

影响四象限探测器探测精度的因素

张 雷¹ 张国玉¹ 刘云清²

(¹ 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022
² 长春理工大学电子信息工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要 主要分析了影响四象限探测器跟踪精度的因素。对光斑大小、光斑位置、质心计算公式、探测器噪声、放大器噪声等因素进行了理论分析,通过计算和仿真的方法对各种因素的作用进行了验证,并通过实验验证了方法的正确性。研究表明,采用常用的四象限质心算法,只要采用合适的光学系统和信号检测电路,就可以实现高精度的跟踪误差检测。

关键词 测量;卫星激光通信;四象限探测器;探测精度;噪声

中图分类号 TP273 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0605007

Affecting Factor for Detection Accuracy of Four-Quadrant Detector

Zhang Lei¹ Zhang Guoyu¹ Liu Yunqing¹

¹ School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology,
Changchun, Jilin 130022, China

² School of Electronics and Information Engineering, Changchun University of Science and Technology,
Changchun, Jilin 130022, China

Abstract Affecting factors for detection accuracy of four-quadrant detector are studied. The effect of facula size, facula centroid position, calculation formula, the noise of detector and amplifier is analyzed in theory, then the effect of these factors is verified by means of calculation and simulation. In the end, a method is proved to be correct by experiment. The research results show that using the appropriate optical system and signal detection circuit, high-precision error detection based on the four-quadrant centroid algorithm is realized.

Key words measurement; satellite laser communications; four-quadrant detector; detection accuracy; noise

OCIS codes 060.2605; 120.1880; 040.1345; 040.5160

1 引 言

在卫星间激光通信系统及星际激光通信系统中,通常采用粗精复合跟瞄系统,为减少系统复杂性,常把通信光作为精跟踪的信标光。跟踪检测器件一般采用面阵 CCD 或象限探测器(QD)。CCD 探测器由于通信距离远、速率高,通常选用 1500 nm 波段激光作为通信光。因在这个波段,CCD 的量子效率较低,而四象限光电探测器(QPIN)在没有大气影响下,具有较高的量子效率和灵敏度,经常作为精跟踪和通信光接收器。由于 QPIN 作为高精度跟踪

探测器时,辨别精度受到计算方法、光斑均匀性、光斑位置、光斑大小、背景光噪声、放大电路噪声等多种因素的影响。对于提高位置检测精度,文献[1]提出了改进的迭代算法,将检测精度控制在 0.1° 。文献[2]对影响探测精度的多种因素进行了仿真。文献[3]采用能量分布公式,在实验室内对 QD 检测精度进行了验证。文献[4]提出了对角改进算法,得到较宽的线性区,但算法较为复杂。本文将系统地探讨多种因素对探测精度的影响,以便在设计时做折中处理,使系统达到最佳性能。

收稿日期: 2011-12-21; **收到修改稿日期**: 2012-03-19

基金项目: 国家自然科学基金(61077056)资助课题。

作者简介: 张 雷(1978—),男,博士研究生,主要从事光电检测技术方面的研究。E-mail: benchi4500@cust.edu.cn

导师简介: 张国玉(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事空间科学与技术、光电仪器与检测技术等方面的研究。

E-mail: zh_guoyu@yahoo.com.cn(通信联系人)

2 象限探测器位置检测工作原理

四象限光电探测器是将4个性能一样的光电探测器按四象限形式分布集成在一起形成位置探测器。QPIN 用在精跟踪系统中,具有灵敏度高、光谱响应范围宽、暗电流小、响应快、动态范围宽等优点,但还存在多种因素影响它的探测精度。其工作原理图如图1所示^[5]。

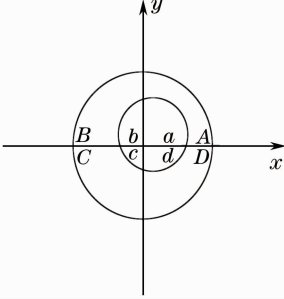


图1 四象限探测器工作原理示意图

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

以象限对称中点为位置零点,以4个探测器的边界为 x 、 y 轴,4个探测器分别对应4个象限,对应的光电流分别为 I_a 、 I_b 、 I_c 、 I_d 。设光在每个象限上的光面积分别为 S_a 、 S_b 、 S_c 、 S_d ,对应的光功率分别为 E_a 、 E_b 、 E_c 、 E_d 。设光斑中心为 (x_0, y_0) ,光斑半径为 r , d_x 、 d_y 为 x 和 y 轴上的位置误差信号,得到

