

# 四象限探测器位置检测精度的主要影响因素研究

张辉<sup>1,2</sup> 陈云善<sup>1</sup> 耿天文<sup>1</sup> 吴佳彬<sup>1,2</sup> 陈涛<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 为了提高四象限探测器(QD)光斑位置检测性能,研究了在高斯光斑模型下影响QD位置检测精度的主要因素。分析了四象限探测器位置检测的基本原理,随后根据误差理论推导出高斯光斑模型下位置检测精度与光斑半径、质心位置和系统信噪比关系的数学模型,通过数值仿真和实验分析验证了该数学模型的有效性,并深入分析了各因素对位置检测精度影响的趋势及大小。研究表明,对于四象限探测器高斯光斑位置检测系统,在保证检测范围的条件下,采用较小半径的光斑、选取靠近光敏面中心的工作区域和提高系统信噪比可以提高位置检测精度。当系统信噪比为57.48 dB时,采用束腰半径为0.6 mm的高斯光斑,QD中心点位置检测精度可达0.514 μm。

**关键词** 测量; 四象限探测器; 检测精度; 高斯光斑; 信噪比

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.1217002

## Study on Main Factors Affecting Position Detection Accuracy of Four-Quadrant Detector

Zhang Hui<sup>1,2</sup> Chen Yunshan<sup>1</sup> Geng Tianwen<sup>1</sup> Wu Jiabin<sup>1,2</sup> Chen Tao<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** In order to improve the spot position detection performance of four-quadrant detector (QD), the main factors affecting QD position detection accuracy in the Gaussian spot model are studied. The basic principle of QD position detection is analyzed. Then on the basis of error theory, the mathematical model of the relationship between position detection accuracy and spot radius, centroid position, signal to noise ratio (SNR) is obtained when a laser spot of Gaussian energy profile illuminates QD. The validity of mathematical model is verified by numerical simulations and experimental analysis. The trends and degree of the factors impact on the position detection accuracy are further discussed. The results show that adoption of smaller spot radius, closer to the center of photosensitive area, and higher SNR, can effectively improve the accuracy of spot detection when the detection range of QD system is fixed. When system's SNR is 57.48 dB and spot radius is 0.6 mm, the center position detection accuracy of QD can be up to 0.514 μm.

**Key words** measurement; four-quadrant detector; detection accuracy; Gaussian spot; signal to noise ratio

**OCIS codes** 120.1880; 040.5160; 060.3510

## 1 引言

四象限探测器(QD)是由四个性能完全一致的光电二极管按照直角坐标系要求制作而成的光电探测器<sup>[1]</sup>。

收稿日期: 2015-04-22; 收到修改稿日期: 2015-06-26

基金资助: 国家自然科学基金(11403064)

作者简介: 张辉(1991—),男,硕士研究生,主要从事弱信号处理、光斑位置检测等方面的研究。

E-mail: 15164399085@163.com

导师简介: 陈涛(1965—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事光电精密测量技术等方面的研究。

E-mail: chent@ciomp.ac.cn

它具有帧频高(可达几千赫兹甚至几万赫兹)、灵敏度高(可探测纳瓦级光斑)、信号处理电路简单等诸多优点,使其在光电检测领域和光电跟踪领域都有广泛应用<sup>[2-5]</sup>。QD已经用于医学电子显微镜、光电自准直仪和地震仪等对微小位移或者微小角度的精确检测;还用于工业机器人手臂、激光导引头和激光通信ATP(捕获跟踪瞄准)系统等光电精密跟踪设备中为其提供高帧频、高精度的位置或角度反馈<sup>[6-10]</sup>。

近些年来对四象限探测器光斑位置检测的研究已进行了大量工作,其中文献[11]对几种激光光斑定位算法进行了比较,说明了高斯光斑具有更高的灵敏度;文献[12]分析了四象限探测器非均匀性对检测准确度的影响,并给出了软校正算法,将检测精度提高了近3%。文献[13]提出了一种四象限探测器的光路数学模型,重点分析了探测器在安装过程中发生的位置偏移量和角度偏移量对解算位置的影响;文献[14]主要分析了探测器噪声以及放大器噪声等对四象限探测器位置检测精度的影响趋势,但并没有建立一个完整的数学模型对其影响进行系统地数值分析。

本文基于高斯光斑模型对四象限探测器的位置检测原理进行了深入分析,使用测得的位置标准差来表征位置检测精度的大小,推导出四象限探测器位置检测精度与光斑束腰半径、质心位置和信噪比关系的数学模型,利用该模型分别对影响位置检测精度的主要因素进行了仿真分析,并设计了实验加以验证。研究结果表明影响QD位置检测精度的因素主要有光斑半径、光斑质心位置和信噪比,导出的数学模型可以直接计算出三个主要因素对位置检测精度的影响,对工程应用具有指导意义。

