

文章编号 1004-924X(2009)04-0764-07

用四象限光电探测器获得光斑参数

林志琦^{1,2}, 李会杰², 郎永辉², 尹福昌¹

(1. 长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022;
2. 长春工业大学 电气与电子工程学院, 吉林 长春 130012)

摘要:对四象限光电探测器的信号处理方法进行了研究。分析了用四象限光电探测器获得光斑参数的方法,研究了其各项指标及误差来源,提出了一种新的采用微动法的四象限光电探测器光斑参数的计算方法,并传统方法进行了比较。采用微动法获取四象限光电探测器的光斑参数,不仅能够得到光斑的光心坐标,还能够计算出传统方法得不到的光斑的半径,增加了信息量。与传统的方法相比,该方法具有误差与光斑中心位置、光斑半径无关的优点。理论分析、仿真和实验都证明,采用四象限光电探测器获得光斑参数的方法具有相当多的优点。获得的参数由两个增加到三个,采用 $\Phi 30$ mm的GaAs-PIN四象限探测器时,最大误差由18%减小到1.2%以下,将其应用于车辆间大气激光通信光电精定位系统中证明,响应时间可减少30.75%。

关键词:四象限光电探测器;光电定位;光电跟踪;光斑

中图分类号:TB133 **文献标识码:**A

Obtaining spot parameters by quadrant photodetectors

LIN Zhi-qi^{1,2}, LI Hui-Jie², LANG Yong-hui², YIN Fu-Chang¹

(1 *Institute of Opto-electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130012, China*; 2. *School of Electric and Electronic Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China*)

Abstract: Signal processing method for quadrant photo-detectors are investigated and how to obtain the spot parameters from quadrant photo-detectors is analyzed. Based on the research of the sources of their indices and errors for the detectors, a new calculation method on obtaining the spot parameters of quadrant photo-detector by a jiggling method is proposed. In comparison to the traditional methods, the proposed method by jiggling method can obtain not only the spot center, but also the spot radius, which can provide more relevant information different from any traditional method. In addition, this method has the advantage over the traditional method that the errors are unrelated to the spot center and the spot radius. Theoretical analysis and simulation experiments have proved that obtaining the spot parameters of quadrant photo-detector by jiggling method has considerable advantages. Field tests in the atmospheric laser photoelectric precision positioning system of inter-vehicle communications is shown that this method is advantageous in speed, accuracy and convergence. Obtained param-

收稿日期:2008-12-12;修订日期:2009-03-15.

基金项目:装备预研基金资助项目(No. 404050603)

eters are from 2 to 3 with the method. When the 30 mm GaAs-PIN quadrant detector is used, the maximum error decreases from 18% to 1.2%.

Key words: quadrant photodetector; photoelectric positioning; photoelectric tracking facula

1 引言

象限探测器(Quadrant detector, QD)、横向效应光电探测器(Lateral Effect Detectors)和多元探测器(如 CCD)是光学跟踪中普遍采用的3种位置传感器。在空间卫星光通信 ATP 技术、现代原子力显微镜的悬臂位置探测、激光准直、激光自动跟踪、激光制导中广泛地采用象限探测器(QD)对目标的方位信息进行探测,实现对目标的定位跟踪^[1]。与另外两类探测器相比,象限探测器具有很多优点。

象限探测器也称之为象限光电池,是通过光刻把一个圆形光敏面分割成数个(二、四、六、八)相互隔离的面积相等、形状相同、位置对称的区域(象限),并分别镀上前极,引出输出线,而后极则仍为一个整片。实际上每个区域相当于一个光电探测器,在理想状态下,每个区域的暗电流应相等。常用的象限光电探测器为四象限探测器(Four-quadrant detector)。

