

采用四象限探测器的光斑中心定位算法

周子云^{1,2}, 高云国¹, 邵 帅¹, 李一芒¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械及物理研究所, 长春 130033; 2. 中国科学院大学, 北京 100039)

摘要: 为提高激光发射系统的监测精度, 提出了一种基于四象限探测器的光斑中心定位算法, 首先采用均匀分布的椭圆模型对光斑进行分析, 根据四象限探测器工作原理, 通过计算椭圆形光斑在四象限探测器上各对应区域所占面积进而推导光斑中心坐标表达式, 然后采用解析几何的方法求取椭圆光斑的长轴与短轴, 最后搭建四象限监测系统对算法进行实验验证; 结果表明, 所提算法能有效提高四象限探测器的光束监测精度, 较传统方法精度提高 21.3%。

关键词: 四象限探测器; 光斑中心; 椭圆模型; 光束监测

Laser Spot Center Location Algorithm Based on Four Quadrant Detector

Zhou Ziyun^{1,2}, Gao Yunguo¹, Shao Shuai¹, Li Yimang¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

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

Abstract: In order to improve the monitoring accuracy of laser emission system, proposes a spot center location algorithm based on the four quadrant detector, first using the elliptical model uniformly distributed on the spot to carry on the analysis, based on the four quadrant detector working principle, by calculating the oval spot in the four quadrant detector corresponding areas on the area and derive the spot center coordinate expression, then the analytic geometry method for Elliptic Spot long axis and short axis, finally, four quadrant monitoring system was verified by experiments, the results show that the proposed algorithm, beam monitoring accuracy algorithm can effectively improve the four quadrant detector, compared with the traditional methods, improve the accuracy of 21.3%.

Keywords: four quadrant detector; laser spot center; elliptical model; beam monitoring

0 引言

高功率多波段激光发射系统因其具有指向性好, 能量高, 覆盖波段范围广等特点, 在军事领域有重要的应用意义^[1-4]。四象限探测器 (four quadrant detector, QD) 作为一种常用的位置敏感元件 (PSD), 可以得到光斑中心在光敏面上的位置。这种监测方法广泛应用于激光准直、跟踪、测角等精密光电检测系统中, 有分辨率高、响应速度快等优点^[5-9]。

光斑中心的获取是四象限监测方法中的关键技术, 不同学者分别提出了采用圆模型^[6]、椭圆模型^[10]、高斯分布^[11]、统计学分布模型^[7]用以等效光斑在四象限探测器上的分布。圆模型是最早也是最为广泛使用的一种模型, 便于计算但与其它模型相比存在较大误差, 椭圆模型能够减小光束与探测器法线存在微小夹角时所产生的误差, 但以往学者多采用近似计算的方法求取光斑中心, 在精度方面仍有待提高。统计学分布与高斯分布能够更接近真实的反应光斑的分布情况, 但其模型相对复杂, 计算量大。

本文在四象限探测器获取光斑中心参数方面提出一种基于椭圆模型的算法, 首先推导了椭圆形光斑在四象限探测器上各区域所占面积的表达式, 然后采用正交微动法求取椭圆圆心, 并通过解析运算求取椭圆光斑的长轴、短轴, 最后通过实验

证校正算法的正确性。

1 四象限探测器的信号处理

1.1 四象限探测器信号处理经典算法

四象限探测器的每个象限功能上都是光电二极管, 根据其工作特性, 在一定的反偏电压和入射光的作用下, 光电二极管会因受激吸收过程产生电子, 形成电流, 所形成电流的大小和它所接受的光能量的大小成正比。四象限探测器的 4 个光电二极管形成 I、II、III、IV 4 个象限, 当光束入射到四象限探测器的光敏表面上, 以四象限探测器中心为坐标原点, 建立坐标系, 可由图 1 表示。