$$d_x = \frac{(I_a + I_d) - (I_b + I_c)}{I_a + I_b + I_c + I_d} = \frac{(E_a + E_d) - (E_b + E_c)}{E_a + E_b + E_c + E_d}, \quad (1)$$

$$d_y = \frac{(I_a + I_b) - (I_c + I_d)}{I_a + I_b + I_c + I_d} = \frac{(E_a + E_b) - (E_c + E_d)}{E_a + E_b + E_c + E_d}. \quad (2)$$

3 光斑大小与位置对跟踪精度的影响

在入射光束为高质量激光光束时,如果不考虑大气影响,经过光学系统成像在四象限探测器上的光斑能量分布通常为高斯分布。要计算每个象限的光能量必须用积分的方法,在实际工作中很难实现。如果通过离焦和匀化处理,可近似地把光斑的分布看成是均匀的,则每个象限中的光能量和电流与光斑的面积成正比,即

$$d_x = \frac{(S_a + S_d) - (S_b + S_c)}{S_a + S_b + S_c + S_d}, \quad (3)$$

$$d_y = \frac{(S_a + S_b) - (S_c + S_d)}{S_a + S_b + S_c + S_d}. \quad (4)$$

因此, d_x 、 d_y 体现了光斑重心的变化,如图1所示。利用几何知识求第一个象限中光斑面积为

$$S_a = x_0 y_0 + \frac{y_0}{2} \sqrt{r^2 - y_0^2} + \frac{x_0}{2} \sqrt{r^2 - x_0^2} + \frac{r^2}{2} \left[\frac{\pi}{2} + \arcsin\left(\frac{y_0}{r}\right) + \arcsin\left(\frac{x_0}{r}\right) \right]. \quad (5)$$

同理可以求出 S_b 、 S_c 、 S_d 的面积。把各个面积代入(3)、(4)式中,得

$$d_x = \frac{1}{\pi r^2} \left[2r^2 \arcsin\left(\frac{x_0}{r}\right) + 2x_0 \sqrt{r^2 - x_0^2} \right], \quad (6)$$

$$d_y = \frac{1}{\pi r^2} \left[2r^2 \arcsin\left(\frac{y_0}{r}\right) + 2y_0 \sqrt{r^2 - y_0^2} \right]. \quad (7)$$

因此即使在光斑均匀情况下,光斑实际重心位置与公式所示中心位置也不呈线性关系。在(6)、(7)式中,当满足 $|x_0| \ll r$, $|y_0| \ll r$,有

$$d_x = \frac{1}{\pi r^2} \left(2r^2 \frac{x_0}{r} + 2rx_0 \right) \approx \frac{2x_0}{\pi r}, \quad (8)$$

$$d_y = \frac{1}{\pi r^2} \left(2r^2 \frac{y_0}{r} + 2ry_0 \right) \approx \frac{2y_0}{\pi r}. \quad (9)$$

以光敏面为圆形,直径为4 mm的QPIN为例,光斑半径分别为0.5、1.0、1.5 mm,以(6)、(8)式仿真,仿真结果如图2所示。从图2中可以得到:1)当 r 一定,且满足 $|x_0| \ll r$, $|y_0| \ll r$,(8)、(9)式成立;2)当 r 变化时, d_x 、 d_y 的结果将发生非线性变化,需要补偿才可以得到近似线性结果;3)简化计算公式与非简化计算公式结果差别较大。

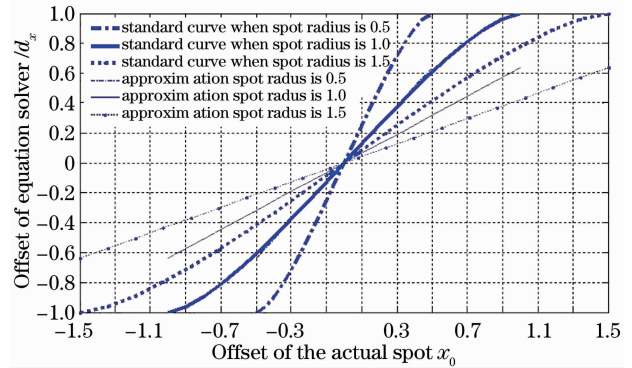


图2 光斑半径变化时质心误差仿真曲线

Fig.2 Error simulation curves for centre of facula when facula radius changes

仿真表明当满足 $|x_0| \leq \frac{r}{20}$, $|y_0| \leq \frac{r}{20}$, $r = 0.5R$ 时,由(6)、(7)式确定的误差与由(8)、(9)式确定的误差相差不超过10%。