四象限探测器作为一种常用的位置敏感器件(Position Sensitive Detector, PSD),当入射光点落在器件感光面的不同位置时,四象限探测器的每个象限输出不同幅度的电信号,通过对这些信号的幅度进行计算,可以确定入射光斑中心在感光面上的位置。这种探测器广泛应用于激光准直、测角、自动跟踪等精密光电检测系统中,可以探测目标位置的连续变化,具有位置分辨率高、响应速度快等特点。

影响四象限光电检测系统工作精度的因素主要包括外围大气环境、目标光斑大小和光斑能量分布、器件响应差异以及噪声、四象限不均匀性及系统本身采用的计算方法。随着工艺的进步和技术水平的提高,器件响应差异以及噪声、四象限不均匀性造成的误差可以忽略。在相同的大气环境中,采用四象限光电探测器进行光电定位时,系统本身采用的计算方法对定位的影响占主导地位^[2]。

为了提高四象限探测器探测系统目标方位信

息的探测能力,本文根据四象限探测器的工作原理,深入研究了光斑几何位置、大小和探测器面积的关系,提出了微动法获得光斑参数的方法,克服了四象限探测器的误差与光斑半径、光心位置的依赖关系,消除了测量误差关联,并解决了如何得到光斑半径的问题。

2 传统四象限光电探测器的信号处理方法

四象限探测器每个象限的输出取决于两方面的因素,即入射光的能量 I 和光斑照射到该象限的面积 $S_i (i = a, b, c, d)$, 如果光斑的能量分布不均匀,则输出也是位置 (x, y) 的函数,可用 $I(x, y)$ 表示 I 。

通常目标光斑几何形状对称、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。当目标光斑相对探测器中心产生偏移,四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处理即可推知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。

传统的四象限光电定位信号处理采用模拟电路实现,从模拟电路的信号处理能力出发,实际信号处理电路采用和差比电路^[2]对输出信号进行处理。由运算放大器组成的加法、减法、除法运算电路对测得的各象限光电流值进行计算,求得光斑中心坐标 (x_0, y_0) 的值^[3-4]。

将四象限探测器的坐标轴和系统的位置坐标轴重合,目标光斑沿系统的位置坐标系移动方向与四象限坐标系的移动方向一致。通常,由于光电流很小,为了能够处理,常对每个象限的输出信号进行放大处理。设 I_1, I_2, I_3 和 I_4 为 4 个象限的输出光电流,放大电路的增益为 A , 以 U_1, U_2, U_3 和 U_4 分别表示放大后四路各自的输出电压值,则:

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

设光斑均匀分布,此时四象限探测系统得到的信

号电流与光斑投射在光敏面上的面积成正比。设比例系数为 k , 用 q_i ($i=1, 2, 3, 4$) 表示一到四象限的信号幅度, 则式(1)可表示为:

$$q_i = kS_i, \quad (2)$$

按照以上约定, 以 x_0 和 y_0 表示目标光斑相对探测面中心的偏移, 可以得到:

$$\begin{cases} x_0 \propto \frac{(U_1+U_4)-(U_2+U_3)}{U_1+U_2+U_3+U_4} \\ y_0 \propto \frac{(U_1+U_2)-(U_3+U_4)}{U_1+U_2+U_3+U_4} \end{cases}, \quad (3)$$

实际上, 并非在整个光敏面范围内系统得到的光斑能量中心偏移信号 x_0 (或 y_0) 都满足以上正比关系。仅在线性区内, 其比例关系为常数, 设比例系数为 G , 则在线性区内上式可写为:

$$\begin{cases} x_0 = G \frac{(U_1+U_4)-(U_2+U_3)}{U_1+U_2+U_3+U_4} \\ y_0 = G \frac{(U_1+U_2)-(U_3+U_4)}{U_1+U_2+U_3+U_4} \end{cases}, \quad (4)$$

将式(1)代入式(4), 消去比例常数 G , 得到 x_0 (或 y_0) 和光斑分别投射在 4 个象限的面积之间的对应关系:

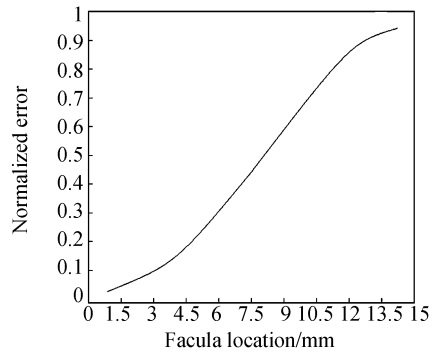
$$\begin{cases} x_0 = \frac{(S_1+S_4)-(S_2+S_3)}{S_1+S_2+S_3+S_4} \\ y_0 = \frac{(S_1+S_2)-(S_3+S_4)}{S_1+S_2+S_3+S_4} \end{cases}, \quad (5)$$

将四象限探测器的坐标轴相对于系统位置坐标轴顺时针旋转 45° , 当光斑在系统坐标系内沿 x 方向移动时, 相应地在四象限探测器坐标系内沿对角线移动, 同理其光斑中心为^[5]:

$$\begin{cases} x_0 = \frac{S_1-S_3}{S_1+S_2+S_3+S_4} \\ y_0 = \frac{S_2-S_4}{S_1+S_2+S_3+S_4} \end{cases}. \quad (6)$$

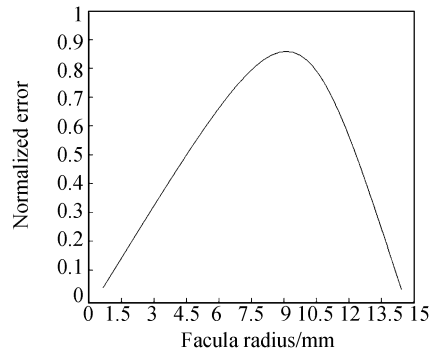
目前采用的 1.2 所述的四象限光电探测器的光斑中心位置坐标的计算方法存在较大的误差, 并且误差依赖于光斑中心相对于探测器原点的坐标及光斑的半径, 但这种计算方法不能获得光斑的半径, 因此也无法对由于光斑半径的变化引起的误差进行补偿。误差与光斑中心位置及光斑半径的依赖关系如图 1 所示^[6]。

图 1 是 QD 输出归一化误差信号与光斑大小及偏移量的关系, 图 1 中, 横坐标分别为归一化的光斑中心相对于探测器原点的坐标距离和光斑半径, 纵坐标为归一化的误差信号。两条曲线分别表示误差对光斑半径及光斑中心的依赖性。



(a) QD 输出归一化误差信号与偏移量的关系

(a) Relationship between QD output error signal and spot offset



(b) QD 输出归一化误差信号与光斑大小的关系

(b) Relationship between QD output error signal and spot size

图 1 QD 输出归一化误差信号与光斑大小及偏移量的关系

Fig. 1 Relationship between the QD output error signal and the size and offset of facula

通过图 1 所示曲线和以上讨论可以得出以下结论:(1)传统四象限光电探测器光斑中心位置的计算误差随着光斑中心的相对位置 (x_0, y_0) 的增大而增大。(2)投射到四象限光敏面上的目标像斑的大小即光斑半径对误差也有较大影响^[7]。

