

文章编号 1004-924X(2010)10-2164-07

四象限探测器的特性测试

赵馨, 佟首峰, 姜会林

(长春理工大学, 吉林 长春 130022)

摘要:研究了用四象限探测器检测光斑中心位置时,入射光斑的各种特性和外部环境对象限探测器输出产生的影响。通过理论推导得出了入射椭圆高斯光斑时光斑中心位置与探测器输出的关系公式及检测灵敏度公式;搭建实验系统完成了室内及野外测试实验。实验结果表明,室内环境下探测器具有较高的检测精度与细分能力;在极限灵敏度下通过数字滤波可以使器件具有36细分的能力;测量了象限探测器的电压特性,完成了背景光特性、光斑大小特性、信噪比特性测试实验。野外实验表明,光强闪烁对探测器影响很大,当大气折射率结构常数为 10^{-16} 时,距离在830 m时器件仅具有7细分能力,距离在12.5 km时基本没有细分能力,已经无法进行光斑检测。

关键词:四象限探测器;椭圆高斯光斑;光强闪烁;细分能力

中图分类号:TP212.14;TN366 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20101810.2164

Experimental testing on characteristics of four-quadrant detector

ZHAO Xin, TONG Shou-feng, JIANG Hui-lin

(Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: The basic characteristics of incident spots and effects of external space environments on a four-quadrant detector were researched when it was used to detect the spot center. The formulae of the output and sensitivity of the detector were proposed when the incident spots showed an elliptical Gaussian-distribution. An experimental system was set up to test and verify the characteristics of the quadrant detector in an indoor test and a field test. Experimental results demonstrate that the detector has higher detection accuracy and subdivision in the indoor test, and can offer a 36-subdivision with digital filtering at a limited sensitivity. By the voltage characteristic curves, the background lights, spot sizes and the ratio of signal to noise were studied. The experiments in the field were also completed between the two spots of 830 m and 12.5 km. It is pointed out that the influence of irradiance scintillation on the detector is rigider than that of the indoor test. When the refractive index structure parameter is 10^{-16} , the subdivision is only 7 in a distance of 830 m, furthermore, it can not detect spots in 12.5 km for the subdivision is invalid.

Key words: four-quadrant detector; elliptical Gaussian -distributed spot; irradiance scintillation; subdivision

收稿日期:2009-10-15;修订日期:2010-01-18.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60677009);吉林省自然科学基金资助项目(No. 20070527);吉林省教育厅“十一五”规划资助项目(No. 2007294);国家863高技术研究发展计划资助项目(No. 2003AA712014)

1 引言

四象限探测器因为具有灵敏度和位置分辨率高、光谱范围宽、体积小、响应快、动态范围宽等特点,在光斑位置检测中得到了广泛应用,尤其是在空间光通信中,光波段从 800 nm 改为 1 550 nm,使用四象限探测器对实现通信光与精信光标统一、减小系统体积十分有效;而在 1 550 nm 波段用于激光光斑位置判定时,由于红外 CCD 探测器受限,象限探测器也是理想的选择。从目前国内外报道的空间光通信系统成功案例和通信系统规划看,象限探测器主要应用在捕获、对准、跟踪(APT)系统精跟踪的光斑检测和提前量伺服系统的光斑检测。例如,日本 NADSA 研制的 LUCE 系统采用象限探测器来完成精跟踪光斑检测及光斑中心计算,其链路为光通信系统的垂直链路^[1-2]。

象限探测器对光斑中心的计算使用的是质心算法,光斑的模型多数为均匀光斑、高斯光斑、艾丽光斑等,而在实际应用环境中由于受到分光系统、反射系统、振动等因素的影响,光斑多数为椭圆的高斯光斑,这对测量精度必然产生影响,因此,有必要对象限探测器的探测特性进行研究^[3]。使用象限探测器时一个很重要的性能指标是其细分能力,即探测器可以分辨的光斑在探测器表面移动的最小间距的能力,它直接影响探测器的检测精度。另外,各种外部特性,如光斑大小的变化、入射光功率的变化、背景光强度的变化也会对探测器的输出检测精度或者其线性范围产生影响,这一点可以从仿真其电压特性曲线得到。再者,当象限探测器应用于大气湍流环境中时,湍流对激光产生调制作用也是一个必须要考虑的问题,由湍流引起的光强闪烁效应会对探测器的输出产生影响,甚至可能造成光斑检测失效^[7]。

