

## 光斑尺寸对光轴检测的约束分析及验证试验

母一宁<sup>1,2</sup>, 王贺<sup>3</sup>, 李平<sup>4</sup>, 姜会林<sup>2</sup>

- (1. 长春理工大学理学院, 吉林 长春 130022;
2. 长春理工大学空间光电技术研究所, 吉林 长春 130022;
3. 吉林交通职业技术学院电子信息分院, 吉林 长春 130022;
4. 长春理工大学计算机科学与技术学院, 吉林 长春 130022)

**摘要:** 入射激光光轴检测分辨率主要由固有分辨率和细分精度两部分组成, 但大气信道二次调制会直接引入误差进而影响光轴检测的检测精度。为了降低光轴检测系统对大气信道环境的敏感程度, 首先 CCD 光轴检测系统和四象限 (4QD) 光轴检测系统作为两种典型的光轴检测系统其检测模型被分析, 并推导在大气环境中其分辨率、固有分辨率、细分精度与光斑尺寸之间的关系。接着以 4QD 检测模型为例, 指出信标光的信噪比和光轴偏移量是影响光轴检测系统的重要技术参数。最后通过一个野外光轴对准试验验证了光轴细分精度对大气干扰敏感, 而固有分辨率受大气影响不大, 可以改变光斑尺寸来改善光轴检测系统对大气干扰的敏感程度。

**关键词:** 无线激光通信; 野外对准; 光轴检测

**中图分类号:** TN929.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)03-1061-07

## Spot size on the optical axis detection of constraint analysis and verification tests

Mu Yining<sup>1,2</sup>, Wang He<sup>3</sup>, Li Ping<sup>4</sup>, Jiang Huilin<sup>2</sup>

- (1. School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;
2. Institute of Space Optical Electronic Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;
3. School of Electronic & Information Engineering, Jilin Communications Polytechnic, Changchun 130013, China;
4. School of Computer Science & Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract:** Axis detection resolution was divided into two sections, the first being the inherent optical resolution of the case and the second the case subdivided accuracy, however, atmospheric channel secondary modulation can directly introduced into detection error, and moreover, influence detection precision. In order to reduce sensitive degree of axis detection system for atmospheric interference, firstly, CCD system and 4QD system as two typical axis detection models were analyzed; the relationship among resolution and inherent optical resolution and subdivided accuracy and beam length was deduced. Afterwards, based on the example of 4QD axis detection system, through the analysis of restricted constraint condition of four-quadrant electro-optical inspection model in atmospheric channel, SNR of

收稿日期: 2014-07-05; 修订日期: 2014-08-15

基金项目: 吉林省科技发展计划创新人才培育计划(20121302)

作者简介: 母一宁(1985-), 男, 讲师, 博士, 主要从事空间激光通信与微光夜视技术方面的研究。

通信作者: 李平(1958-), 女, 教授, 硕士, 主要从事激光物联网方面的研究。Email: dero403030420@163.com

distortions and axis offset are two main technical parameters to affect electro-optical inspection system. Finally, the point, subdivided accuracy of axis detection was sensitive to atmospheric interference and inherent optical resolution was little influenced by atmospheric interference. Therefore, changing beam length can improve sensitive degree of axis detection system for atmospheric interference.

**Key words:** wireless laser communication; wild pointing; axis detection

## 0 引言

由参考文献[1-2]可知,大气信道二次调制会对通信光信标光均造成影响。光端机之间的光轴对准是实现大气光通信的前提条件,如何利用气溶胶中的信标光实现光轴的高精度检测将直接影响无线激光通信链路的稳定性与持久性<sup>[3]</sup>。目前在实际 APT 系统中,最为常用的光电探测器分别为电荷耦合传感器(CCD)和象限探测器(QD)<sup>[4-5]</sup>。前者的器件特性为积分,所以从器件原理的角度讲其检测带宽不可能太高。当 APT 系统追求高控制带宽时,CCD 的帧频便成了整个跟踪系统的约束条件。然而后者则是一种标准的微分器件,其相应带宽通常只会被后面处理电路所限制。但是参考文献[6-9]指出 4QD 光轴检测系统对大气干扰十分敏感,导致其跟踪精度与大气环境直接相关。