为了克服以上缺点, 本文提出了采用微动法的四象限光电探测器信号处理方法。

3 由光斑中心位置坐标描述光斑面积

如图 2 所示, 四象限光电探测器的中心为 O 点, 光斑的中心为 A 点, 以四象限光电探测器的

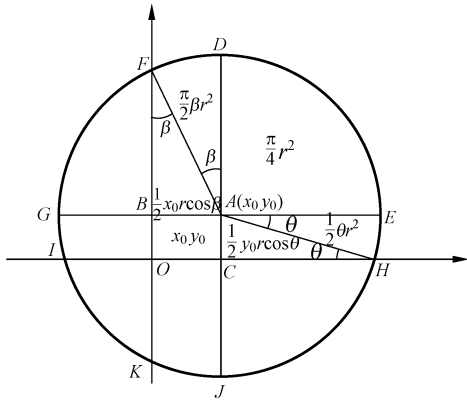


图 2 光斑质心在探测器坐标系中的位置

Fig. 2 Position of facula centroid in the coordinate system of the detector

中心 O 为原点建立直角坐标系, 设光斑的中心 A 的坐标为 (x_0, y_0) , 光斑的半径为 r , 则可以分别计算出光斑在探测器各象限上的面积。设光斑在第一象限, 则光斑在第一象限的面积 S_1 为 $1/4$ 光斑的面积 $1/4\pi r^2$, 加上扇形 FAD 的面积 $1/2\beta r^2$, 再加上三角形 BFA 的面积 $1/2x_0 r \cos \beta$, 再加上矩形 $OBAC$ 的面积 $x_0 y_0$, 还要加上扇形 EAH 的面积 $1/2\theta r^2$ 和三角形 ACH 的面积 $1/2y_0 r \cos \theta$ 。即:

$$S_1 = \frac{1}{4}\pi r^2 + \frac{1}{2}\beta r^2 + \frac{1}{2}x_0 r \cos \beta + \frac{1}{2}\theta r^2 + \frac{1}{2}y_0 r \cos \theta + x_0 y_0, \quad (7)$$

光斑在第二象限上的面积为 $1/4$ 光斑面积减去扇形 FAD 与三角形 FBA 的面积之和 $1/2\beta r^2 + 1/2x_0 r \cos \beta$, 再加上 $GBOI$ 区域的面积, 并且 $GBOI$ 区域的面积等于 $GACI$ 区域的面积减去矩形 $OBAC$ 的面积 $x_0 y_0$, 由对称性知道 $GACI$ 区域的面积与 $AEHC$ 区域的面积相等为 $1/2\theta r^2 + 1/2x_0 r \cos \beta$, 所以:

$$S_2 = \frac{1}{4}\pi r^2 - \frac{1}{2}\beta r^2 - \frac{1}{2}x_0 r \cos \beta + \frac{1}{2}\theta r^2 + \frac{1}{2}x_0 r \cos \theta - x_0 y_0, \quad (8)$$

光斑在第三象限的面积为 $1/4$ 圆的面积减去 $GACI$ 区域的面积, 再减去 $COKJ$ 区域的面积, $COKJ$ 的区域面积为 $1/2\beta r^2 + 1/2x_0 r \cos \beta - x_0 y_0$, 故:

$$S_3 = \frac{1}{4}\pi r^2 - \frac{1}{2}\beta r^2 - \frac{1}{2}x_0 r \cos \beta - \frac{1}{2}\theta r^2 - \frac{1}{2}x_0 r \cos \theta + x_0 y_0, \quad (9)$$

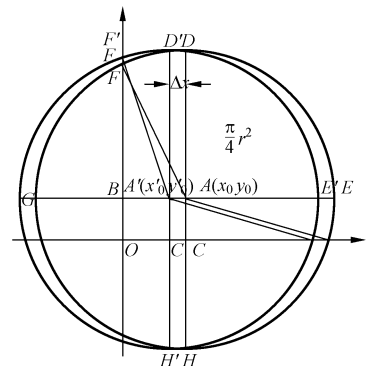
同理可得光斑在第四象限的面积为:

$$S_4 = \frac{1}{4}\pi r^2 + \frac{1}{2}\beta r^2 + \frac{1}{2}x_0 r \cos \beta - \frac{1}{2}\theta r^2 - \frac{1}{2}x_0 r \cos \theta + x_0 y_0. \quad (10)$$