目前,对象限探测器特性的研究多数为理论与仿真分析^[4-6]。本文试图通过实际测试研究四象限探测器的性能。首先,理论推导得到了入射椭圆高斯光斑时,光斑中心位置与探测器输出的关系公式及检测灵敏度公式。搭建实验平台完成了室内和野外实验,对探测器相关性能进行了实验测试,并给出了相应测试结果,本文的研究可为象限探测器实际应用起指导作用。

2 象限探测器工作原理

象限探测器(Quadrant Detector, QD)是将 4 个性能几乎完全一样的光电管按四象限分布的形式集成而成。当激光光束入射到 QD 探测器的光敏面上时,根据 4 个象限的分布情况将成像光斑(假设成像光斑形状理想为圆形)分成 A, B, C, D4 个部分,4 个部分的光能量转换为光电流,则探测器输出位置信息为:

$$E_x = \frac{A+D-B-C}{A+B+C+D}, \quad (1)$$

$$E_y = \frac{A+B-C-D}{A+B+C+D}, \quad (2)$$

但是在实际环境中很难得到圆形光斑,比较理性的情况下为椭圆高斯光斑,其能量可按式描述^[8-9]:

$$I = I_0 \frac{2}{\pi w_a w_b} \exp[-2(x-x_0)^2/w_a^2 - 2(y-y_0)^2/w_b^2], \quad (3)$$

式中 (x_0, y_0) 为光斑质心位置, w_a 为长轴方向上的光斑高斯宽度, w_b 为短轴方向上的光斑高斯宽度。设探测器输出位置偏差信号和实际位置之间存在如下关系:

$$E_x = K_x x_0; E_y = K_y y_0, \quad (4)$$

式中 K_x, K_y 为探测器误差信号同光斑质心偏移量的比值,即探测灵敏度^[10],因此有:

$$I_A + I_D = \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} I(x, y) dx dy, \quad (5)$$

$$I_B + I_C = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^0 I(x, y) dx dy, \quad (6)$$

将式(5)、(6)带入式(1)得到:

$$E_x = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \operatorname{erf}\left(\frac{x_0}{\sqrt{2}w_a}\right), \quad (7)$$

同理得:

$$E_y = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \operatorname{erf}\left(\frac{y_0}{\sqrt{2}w_b}\right), \quad (8)$$

式(7)中对 x_0 求导可得 x 方向的光斑检测灵敏度为:

$$K_x = \frac{dE_x}{dx_0} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi w_a} \exp\left(-\frac{x_0^2}{2w_a^2}\right), \quad (9)$$

同理得:

$$K_y = \frac{dE_y}{dy_0} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi w_b} \exp\left(-\frac{y_0^2}{2w_b^2}\right), \quad (10)$$

当光斑位于探测器中心位置附近时,有:

$$K_x/K_y \approx w_b/w_a. \quad (11)$$

从式(8)~(11)可知对于象限探测器而言,只有光斑位于象限探测器的中心附近时,才能实现较高的光斑检测精度,当光斑远离探测器中心时光斑检测精度将下降,且 x 轴和 y 轴上的检测精度是不同的。上述椭圆光斑检测精度公式适用于室内或是空间环境(如星间或太空),在后续室内实验中观察到的均为椭圆高斯光斑,对其绘制的象限探测器特性曲线与式(7)、式(8)一致;当在大气环境中存在湍流对光斑的调制作用时,光斑的形状与能量分布均不能用特定的函数描述,不能用上述公式描述。

3 测试系统组成

测试有室内测试和野外测试两个部分,室内测试可避免大气对器件的影响,与星间环境类似;野外测试主要验证大气湍流对 QD 的影响。

3.1 室内测试系统

测试原理如图 1 所示,系统由激光器、整形透镜、衰减片、二维偏转镜、滤光片、成像系统、四象限探测器、CCD、D/A、A/D、计算机、精密三维转台等构成。激光器选用波长为 532 nm 的半导体激光器,功率可调;二维偏转镜选用 FSM-300,输入电压为 $-10 \sim 10$ V,相应振镜旋转角为 $-26.2 \sim 26.2$ mrad; QD 选用 s4349,光敏面为 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$,沟道间隔为 $100 \mu\text{m}$,转换效率为 0.45