光轴检测分辨率主要由固有分辨率和细分精度两部分组成,文中主要研究在实际情况中光轴检测分辨率与相关参数之间的关系,给出优化模型,并通过野外对准试验验证其论点。

## 1 光轴检测系统构成及其工作原理

从几何光学的角度讲,光轴的定位可以等价于艾里斑的位置检测。然而由于激光受到大气信道的“二次调制”,不同的探测模型对这种调制的敏感程度也不尽相同。

### 1.1 CCD 与 QD 光轴检测模型

在 APT 系统当中一般多采用较为成熟的 4QD 探测器,该探测器是将器件特性相近的 Pin 管按图 1 所示的形状封装在一起,并且将该器件放在光学天线的焦平面处。

设  $I_a, I_b, I_c, I_d$  分别表示为每个 Pin 管检测到的电流值; $P_a, P_b, P_c, P_d$  分别表示为每个 Pin 管检测到的光功率; $S_a, S_b, S_c, S_d$  表示为每个 Pin 管的光敏面

面积(一般  $S_a=S_b=S_c=S_d$ )。 $S_x$  表示激光光斑面积, $S_{abcd}$  表示探测器总面积( $S_{abcd}=S_a+S_b+S_c+S_d$ ), $d_x$  表示四象限中间的隔离沟道宽度,每个 Pin 产生正比于其表面的光强的光电流:

$$I_n = \iint_s i(x,y) d_x d_y \quad (1)$$

可见每个 Pin 所产生的电流正比于接收到的光功率,其细分表达式为:

$$\sigma_x = \frac{(I_a+I_d)-(I_b+I_c)}{I_a+I_d+I_b+I_c} \quad (2)$$

$$\sigma_y = \frac{(I_a+I_b)-(I_c+I_d)}{I_a+I_d+I_b+I_c} \quad (3)$$

其中光轴偏移量为  $\Delta\sigma_x, \Delta\sigma_y$ ,可见 4QD 的受两部分条件约束,即光学固有分辨能力和电子细分精度。

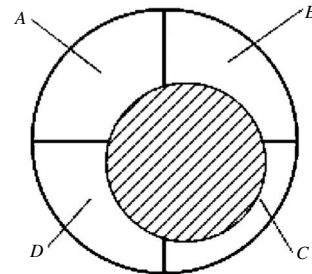


图 1 四象限探测器

Fig. 1 Four-quadrant detector

当采用 CCD 系统进行光轴定位时,目前多像素细分技术最为常用。其中最为典型的便是质心拟合方法,其拟合公式如下<sup>[3]</sup>:

$$x_0 = \frac{\sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^N F(x,y)x}{\sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^N F(x,y)} \quad (4)$$

$$y_0 = \frac{\sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^N F(x,y)y}{\sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^N F(x,y)} \quad (5)$$

### 1.2 光轴检测分辨率与精度分析

由公式(2)~(5)可知前者与后者的光轴检测原理是一样的,区别在于公式(4)~(5)时对公式(2)~(3)的空间采样,即该采样频率便是后者象元的空间分布频率。可见,光轴检测系统的固有精度  $\Delta$  直接受最小分辨单元直径  $d_a$  与焦距  $f$  约束:

$$\Delta = d_a / 2f \tag{6}$$

从理论上讲,光轴定位精度只要受两部分影响,分别是固有分辨精度  $\Delta$  和检测细分精度  $\sigma$ ,即光轴检测精度  $\theta$ ,表达式如下:

$$\theta = \Delta * \sigma \tag{7}$$

可见四象限系统为了确保视场范围,其探测器光敏面的直径不能太小,进而降低艾里斑大小改善光斑波前质量成为提高该检测系统精度的唯一途径。但是这些因素受大气严重难以控制。4QD 系统的分辨率 QD 为:

$$\theta_{4QD} = \Delta * \sigma = d_a \sigma / 2f \tag{8}$$

相反,CCD 系统则是通过多像素细分手段实现光轴检测,由公式(4)~(5)可知,检测系统的细分精度  $\sigma$  不仅和大气环境相关,而且还会被 CCD 象元尺寸  $d_r$  这一个条件所约影响,进而该系统的分辨率  $\theta_{CCD}$  为:

$$\theta_{CCD} = \frac{d_a d_r}{2f(d_a + 2d_r)} \tag{9}$$

大气平流层的成分、温度、湿度、密度等因素均会出现瞬态随机变化,进而导致接收到的艾里斑只能通过统计理论来描述其过程。理想的艾里斑可以用一阶贝塞尔函数描述其分布信息,但由于这种大气随机干扰存在,以至于其艾里斑存在必然畸变。图 2 展示了受大气干扰的艾里斑。图 3 为展示了信道对激光传输的影响与干扰。可见在真实的大气信道会直接降低光轴检测系统的细分精度。

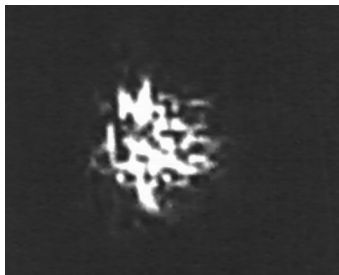


图 2 激光散斑  
Fig.2 Laser speckle

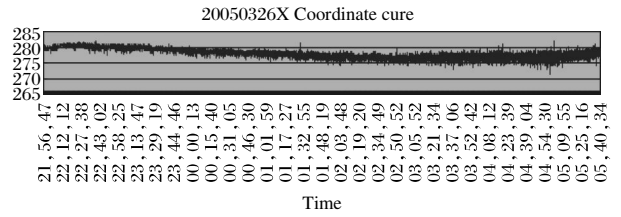


图 3 传输距离 13 km CCD 探测光斑平均亮度曲线  
Fig.3 CCD detected average bright curved when transmission is 13 km

### 2 光轴检测误差分析

光轴检测系统的误差除了电子误差和探测器制造误差外,外界所引入误差主要包括大气湍流误差和背景光干扰误差这两大类<sup>[12-15]</sup>。针对大气湍流误差参考文献[9-15]给出相应的补偿方案。在实际的大气链路中,会有更多的干扰因素影响检测结果。通过长春净月潭国家森林公园的通信实验表明尤其雾天大气散射背景光干扰与光轴偏差干扰都会造成诸多影响,具体的细分的干扰表达式如下:

在整个光轴检测系统当中,背景会以成像的方式干扰信标光斑的定位,通过在长春净月潭国家森林公园的通信实验表明尤其在雾天大气散射现象非常严重,其背景光功率是正常天气下的 4~5 倍。所以如何降低背景光功率,提升信标光和背景光功率的信噪比直接影响整个四象限光轴检测的细分精度。(因为四象限 4 个像面尺寸、光电特性基本一样,并且背景光的成像能量分布也大体相似,所以在此认为这 4 个像面所引入背景光功率趋于一致,即背景光引入电流记作  $I_x$ )。

具体的细分的干扰表达式为:

$$\sigma'_x = \frac{(I_a + I_x + I_d + I_x) - (I_b + I_x + I_c + I_x)}{I_a + I_d + I_b + I_c + 4I_x} \tag{10}$$

$$\sigma'_y = \frac{(I_a + I_x + I_b + I_x) - (I_c + I_x + I_d + I_x)}{I_a + I_d + I_b + I_c + 4I_x} \tag{11}$$

式中: $I_x$ 代表每个 Pin 探测到的背景光功率,可见将公式(2)减公式(10)即可获得背景光对  $x$  方向精度的影响, $y$  方向同理可得,具体表达式如下:

$$\Delta \sigma_x = \frac{4I_x(I_a + I_d - I_b - I_c)}{(I_a + I_d + I_b + I_c)(I_a + I_d - I_b - I_c + 4I_x)} \tag{12}$$

$$\Delta \sigma_y = \frac{4I_x(I_a + I_d - I_b - I_c)}{(I_a + I_d + I_b + I_c)(I_a + I_b - I_d - I_c + 4I_x)} \tag{13}$$