4 通过正交微位移测量光斑的参数

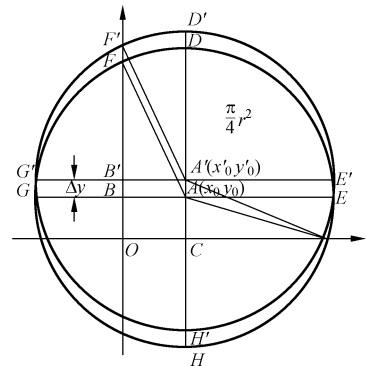
4.1 四象限光电探测器的正交微动

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。



(a) X 方向移动

(a) Moving in the X direction



(b) Y 方向移动

(b) Moving in the Y direction

图 3 四象限光电探测器微动法信号处理原理
Fig. 3 Signal processing principle of quadrant detector by jiggling method

设在初始位置测得 4 个象限的光电输出分别为 q_1, q_2, q_3, q_4 , 如图 3 所示, 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 , 相当于过光斑向 x 负方向移动了 Δx 。此时测得四个象限的输出分别为 q_1', q_2', q_3', q_4' , 如图 3(a) 所示。

再让四象限光电探测器沿 y 的正向移动 Δy , 此时相当于光斑沿 y 轴负方向移动了 Δy 。此时测得 4 个象限的光电输出分别为 $q_1'', q_2'', q_3'', q_4''$, 如图 3(b) 所示。

4.2 通过正交微动计算光斑中心坐标

为了分析方便, 设式(2)中 $k=1$, 先求出(7) - (8) + (9) - (10) 再将式(2)代入得:

$$(q_1 - q_2) + (q_3 + q_4) = 4x_0 y_0, \quad (11)$$

若将四象限探测器沿 x 轴方向上移动 Δx 后的新测量值 q_1', q_2', q_3', q_4' 代入式(11), 因 y_0 没有改变, 所以:

$$(q_1' - q_2') + (q_3' - q_4') = 4x_0' y_0, \quad (12)$$

由于只有 x 轴方向有移动为 Δx 则:

$$x_0' = x_0 + \Delta x, \quad (13)$$

将式(13)代入式(12)有:

$$(q_1' - q_2') + (q_3' - q_4') = 4(x_0 + \Delta x)y_0 = 4x_0 y_0 + 4\Delta x y_0, \quad (14)$$

将 $4x_0 y_0$ 移到等号左端, 并将式(11)代入式(14)中则有:

$$(q_1' - q_2') + (q_3' - q_4') - [(q_1 - q_2) + (q_3 - q_4)] = 4\Delta x y_0, \quad (15)$$

同理有:

$$(q_1'' - q_2'') + (q_3'' - q_4'') - [(q_1 - q_2) + (q_3 - q_4)] = 4\Delta y x_0, \quad (16)$$

式(15)、(16)两式中 Δx 和 $\Delta y, q_1 \sim q_4, q_1' \sim q_4', q_1'' \sim q_4''$ 均为已知, 故可求得

$$\begin{cases} x_0 = \frac{(q_1'' - q_2'') + (q_3'' - q_4'') - [(q_1 - q_2) + (q_3 - q_4)]}{4\Delta y} \\ y_0 = \frac{(q_1' - q_2') + (q_3' - q_4') - [(q_1 - q_2) + (q_3 - q_4)]}{4\Delta x} \end{cases}, \quad (17)$$

以上推导过程中, 假设 $k=1$, 实际应用中可将实际常数 k 值(由探测器的性能确定)代入, 实际用来计算的为式(18)。

$$\begin{cases} x_0 = \frac{1}{k} \frac{(q_1'' - q_2'') + (q_3'' - q_4'') - [(q_1 - q_2) + (q_3 - q_4)]}{4\Delta y} \\ y_0 = \frac{1}{k} \frac{(q_1' - q_2') + (q_3' - q_4') - [(q_1 - q_2) + (q_3 - q_4)]}{4\Delta x} \end{cases}, \quad (18)$$