因此实际使用过程中如果数据处理速度满足系统要求时,可以采用(6)、(7)式。

4 QPIN 噪声引起跟踪误差分析

由探测器自身引起的噪声和外部条件引起的噪声会引起跟踪误差,它们之间关系为^[6,7]

$$\sigma = \frac{\lambda/d}{\sqrt{R_{S/N}}}, \quad (10)$$

式中 λ 为光波长, d 为光学孔径, σ 为分配的跟踪误差方差, $R_{S/N}$ 为信噪比。

4.1 QPIN 噪声

假设 QPIN 上各项噪声都是独立的随机噪声并服从统计规律,则输出的总均方噪声 N 为^[8]

$$N = \left[4\Delta f \frac{KT}{R_L} + \Delta f e (i_B + i_D) + \frac{\pi\lambda^2 r_T^4}{4R^2 S} + 4.192S^{1/6} r_T C_n^2 K^{-2} i_1^2 + \Delta f e i_{BS}^2 + \frac{\pi\lambda^2}{16S\psi} i_{BS}^2 \right]^{1/2}, \quad (11)$$

式中第一项为热噪声,第二项为背景噪声,第三项为光斑噪声,第四项为大气湍流噪声,第五项为大气后向散射噪声,第六项为大气散射引起的光斑噪声。 K 为玻尔兹曼常数, T 为工作环境的绝对温度, R_L 为负载电阻, e 为单位电荷, R 为探测器直径, S 为光学系统接收面积, ψ 为在 $1.5 \mu\text{m}$ 附近的天空背景光功率谱密度, Δf 为信号带宽, r_T 为通信距离, i_D 为探测器暗电流, i_B 为背景电流, i_{BS} 为后向散射电流, C_n^2 为湍流常数。

当在自由空间时,第四、五、六项引起的噪声忽略不计,主要计算前三项噪声:

1) 热噪声

噪声电流:

$$i_n = (4K\Delta f T/R_L)^{1/2} = \left(\frac{4 \times 1.38 \times 10^{-23} \times 2 \times 10^7 \times 273}{1 \times 10^7} \right)^{1/2}. \quad (12)$$

2) 背景噪声

设 QPIN 对应的视场角 θ 为 $320 \mu\text{rad}$, 对应立体角为 $\Omega = \pi\theta^2/4 \text{ sr}$ 。

背景电流:

$$i_B = R_O \psi S \Delta\lambda \tau_{OR} \Omega, \quad (13)$$

式中 $\Delta\lambda$ 为滤波器带宽。

背景噪声电流:

$$i_{Bn} = (\Delta f e i_B)^{1/2}. \quad (14)$$

暗电流噪声:

$$i_{Dn} = (\Delta f e i_D)^{1/2}. \quad (15)$$

3) 光斑噪声

$$i_{Tn} = (\Delta f e i_1^2)^{1/2} = (2 \times 10^7 \times 1.6 \times 10^{-19} \times i_1^2)^{1/2} = 1.8 \times 10^{-6} i_1, \quad (16)$$

$$R_{S/N} = 2i_1 / (1.86 \times 10^{-6} i_1) = 1.07 \times 10^6. \quad (17)$$

当取 $R_L = 10^7 \Omega$, $R = 4 \text{ mm}$, $S = 0.05 \text{ m}^2$, 天空背景光功率谱密度 $\psi = 0.3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{nm} \cdot \text{sr})$, $\Delta\lambda = 3 \text{ nm}$, $\Delta f = 2 \times 10^7 \text{ Hz}$, $i_D = 2 \text{ nA}$, $r_T = 4.5 \times 10^7 \text{ m}$, 得: $i_n = 1.7 \times 10^{-11} \text{ A}$, $i_{Bn} = 1.2 \times 10^{-13} \text{ A}$, $i_{Dn} = 1.2 \times 10^{-10} \text{ A}$ 。因此 QPIN 的暗电流噪声是影响跟踪误差的主要噪声因素。当分配 $\sigma = 0.5 \mu\text{rad}$ 时, $R_{S/N} = 144$, 则信号电流不小于 $1.7 \times 10^{-8} \text{ A}$ 。