可见背景光引入会明显提高信噪比,降低精度。另外,在实际通信链路中,为了降低捕获难度,信标光的发散角通常会远大于光学系统衍射极限角,

所以一般按照几何光学进行描述。

$$d = \alpha \cdot f \tag{14}$$

设定入射平行光发散角  $\alpha$  为  $800 \mu\text{rad}$ , 光源波长为  $0.65 \mu\text{m}$ , 系统焦距为  $\Phi 150$ , 光学天线直径为  $\Phi 80$ 。可见衍射极限( $10 \mu\text{rad}$ )远远小于入射平行光发散角, 所以该艾里斑尺寸约为  $120 \mu\text{m}$ , 设定 4QD 光敏面为  $\Phi 2$ , 其固有分辨率为  $400 \mu\text{rad}$ 。

根据上述约束图 4 给出了背景光误差模型。

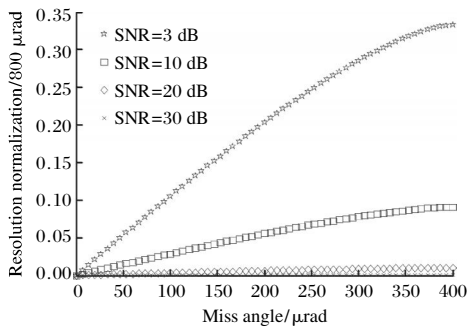


图 4 光轴偏移量引入误差变化趋势  
Fig.4 Introduced error trend by optical axis offset

由大气对光波波前的影响是随机的, 为了定性的进一步分析误差模型, 接下来近似认为光斑为圆形及忽略中间沟道的影响。可以将公式(12)变形为公式(15), 其误差影响模型等效为:

$$\Delta \sigma = \frac{P_s P_x}{P_s^2 + P_s P_x} \tag{15}$$

式中:  $P_s$  为探测信号功率;  $P_x$  为  $x$  或  $y$  方向上的轴向检测功率差。

误差的最终表达式为:

$$\Delta \sigma = \left\{ \frac{P_n}{P_s^2 + P_s P_n} \right\} \left\{ P_s \frac{\pi r^2 - 2 \left[ \frac{2\pi r^2 \arccos(\frac{r-\Delta x}{r})}{360} - \frac{\sin[2\arccos(\frac{r-\Delta x}{r})]r^2}{2} \right]}{\pi r^2} \right\} \tag{16}$$

式中:  $r$  为光斑半径;  $\Delta x$  为光轴偏移量, 并且作进一步等量变换, 便可以得到公式(17)。可见整体的不仅与信标光信噪比而且还受到光轴偏差量的约束。

$$\Delta \sigma = \left\{ \frac{1}{\frac{P_s}{P_n} + 1} \right\} \left\{ \frac{\pi r^2 - 2 \left[ \frac{2\pi r^2 \arccos(\frac{r-\Delta x}{r})}{360} - \frac{\sin[2\arccos(\frac{r-\Delta x}{r})]r^2}{2} \right]}{\pi r^2} \right\} \tag{17}$$

### 3 理论验证性试验与结果分析

为了证明固有检测精度对光轴检测系统的重要性, 文中进行了以下验证性试验。试验方法过程如下: 首先将一个发散角可调激光器与一个望远镜的光轴调平, 然后通过望远镜将激光器发射出来的平行光击中一公里以外的光端机。最后光端机可以沿着入射光轴反向发射激光击中对面的望远镜。通过改变激光发散角来控制入射信标光在光端机 4QD 探测器上艾里斑成像的大小。分析固有分辨能力与整体对准精度之间的对应关系。测试系统组成框图如图 5 所示。