4.3 微动法计算四象限光电探测器的光斑半径

由图 3(a) 可知, 在 x 轴方向上光斑移动时, 区域 $AEHC$ 的面积移动后为 $A'E'H'C'$ 没有改变, 光斑在一、四象限的减少与二、三象限的增加面积

$$\Delta S_{I-IV} = S_{OFDC} - S_{OFD'C'} = S_{CC'DD'} \approx (r + y_0) \Delta x, \quad (19)$$

同理, 由图 3(b) 可知:

$$\Delta S_{II-III} = S_{COFD} - S_{COF'D'} = S_{BB'EE'} \approx (r + x_0) \Delta y, \quad (20)$$

在 x 轴与 y 轴微动时光强是不变的, 也就是在 x 轴方向上, 一、二两象限上单位面积的响应与在 y 轴方向上一、四两象限上单位面积的响应相等, 即:

$$\frac{\Delta S_{I-IV}}{\Delta q_{I-IV}} = \frac{\Delta S_{II-III}}{\Delta q_{II-III}}. \quad (21)$$

将式(21)与式(19)代入式(20)有:

$$r = \frac{\Delta q_{I-IV} x_0 \Delta y - \Delta q_{II-III} y_0 \Delta x}{\Delta q_{II-III} \Delta x - \Delta q_{I-IV} \Delta y}. \quad (22)$$

式(22)中 x_0, y_0 可由式(17)算出, $\Delta x, \Delta y$ 为四象限光电探测器的微位移, 由转台带动产生, 是人为的动作, 动作的距离是已知的。

Δq_{II-III} 是 x 轴方向上移动时光电探测器左侧和右侧的响应差 $(q_1 + q_4) - (q_1' + q_4')$ 或 $(q_2 + q_3) - (q_2' + q_3')$, Δq_{I-IV} 是 y 轴移动 Δy 后上面和下面的响应差 $(q_1 + q_2) - (q_1' + q_2')$ 或 $(q_2 + q_4) - (q_2' + q_4')$, 可以获得所需光斑半径。

5 误差分析与实验结果

微动法通过分别在 x 方向上移动 Δx , 在 y 轴方向移动 Δy , 由移动前后的响应 $q_1, q_2, q_3, q_4, q_1', q_2', q_3', q_4', q_1'', q_2'', q_3'', q_4''$ 可以求得光心坐标为:

$$\begin{cases} x_0 = \frac{(q_1' - q_2') + (q_3' - q_4') - [(q_1 - q_2) + (q_3 - q_4)]}{4\Delta y} \\ y_0 = \frac{(q_1 - q_2) + (q_3 - q_4) - [(q_1'' - q_2'') + (q_3'' - q_4'')]}{4\Delta x} \end{cases}, \quad (23)$$

光斑的半径为:

$$r = \frac{\Delta q_{I-IV} x_0 \Delta y - \Delta q_{II-III} y_0 \Delta x}{\Delta q_{II-III} \Delta x - \Delta q_{I-IV} \Delta y}. \quad (24)$$

5.1 光斑半径对测量误差的影响

实际测量过程中, 照射到四象限光电探测器上的光斑大小对测量误差有很大的影响。图 4 是

采用微动法测量的光斑中心位置与理想光斑中心位置随光斑半径的不同而变化的关系曲线。

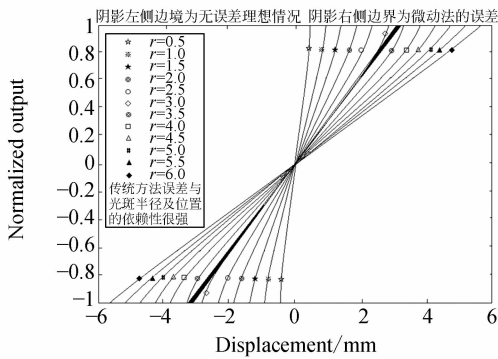


图4 四象限探测器微动法信号处理与传统方法的比较

Fig. 4 Comparison of signal processing by quadrant detector and traditional method