A/W,在 532 nm 波长响应率为 0.3, QD 驱动由低噪声放大电路构成,选用二级放大系统,设计增益为 6.8×10^6 ; CCD 相机具有开窗口功能,可见光波段; D/A 与 A/D 均选用 16 位;成像系统焦距为 70~300 mm。

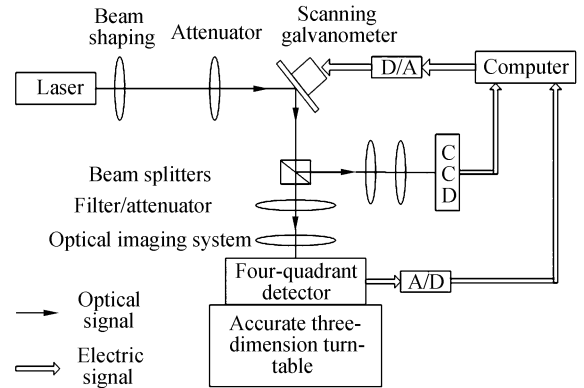


图 1 室内测试系统组成原理

Fig. 1 Block diagram of test system indoors

3.2 野外测试系统

测试原理如图 2 所示,分为发射端和接收端 2 个部分。发射端选用大功率可调激光器,波长 808 nm,最高输出功率为 1 W,同时将激光器架设在观靶镜和二维转台上,便于对准和调整;接收端组除了使用卡赛格林光学系统作为光学天线及没有扫描振镜外,其他与静态实验系统基本相同。

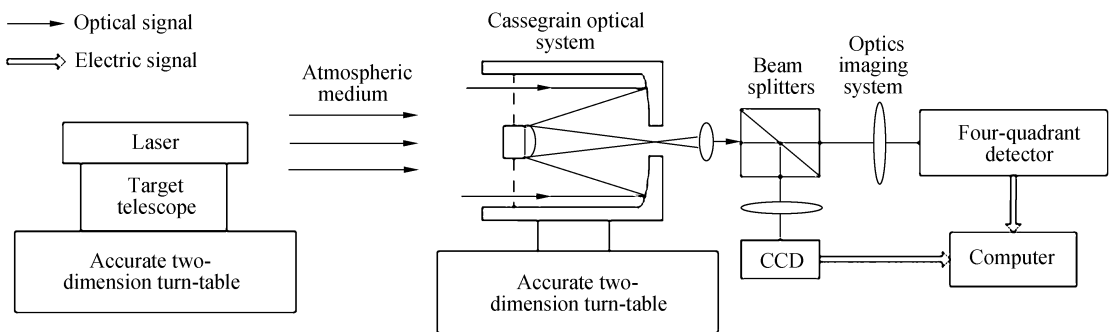


图 2 野外测试系统组成原理

Fig. 2 Block diagram of test system in field

4 数据分析

4.1 室内测试

室内由于没有大气的因素影响,与星间环境

较类似。本文主要完成了 QD 的极限灵敏度特性、细分能力特性、信噪比特性、背景光特性、光斑大小特性的测试。

4.1.1 灵敏度及细分能力测试

在实际使用 QD 的过程中,由于距离一般都

比较远,所以 QD 通常是在接近其极限灵敏度的条件下进行工作的,测量其静态噪声曲线,结果如图 3 所示,实测光功率大小为 35 nW(使用光功率计在探测器前测量)。从图中可以看出,噪声占整个光敏面的 0.8(整个光敏面范围为 2,式(1)和式(2)的表示形式是归一化处理结果),只能实现 2 细分。细分能力与探测器的噪声有关,可采用滤波方法对噪声进行抑制^[11-12]。