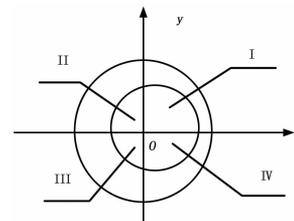


图 1 四象限探测器示意图

通常目标光斑的几何形状对称, 能量分布均匀, 当其位于探测器中心时, 各个象限由于光辐射量相同, 输出相等的光电流, 偏差为 0。而当目标光斑相对探测器中心产生偏移, 4 个象限由于光辐射量不同而产生不同的光电流。通过对光电流的偏差进行数据处理即可推导目标光斑相对四象限探测器中心的偏移, 从而对目标光斑中心进行定位^[12]。

一般地, 由于光电流很小, 为了能够便于处理, 常对每个象限的输出信号进行放大处理。设 I_1, I_2, I_3, I_4 为 4 个象限的

收稿日期: 2014 - 02 - 15; 修回日期: 2014 - 03 - 20。

基金项目: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所三期创新工程资助项目(057X22C050)。

作者简介: 周子云(1987 -), 女, 江苏沛县人, 博士研究生, 主要从事光学精密机械机构设计方向的研究。

输出光电流, 放大电路的增益为 A , 则放大后的输出电压可由公式 (1) 表示。

$$U_i = I_i A, i = (1, 2, 3, 4) \quad (1)$$

设光斑均匀分布, 此时四象限探测系统所得到的信号与光斑投射在光敏面上的面积成正比。设比例系数为 k , 用 $E_i (i = 1, 2, 3, 4)$ 表示 4 个象限对应的信号幅度, 则 (1) 式可改写为如下形式。

$$E_i = kS_i, i = (1, 2, 3, 4) \quad (2)$$

探测器输出的位置信息

$$\begin{aligned} E_x &= \frac{(E_1 + E_4) - (E_2 + E_3)}{E_1 + E_2 + E_3 + E_4} \\ E_y &= \frac{(E_1 + E_2) - (E_3 + E_4)}{E_1 + E_2 + E_3 + E_4} \end{aligned} \quad (3)$$

根据上述原理和约定, 光斑中心坐标 (x_0, y_0) 可用公式 (4) 表示。

$$\begin{cases} x_0 = \frac{1}{k} \frac{(S_1 + S_4) - (S_2 + S_3)}{S_1 + S_2 + S_3 + S_4} \\ y_0 = \frac{1}{k} \frac{(S_1 + S_2) - (S_3 + S_4)}{S_1 + S_2 + S_3 + S_4} \end{cases} \quad (4)$$

这种光斑中心位置坐标的计算方法存在较大的误差, 并且误差依赖于光斑中心相对于探测器原点的坐标及光斑的半径, 但这种计算方法不能获得光斑的半径, 因此也无法对由于光斑半径的变化引起的误差进行补偿。

1.2 椭圆光斑模型信号处理算法

在四象限探测器对激光光束进行监测过程中, 很难调整激光光束与探测器所在平面的法线平行, 又由于高能激光发射系统所发射的激光光束截面并非是规则的圆形。因此采用椭圆模型拟合四象限探测器上的光斑分布较圆模型能够获得更高的精度。

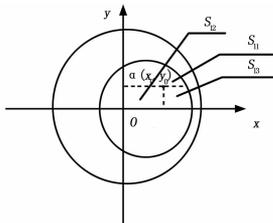


图 2 椭圆形光斑模型示意图

此时 1.1 节中的光斑中心坐标计算方法仍然有效, 因此需要计算椭圆形光斑在四象限探测器中各象限所占面积。设椭圆长轴为 a , 短轴为 b , 则各部分面积如公式 (5)、(6)、(7)、(8) 所示。