图4中,中间窄小的阴影部分左侧边界线为理想的无误差输出与位置关系,阴影部分右侧边界线为采用微动法时,用弦近似代替弧带来的误差,由于 Δx 和 Δy 都很小(实验中取 $100\ \mu\text{m}\sim 500\ \mu\text{m}$),且与光斑中心位置及半径无关,所以这个误差不仅很小而且与光斑中心位置及半径无关,图中阴影部分是微动法的误差,使用 $\Phi 30\ \text{mm}$ 的GaAs-PIN四象限探测器时,最大误差仅在1.2%以下。

图4中其它的曲线为光斑半径不同时的输出与光斑中心位置的关系,这些曲线与阴影左侧边界的理想曲线的距离为传统方法产生的误差,相比有较大的误差。使用 $\Phi 30\ \text{mm}$ 的GaAs-PIN四象限探测器时,最大误差达到18%。

由图4可以看出,采用本文所研究的方法不但使光斑位置及光斑半径对光心位置的误差影响都很小而且与光斑中心位置及半径无关,并且克服了目前采用其它光心位置计算方法带来的随光斑位置、光斑半径不同,误差变化大,并且在很大的范围内误差都较大的缺点。同时,本方法还可以测出光斑半径,克服了目前采用的四象限光电探测器进行光电定位时无法确定光斑半径的缺点,具有相当广泛的实用价值。

5.2 微动量的大小对光斑半径的影响

由于粗跟踪机构的存在,光斑可以落到四象限探测器的近中央,即图2中的 θ 和 β 一般比较小。在微动时,由于采用数字方式处理信息,其分

辨率受到技术限制,因此较小的微动量会引起量化误差,所以微动量 Δx 、 Δy 不应取太小。由于

$$\begin{cases} \frac{\partial r}{\partial \Delta x} = \frac{(y_0 - x_0) \cdot \Delta y \cdot \Delta q_{I-IV} \cdot \Delta q_{II-III}}{(\Delta q_{II-III} \cdot \Delta x - \Delta q_{I-IV} \cdot \Delta y)^2} \\ \frac{\partial r}{\partial \Delta y} = \frac{(x_0 - y_0) \cdot \Delta x \cdot \Delta q_{I-IV} \cdot \Delta q_{II-III}}{(\Delta q_{II-III} \cdot \Delta x - \Delta q_{I-IV} \cdot \Delta y)^2} \end{cases} \quad (25)$$

图5中曲线1为处理信息时12位ADC量化造成的误差曲线,曲线2为微动量对光斑半径的误差曲线。由上图可以看出,微动量太小时,ADC量化造成的误差对光斑半径影响较大;当微动量太大时,光斑半径 r 的误差会显著增大。所以,在实际应用中取微动量最优值 Δx_{opt} 、 Δy_{opt} 。

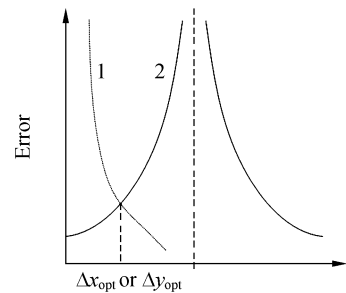


图5 微动量对光斑半径的影响

Fig. 5 Influence of jiggle value on sport radius

5.3 实验结果

在车辆间大气激光通信的光电精定位系统中,车辆间距离为5 km,发散角为1 mrad时,到达探测器的光斑直径的理论值为5.68 mm,实际测量四象限探测器上光斑直径为5.5 mm,误差为3.2%。定位时间为300 ms,采用传统算法进行定位时定位时间约为400 ms~1 s,因此响应时间减小了30~75%。

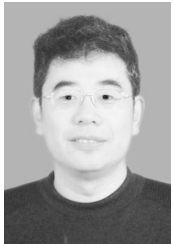
6 结论

本文提出的微动法在 x 、 y 轴方向上微动一个增量 Δx 、 Δy ,可以较为精确地计算出光斑中心的位置,还可以得到光斑半径的信息,光斑半径可作为具备自动调焦能力的光电跟踪系统中的自动调焦控制参数,还可以用来对光心位置的误差进行补偿。由于获得的光斑位置参数精度高,同时还增加了光斑半径作为辅助参数,系统跟踪控制的响应速度,精度和稳定性都得到大大提高。