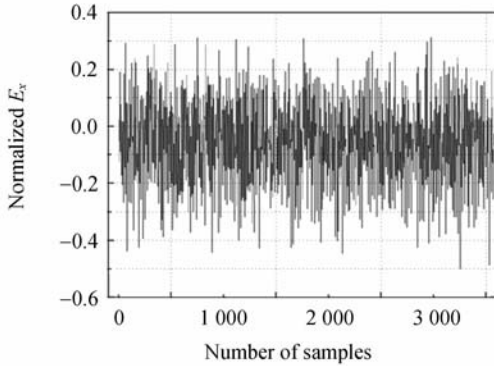


图 3 极限灵敏度测试

Fig. 3 Test on limit sensitivity

在极限灵敏度条件下对 QD 输出进行数字滤波(10 阶数字滤波),其结果如图 4 所示,表明数字滤波提高了细分能力,接近 6 细分。

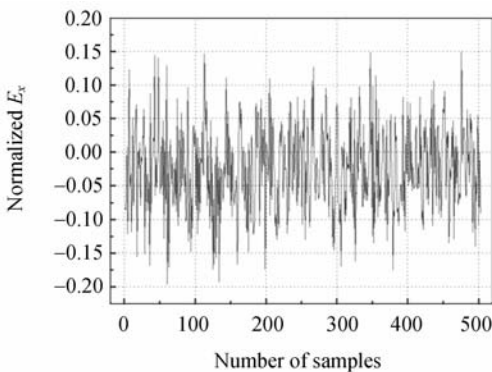


图 4 极限灵敏度滤波测试(10 阶数字滤波)

Fig. 4 Test on limit sensitivity after filtering (10-order digital filter)

进一步增加滤波阶数(50 阶数字滤波),QD 输出如图 5 所示,接近 36 细分。细分能力的增加,增加了 QD 的光斑检测精度,但是系统处理速度下降,所以在实际工作中要在检测精度与系统处理速度中折中选取。

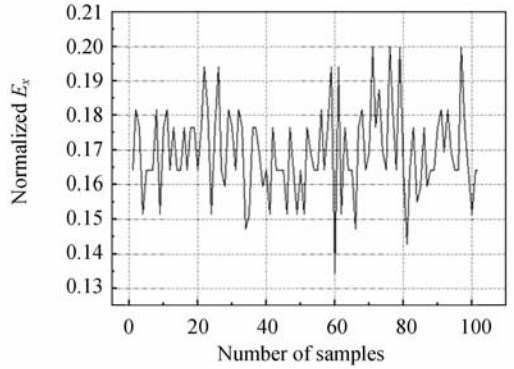


图 5 极限灵敏度滤波测试(50 阶数字滤波)

Fig. 5 Test on limit sensitivity after filtering (50-order digital filter)

4.1.2 信噪比、光斑大小、背景光特性测试

测量 QD 电压特性曲线并分析其 3 种特性,结果表明,不同的信噪比将对 QD 的检测精度与线性范围产生影响,如图 6 所示。信噪比大,光斑检测精度高,但是其线性范围下降。

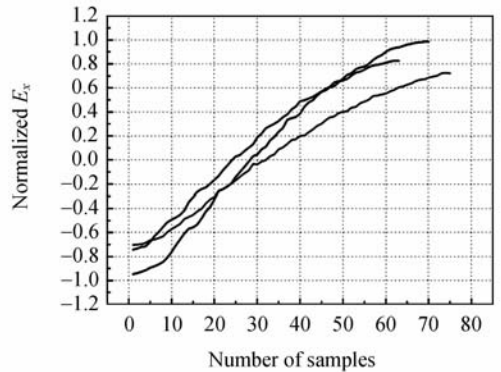


图 6 不同信噪比对 QD 影响

Fig. 6 Effects of different signal noise ratios on QD

光斑大小与检测精度与线性范围有直接关系,其结果如图 7 所示,光斑小,检测精度高,线性范围小,但是如果光斑过小的话,信号将被沟道间隔淹没。在实际设计时需要对比光斑优化选取,一般可以取光斑大小近似等于探测器光敏面的 1/2,同时需要结合视场大小综合选取光斑大小。图 7 同时可反映出椭圆高斯光斑对探测器的影响,当光斑在 2 个轴的方向上移动相同的距离时,由于光斑在 2 个轴上的高斯宽度不一样,将造成探测器在 2 个轴上的检测精度及线性范围不同,高斯宽度大的轴检测精度低,线性范围大;高斯宽度小的轴检测精度高,线性范围小。