## 2 高斯光斑模型下四象限探测器位置检测原理

### 2.1 四象限探测器的基本原理

假设理想光斑入射到四象限探测器光敏面,若光斑质心与QD中心重合,如图1(a)所示,则四个象限将产生大小相等的光电流;若当光斑质心相对QD中心产生偏移,如图1(b)所示,四个象限接收到光能量,就会产生相应大小的光电流<sup>[15]</sup>,光斑质心的相对位置为<sup>[16-17]</sup>:

$$\hat{x}_r = \frac{(I_I + I_{IV}) - (I_{II} + I_{III})}{I_I + I_{II} + I_{III} + I_{IV}} = \frac{(P_I + P_{IV}) - (P_{II} + P_{III})}{P_I + P_{II} + P_{III} + P_{IV}}, \quad (1)$$

$$\hat{y}_r = \frac{(I_I + I_{II}) - (I_{III} + I_{IV})}{I_I + I_{II} + I_{III} + I_{IV}} = \frac{(P_I + P_{II}) - (P_{III} + P_{IV})}{P_I + P_{II} + P_{III} + P_{IV}}, \quad (2)$$

式中  $\hat{x}_r$ 、 $\hat{y}_r$  是光斑质心在  $x$  和  $y$  方向的相对位置;  $I_I$ 、 $I_{II}$ 、 $I_{III}$ 、 $I_{IV}$  是四象限探测器各个象限产生的光电流;  $P_I$ 、 $P_{II}$ 、 $P_{III}$ 、 $P_{IV}$  是各个象限所接收到的光能量。

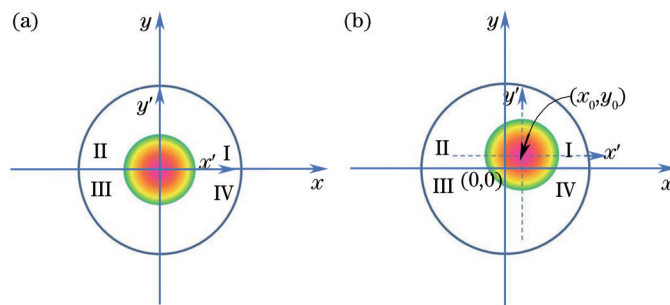


图1 四象限探测器工作原理示意图

Fig.1 Schematic diagrams for operating principle of four-quadrant detector

### 2.2 位置检测分析

(1)式和(2)式求解出的  $\hat{x}_r$ 、 $\hat{y}_r$  只是相对位置,还需要利用光斑的分布模型解算光斑质心的实际位置  $(x_0, y_0)$ 。常用的光斑分布模型有均匀光斑和高斯光斑,图2给出了两种模型下实际位置  $x$  与相对位置  $\hat{x}_r$  的关系曲线,从图2可以看出在中心位置附近高斯光斑模型的斜率比均匀光斑大,即具有更高的灵敏度。在实际应用中,激光光束经过光学元件扩束、整形和耦合后成像在四象限探测器上的光斑能量分布通常为高斯分布。

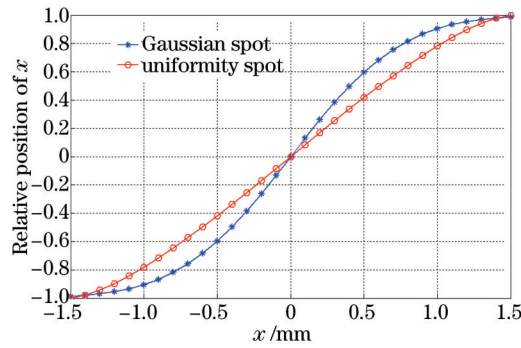


图2 不同光斑模型下  $x$  相对位置  $\hat{x}_r$  的仿真曲线

Fig.2 Simulation curves of  $\hat{x}_r$  in different spot models

高斯分布光斑能量表达式为<sup>[18-19]</sup>:

$$p(x,y) = \frac{2P_0}{\pi\omega^2} \exp\left\{-\frac{2[(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2]}{\omega^2}\right\}, \quad (3)$$

式中  $P_0$  为光斑总能量,  $(x_0, y_0)$  为光斑质心实际位置,  $\omega$  为高斯光斑的束腰(下文统称为光斑半径)。假设光斑能量都集中在四象限探测器内, 在光敏面外的光能量忽略不计, 则积分上下限可以取为无穷, 则有

$$(P_I + P_{IV}) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_0^{+\infty} p(x,y) dx dy, \quad (4)$$

$$(P_{II} + P_{III}) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^0 p(x,y) dx dy, \quad (5)$$

将(3)~(5)式代入(1)式得到:

$$\hat{x}_r = \operatorname{erf}\left(\frac{\sqrt{2}x_0}{\omega}\right), \quad (6)$$

式中  $\operatorname{erf}(x)$  为误差函数。同理有:

$$\hat{y}_r = \operatorname{erf}\left(\frac{\sqrt{2}y_0}{\omega}\right), \quad (7)$$