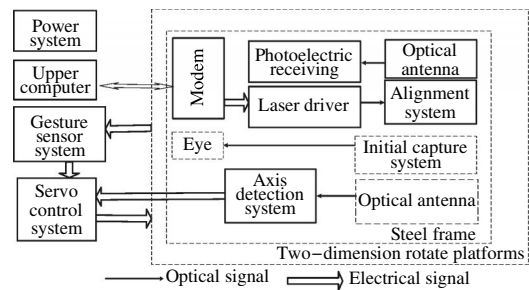


图 5 光端机结构图  
Fig.5 Optical terminal structure diagram

#### 3.1 光学接收天线参数

因为整个检测系统采用的是  $658 \text{ nm}$  的准单色光, 所以在设计光学系统时只需考虑球差, 无需考虑色差, 其光学参数如下: 通光口径  $D=80 \text{ mm}$ , 焦距  $f=150 \text{ mm}$ 。因为所选择的四象限探测器的光敏面直径为  $0.8 \text{ mm}$ , 所以其跟踪视场为  $5.3 \text{ mrad}$ , 具体的光学天线设计参数图如图 6 所示。

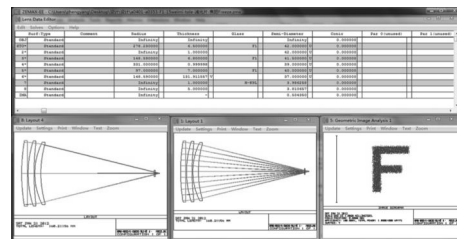


图 6 光学天线设计图  
Fig.6 Optical antenna blueprint

#### 3.2 光学接收天线参数

该光端机的多路光轴调平与校准是关键, 具体校准方法如下: 首先用一个氦氖激光器发射一束激

光,射到一张白纸上,激光经过白纸发生漫反射形成一个点光源,该点光源视为外部参考目标,且将该参考目标置于平行光管的焦平面上,实验情况如图7所示,图中为  $\Phi 1.2$  的艾里斑,平行光管焦距为  $\Phi 2\ 000$ ,该发散角为  $0.6\ \text{mrad}$ ,与实际系统激光器发散角基本相同。将光端机放在平行光管的出射端,使四象限导引系统的光轴与平行光管的光轴重合,通过四象限探测器对该平行光轴进行探测并且根据探测结果自动调整转台姿态使四象限正对入射平行光。在四象限下端安置一个平面镜,可以通过该平面镜观察四象限的对准状态。其检测方法图和对准效果图如 8、9 所示。当转台姿态调整完成后,将光端机的激光器开启,光端机的通信激光器所发出的平行光沿着平行光管入射,在焦点处的白纸上汇聚,与氦氖激光器的光点形成两个光点,两光点之间的距离便是光端机发射光轴与入射光轴之间的角度差,通

过六顶丝结构调整激光器发射姿态使两者重合,即入射和出射光共轴。其离轴截图与共轴截图如图 10 和图 11 所示。



图 7 信标光合作目标

Fig.7 Beacon cooperative target



图 8 检测方法图

Fig.8 Detection method

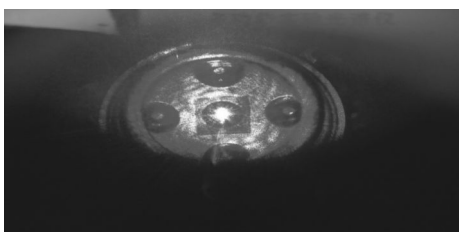


图 9 检测效果图

Fig.9 Detection effect



图 10 离轴效果图

Fig.10 Off-axis effect

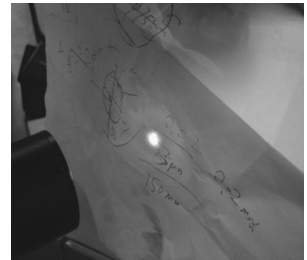


图 11 同轴效果图

Fig.11 On-axis effect

### 3.3 试验结果

当入射光与出射光调整共轴后,开启光端机的自动跟踪系统,实时读取光端机上绝对式编码器的姿态信息并记录,然后通过 MATLAB 软件对该数据进行均方误差统计,分析误差,并给出抖动曲线如图 12 所示。图中为 3 000 组数据进行处理获得的姿态抖动图,计算其均方误差获得其精度为  $31.234\ \mu\text{rad}$ ,可见该系统的装调误差、结构误差、跟踪误差的累加和不超过  $31.234\ \mu\text{rad}$ ,即实验室环境下其细分精度优于固有分辨率 10 倍以上(由上文可知整个系统的固有分辨率约为  $300\ \mu\text{rad}$ )。