背景光会造成检测精度与线性范围的同时

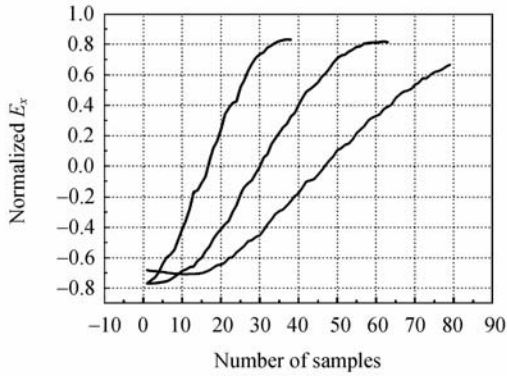


图 7 不同光斑大小对 QD 影响

Fig. 7 Effects of different spot sizes on QD

下降,其影响结果可以从图 8 中看出,所以背景光有别于上述两种特性,是必须要滤出的。

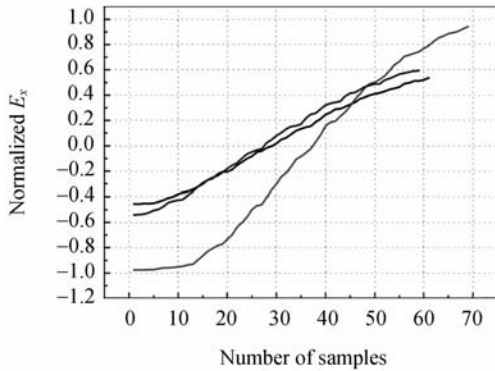


图 8 不同背景光对 QD 影响

Fig. 8 Effects of different background light intensities on QD

上述 3 种特性曲线测试结果均为 x 轴的输出结果,光斑从 x 的负相以恒定的速度运动到 x 轴正相,归一化后的范围为 $-1 \sim 1$, y 轴保持恒定,3 种曲线给出的总体趋势为当光斑位于探测器中心时,光斑检测精度高,随着光斑远离探测器,曲线斜率下降,检测精度下降,和理论推导保持一致。由于实验中光斑为椭圆光斑, y 轴可得到相似结果,但是检测精度不同。二维偏转镜呈 45° 放置,光束折转 90° 后入射到探测器光敏面上,当光斑在探测器中心时,两轴检测精度比为 $\sqrt{2} : 1$,当光斑远离中心时比值将增大。

4.2 野外测试

野外测试分近距离(GPS 实测 830 m)和远距离测试(GPS 实测 12.5 km),主要测试大气湍流对 QD 的影响及 QD 在湍流下的细分能力,其中大气对 QD 的最主要影响是光强闪烁效应,将造

成 QD 接收到的光能量剧烈变化,有可能使 QD 的 4 个象限达到饱和输出从而使其失去光斑检测能力。湍流的运动频率随不同时间段(清晨和傍晚湍流影响较小)和不同环境地点而变化(如在有水的湖面等环境下湍流影响较小)。本实验是在近似水平链路下完成的,海拔高度为 290 m 左右,实验时间为上午 9 时左右,能见度 > 13 km,大气折射率结构常数 $C_n^2 = 0.1 \times 10^{-15}$,根据公式:

$$\beta_1^2 = 1.23 \cdot k^{7/6} \cdot L^{11/6} \cdot C_n^2, \quad (12)$$

可计算出光强起伏方差 β_1^2 ,式中 $k = 2\pi/\lambda$, L 为发射和接收两点间距离。

图 9 给出野外环境下近距离实验结果,此时实测到达 QD 的光功率大小为 170 nW(信噪比较高),从图中可以看出 QD 的细分能力为 7 细分左右,细分能力与室内相比明显下降。图 10 给出远距离情况下 QD 输出结果,可以看出在此条件下 QD 已经不具备细分能力,失去光斑检测的能力;