由此可以推出高斯光斑质心实际位置  $(x_0, y_0)$  的解算关系式为:

$$\begin{cases} x_0 = \frac{\omega}{\sqrt{2}} \operatorname{erf}^{-1}(\hat{x}_r) \\ y_0 = \frac{\omega}{\sqrt{2}} \operatorname{erf}^{-1}(\hat{y}_r) \end{cases}, \quad (8)$$

式中  $\operatorname{erf}^{-1}(x)$  为反误差函数, 在处理时可以通过查找函数库求解。

### 3 四象限探测器位置检测精度数学模型的推导

设光斑质心的位置为  $(x_0, y_0)$ , 用绝对位置的标准差  $\sigma$  来表征位置检测精度, 标准差越大, 对同一位置点的解算值就越离散, 两个位置点就越难区分开, 检测精度就越低。限于篇幅, 仅对  $x$  轴方向的  $\sigma_x$  数学模型进行推导与分析,  $y$  轴方向类似。

在理想情况下:

$$\hat{x}_r = \frac{U - V}{U + V}, \quad (9)$$

式中  $U = I_I + I_{IV}$ 、 $V = I_{II} + I_{III}$ 。

而实际上, 电路及光子噪声是不可避免的, 在考虑噪声影响的情况下:

$$\hat{x}_r = \frac{(U + U_n) - (V + V_n)}{U + U_n + V + V_n} = \left(\frac{U - V}{U + V} + \frac{U_n - V_n}{U + V}\right) \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{U_n + V_n}{U + V}\right)}, \quad (10)$$

式中  $U_n = I_{nI} + I_{nIV}$ 、 $V_n = I_{nII} + I_{nIV}$ ， $I_{nI}$ 、 $I_{nII}$ 、 $I_{nIII}$ 、 $I_{nIV}$  是等效到四象限探测器 I、II、III、IV 象限的电流噪声水平，在无光照输入时，光斑位置检测系统输出越大，电流噪声水平也就越大。在有光输入时，噪声水平要远远小于有用光电流信号，即  $U_n + V_n \ll U + V$ ，可对  $\frac{1}{\left(1 + \frac{U_n + V_n}{U + V}\right)}$  进行泰勒展开，并取其前两项，则(10)式可以改写为：

$$\hat{x}_r \approx \frac{U - V}{U + V} + 2 \cdot \frac{U_n V - UV_n}{(U + V)^2}, \quad (11)$$

式中第一部分为光斑相对位置的平均值，第二部分为由噪声引起的随机偏差。由此可以说明，在噪声的影响下，测得的光斑相对位置并不是一个固定值，而是在一定范围内波动，噪声水平越大，波动范围也就越大。如果假定这个随机偏差为  $\hat{x}_m$ ，则有

$$\hat{x}_m \approx \frac{2V}{(U + V)^2} U_n - \frac{2U}{(U + V)^2} V_n, \quad (12)$$

用方差  $\sigma_{\hat{x}_r}^2$  来描述随机变量  $\hat{x}_m$ ，可表示为：

$$\sigma_{\hat{x}_r}^2 \approx \frac{4V^2}{(U + V)^4} \sigma_u^2 + \frac{4U^2}{(U + V)^4} \sigma_v^2, \quad (13)$$

式中  $\sigma_u^2$  为  $U_n$  的方差， $\sigma_v^2$  为  $V_n$  的方差。在光斑位置检测系统中，由于四象限探测器的四个光电二极管以及四路电路是一样的，在不考虑光引入噪声的情况下，四个象限的噪声水平基本相等，即  $\sigma_u^2 = \sigma_v^2 = 2\bar{i}_n^2$ ，其中  $\bar{i}_n^2$  表征的是各个象限噪声均方根的平方，则(13)式可以改写为：

$$\sigma_{\hat{x}_r}^2 \approx 8 \frac{U^2 + V^2}{(U + V)^4} \bar{i}_n^2 = k \cdot \frac{4\bar{i}_n^2}{S^2}, \quad (14)$$

式中  $k = \frac{2[U^2 + (S - U)^2]}{S^2}$ ， $k$  的取值与光斑位置有关； $S = (U + V)$  为一定值。因为  $4\bar{i}_n^2$  为四象限探测器的总电流噪声功率， $S^2$  为有用光电流总功率，所以  $\frac{4\bar{i}_n^2}{S^2} = \frac{1}{R_{SN_s}}$ ，其中  $R_{SN_s}$  为总信噪比。此时  $\sigma_{\hat{x}_r}^2$  可最终写为：

$$\sigma_{\hat{x}_r}^2 \approx \frac{k}{R_{SN_s}}, \quad (15)$$

(15)式给出了光斑质心相对位置  $\hat{x}_r$  的方差。因为  $x_0$  与  $\hat{x}_r$  之间并非线性关系，通过(8)式和(15)式难以得到  $x_0$  的方差。在中心附近区域，可将(6)式中的误差函数  $\text{erf}\left(\frac{\sqrt{2}x_0}{\omega}\right)$  泰勒展开，并做一阶近似，得到  $x_0$  与  $\hat{x}_r$  的近似线性关系为  $x_0 \approx \frac{\sqrt{\pi}\omega}{2\sqrt{2}}\hat{x}_r$ ，偏离中心越远，相对误差就越大。经计算：当  $|x_0| = \frac{\omega}{2}$  时，其相对误差在 14.5% 左右；而当  $|x_0| < \frac{\omega}{8}$  时，其相对误差小于 0.1%。再通过(15)式可以得到  $x_0$  的方差为：

$$\sigma_{x_0}^2 \approx \left(\frac{\sqrt{\pi}\omega}{2\sqrt{2}}\right)^2 \cdot \frac{k}{R_{SN_s}}, \quad (16)$$