$$\begin{aligned} S_1 &= S_{11} + S_{12} + S_{13} = \\ &x_0 y_0 + \frac{bx_0}{2a} \sqrt{a^2 - x_0^2} + \frac{ay_0}{2b} \sqrt{b^2 - y_0^2} + \\ &\frac{ab}{2} \left(\frac{\pi}{2} + \arcsin \frac{x_0}{a} + \arcsin \frac{y_0}{b} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} S_2 &= S_1 - \int_{-x_0}^{x_0} b \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} dx - 2x_0 y_0 = \\ &-x_0 y_0 - \frac{bx_0}{2a} \sqrt{a^2 - x_0^2} + \frac{ay_0}{2b} \sqrt{b^2 - y_0^2} + \\ &\frac{ab}{2} \left(\frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{x_0}{a} + \arcsin \frac{y_0}{b} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

$$S_4 = S_1 - 2S_{12} - 2S_{13} =$$

$$\begin{aligned} &-x_0 y_0 + \frac{bx_0}{2a} \sqrt{a^2 - x_0^2} - \frac{ay_0}{2b} \sqrt{b^2 - y_0^2} + \\ &\frac{ab}{2} \left(\frac{\pi}{2} + \arcsin \frac{x_0}{a} - \arcsin \frac{y_0}{b} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} S_3 &= \pi ab - (S_1 + S_2 + S_4) = \\ &x_0 y_0 - \frac{bx_0}{2a} \sqrt{a^2 - x_0^2} - \frac{ay_0}{2b} \sqrt{b^2 - y_0^2} - \\ &\frac{ab}{2} \left(-\frac{\pi}{2} + \arcsin \frac{x_0}{a} + \arcsin \frac{y_0}{b} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

从上式中可以看出, 直接求解光斑中心位置需求解超越方程, 传统方法取光斑中心在四象限探测器中心附近时计算其近似结果, 因此得到的光斑中心位置精度不高。

2 正交微动法测量椭圆光斑

采用四象限光电探测器进行光电探测定位时, 四象限光电探测器是安装在转台上进行扫描来完成光电定位的。由于四象限光电探测器安装在转台上, 因此可以采用让转台微位移一个小的增量的方法实现四象限光电探测器的精确定位。

设在初始位置测得 4 个象限的光电输出分别为 E_1, E_2, E_3, E_4 , 首先让四象限光电探测器在 x 方向上向 x 轴正方向移动一个微小的增量 Δx , 其等效于过光斑向 x 轴负方向移动 Δx 。此时测得 4 个象限的输出分别为 E_1', E_2', E_3', E_4' 。同理在 x 方向固定不动, 在 y 方向移动 Δy , 可测得输出分别为 $E_1'', E_2'', E_3'', E_4''$ 。

2.1 光斑中心获取算法

为叙述方便并不失一般性, 设式 (2) 中 $k = 1$, 求出 (5) - (6) + (7) - (8) 并将 (2) 式带入可以得到输出结果与光斑中心点坐标间的关系。

$$(E_1 - E_2) + (E_3 - E_4) = 4x_0 y_0 \quad (9)$$

在 x 方向上向 x 轴正方向移动一个微小的增量 Δx 后, 输出与光斑中心点关系如 (10) 式所示。

$$\begin{aligned} (E_1' - E_2') + (E_3' - E_4') = \\ 4x_0 y_0 + 4\Delta x y_0 \end{aligned} \quad (10)$$

同理可得在方向上向 y 轴正方向移动一个微小的增量 Δy 后, 输出与光斑中心点关系如 (11) 式所示。

$$\begin{aligned} (E_1'' - E_2'') + (E_3'' - E_4'') = \\ 4x_0 y_0 + 4\Delta y x_0 \end{aligned} \quad (11)$$

将 (9)、(10)、(11) 三式联立, 并将 k 代回式中, 可以求得光斑中心点坐标的表达式如下。

$$\begin{cases} x_0 = \frac{1}{k} \frac{(E_1' - E_2') + (E_3' - E_4') - [(E_1 - E_2) + (E_3 - E_4)]}{4\Delta y} \\ y_0 = \frac{1}{k} \frac{(E_1'' - E_2'') + (E_3'' - E_4'') - [(E_1 - E_2) + (E_3 - E_4)]}{4\Delta x} \end{cases} \quad (12)$$

