

文章编号 1004-924X(2015)增-0000-07

四象限探测器的均匀光斑位置分辨率

陈云善*

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,吉林长春130033)

摘要:为了精确分析四象限探测器(Quadrant Detector, QD)位置检测系统性能,研究了均匀光斑模型下影响QD位置分辨率检测的主要因素。分析了在均匀光斑模型下QD位置检测原理;根据误差理论并利用光斑位置近似解算公式,推导出了该探测器位置分辨率与光斑半径、光斑中心位置和总信噪比关系的近似数学模型;最后,对模型的正确性进行了实验验证。结果表明,当光斑位置与靶面中心的距离在二分之一光斑半径以内,总信噪比为63.04dB时,在不同光斑半径情况下使用该模型估算的位置分辨率误差约为12%。另外,使用该模型可直接估算出该探测器位置检测系统可以达到的分辨率,极大地方便了工程应用。

关 键 词:位置检测系统;四象限探测器;位置分辨率;均匀光斑

中图分类号:TN212.12 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152313.0000

Position resolution of quadrant detector for uniform spot

CHEN Yun-shan*

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: yiyunsn@163.com

Abstract: To precisely analyze the performance of a position detecting system based on a quadrant detector (QD), the main factors affecting QD position resolution for a uniform spot model were studied. The basic principle of the QD position detection was firstly analyzed. Based on the approximation formula of spot position and according to the error theory, an approximate mathematical model was derived to characterize the relationship between the position resolution and the beam radius, the spot centroid position and the total signal to noise ratio. Finally, an experimental system was designed to verify the validity of the mathematical model. The research results show that the estimation error of position resolution using the mathematical model is about 12% for various radii when the distance between the center of QD and the position of spot is in a half radius range and the total signal to noise ratio is 63.04 dB. Furthermore, the mathematical model could exactly and directly estimate the position resolution of detection system of the QD, which brings great convenience to engineering applications.

Key words: position detection system; quadrant detector; position resolution; uniform spot

收稿日期:2015-06-08;修订日期:2015-06-30.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 11403064)

1 引言

四象限探测器 (Quadrant Detector, QD) 是一种利用光电效应检测光斑在探测器光敏面上相对位置的位置传感器。它由 4 个性能一致的 P-N 结光电二极管按照 4 个象限的形式排列而成^[1]。与其它位置敏感传感器 (如横向效应 PSD、CCD) 相比, QD 具有响应频率快、波长范围宽、灵敏度高等优点^[2], 因而被广泛地应用于激光监听^[3]、自由空间激光通信^[4-6]、激光跟踪仪^[7]、激光导引头^[8]等需要高精度微小位移或角度反馈的系统。

基于 QD 的高精度测量系统的性能受到光斑模型^[9]、光斑具体位置、光斑半径^[10]、死区^[1]、背景光噪声^[11]和大气湍流^[12-13]等众多因素的影响^[14]。如何降低这些因素对 QD 光斑位置检测系统性能的影响, 已成为国内外学者研究的热点问题。文献[1]详细研究了死区对探测灵敏度的影响, 结果表明死区宽度相对光斑半径的比例越大, 探测灵敏度越高。文献[2]设计了一种环形分割微积分的方法来分析光斑的能量分布、死区、光斑运动模式对动态范围和灵敏度的影响。文献[11]则研究了背景光与闪烁对检测精度的影响, 指出可以通过提高四象限的固有分辨率来克服大气环境的干扰。文献[14]对影响四象限探测器跟踪精度的因素进行了较为全面的分析。文献[15]研究了四象限探测器安装角度对检测灵敏度的影响, 结果显示对角线安装法的灵敏度为直角安装法的 1.4 倍。这些研究主要针对影响定位精度的解算误差、安装方式等系统固有误差; 而针对由各种噪声引起的随机误差的研究相对较少, 文献[14]虽研究了噪声的大小, 但并未给出随机噪声与实际位置分辨率的关系。