由(6)式、(9)式和  $k = \frac{2[U^2 + (S - U)^2]}{S^2}$  可求得  $k$  与  $x_0$  的关系为  $k = 1 + \text{erf}^2\left(\frac{\sqrt{2}x_0}{\omega}\right)$ ，代入(16)式可以得到：

$$\sigma_{x_0}^2 \approx \frac{\sqrt{\pi}\omega}{2\sqrt{2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{R_{SN_s}}} \cdot \sqrt{1 + \text{erf}^2\left(\frac{\sqrt{2}x_0}{\omega}\right)}, \quad (17)$$

(17)式为四象限探测器位置检测精度的近似数学模型。由此模型可以看出四象限探测器的位置检测精度与高斯光斑半径  $\omega$ 、光斑质心位置  $(x_0, y_0)$  和信噪比  $R_{SN_s}$  有关。

## 4 模型仿真及分析

前面介绍了在高斯光斑模型下四象限探测器位置检测的基本原理,并根据误差合成理论得到位置检测精度与光斑半径  $\omega$ 、光斑质心位置和信噪比  $R_{SN_x}$  的近似关系式。为了进一步探讨这三个因素对位置检测精度的影响趋势及大小,利用该近似关系式,在 Matlab 中分别对各影响因素进行了仿真分析。

### 4.1 光斑半径 $\omega$ 对位置检测精度的影响

为方便讨论,假定系统总信噪比  $R_{SN_x} = 50.97$  dB,图 3 给出了  $\omega = 0.60$ 、 $0.65$ 、 $0.70$ 、 $0.75$  和  $0.80$  mm 下光斑质心从  $x$  轴  $-0.3$  mm 处移动到  $+0.3$  mm 时  $\sigma_x$  的仿真曲线。从图中可以看出,高斯光斑半径  $\omega$  越大,  $\sigma_x$  的值也越大,四象限探测器的位置检测精度就越低。这是因为  $\omega$  越大,高斯光斑能量越不集中,能量梯度越趋于平缓,导致位置检测精度下降。一般情况下,为提高位置检测精度,可以减小光斑半径,但是光斑半径不能一直减小,这是因为光斑半径直接影响到了检测范围<sup>[20]</sup>,  $\omega$  越小,系统的检测范围也就越小,所以要根据实际情况,在保证检测范围的条件下,尽量选择小的光斑。

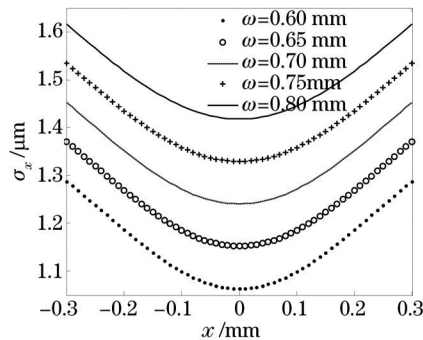


图 3 不同  $\omega$  下  $\sigma_x$  的仿真曲线

Fig.3 Simulation curves of  $\sigma_x$  under different  $\omega$

### 4.2 光斑质心位置对位置检测精度的影响

在光斑半径和信噪比一定时,高斯光斑入射在四象限探测器光敏面各点的检测精度并不相同,而是随着位置的变化而变化。现假定  $\omega = 0.6$  mm、 $R_{SN_x} = 50.97$  dB,图 4 给出了在  $x$  方向  $0 \sim 0.3$  mm 内  $\sigma_x$  的仿真曲线。从图 4 可以看出,光斑质心偏离中心越远,  $\sigma_x$  越大,位置检测精度就越低。当光斑质心与 QD 中心重合时,  $\sigma_x$  取得最小值,约为  $1.09 \times 10^{-3}$  mm,该位置点为检测精度最大点。所以在某些特定场合,如测量光斑的微小偏移量时,让光斑质心尽量入射在四象限探测器中心附近,这样可以提高系统的测量精度。