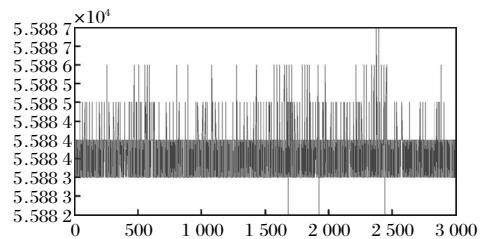


图 12 姿态抖动效果图

Fig.12 Posture changing effect

实验室环境下的光轴检测虽然可以测出系统的整体误差,但是却不能完全反映在大气信道中的光轴对准精度,需要在应用环境下进行了光轴的检测实验。发射端发射激光,经过  $1\ \text{km}$  的大气传输后,被接收端的光端机所接收,光端机沿着入射光轴往回发射激光,并且命中发射端的光端机,由于大气环境的影响,会使光波的波前发生变形进而对光轴跟踪精度造成误差,使发射端的光斑产生晃动。首先发射端以  $0.6\ \text{mrad}$  发散角发射信标光,光端机光轴检测

系统的固有分辨率为  $300 \mu\text{rad}$ , 光端机回射光斑的晃动范围在  $100 \text{ mm}$  左右, 所以其跟踪误差范围约为  $0.1 \text{ m}/1000 \text{ m}=100 \mu\text{rad}$ 。随后将发射端的发散角改为  $1 \text{ mrad}$ (保证外部环境基本不变仅仅改变激光发散角扩大艾里斑尺寸降低系统固有分辨率), 光端机回射光斑的晃动范围在  $220 \text{ mm}$  范围内晃动, 所以其跟踪误差范围约为  $0.22 \text{ m}/1000 \text{ m}=220 \mu\text{rad}$ , 可见随着发散角线性上升, 跟踪误差非线性上升, 如图 13 所示。

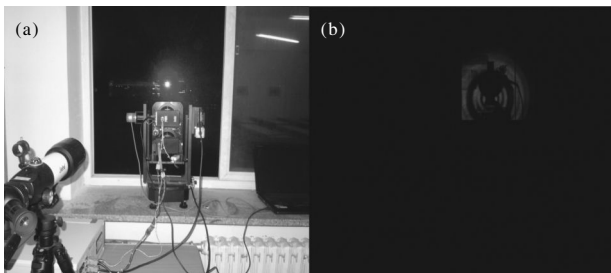


图 13 跟踪对准实验

Fig. 13 Tracking and pointing test

综上所述可以得到以下三个观点: 第一, 将艾里斑尺寸压缩 4QD 光敏面尺寸一半是不合理的, 如此设计虽然可以使艾里斑和探测器尺寸相互匹配, 但是需要较高的细分精度来满足光轴对准的需要, 当通信距离拉长或者大气环境变恶劣时其细分精度便无法满足需求。第二, 通过压缩艾里斑尺寸提升检测系统的固有分辨能力将可以降低检测系统对大气环境的敏感程度。第三, 4QD 光轴检测系统与 CCD 光轴检测系统相比会更容易受到大气环境的影响, 所以如果能通过压缩艾里斑尺寸来提高 4QD 光轴检测系统在大气环境中的检测精度便可以证明观点二。

## 4 结论

文中通过理论分析、模型仿真与野外验证性试验证明了光轴检测系统的检测精度由固有精度和细分精度两部分组成, 并且通过压缩光斑尺寸可以有效提高检测系统的固有分辨率进而整体降低光轴检测系统对大气干扰的敏感程度。