本文对四象限探测器在均匀光斑模型下的位置检测原理进行了分析, 利用实际位置的标准差来表征位置分辨率, 推导出了靶面中心位置附近四象限探测器的位置分辨率与光斑半径、光斑中心和总信噪比的近似数学模型。在靶面中心位置附近, 该模型可以准确地反映三者与位置分辨率的关系。

2 四象限探测器位置检测原理

光斑照射在探测器靶面上时, 四个象限会产生与各象限接收到的光功率成比例的光电流, 如图 1 所示。以探测器的中心 O 为原点建立直角

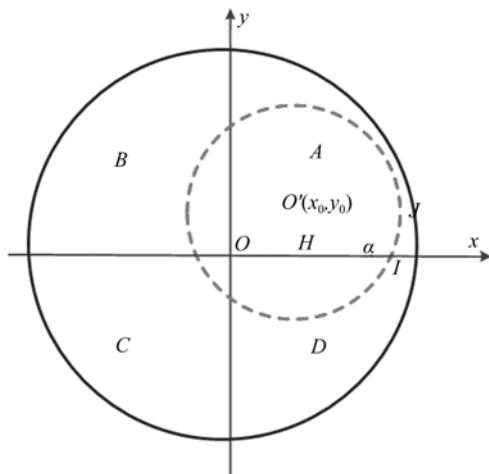


图 1 四象限探测器工作原理示意图

Fig. 1 Schematic diagrams for operating principle of quadrant detector

坐标系, 则探测器 4 个光电二极管与坐标系 A, B, C, D 4 个象限对应。设每个象限的光电流分别为 I_A, I_B, I_C, I_D , 则 x 和 y 方向上的位置解算值为:

$$\hat{x} = \frac{(I_A + I_D) - (I_B + I_C)}{I_A + I_B + I_C + I_D}, \quad (1)$$

$$\hat{y} = \frac{(I_A + I_B) - (I_C + I_D)}{I_A + I_B + I_C + I_D}. \quad (2)$$

假设光斑为均匀光斑, 光斑中心为 (x_0, y_0) , 光斑半径为 r , 则每个象限的光电流和光斑面积成正比, 利用几何关系可以得到光斑的解算位置为^[14]:

$$\hat{x} = \frac{1}{\pi r^2} \left(2r^2 \sin^{-1} \frac{x_0}{r} + 2x_0 \sqrt{r^2 - x_0^2} \right), \quad (3)$$

$$\hat{y} = \frac{1}{\pi r^2} \left(2r^2 \sin^{-1} \frac{y_0}{r} + 2y_0 \sqrt{r^2 - y_0^2} \right). \quad (4)$$

可见, 光斑的实际位置和解算位置是非线性关系, 无法直接反解出实际位置。当光斑中心位置距离坐标原点较小 ($|x_0| \ll r, |y_0| \ll r$) 时, 有:

$$\hat{x} \approx \frac{1}{\pi r^2} \left(2r^2 \frac{x_0}{r} + 2rx_0 \right) = \frac{4x_0}{\pi r}, \quad (5)$$

$$\hat{y} \approx \frac{1}{\pi r^2} \left(2r^2 \frac{y_0}{r} + 2ry_0 \right) = \frac{4y_0}{\pi r}. \quad (6)$$

3 四象限探测器位置分辨率数学模型

3.1 模型推导

由于探测器自身暗电流、光电流、大气以及后续信号处理电路(放大电路、AD)等因素的影响,四象限探测器的输出信号不可避免地包含了噪声,噪声是影响光斑位置检测精度非常重要的因素之一,噪声大小直接决定了位置分辨率的大小。考虑等效噪声,式(1)可以改写为:

$$\hat{x} = \frac{(I_r + I_m) - (I_l + I_n)}{I_r + I_m + I_l + I_n}, \quad (7)$$

其中: I_{in} 为第*i*个光敏面上所有噪声的等效噪声电流, $I_r = I_A + I_D$ 为探测器右半部分的光电流大小; $I_l = I_B + I_C$ 为探测器左半部分的光电流大小; $I_m = I_{An}$, $I_n = I_{Bn}$,分别为探测器右半部分和左半部分的噪声大小。通常情况下,光电流远大于噪声信号,即 $I_m + I_n \ll I_r + I_l$,则有:

$$\hat{x} \approx \frac{(I_r - I_l)}{I_r + I_l} + 2 \frac{(I_m I_l - I_n I_r)}{(I_r + I_l)^2}. \quad (8)$$