4.2 放大电路噪声

由于 QPIN 是电流型光电器件,因此前级放大电路选用跨阻放大器。放大电路噪声主要由输入失调电压、失调电流、反馈电阻噪声、带宽等因素组成。

因为要对微小电流进行放大,其引起的检测误差可以忽略不计。选用高输入阻抗的 MOS 型运放。

由于 QPIN 暗电流为纳安量级,根据信噪比要求最小大于 10 倍的原则, QPIN 输出信号电流不小于 10 nA 量级。为减少失调电流的影响,需选用失调电流小于 0.1 nA 的运放。

如果选用 $1 \text{ M}\Omega$ 电阻作为反馈电阻 R_f , 则输出电压为 10 mV 量级,这样的信号不利于后继处理,因此需要选用 $10 \text{ M}\Omega$ 或 $100 \text{ M}\Omega$ 作为反馈电阻,输出电压为 100 mV 量级或几伏量级。由于 $100 \text{ M}\Omega$ 的分布电容很大,因此选用 $R_f = 10 \text{ M}\Omega$ 反馈电阻比较合适,其输出电压为数十毫伏量级,因此选用输入失调电压小于 0.5 mV 的运放。

电阻的均方根噪声电压 $E_i = \sqrt{4KTR\Delta f_1}$, 式中 Δf_1 为有反馈电阻 R_f 及其附带电容 C_f 所决定的带宽: $\Delta f_1 = \frac{1}{2\pi R_f C_f}$ 。取 $C_f = 1 \times 10^{-11} \text{ F}$, 则 $E_i = \sqrt{4KTR\Delta f_1} = 16 \mu\text{V}$, 远小于输出电压,可以忽略不计。综上所述,在系统焦距、光斑半径已经确定情况下,选择合适的运放, QPIN 最小分辨率主要由 QPIN 的暗电流噪声和信号电流决定。

5 不同模式光斑对 QPIN 的影响

常见的光能量分布模式为均匀分布、高斯分布、艾里(Airy)分布。高斯分布为光斑离焦形式,可调整光斑大小,其能量按高斯函数形式分布:

$$I = I_0 \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} \exp\left[-\frac{(r_1 - \tau)^2}{2\sigma_1^2}\right], \quad (18)$$

式中 τ 为能量平均值, σ_1 为能量分布标准方差, r_1 为光斑距离中心的大小。

在圆形光瞳的情况下,成像面位于系统焦平面上,艾里分布光强分布函数为

$$I = I_0 \left[\frac{2J_1(V)}{V} \right]^2, \quad (19)$$

式中

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{d}{f} \right) = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{d}{f} \right) \sqrt{x^2 + y^2}, \quad (20)$$

I_0 为成像处中心点光强, J_1 为一阶 Bessel 函数, f 为光学系统焦距, d 为光学孔径。

光斑分布模式不同,探测器的输出也不同。图 3 给出了不同光斑分布模式下探测器检测灵敏度与光斑重心之间的相互关系。从图中可以看出艾里分布情况下探测灵敏度最高,其输出线性范围最小;均匀分布情况下探测灵敏度最差,其输出线性范围最大。所以在视场较大工作时光斑为离焦的均匀光斑最好,可以达到较大的线性工作范围。