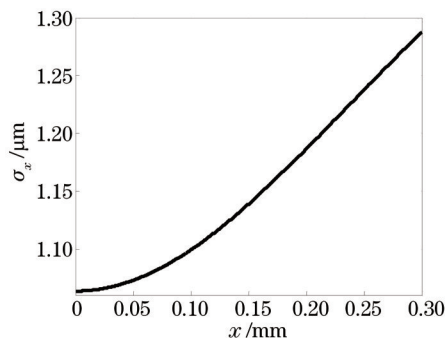


图 4 QD 光敏面不同位置点  $\sigma_x$  的仿真曲线

Fig.4 Simulation curves of  $\sigma_x$  at different positions of QD

### 4.3 信噪比 $R_{SN_x}$ 对位置检测精度的影响

信噪比是影响四象限探测器位置检测精度的一个重要因素。图 5(a)给出了在  $\omega = 0.6$  mm,四象限探测器中心点的  $\sigma_x$  随  $R_{SN_x}$  的仿真曲线,从图中可以看出,当  $R_{SN_x} < 1$  时,  $\sigma_x$  急剧变大,这是因为有用信号被淹没在了噪声中,使位置检测精度大大降低;图 5(b)给出了对数坐标下  $R_{SN_x}$  从 10 dB 提升到 70 dB 的情况,信噪比越大,  $\sigma_x$

就越小,噪声对QD位置检测精度的影响就越小。在大多数情况下,光斑半径 $\omega$ 和质心位置的取值因实际需要而受到限制,此时若要提高位置检测精度,提高系统的信噪比就显得尤为关键。例如,当 $\omega = 0.6 \text{ mm}$ 、 $R_{\text{SN}_2} = 40 \text{ dB}$ 时,四象限探测器中心位置 $\sigma_x \approx 3.76 \times 10^{-3} \text{ mm}$ ;若采用性能更为优越的四象限探测器和前置放大器,加上合理的布局和良好的电磁屏蔽,将系统的信噪比提高到50 dB,此时 $\sigma_x \approx 1.19 \times 10^{-3} \text{ mm}$ ,使得位置检测精度显著提升。由此可见,设计出高信噪比的系统对提高四象限探测器的位置检测精度至关重要。

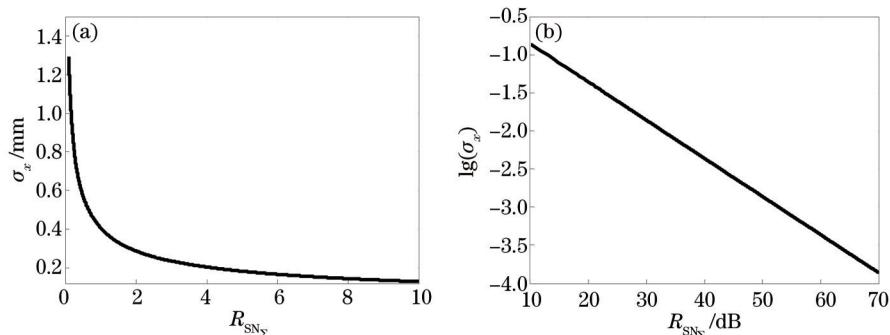


图5 在不同信噪比下 $\sigma_x$ 的仿真曲线。(a) 在信噪比为0到10下 $\sigma_x$ 的仿真曲线;(b) 对数坐标下 $\sigma_x$ 的仿真曲线

Fig.5 Simulation curves of  $\sigma_x$  under different  $R_{\text{SN}_2}$ . (a) Simulation curves of  $\sigma_x$  when  $R_{\text{SN}_2}$  ranges from 0 to 10; (b) simulation curves of  $\sigma_x$  in logarithmic coordinates

前面分别对影响四象限探测器位置检测精度的主要因素,即光斑大小、光斑位置和信噪比进行了仿真分析,从仿真曲线可以看出,适当减小光斑半径、使工作区域靠近四象限探测器中心和提高系统性噪比可以提高位置检测精度。在很多时候光斑半径和工作区域因工程需要而受到限制,此时提高位置检测精度最有效的方法是提高系统的信噪比。

## 5 实验结果与分析

为了验证(17)式的有效性和仿真分析结果的正确性,设计了如图6所示的半实物仿真测试系统。

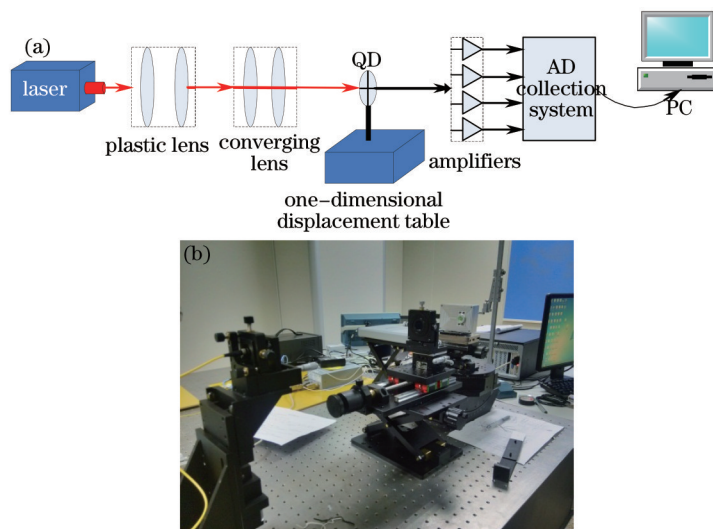


图6 实验系统组成。(a) 系统示意图;(b) 系统实物图

Fig.6 Experimental system. (a) Schematic diagram of the system; (b) experimental system