式(8)的第一项与式(1)相同,代表了光斑解算位置的平均值,第二部分代表了由随机噪声引起的随机误差。假设随机误差为 \hat{x}_n ,则有:

$$\hat{x}_n = 2 \frac{(I_m I_l - I_n I_r)}{(I_r + I_l)^2}. \quad (9)$$

由于四个象限的噪声相互独立,根据误差合成理论则有:

$$\sigma_{\hat{x}_n}^2 = \frac{4I_l^2}{(I_r + I_l)^4} \sigma_m^2 + \frac{4I_r^2}{(I_r + I_l)^4} \sigma_n^2, \quad (10)$$

式中: $\sigma_{\hat{x}_n}$ 为解算位置随机误差的标准差, σ_m 为 I_l 标准差, σ_n 为 I_r 标准差。由于四象限探测器的暗电流是随机噪声的主要来源,而随着工艺的进步,4个象限趋于一致,因此可以近似认为各象限的噪声水平相当,即 $\sigma_m^2 = \sigma_n^2 = 2i_n^2$, i_n 为各象限的噪声,则有:

$$\sigma_{\hat{x}_n}^2 \approx 8 \frac{I_l^2 + I_r^2}{(I_r + I_l)^4} i_n^2 = \frac{K}{R_{SN}}, \quad (11)$$

其中: $R_{SN} = \frac{(I_r + I_l)^2}{4i_n^2} = \frac{S^2}{4i_n^2}$,为总信噪比; $S = I_r + I_l$,为四个象限的总光电流; $K = 2 \frac{I_l^2 + I_r^2}{(I_r + I_l)^2}$

$= 1 + \left(\frac{I_r - I_l}{I_r + I_l} \right)^2 = 1 + \hat{x}^2$ 。将 K 代入式(11),并根据公式(5)结合误差合成理论可得:

$$\sigma_{x_0} \approx \frac{\pi r}{4} \sigma_{\hat{x}_n} = \sqrt{\frac{x_0^2 + \left(\frac{\pi r}{4} \right)^2}{R_{SN}}}. \quad (12)$$

同理可得 y_0 的标准差为:

$$\sigma_{y_0} \approx \sqrt{\frac{y_0^2 + \left(\frac{\pi r}{4} \right)^2}{R_{SN}}}. \quad (13)$$

式(12)和式(13)即为四象限探测器位置分辨率的近似数学模型,由其标准差来表征最终求解出的实际光斑位置的分辨率。由于 x 方向和 y 方向相互独立且对称,下文仅讨论 x 方向的标准差, y 方向的类似。

由公式(12)可以看出,实际位置 x_0 的标准差即位置分辨率与中心实际位置、光斑半径、信噪比有关。显然 x_0 越大,离中心位置越远,标准差越大,分辨率越低。

3.2 模型仿真分析

为了进一步分析前文推导的近似数学模型,利用MATLAB进行了数值仿真分析。图2给出了当总信噪比为63.04 dB时,光斑半径取0.35,0.45,0.55,0.65,0.75和0.85 mm时光斑中心 x_0 在[-0.35 mm,0.35 mm]的仿真曲线,可以看出位置分辨率随着光斑半径的增大而减小,并随着光斑中心远离靶面中心而减小。因此可以通过减小光斑半径的方式来提高分辨率,但通常位置检测系统对动态检测范围有一定要求,光斑半径不能过小,因此实际使用时应根据实际情况进行折中处理。