2.2 长轴与短轴计算方法

传统算法求解椭圆模型光斑中心位置时, 只考虑了光斑中心靠近四象限探测器中心时的情况, 并且运用了近似算法。上述方法在求取椭圆形光斑长短轴长度时依然运用了近似计算。采用正交微动法不但能计算椭圆形光斑的中心位置, 同时能计算出椭圆模型的长短轴长度, 其精度高于采用近似计算的方法。

根据四象限探测器工作原理, 结合 (2) 式可推导出分别在 x 轴 y 轴移动微小增量后关于 k 的等式。

$$\frac{\Delta E_1}{S_{\Delta x}} = \frac{\Delta E_2}{S_{\Delta y}} = k \quad (13)$$

式中, ΔE_1 为椭圆形光斑在 x 轴移动微小增量后一、四象限输出结果的变化量, $S_{\Delta x}$ 为光斑在一、四象限所占面积的变化量, ΔE_2 为椭圆形光斑在 y 轴移动微小增量后二、三象限输出结果的变化量, $S_{\Delta y}$ 为光斑在二、三象限所占面积的变化量。 $\Delta E_1, \Delta E_2, S_{\Delta x}, S_{\Delta y}$ 的表达式如下。

$$\Delta E_1 = E_1' + E_4' - (E_1 + E_4) \quad (14)$$

$$\Delta E_2 = E_2' + E_3' - (E_2 + E_3) \quad (15)$$

$$S_{\Delta x} = 2a\Delta x \sqrt{1 - \frac{x_0^2}{b^2}} \quad (16)$$

$$S_{\Delta y} = 2b\Delta y \sqrt{1 - \frac{y_0^2}{a^2}} \quad (17)$$

将 (13), (14), (15), (16) 和 (17) 式联立并将 $\Delta E_1, \Delta E_2$ 视作已知量, 求得椭圆光斑长短轴参数如式 (18) 所示。

$$\begin{cases} a = \sqrt{\frac{(\Delta E_1 \Delta E_2)^2 / 4\Delta x^2 - 4k^4 x_0^2 y_0^2 \Delta y}{k^2 \Delta E_2^2 - 4k^4 x_0^2 \Delta y^2}} \\ b = \sqrt{\frac{(\Delta E_1 \Delta E_2)^2 / 4\Delta y^2 - 4k^4 x_0^2 y_0^2 \Delta x}{k^2 \Delta E_1^2 - 4k^4 y_0^2 \Delta x^2}} \end{cases} \quad (18)$$

3 实验验证

搭建实验平台如图 3 所示。实验平台主要由波长 $\lambda = 532 \text{ nm}$ 的连续激光器, QP100-6 四象限采集系统, 电控位移台, 快速反射镜, 计算机, 旋转平台和 $f = 75 \text{ mm}$ 的透镜组成。

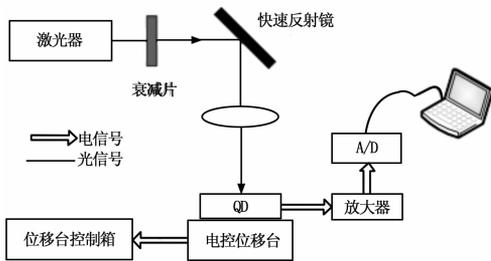


图 3 实验平台示意图

实验中通过快速反射镜的转角计算光斑中心的标准值, 分别采用 1.1 和 2.1 中的方法计算光斑中心位置并同标准值做比较得到结果如图 4~5 所示。

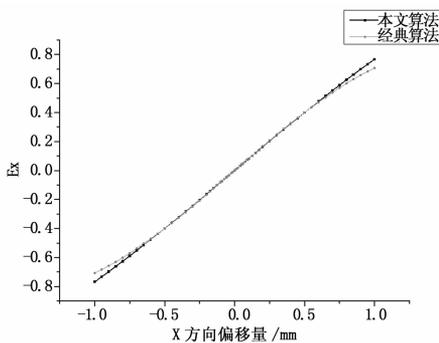


图 4 X 轴方向实验结果

从结果中可以看出, 采用本文提出的光斑中心定位方法精度高, 更接近真实值。通过 2.2 中办法可计算出椭圆光斑长轴为 2.16 mm , 短轴为 1.92 mm , 与实际测量结果相符合。实验