在实验系统中,激光器固定不动,光功率可调;将InGaAs四象限探测器安装在一维超精密微位移平台上,可以实现 $x$ 方向上的精密移动(纳米级别);前置放大电路每通道的放大倍数均为30 MV/A,且根据工程需要将信号带宽限制在1 kHz;采用的AD采集卡为NI公司的四通道十六位高精度AD采集板卡,每个通道都有独立的AD芯片,保证了采集数据的一致性和实时性;在PC机上,采用LabVIEW编写的软件采集数据,使用Matlab对数据进行处理。

系统工作过程为:激光器发出 1550 nm 波段的高斯光束经光学系统后入射在加滤光片的四象限探测器光敏面上,加滤光片的目的是为了滤除背景光的影响;QD 将光能量转换成四路光电流,经放大、采集后将模拟量转换为数字量送给 PC 进行后处理。

5.1 光斑半径的影响

四象限探测器放置在会聚透镜的焦点前,可以通过改变透镜组与探测器之间的距离来达到改变光斑半径的目的。将光斑质心调整到 QD 中心,调节光功率大小,使信噪比约为 50.97 dB,分别采集  $\omega$  为 0.60、0.65、0.70、0.75 和 0.80 mm 时的数据。表 1 给出了不同光斑半径下(0,0)位置点  $\sigma_x$  的理论值和实验值的对比结果。通过表 1 可以看出:1) 实验值比理论值略微偏大,但基本是吻合的;2) 随着光斑半径  $\omega$  的增大,  $\sigma_x$  也变大。

表 1 不同光斑半径下(0,0)位置点  $\sigma_x$  的理论值和实验值的对比结果

Table 1 Comparison result between theoretical and experimental values of  $\sigma_x$  at (0,0) position in different spot radii

$\omega$ /mm	$\sigma_x$ (theory) /mm	$\sigma_x$ (experiment) /mm
0.60	$1.06 \times 10^{-3}$	$1.09 \times 10^{-3}$
0.65	$1.15 \times 10^{-3}$	$1.17 \times 10^{-3}$
0.70	$1.24 \times 10^{-3}$	$1.25 \times 10^{-3}$
0.75	$1.33 \times 10^{-3}$	$1.36 \times 10^{-3}$
0.80	$1.42 \times 10^{-3}$	$1.44 \times 10^{-3}$

5.2 光斑位置的影响

采用  $\omega = 0.60$  mm 的高斯光斑,系统的信噪比仍为 50.97 dB,调整光路让光斑质心入射在四象限探测器中心,通过一维纳米位移平台使探测器在  $x$  方向大约以  $1 \mu\text{m/s}$  的速度移动 300  $\mu\text{m}$ 。图 7 给出了实验结果,从图中可以看出,其总体趋势是随着  $x$  的增大,  $\sigma_x$  也逐渐变大,与前面的分析一致;在图中出现了一些偏离较大的点,这可能是由外部电磁干扰等不确定因素引起的。为了进一步验证模型的准确性,图 8 给出了 0~0.05 mm 中心位置附近,  $\sigma_x$  的实验数据与仿真曲线的对比图,其相对误差不超过 0.1%,因此实验结果与理论仿真结果基本是相符的。

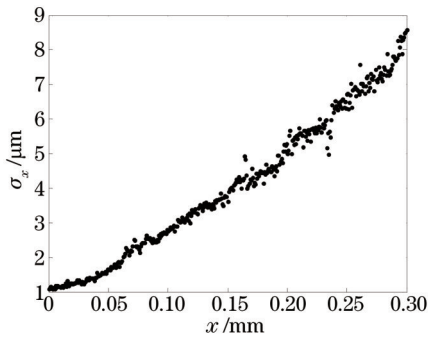


图 7 在  $x$  方向 0 到 0.3 mm 内  $\sigma_x$  的实验曲线  
Fig.7 Experimental curve of  $\sigma_x$  when  $x$  ranges from 0 to 0.3 mm

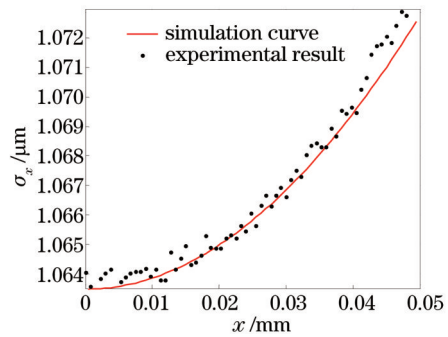


图 8 在  $x$  方向 0~50  $\mu\text{m}$  内  $\sigma_x$  的实验数据与仿真曲线的对比图  
Fig.8 Comparison figure between experimental result and simulation curve of  $\sigma_x$  when  $x$  ranges from 0 to 0.05 mm