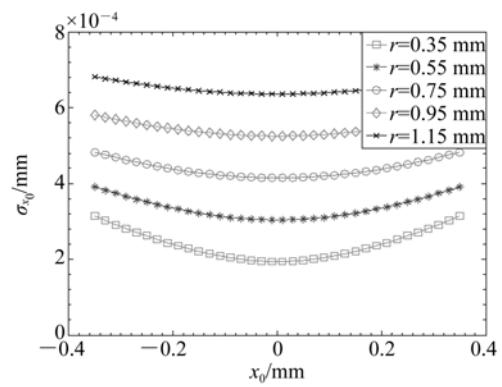


图2 总信噪比为63.04 dB时,不同半径的 σ_{x_0} 仿真曲线

Fig. 2 Simulation curves of σ_{x_0} for different radii with total signal to noise ratio of 63.04 dB

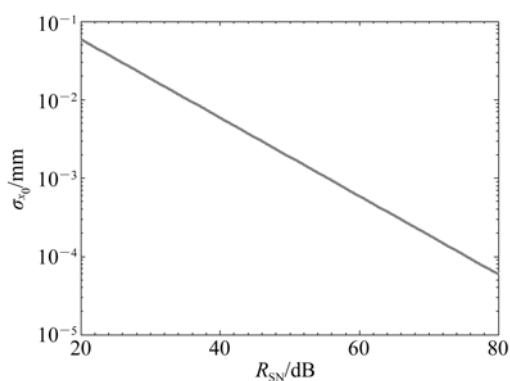
图3 不同总信噪比下 σ_{x_0} 仿真曲线

Fig. 3 Simulation curves of σ_{x_0} for different total signal to noise ratios

图3给出了光斑半径为0.75 mm,当光斑中心位于靶面中心位置时分辨率随总信噪比的变化曲线。可见在中心位置,随着信噪比的增大,分辨率逐渐提高。在实际应用中,受限于光斑半径,所以只能通过提高信噪比的方式来提高靶面中心位置的分辨率。

4 实验结果与分析

为了验证本文推导的近似数学模型及前文分析的正确性,设计搭建了如图4所示的实验系统。其中QD安装在一维纳米位移平台上,实现光斑位置在x方向上的精确移动;QD靶面大小为3 mm,暗电流为20 nA,波长1550 nm对应的响应度为0.95 A/W;放大倍数设为25 MV/A;数据采集使用NI公司的16位精度AD采集卡。

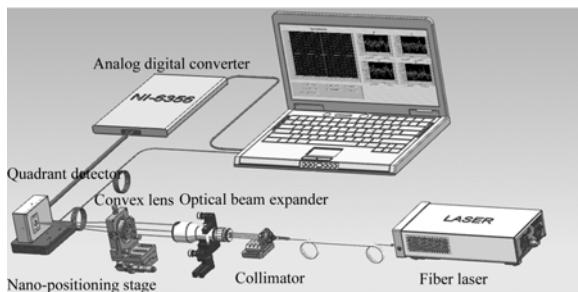


图4 实验平台示意图

Fig. 4 Schematic diagram of experimental system

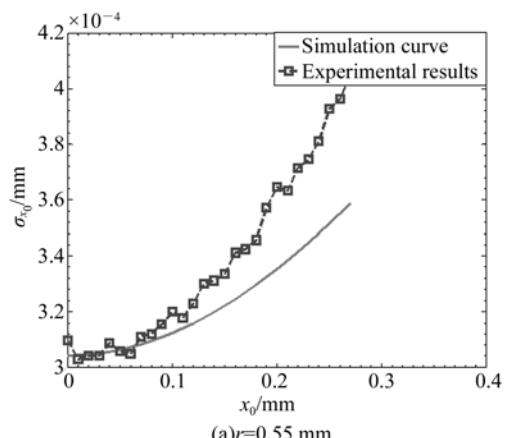
系统工作过程为:光纤激光器发出的1550 nm的高斯光束首先经过光纤准直器准直为近似