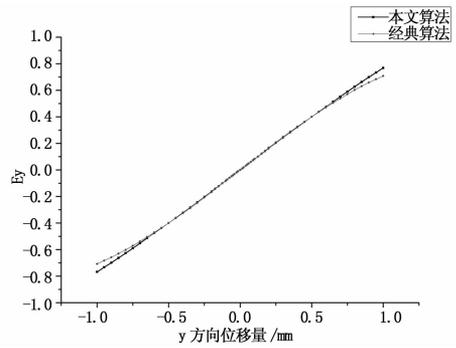


图 5 Y 轴方向实验结果

结果显示虽然本文提出的算法较经典算法定位精度高, 但依然存在细小的误差, 其主要来源有: 大气波动, 接收光斑直径, 光斑能量分布形式, 4 个象限不均匀性, 噪声以及采用的计算方法等。目前随着技术水平的提高, 噪声、四象限不均匀性等造成的误差已低至可以忽略。

4 结论

本文提出了一种基于四象限探测器的光斑中心定位算法, 首先采用均匀分布的椭圆模型对光斑进行分析, 根据四象限探测器工作原理, 通过计算椭圆形光斑在四象限探测器上各对应区域所占面积进而推导光斑中心坐标表达式, 然后采用解析几何的方法求取椭圆光斑的长轴与短轴, 最后搭建四象限监测系统对算法进行实验验证, 结果表明, 所提算法能有效提高四象限探测器的光束监测精度, 较传统方法精度提高 21.3% 。

参考文献:

- [1] Ng T W, Tan H Y, Foo S L. Small Gaussian laser beam diameter measurement using a quadrant photodiode [J]. Optics & Laser Technology, 2007, 39: 1098 - 1100.
- [2] Masahiro Toyoda, Kenichi Araki, Yoshiaki Suzuki. Measurement of the characteristic of a quadrant avalanche photodiode and its application to a laser tracking system [J]. Optical Engineering, 2002, 41 (1): 145 - 149.
- [3] 冯 强, 耿爱辉. 基于 LabVIEW 的四象限光电探测器数据采集系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (5): 1397 - 1399.
- [4] 周韦琴, 马 宏. 炮管直线度测量仪的研制 [J]. 计算机测量与控制, 2006, 14 (7): 929 - 930.
- [5] 汤晓君, 李玉军, 刘君华, 等. 基于四象限光电探测器的对准与测量系统优化设计——系统优化 [J]. 仪器仪表学报, 2008, 29 (7): 1359 - 1364.
- [6] 王 兵, 王伟国, 郭汝海, 等. 基于四象限探测器的监视对准实验 [J]. 光机电信息, 2011, 28 (12): 37 - 40.
- [7] 杨 翠, 邹 建, 刘得志, 等. 四象限光电探测器定位误差分析 [J]. 传感器与微系统, 2009, 28 (5): 49 - 51.
- [8] 匡翠方, 冯其波, 冯俊艳, 等. 四象限探测器用作激光准直的特性分析 [J]. 光学技术, 2004, 30 (4): 387 - 389.
- [9] 王秀青, 徐 德, 谭 民, 等. 一种基于四象限光电探测器的对准新方法 [J]. 传感器与微系统, 2009, 28 (5): 49 - 51.
- [10] 王新影. 激光靠泊测角系统研究 [D]. 大连: 大连海事大学, 2010.
- [11] 孙晓林. 基于四象限探测器的高精度定位算法研究 [D]. 大连: 大连海事大学, 2012.
- [12] 林志琦, 李会杰, 郎永辉, 等. 用四象限光电探测器获得光斑参数 [J]. 光学精密工程, 2009, 17 (4): 764 - 770.