5.3 系统信噪比的影响

仍采用  $\omega$  为 0.6 mm 的高斯光斑,调整光学系统让光斑质心入射在四象限探测器中心,调节光功率,改变信噪比,分析信噪比的影响。图 9~11 分别给出了系统信噪比为 39.40 dB、50.97 dB 和 57.48 dB 时的实验结果,对应的  $\sigma_x$  分别为 0.00411、0.00109 和 0.000514 mm。图中,截取了 1000 个采样点,  $y$  轴为解算出的实际位置  $x$ 。比较这 3 幅图可以看出,系统信噪比越大,  $x$  的解算值波动程度越小。为了进一步说明问题,表 2 给出了这三种信噪比下  $\sigma_x$  的理论值和实验值的对比结果。通过表 2 可以看出,理论值与实验值基本吻合,且随着信噪比的增大,  $\sigma_x$  减小,位置检测精度增加,与理论仿真分析结果一致。

综合实验分析可以看出,各因素对位置检测精度影响的实验结果与仿真结果是一致的,且实验数据与理论数据吻合的非常好,这充分说明了所建立的数学模型的有效性。

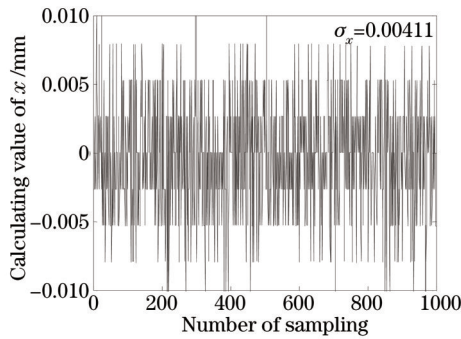


图9 在系统信噪比为 39.40 dB 时, (0,0)位置点  $x$  的解算值分布图

Fig.9 Distribution of calculated values of  $x$  at (0,0) position when system  $R_{SN_x}$  is 39.40 dB

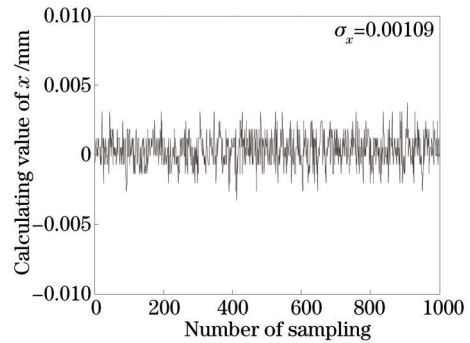


图10 在系统信噪比为 50.97 dB 时, (0,0)位置点  $x$  的解算值分布图

Fig.10 Distribution of calculated values of  $x$  at (0,0) position when system  $R_{SN_x}$  is 50.97 dB

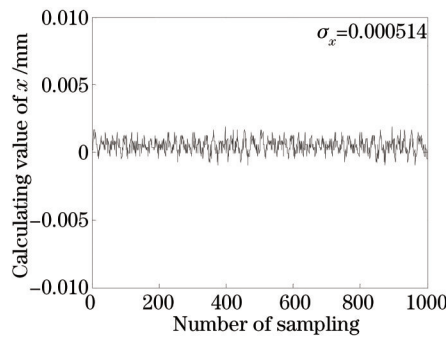


图11 在系统信噪比为 57.48 dB 时, (0,0)位置点  $x$  的解算值分布图

Fig.11 Distribution of calculated values of  $x$  at (0,0) position when system  $R_{SN_x}$  is 57.48 dB

表2 不同信噪比下(0,0)位置点  $\sigma_x$  的理论值与实验值的对比结果

Table 2 Comparison results between theoretical and experimental values of  $\sigma_x$  at (0,0) position under different  $R_{SN_x}$

$R_{SN_x}$ /dB	$\sigma_x$ (theory) /mm	$\sigma_x$ (experiment) /mm
39.40	$4.03 \times 10^{-3}$	$4.11 \times 10^{-3}$
50.97	$1.06 \times 10^{-3}$	$1.09 \times 10^{-3}$
57.48	$5.02 \times 10^{-4}$	$5.14 \times 10^{-4}$

## 6 结 论

对四象限探测器的位置检测精度进行了深入的研究,根据误差理论对其建立了数学模型,利用该模型对影响位置检测精度的主要因素进行了仿真分析,并设计了实验进行验证。研究表明,影响QD位置检测精度的因素主要有光斑半径  $\omega$ 、光斑质心位置和信噪比  $R_{SN_x}$ ,为提高光斑检测系统的检测精度,可以从以下三个方面入手:1) 在保证检测范围的条件下,尽量采用小的高斯光斑;2) 在条件允许的情况下,尽量让光斑入射在四象限探测器中心附近;3) 减小系统噪声,合理提高光功率,设计出高信噪比的光斑位置检测系统。此外,该模型可以直接计算出特定条件下的位置检测精度,给工程应用提供了理论指导。