平行光,再经扩束系统扩束,然后由透镜组聚焦形成能量近似均匀分布的光斑投射到QD靶面,QD输出的4路电流信号经放大、AD采集后送给PC进行处理。

根据前文分析,位置分辨率与光斑中心位置、光斑半径和信噪比有关,而在QD位置检测系统的工作过程中,总是伴随着光斑中心位置的变化,因此本文仅从光斑半径和信噪比两方面进行实验验证。

首先根据放大倍数调整激光器功率,得到合适的信噪比;其次通过微调透镜组与QD靶面的距离,将光斑半径调整为0.75 mm左右;再次调整机械支架将光斑中心调整到QD中心位置附近;然后移动安装QD的精密平台,反复测量,使光斑中心与坐标重合,并使位移台移动方向与x方向一致,最后控制一维位移平台以10 μm为步进量从中心位置向负方向移动,相当于光斑位置往正方向移动,每个位置采集5组数据进行平均求位置分辨率 σ_{x_0} 。

在进行光斑半径对分辨率影响的验证实验时,总信噪比约为63.04 dB,根据QD靶面大小,选取光斑半径为0.55,0.75,0.95 mm。图5(a),(b),(c)分别给出了半径为0.55,0.75和0.95 mm时,二分之一半径范围内的实验结果与模型仿真结果的对比。由这3幅图可以看出,在中心位置附近时实验结果与模型仿真结果吻合得很好,而随着 x_0 远离靶面中心,误差逐渐增大,但总体趋势是一致的;与此同时半径越大,位置分辨率越低;在二分之一半径范围内最大误差分别为:12.22%,12.24%和12.18%。



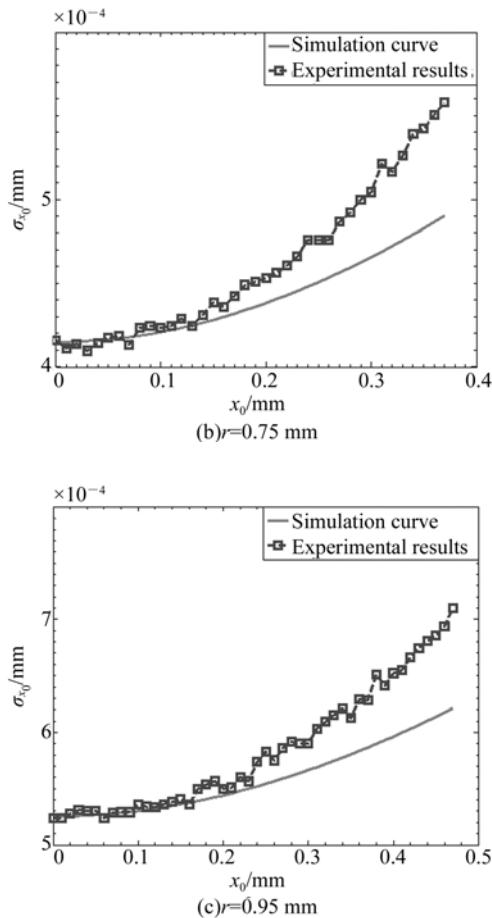


图5 不同半径的分辨率实验结果与仿真曲线的对比

Fig. 5 Comparison of σ_{x_0} between stimulation curves and experimental results with different radii

总信噪比影响验证实验时,将光斑中心调整到靶面中心位置附近(0.1 mm)固定不动,半径设置为0.75 mm。图6(a)、(b)、(c)分别给出了信噪比为49.06,59.52和69.06 dB时其中1组 x_0 位置的计算值。这3幅图的位置分辨率依次为2.30,0.72,0.23 μm ,而其数学模型计算的理论值分别为2.10,0.63和0.21 μm 。可见信噪比越高,位置分辨率越高,与前文分析一致。实际测试结果比理论计算值偏大,这是由于噪声的随机性、单次测量结果误差较大的缘故。

总之,虽然受一维位移台位置准确度、光斑能量分布均匀性误差、光斑半径准确性等因素的影响,实验值与模型计算值存在一定误差,但二者均说明光斑半径越小、总信噪比越大、离中心位置越近,四象限探测器的位置分辨率越高,可见数学模型可有效地估算系统的位置分辨率。