### 参考文献:

- [1] Mu Yining, Liu Quan, Yu Lintao, et al. Application of Hartmann technique in sequence spot detection [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(9): 2197–2042. (in Chinese)
- [2] Mu Yining, Wen Guanyu, Wang He, et al. Study of technique of spot detection based on sequence information fit circle center [J]. *Journal of Air Force Engineering University*, 2011, 12(1): 57–62. (in Chinese)
- 母一宁, 温冠宇, 王贺, 等. 基于序列信息圆心拟合的大气激光光斑检测技术 [J]. *空军工程大学学报* 2011, 12(1): 59–62.
- [3] Jiang Huilin, Tong Shoufeng, et al. The System And Technology of The Free Space Laser Communications [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011: 6 (in Chinese)
- 姜会林, 佟首峰, 等. 空间激光通信技术与系统[M]. 北京: 国防工业出版社 2011: 6.
- [4] Feng Longling, Deng Renliang. Study on optical tracking with Four-quadrant detectors[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 1996, 25(1): 16–21. (in Chinese)
- 冯龙龄, 邓仁亮. 四象限光电跟踪技术中若干问题探讨[J]. *红外与激光工程*, 1996, 25(1): 16–21.
- [5] Yu Siyuan, Han Qiqi, Ma Jing, et al. Size selection of dispersive spot imaging on CCD in a satellite optical communication[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, 34(4): 67–71. (in Chinese)
- 于思源, 韩琦琦, 马晶, 等. 卫星光通信终端 CCD 成像光斑弥散圆尺寸选择[J]. *中国激光*, 2007, 34(4): 67–71.
- [6] Zhao Xin, Tong Shoufeng, Jiang Huilin. Experimental testing on characteristics of four quadrant detector [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(10): 2164–2170. (in Chinese)
- 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.
- [7] Zhao Xin, Tong Shoufeng, Liu Yunqing, et al. Technology on spot detection and tracking based on Four-Quadrant detector[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(7): 1756–1561. (in Chinese)
- 赵馨, 佟首峰, 刘云清, 等. 基于四象限探测器的光斑检测跟踪技术[J]. *中国激光*, 2010, 37(7): 1756–1561.
- [8] Han Cheng, Bai Baoxing, Yang Huamin. Study four-quadrant detector in the free space laser communication[J]. *Chinese Journal of Laser*, 2009, 36 (8): 2030–2034. (in Chinese)
- 韩成, 白宝兴, 杨华民. 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] 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. (in Chinese)  
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.
- [10] Cheng Chunyi, Bai Huaming, Jiang Huilin, et al Study four-quadrant detector in the free space laser communication [J]. *Chinese Journal of Laser*, 2009, 36 (8): 2030-2034. (in Chinese)  
陈纯毅, 杨华民, 姜会林, 等. 大气光通信中大孔径接收性能分析与孔径尺寸选择[J]. *中国激光*, 2009, 36(11): 2957-2961.
- [11] Chen Chunyi, Yang Huamin, Jiang Huilin, et al. Research progress of mitigation technologies of turbulence effects in atmospheric optical communication [J]. *Acta Armamentarm*, 2009, 30(6): 779-791. (in Chinese)  
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.
- [12] Lou Yan, Jiang Huilin, Chen Chunyi, et al. Analysis of experimental data of the scintillation fluctuation and spot area in atmosphere laser communication [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(3): 515-519. (in Chinese)  
娄岩, 姜会林, 陈纯毅, 等. 激光大气湍流传输光强起伏及光斑面积实验分析 [J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(3): 515-519.
- [13] Jing Wenbo, Jiang Huilin, Wang Xiaoman, et al. Comparison of Hartmann and CCD sensor for precision positioning of beacon axis [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40 (11): 1963-1968. (in Chinese)  
景文博, 姜会林, 王晓曼, 等. 哈特曼与 CCD 传感器信标光轴精密定位对比 [J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(11): 1963-1968.
- [14] Jing Wenbo, Zhao Si, Fu Qiang, et al. Turbulence characteristics optical test contrast [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, 31(7): 805-811. (in Chinese)  
景文博, 赵思, 付强, 等. 湍流特征光学测试对比 [J]. *光子学报*, 2012, 31(7): 805-811.
- [15] Han Cheng, Bai Baoxing, Yang Huamin, et al. Primary environment influence factors to tracking precision in space-ground laser communication [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 29(1): 89-94. (in Chinese)  
韩成, 白宝兴, 杨华民, 等. 空地激光通信跟踪精度主要外界影响因素研究 [J]. *光子学报*, 2010, 29(1): 89-94.