## 参 考 文 献

- 1 Shuzhen Wang, Suping Chang, Tiebang Xie, *et al.*. Applied research on four-quadrant optoelectronic detector for surface topography measurement[C]. SPIE, 2007, 6723(1): 672329.
- 2 Jin Lufan, Zhang Yating, Wang Haiyan, *et al.*. Acceleration aging of InGaAs PIN photoelectric detectors[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(10): 1008002.  
金露凡, 张雅婷, 王海艳, 等. InGaAs PIN 光电探测器的加速老化研究[J]. 中国激光, 2014, 41(10): 1008002.
- 3 Bao Pengfei, Lin Chengjian, Yang Feng, *et al.*. Development of large-area quadrant silicon detector for charged particles[J]. Chinese



- Physics C, 2014, 38(12): 126001.
- 4 Zhao Xin, Tong Shoufeng, Liu Yunqing, *et al.*. Application research on four-quadrant detector in space laser communication system[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2010, 21(1): 46-49.  
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.
- 5 Song Cui, Yeng Chai Soh. Improved measurement accuracy of the quadrant detector through improvement of linearity index[J]. Applied Physics Letters, 2010, 96(8): 081102.
- 6 Zhao Xin, Song Yansong, Tong Shoufeng, *et al.*. Dynamic demonstration experiment of acquisition, pointing and tracking system in space laser communications[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(3): 0305005.  
赵馨, 宋延嵩, 佟首峰, 等. 空间激光通信捕获、对准、跟踪系统动态演示实验[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0305005.
- 7 Xiang Hao, Cui Fang Kuang, Yulong Ku, *et al.*. A quadrant detector based laser alignment method with higher sensitivity[J]. Optik, 2012, 123(24): 2238-2240.
- 8 Chao Lu, Yusheng Zhai, Xinjie Wang, *et al.*. A novel method to improve detecting sensitivity of quadrant detector[J]. Optik, 2014, 125(14): 3519-3523.
- 9 Qian Feng, Jia Jianjun, Zhang Liang, *et al.*. Defective pixel correction of spot-detecting camera in satellite-to-ground laser communication ATP system[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(5): 0505007.  
钱锋, 贾建军, 张亮, 等. 星地激光通信ATP系统探测相机的坏点校正[J]. 中国激光, 2014, 41(5): 0505007.
- 10 Yu Xiaonan, Tong Shoufeng, Dong Yan, *et al.*. Single beam tracking subsystem of space laser communication network[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(12): 3348-3353.  
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.
- 11 Tang Guanqun. Analysis and comparison of several calculation methods of beam spot center[J]. Journal of Beijing Institute of Machinery, 2009, 24(1): 61-64.  
唐冠群. 几种激光光斑中心定位算法的比较[J]. 北京机械工业学院学报, 2009, 24(1): 61-64.
- 12 Dang Liping, Liu Junhua, Tang Shugang. Analysis of the non-uniformity effect and soft correction algorithm for four-quadrant detector [J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 35(4): 540-544.  
党丽萍, 刘君华, 唐树刚. 象限探测器非均匀性的影响分析及软校正算法[J]. 光子学报, 2006, 35(4): 540-544.
- 13 Tang Xiaojun, Liu Junhua, Chen Jian, *et al.*. Mathematic model of ray-path of four-quadrant photoelectric detector[J]. Chinese J Lasers, 2004, 31(4): 421-424.  
汤晓君, 刘君华, 陈剑, 等. 四象限光电探测器的光路数学模型[J]. 中国激光, 2004, 31(4): 421-424.
- 14 Zhang Lei, Zhang Guoyu, Liu Yunqing. Affecting factor for detection accuracy of four-quadrant detector[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(6): 0605007.  
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): 0605007.
- 15 Shang Tao, Li Xi, Liu Zengji, *et al.*. Novel four-quadrant design and the method for obtaining spot parameters[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(4): 1034-1040.  
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.
- 16 Chen Lin. Research on the Precise Detection Technology of Infrared Laser Facula Position Based on QD[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2010: 11-13.  
陈琳. 基于QD的红外激光光斑位置精密检测技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2010: 11-13.
- 17 Lazo M Manojlovic, Žarko P Barbaric. Optimization of optical receiver parameters for pulsed laser-tracking systems[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2009, 58(3): 681-690.
- 18 Shen Chaobo. The Development of Photon Beam Position Monitor System based on Four-quadrant Detector[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2009: 20-23.  
申超波. 基于四象限探测器的同步光位置测量系统研制[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2009: 20-23.
- 19 Zhao Xin, Tong Shoufeng, Jiang Huilin. Experimental testing on characteristics of four-quadrant detector[J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(10): 2164-2170.  
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.
- 20 Yu Feng, He Ye, Li Song, *et al.*. Improvement of positioning algorithm for four-quadrant optoelectronic detection system[J]. Journal of Applied Optics, 2008, 29(4): 493-497.  
余峰, 何焯, 李松, 等. 四象限光电检测系统的定位算法研究及改进[J]. 应用光学, 2008, 29(4): 493-497.

栏目编辑: 刘丰瑞