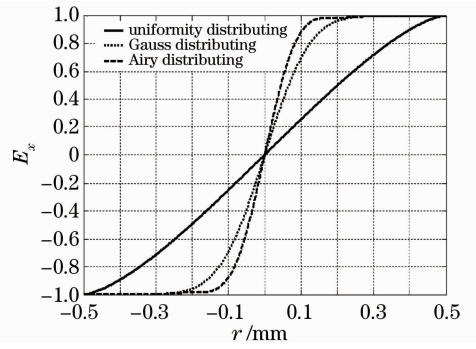


图 3 不同模式光斑对探测器输出的影响

Fig. 3 Output of detector in different pattern facula

6 QPIN 测试实验

为了验证分辨率与信噪比、线性度之间的关系,在实验室内搭建了如图 4 所示的半实物仿真系统。

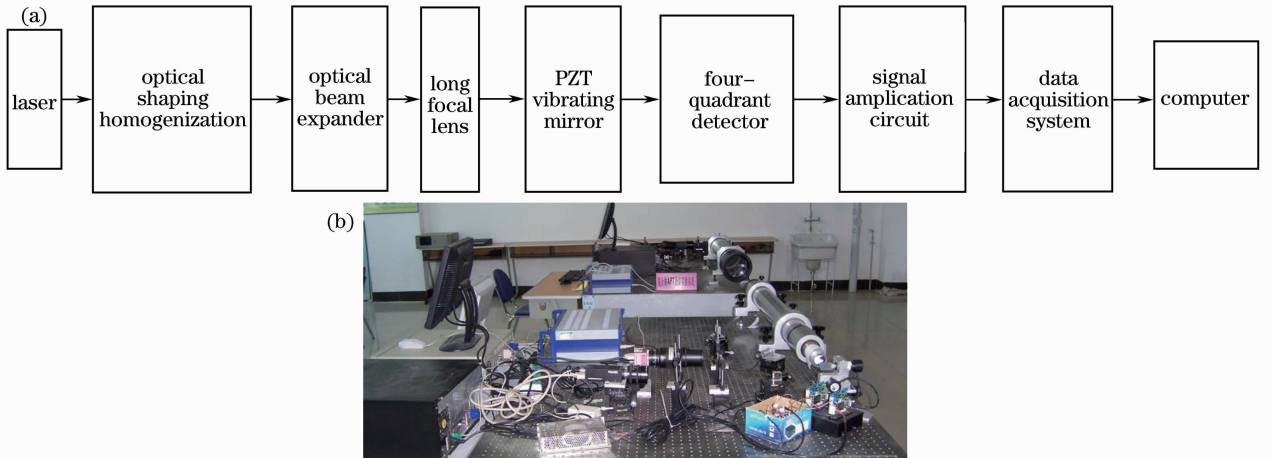


图 4 实验系统组成。(a)系统示意图;(b)实物系统

Fig. 4 Experimental system. (a) Schematic diagram of the system; (b) really experimental system

其工作过程:激光器发出的高斯光束经过整形匀化处理变为均匀光,经过扩束镜成为平行光束(模拟无限远光斑),在经过长焦距光学镜头投射到压电陶瓷(PZT)振镜上,PZT 振镜将光线折射到 QPIN 光敏面,QPIN 将光信号转换为电流信号。PZT 振镜每次转动一个设定的角度,经放大、数据采集后,求解算所得的光斑位置偏移量传输到计算机进行分析。

检验内容:1) 检验分配跟踪误差与信噪比的关系;2) 检验在要求的跟踪误差下细分能力;3) 光斑位置与计算误差是否符合。

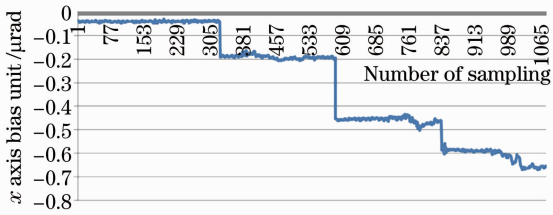
为了检测光斑位置偏移量,在扩束镜后放置高精度 PZT 振镜,其偏转精度 $0.1 \mu\text{rad}$;光学系统焦距 f 等效为 2000 mm ,QPIN 管 R 为 3 mm ,暗电流 i_D 为 2 nA ,滤波器带宽 3 nm ,波长 1550 nm 处灵敏度为 0.95 A/W ,跨阻放大器选择 OP656, R_f 为

$10 \text{ M}\Omega$,数据采样速率最高 100 kHz ,AD 转换精度 16 位。光斑半径为 1 mm ,光斑动态范围为 $\pm 0.5 \text{ mm}$,则 QPIN 视场为

$$\theta = \frac{dx}{f} = \frac{1 \text{ mm}}{2000 \text{ mm}} = 500 \mu\text{rad}. \quad (21)$$