参考文献:

- [1] 冯龙龄, 邓仁亮. 四象限光电跟踪技术中若干问题的探讨[J]. 红外与激光工程, 1996, 25(1): 16-21.
FENG L L, DENG R L. Study on optical tracking with Four-quadrant detectors [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 1996, 25(1): 16-21.
- [2] 徐代升. 四象限探测系统信号光斑的优化设计[J]. 湖南理工学院学报(自然科学版), 2007, 20(1): 50-54.
XU D SH. Optimal design for signal light spot of detecting systems with quadrant detectors [J]. *Journal of Hunan Institute of Science and Technology (Natural Sciences)*, 2007, 20(1): 50-54.
- [3] RICHARD P, RODNEYS R. Cross talk between friction and height signals in atomic microscopy [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2002, 73(9): 3392-3394.
- [4] 陈海清, 齐哲明. 四象限红外探测器光电参数测试技术研究[J]. 光学仪器, 2007, 29(1): 8-11.
CHEN H Q, QI ZH M. Study on photo-electronic parameters measurement system of four quadrant infrared detector [J]. *Optical Instruments*, 2007, 29(1): 8-11.
- [5] 党丽萍, 刘君华, 唐树刚. 双四象限探测器位置自适应测量新模型[J]. 西安交通大学报, 2006, 40(2): 142-146.
DANG L P, LIU J H, TANG SH G. New Measurement Model of Double2Four Quadrants Photoelectric Detector Without Position Adjustment [J]. *Journal of Xi An Jiao tong University*, 2006, 40(2): 142-146.
- [6] 胡贤龙, 周世椿. 几种四象限探测器测角算法的分析研究 [J]. 激光与红外, 2007, 37(6): 6546-547 551.
HU X L, ZHOU SH CH. Analysis and Research on Several Angle measurement Algorithms Based on Four quadrant Detector [J]. *LASER & INFRARED*, 2007, 37(6): 6546-547 551.
- [7] XU X Y, CHEN H Q, QI H M. Study on photo-electronic parameters measurement system of four quadrant infrared detector [J]. *Optical Instruments*, 2007, 29(3): 7-11.
- [8] HEN D, XU X F, LIU Y N. Signal Processing System of Four quadrant Infrared Detector [J]. *Science Technology and Engineering*, 2006, 6(5): 215-218.
- [9] 王秀青, 徐德, 谭民. 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, 2006, 25(7): 188-192.
WANG X Q, XU D, TAN M, et al.. Alignment method based on the four quadrant photo electronic detector Transducer and Microsystems Technologies, 2006, 25(7): 188-192.

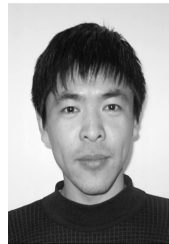
作者简介:



林志琦(1964—)男, 吉林农安人, 长春工业大学副教授, 博士研究生, 主要从事光电检测、无线光通信、嵌入式系统应用等方面的研究。E-mail: zhiqiln@yahoo.com



李会杰(1965—), 女, 吉林九台人, 硕士, 长春工业大学副教授, 主要从事机械电子, 工业设计教学等方面的研究。E-mail: lihuijie@mail.ccut.edu.cn



郎永辉(1982—)吉林汪清人, 硕士研究生, 主要从事可编程逻辑器件应用方面的研究。E-mail: langyh@qq.com

导师简介:

尹福昌(1940—), 男, 辽宁营口人, 教授, 博士生导师, 主要从事大气激光通信, 激光敌我识别等方面的研究。E-mail: yinfuchang@mail.cust.edu.cn