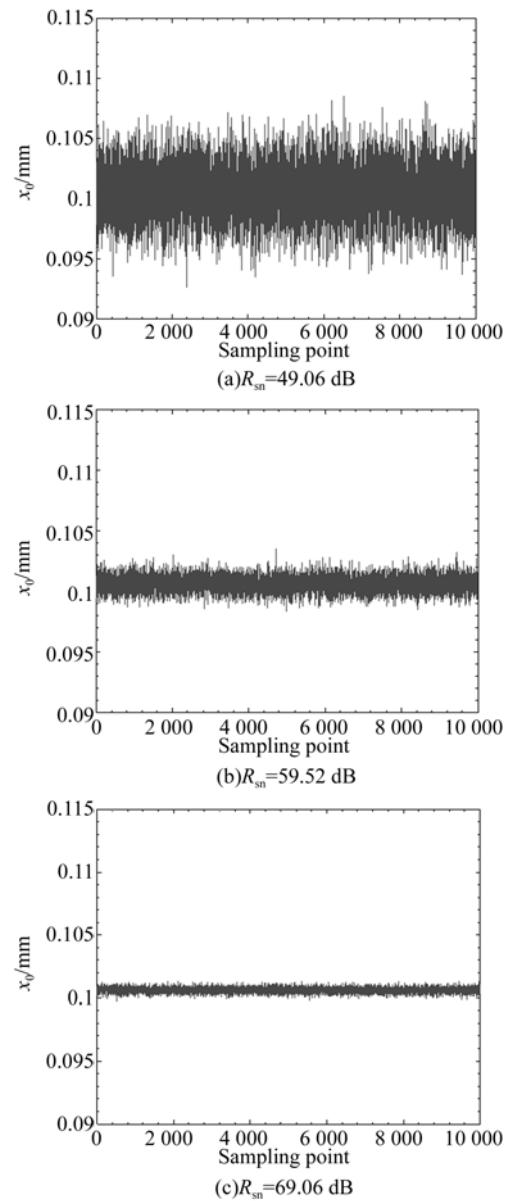
图6 总系统信噪比不同时,(0.1,0)点 x_0 的计算值

Fig. 6 Calculating values of x_0 at (0.1,0) position with different total signal to noise ratios

5 结 论

本文从四象限探测器基本解算公式出发,利用均匀光斑近似解算公式推导出了位置分辨率与光斑半径、光斑中心和总信噪比的近似数学模型。研究结果表明,光斑半径越小,光斑中心离靶面中心越近,总信噪比越高,位置分辨率越高。该模型可以直接估算出四象限探测器位置检测系统的分辨率,从而为实际系统的设计分析带来极大的便利。

参考文献:

