 119.
- [4] P S Neelakantaswamy, A Rajaratram. Boresight error in the conical scan method of autoboresighting a laser beam on a specular point-target[J]. Appl. Opt., 1982, 21:3607 - 3612.
- [5] A Erteza. Boresighting a Gaussian beam on a specular target point: a method using conical scan[J]. Appl. Opt., 1976, 15:656 - 660.
- [6] 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 [J]. Proc. SPIE, 2004, 5552:105 - 113.
- [7] S Basu, D Voelz, S M Chandler, et al. Model-based control for illumination of remote objects, part II: laboratory testbed[J]. Proc. SPIE, 2004, 5552:114 - 122.