当分配跟踪误差 $\sigma = 0.5 \mu\text{rad}$ 时,要求 QPIN 的最小分辨率小于 $0.25 \mu\text{rad}$ 。对应的直线分辨距离为 $0.5 \mu\text{m}$ 。质心计算方法采用(6)、(7)式。图 5 是在视场中心附近实际测试精度,其中激光到达 QPIN 表面功率 $10 \mu\text{W}$, $R_{S/N} = 45$,可以满足(10)式的最小跟踪分配误差的要求。在 $0.5 \mu\text{rad}$ 的范围内信号可以实现 2~3 细分。表明当信噪比足够低时,合适的光学系统可以满足高精度跟踪要求。

图 6 同样是在视场中心附近实际测试精度,其中激光到达 QPIN 表面功率 $1 \mu\text{W}$, $R_{S/N} = 18$ 。可以

图5 $R_{S/N}$ 足够时视场中心信号细分图Fig. 5 Subdivision graph of central signal in the field when $R_{S/N}$ is enough large

看出信号方差达到 $0.8 \mu\text{rad}$ ，在 $0.5 \mu\text{rad}$ 的范围内信号不能实现细分。表明当信噪比较低时，即使采用合适的光学系统，也不能满足高精度跟踪要求。

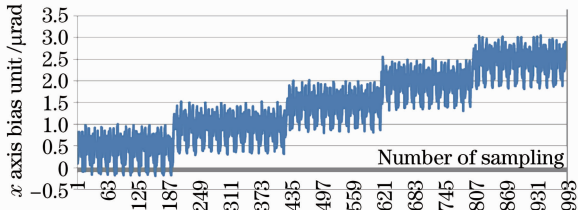
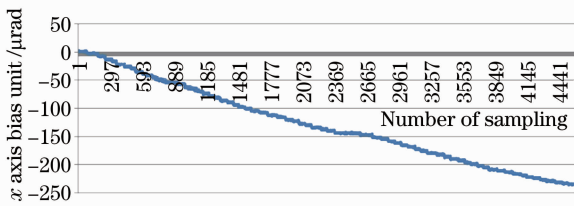
图6 $R_{S/N}$ 较小时视场中心信号细分图Fig. 6 Subdivision graph of central signal in the field when $R_{S/N}$ is enough small

图7是采用(6)式计算 x 轴上的全视场质心曲线图。表明在视场中心细分能力优于视场边缘，并且离开视场中心越远，呈现的非线性越强，这与仿真结果趋势是一致的。

图7 x 轴质心曲线图Fig. 7 Centroid curve for full field in x axis

7 结 论

通过理论分析和实验，得到如下结果：采用四象限探测器作为位置探测器件时，合理设置光学系统和电路，采用常用的加减方程检测质心，可以得到较高的测试精度；在视场范围较大情况下，不宜采用简化公式计算。

参 考 文 献

- 1 Chen Yong, Zhu Tianrui, Li Huangong. Analysis and improvement in angle-measurement algorithm of the four-quadrant detector[J]. *Laser & Infrared*, 2009, **39**(6): 669~672
- 2 Han Cheng, Bai Baoxing, Yang Huamin. Study four-quadrant detector in the free space laser communication[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(8): 2023~2029
- 3 Zhao Xin, Tong Shoufeng, Liu Yunqing *et al.*. Technology on spot detection and tracking based on four-quadrant detector[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(7): 1756~1761
- 4 Feng Longling, Deng Renling. Study on optical tracking with four-quadrant photodetector [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 1996, **25**(1): 16~22
- 5 Liu Yunqing, Jiang Huilin, Tong Shoufeng. Study on stabilizational tracking technology for atmospheric laser communication system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(5): 0505005
- 6 A. J. Masino, C. Y. Young, L. C. Andrews *et al.*. Mean irradiance: experimental and theoretical results[C]. *SPIE*, 2005, **5793**: 178~184
- 7 J. F. Walter. Prospects for Precision Active Tracking Using a Quadrant Detector[R]. Technical Memorandum, 1976. A022714
- 8 Tao Wen, Zhaowen Zhang, Jibo Wei *et al.*. A novel method to improve spatial resolution of acousto-optic deflector [J]. *Optoelectron. Lett.*, 2006, **2**(1): 34~36

栏目编辑：何卓铭