- [1] 杨桂栓,张志峰,翟玉生,等. 死区对四象限探测器探测范围和灵敏度影响的研究[J]. 激光与光电子学进展,2013,50(062303):1-6.
YANG G SH, ZHANG ZH F, ZHAI Y SH, et al.. Study on influence of dead zone on detection range and sensitivity four-quadrant detector[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013,50(062303):1-6. (in Chinese)
- [2] LU CH, ZHAI Y SH, WANG X J, et al.. A novel method to improve detecting sensitivity of quadrant detector[J]. *Optik*, 2014,125:3519-3523.
- [3] 刘艳阳,母一宁,李野,等. 基于四象限探测器的激光监听系统[J]. 压电与声光,2014,36(4):675-678.
LIU Y Y, MU Y N, LI Y, et al.. Laser eavesdropping system based on four quadrant detector[J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2014,36(4):675-678. (in Chinese)
- [4] 于笑楠,佟首峰,董岩,等. 空间激光通信组网单光束跟踪子系统[J]. 光学精密工程,2014,22(12):3348-3353.
YU X N, TONG SH F, DONG Y, et al.. Single beam tracking subsystem of space laser communication network[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22 (12) : 3348-3353. (in Chinese)
- [5] 赵馨,佟首峰,刘云清,等. 四象限探测器在空间激光通信中应用研究[J]. 光电子·激光,2010,21(1):46-49.
ZHAO X, TONG SH F, LIU Y Q, et al.. Application research on four-quadrant detector in space laser communication system[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2010,21(1):46-49. (in Chinese)
- [6] 刘云清,姜会林,佟首峰. 大气激光通信中稳定跟踪器件及算法研究[J]. 中国激光,2011,38(5):5-12.
LIU Y Q, JIANG H L, TONG SH F. Study on stabilizational tracking technology for atmospheric laser communication system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, 38 (5) : 5-12. (in Chinese)
- [7] 周培松,卢荣胜,周维虎,等. 四象限探测器用于激光跟踪仪目标脱靶量测量[J]. 光电技术应用,2014,29(1):75-79.
ZHOU P S, LU R SH, ZHOU W H, et al.. Measurement system for laser tracker's target-missing quantity base on four-quadrant detector[J]. *Electro-optic Technology Application*, 2014, 29 (1) : 75-79. (in Chinese)
- [8] 薛佩瑶,吴耀,冯茜,等. 大视场四象限探测光学系统设计[J]. 中国光学,2014,7(3):462-468.
XUE P Y, WU Y, FENG Q, et al.. Design of the large field optical system [J]. *Chinese Optics*, 2014,7 (3) : 462-468. (in Chinese)
- [9] 周子云,高云国,邵帅,等. 采用四象限探测器的光斑中心定位算法[J]. 计算机测量与控制,2014,22(7):2154-2156.
ZHOU Z Y, GAO Y G, SHAO SH, et al.. Laser spot center location algorithm based on four quadrant detector[J]. *Computer Measurement & Control*, 2014, 22 (7) : 2154-2156. (in Chinese)
- [10] 尚韬,李曦,刘增基,等. 新型四象限设计及其光斑参数测量方法[J]. 红外与激光工程,2012,41(4):1034-1040.
SHANG T, LI X, LIU ZH J, et al.. Novel four-quadrant design and the method for obtaining spot parameters[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41 (4) : 1034-1040. (in Chinese)
- [11] 母一宁,王贺,李平,等. 光轴检测模型中背景干扰分析与闪烁补偿方法探讨[J]. 激光与光电子学进展,2013,50(060601):1-6.
MU Y N, WANG H, LI P, et al.. Discussion on scintillation compensation method and background interference analysis in optical-axis detection model [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50 (060601) : 1-6. (in Chinese)
- [12] 张金瑞,母一宁,王贺,等. 四象限精跟踪光轴检测模型与误差分析[J]. 半导体光电,2014,35(2):305-309.
ZHANG J R, MU Y N, WANG H, et al.. Analysis of four-quadrant electro-optical fine tracking inspection model and system error[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2014,35(2):305-309. (in Chinese)
- [13] 赵馨,佟首峰,姜会林. 四象限探测器的特性测试[J]. 光学精密工程,2010,18(10):2164-2170.
ZHAO X, TONG SH F, JIANG H L. Experimental testing on characteristics of four-quadrant detector [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18 (10) : 2164-2170. (in Chinese)
- [14] 张雷,张国玉,刘云清. 影响四象限探测器探测精度的因素[J]. 中国激光,2012,39(6):7-11.
ZHANG L, ZHANG G Y, LIU Y Q. Affecting factor for detection accuracy of four-quadrant detector[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012,39(6):7-11. (in Chinese)

- [15] HAO X, KUANG C F, KU Y L, et al. A quadrant detector based laser alignment method with higher sensitivity[J]. *Optik*, 2012, 123: 2238-2240.

作者简介:



陈云善(1984-),男,四川成都人,博士,助理研究员,2007年于东北师范大学获得学士学位,2012年于长春光机所获得博士学位,主要从事微弱信号处理、光斑位置检测等方面的研究。E-mail: yiyunsn@163.com