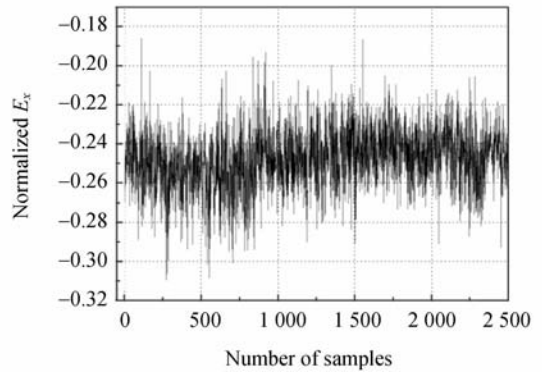


图 9 野外 800 m 测试结果

Fig. 9 Test results in 800 m distances

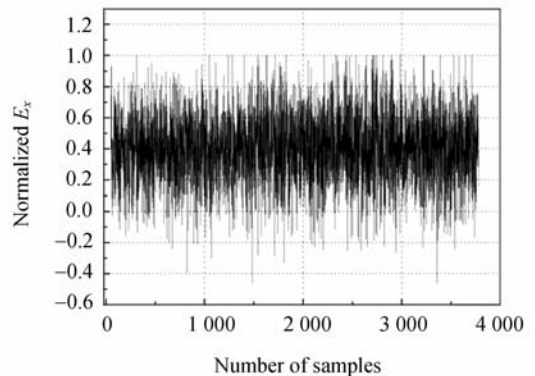


图 10 野外 12.5 km 测试结果

Fig. 10 Test results in 12.5 m distances

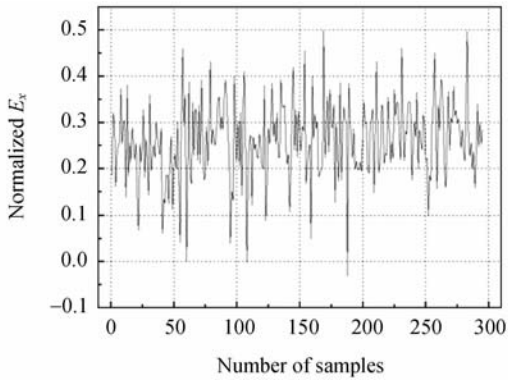


图 11 野外 12.5 km 测试结果(50 阶数字滤波)

Fig. 11 Test results in 12.5 m distances (50-order digital filtering)



图 12 CCD 检视下光强闪烁对光斑能量的影响

Fig. 12 Effects of irradiance scintillations on spot energy received from CCD camera

对其输出进行 50 阶数字滤波的结果如图 11 所示, QD 仅仅具有 4 细分的能力。图 12 是一组 CCD 监视下光强闪烁时其能量变化的直观图。

5 结 论

本文推导了入射椭圆高斯光斑时光斑中心位置与探测器输出的关系公式及检测灵敏度公式, 系统研究了四象限探测器的各种性能及外部环境对其性能影响, 搭建实验平台完成了室内及野外测试。测试结果表明, 在室内环境下探测器具有较好的工作特性, 检测精度高、细分能力强; 数字滤波可提高其细分能力, 在极限灵敏度条件下通过数字滤波可实现 36 细分, 可作为星间精跟踪探测器、提前量伺服系统光斑探测器使用, 也可用于其他检测系统中光斑中心位置的判定。但是在野外环境中由于大气湍流的影响, 主要是光强闪烁对探测器的影响, 当大气折射率常数为 $C_n^2 = 0.1 \times 10^{-15}$ 时(弱湍流环境), 在距离 830 m 处可实现 7 细分, 但是在距离 12.5 km 处基本失去细分能力, 已经不具备光斑检测能力, 经过 50 阶数字滤波后仅具有 4 细分能力, 与室内环境相比细分能力大大降低, 表明使用该器件时需要充分考虑大气因素的影响。

参考文献:

- [1] JEGANATHAN M, PORTILLO A, RACHO C, *et al.*. Lessons Learnt from the Optical Communications Demonstrator (OCD) [J]. *SPIE*, 1999, 3615:23-30.
- [2] TOLKRR-NIELSED T, OPPEHAUSER G. In orbit test result of an operational optical intersatellite link between ARTEMIS and SPOT₄, SILEX [J]. *SPIE*, 2003, 4635:1-15.
- [3] 丁涛, 许国良, 张旭革, 等. 空间光通信中平台振动对误码率影响的抑制[J]. *中国激光*, 2007, 34(4): 449-502.
DING T, XU G L, ZHANG X P, *et al.*. Control of bit error rate introduced by platform vibration for free space optical communication[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, 34(4):449-502. (in Chinese)
- [4] 张文涛, 李贤, 胡渝. 空间光通信探测技术中象限探测器(QD)的研究[J]. *量子电子学报*, 2003, 20(1): 114-117.
- [5] ZHANG W T, LI X, HU Y. Research of quadrant detector(QD) in optical communication technology [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2003, 20(1):114-117. (in Chinese).
- [6] 熊金涛, 胡成. 空间激光通信 APT 系统误差信号的特性分析[J]. *电子科技大学学报*, 2001, 30(5):489-493.
- [7] XONG J T, HU CH. Research of characteristics of error signal in APT system of space laser communication[J]. *Journal of UEST of China*, 2001, 30(5):489-493. (in Chinese).
- [8] 韩成, 白宝兴, 杨华民, 等. 自由空间激光通信四象限探测器性能研究[J]. *中国激光*, 2009, 36(8): 2030-2034.
- [9] HAN CH, BAI B X, YANG H M, *et al.*. Study four-quadrant detector in the free space laser communication [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(8):2030-2034. (in Chinese).
- [10] 陈纯毅, 杨华民, 姜会林, 等. 大气光通信中大气湍

- 流影响抑制技术研究进展[J]. 兵工学报, 2009, 30(6): 779-791.
- CHEN CH Y, YANG H M, JIANG H L, *et al.*. Research progress of mitigation technologies of turbulence effects in atmospheric optical communication [J]. *Acta Armamen Tarii*, 2009, 30(6): 779-791. (in Chinese).
- [8] 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.
- LIN Z Q, LI H J, LANG Y H, *et al.*. Obtaining spot parameters by quadrant photodetectors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(4): 764-770. (in Chinese).
- [9] 王海涌, 费峥红, 王新龙. 基于高斯分布的星像点精确模拟及质心计算[J]. 光学精密工程, 2009, 17(7): 1672-1677.
- WANG H Y, FEI ZH H, WANG X L. Precise simulation of star spots and centroid calculation based on Gaussian distribution[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(7): 1672-1677. (in Chinese).
- [10] 朱雅茗, 李明全, 汤国茂, 等. 光子计数式四象限跟踪探测器的噪声分析[J]. 光电工程, 1999, 26(3): 1-7.
- ZHU Y M, LI M Q, TANG G M, *et al.*. Noise analysis for photon counting quadrant detector[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1999, 26(3): 1-7. (in Chinese)
- [11] 徐晨, 戴天明, 宋义超, 等. 特气室温红外探测器的噪声分析[J]. 光学精密工程, 2009, 17(6): 1274-1278.
- XU CH, DAI T M, SONG Y CH, *et al.*. Noise analysis of special IR detector[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(6): 1274-1278. (in Chinese)
- [12] 赵馨, 王世峰, 佟首峰, 等. 具有自动增益调整功能的光斑实时检测技术[J]. 光电工程, 2009, 36(11): 20-24.
- ZHAO X, WANG SH F, TONG SH F, *et al.*. Technology on real-time spot detection with automatic gain function[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, 36(11): 20-24. (in Chinese)

作者简介:



赵馨(1977—), 男, 吉林长春人, 博士研究生, 讲师, 2002年、2005年分别于长春理工大学获得学士、硕士学位, 主要从事空间激光通信及光电检测方面的研究。E-mail: gps.ins@163.com



姜会林(1945—), 男, 吉林长春人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事空间激光通信技术及光电检测技术等方面的研究。E-mail: jhl@cust.edu.cn



佟首峰(1972—), 男, 吉林长春人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事空间光学遥感及自由激光通信领域的研发工作。E-mail: tsf@cust.edu.cn

(本栏目编辑: 严寒)